

Energia Ambiente e Innovazione

ISSN 1124-0016

Agricoltura ed Energia: Sinergie per un Futuro Sostenibile

L'INTERVENTO:

Sostenibilità e gestione intelligente del territorio
di Salvatore Carfi **p. 15**

Il biogas agricolo: energia, sostenibilità e innovazione
di Piero Gattoni **p. 24**

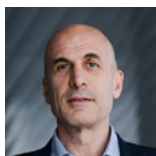
Energia pulita per lo sviluppo agricolo
di Maria Michela Morese **p. 29**

Agricoltura di precisione, innovazione digitale ed energia
di Pietro Piccarolo **p. 32**

LE INTERVISTE:

Francesco Lollobrigida, Massimiliano Giansanti, Ettore Prandini, Andrea Rocchi

Agricoltura ed Energia: un'alleanza a supporto della decarbonizzazione e dello sviluppo territoriale



di **Giorgio Graditi**, *Direttore Generale ENEA*

Il settore agricolo dipende ancora molto dai **combustibili fossili**, sia per i consumi diretti (macchine e macchinari agricoli) che per quelli indiretti (es. fertilizzanti azotati, la cui produzione richiede consumi elevati di energia).

Anche il settore agricolo, dunque, è chiamato nel suo complesso a contribuire agli obiettivi di mitigazione delle emissioni e per questo non può derogare dall'assunzione di impegni concreti volti alla sua decarbonizzazione e alla diminuzione dei consumi energetici. Insieme alla necessità di ridurre l'impatto sull'ambiente, è da considerare che il costo dell'energia incide in maniera rilevante sul prezzo finale dei prodotti agricoli, rappresentando un elemento prioritario per la competitività delle nostre imprese agricole.

L'interazione tra agricoltura ed energia può e deve favorire un modello di sviluppo più equilibrato e resiliente, capace di affrontare le sfide del cambiamento climatico e di promuovere al tempo stesso un'economia sostenibile. Grazie al suo legame con il territorio, il settore agricolo attraverso l'integrazione tra la produzione di cibo e quella di energia, può generare benefici per l'economia, l'ambiente, il territorio e le comunità locali.

Inoltre, l'integrazione tra agricoltura e produzione energetica favorisce la resilienza delle imprese agricole. In un contesto di crescente incertezza climatica e di mercato, diversificare le attività e le fonti di reddito permette agli agricoltori di affrontare meglio le sfide e di adattarsi ai cambiamenti.

Alcune soluzioni/approcci sono già oggi disponibili per promuovere un'azione sinergica e positiva tra i settori dell'agricoltura e dell'energia:

- valorizzare i residui agricoli, zootecnici e agroindustriali trasformandoli in risorse energetiche (biocarburanti, calore, elettricità), ossia in **bioenergie**, che rappresentano un esempio di chiusura dei cicli, complementare al recupero di materie prime e biorisorse secondo i principi dell'economia circolare, e permettono di ridurre le emissioni e i gas serra nonché di promuovere l'autosufficienza energetica delle aree rurali;
- integrare impianti fotovoltaici con l'attività agricola mediante l'**agrivoltaico**, approccio multifunzionale che, declinato secondo opportune pratiche progettuali ed un'adeguata scelta delle soluzioni tecnologiche, permette di ottimizzare l'uso del suolo, combinando in modo virtuoso la generazione di energia rinnovabile con la coltivazione di piante o l'allevamento;
- promuovere modelli di autogestione che coinvolgono cittadini, imprese e agricoltori nella produzione e condivisione di energia rinnovabile a chilometro zero, ossia le **comunità energetiche**, spesso radicate nei territori rurali, che offrono opportunità per rafforzare la resilienza energetica locale, ridurre i costi energetici e stimolare lo sviluppo economico sostenibile.

Le **biomasse**, in particolare quella di seconda generazione (lignocellulosiche e/o residuali), possono rappresentare un pilastro fondamentale per una transizione energetica sostenibile, radicata nell'economia circolare.

Un aspetto cruciale di cui tener conto è la **sostenibilità delle filiere** di produzione di **bioenergia** e **biocarburanti** da valutare sotto il profilo tecnico-economico, ambientale e sociale. Secondo l'**Atlante ENEA delle biomasse**

i residui e sottoprodotti dell'agroindustria in Italia hanno un potenziale teorico complessivo di 20 Mt/anno su base secca (corrispondente a circa 5,6 miliardi di m³ di biometano nel 2022, ovvero a circa l'8% del consumo nazionale totale di gas naturale in Italia nello stesso anno). La **Strategia Forestale Nazionale** indica che si potrebbe arrivare a prelevare il 45% dell'incremento forestale annuo (limite attualmente fissato al 33%), sempre nel rispetto dei criteri di gestione sostenibile, diminuendo così la dipendenza da biomasse e combustibili fossili provenienti da paesi esteri.

Inoltre, il nuovo regolamento UE sull'assorbimento del carbonio associato all'uso delle foreste e del suolo pone obiettivi ambiziosi per l'Italia, come l'assorbimento di **36 milioni di tonnellate di CO₂ equivalenti all'anno entro il 2030** attraverso rimboschimento, agroforestazione e uso di colture intercalari e di copertura. Altri esempi per la cattura della CO₂ atmosferica sono l'utilizzo nei suoli del biochar, un prodotto ad elevato contenuto di carbonio stabile derivato da trattamenti termici della biomassa e del digestato, un sottoprodotto della digestione anaerobica, che permettono di migliorare la fertilità del terreno e la ritenzione idrica, risultando particolarmente utili in aree soggette a siccità.

Per quanto concerne i **biocarburanti**, l'aggiornamento della Direttiva Europea UE 2018/201/EU (RED II) ha ampliato le materie prime utilizzabili per la loro produzione, includendo scarti agricoli, agroindustriali e anche biomasse da coltivazioni in terreni marginali o contaminati, come quelli colpiti dalla Xylella che potrebbero, così, diventare una risorsa e contribuire a una gestione sostenibile delle emergenze fitosanitarie.

Le biomasse in agricoltura rappresentano un elemento strategico anche per la promozione di modelli di autogestione dell'energia, infatti, gli impianti di **cogenerazione a biomassa** permettono la produzione simultanea ed efficiente di elettricità e calore, ideali per serre agricole, sistemi di teleriscaldamento urbano e aree rurali remote con impianti di piccola scala (20-400 kWe).

Il ruolo delle biomasse nella transizione energetica va, quindi, oltre la mera produzione di energia. Esse rappresentano una componente fondamentale per costruire un modello sostenibile, in cui il settore agricolo diventa protagonista della transizione ecologica.

Anche l'**agrivoltaico** rappresenta un pilastro fondamentale per una transizione energetica sostenibile, consentendo di superare le barriere legate all'uso del suolo associate al fotovoltaico. I benefici derivanti dall'integrazione dei moduli fotovoltaici nelle aree agricole sono molteplici, quali la **protezione delle colture**, in quanto i moduli sollevati proteggono le piante dall'eccessiva radiazione solare, dalla grandine e dalla pioggia, stabilizzando le condizioni di crescita, soprattutto in periodi di siccità o eventi meteorologici estremi; il **risparmio idrico**, in diversi contesti mediterranei sono stati, infatti, misurati risparmi idrici fino al 40%, con notevoli benefici economici per le aziende agricole; l'**innovazione agricola**, la presenza dell'energia fotovoltaica e dell'elettronica collegata abilita l'introduzione di sistemi agricoli innovativi; il **miglioramento delle condizioni di lavoro** degli operatori agricoli; la **creazione di nuove professionalità** che uniscono e integrano competenze nel settore energetico e agricolo.

Sul tema agrivoltaico l'Italia è in una posizione di rilievo nel panorama europeo, oggi, insieme alla Francia e alla Germania, l'Italia è tra i paesi che ne guidano lo sviluppo attraverso azioni che vanno dalla definizione normativa e tecnica al supporto con misure di finanziamento dedicate, e mediante la costituzione di associazioni di categoria che ne sostengono e orientano l'implementazione.

Infine, anche le **comunità energetiche** stanno rivoluzionando la gestione dell'energia, promuovendo un modello più sostenibile e partecipativo, radicato nei territori. Tra i vantaggi delle **comunità energetiche** si citano i seguenti che sono orientati a favorire: il coinvolgimento diretto e consapevole di cittadini, imprese ed enti locali nella produzione e gestione dell'energia, permettendo di creare un sistema energetico decentralizzato; la diffusione di impianti a fonti rinnovabili, contribuendo in tal modo alla decarbonizzazione e all'indipendenza energetica; l'ottimizzazione dell'uso delle risorse locali, che spaziano dall'energia rinnovabile alla filiera produttiva, generando valore aggiunto per il territorio e promuovendo l'economia circolare; l'incremento dell'autoconsumo locale, riducendo le perdite di energia e migliorando l'efficienza del sistema elettrico; il superamento delle barriere sociali locali, facilitando l'accettazione sociale di nuovi impianti rinnovabili; l'efficientamento energetico, sia nella produzione che nella domanda, promuovendo una maggiore

consapevolezza nell'uso dell'energia.

La sinergia e l'integrazione tra le **Comunità Energetiche**, l'**agrivoltaico** e le **bioenergie**, specialmente nelle zone agricole e periurbane, accresce il potenziale delle prime in maniera esponenziale offrendo una serie di vantaggi significativi per una transizione energetica più efficace e sostenibile.

La predetta integrazione rappresenta una soluzione concreta per affrontare il cambiamento climatico e ridurre la dipendenza energetica, che abilita, al contempo, anche nuove prospettive di sviluppo sostenibile per i territori. Favorendo la collaborazione tra cittadini, imprese e istituzioni, queste configurazioni promuovono un uso più efficiente delle risorse, generano benefici economici e sociali, e contribuiscono alla creazione di un sistema energetico resiliente e inclusivo. Al fine di coniugare la inevitabile trasformazione del paesaggio con un approccio orientato alla gestione sostenibile del territorio, occorre sia promuovere una cultura in grado di legare le componenti di "energia-agricoltura" e "paesaggio" in un progetto coerente sia definire un sistema legislativo, normativo e tecnico di riferimento che ne guidi e ne supporti l'implementazione, migliorando l'accettabilità da parte dei cittadini delle soluzioni proposte da implementare su larga scala e facilitando una partecipazione consapevole da parte di tutti gli operatori coinvolti a vario titolo e livello e della società civile.

Giorgio Graditi

Agricoltura ed Energia: sinergie per un futuro sostenibile



di **Cristina Corazza**, *Direttore Energia Ambiente e Innovazione*

Questo numero della rivista Energia, Ambiente e Innovazione dal titolo "Agricoltura ed Energia: sinergie per un futuro sostenibile" vuole esplorare il legame tra agricoltura ed energia, per offrire ai lettori la possibilità di comprendere in modo più approfondito come due settori economici apparentemente molto distanti siano in realtà fortemente interconnessi. Anche il settore agricolo è fortemente dipendente dall'energia, con costi che incidono notevolmente sul prezzo finale del cibo che giunge sulle nostre tavole ed impatti sull'ambiente quando l'energia utilizzata non è prodotta in modo sostenibile.

Il consumo di energia è associato all'utilizzo di macchine e macchinari (consumo diretto) ma anche all'impiego di fertilizzanti necessari per le coltivazioni, prodotti attraverso processi fortemente energivori (consumo indiretto). Dunque, anche il settore agricolo, in quanto settore energivoro, è chiamato a contribuire agli obiettivi di mitigazione delle emissioni e per questo non può derogare dall'assumere impegni concreti e di efficientamento dei processi, circolarità e utilizzo di fonti rinnovabili.

La sfida dettata dalla transizione ecologica è di sviluppare e adottare soluzioni tecnologiche innovative che integrino la produzione di cibo e quella di energia, creando sinergie virtuose tra sviluppo economico, protezione ambientale, benessere delle comunità locali e sostenibilità dell'intera filiera produttiva.

In un contesto così complesso, in rapida evoluzione e considerato prioritario per lo sviluppo economico e il benessere sociale, risulta fondamentale comprendere a fondo il contributo concreto che può offrire il mondo della ricerca. Nella rivista, vogliamo fare proprio questo: dare voce ai ricercatori ENEA e ad altri protagonisti ed esperti del settore per analizzare le prospettive future e le soluzioni tecnologiche che possono essere messe in campo.

L'utilizzo di tecnologie energetiche rinnovabili nelle pratiche agricole permette di ridurre l'impatto ambientale e migliorare l'efficienza delle risorse: pannelli solari installati nei campi agricoli e turbine eoliche possono alimentare sistemi di irrigazione e macchinari, i biogas prodotti dai rifiuti agricoli offrono una soluzione circolare per la gestione dei rifiuti e la generazione di energia. L'adozione di tecnologie digitali, come i sensori IoT e i droni, contribuisce a migliorare la gestione delle colture e l'efficienza delle risorse energetiche e idriche. L'integrazione tra il mondo dell'energia ed il settore agricolo rappresenta non solo una soluzione concreta per affrontare il cambiamento climatico e ridurre la dipendenza energetica, ma apre anche nuove prospettive di sviluppo sostenibile per i territori. Favorendo la collaborazione tra cittadini, imprese e istituzioni, queste configurazioni promuovono un uso più efficiente delle risorse, generano benefici economici e sociali e contribuiscono alla creazione di un sistema energetico resiliente e inclusivo.

Perché questa transizione possa realizzarsi in modo efficace e condiviso, è fondamentale affiancare all'innovazione tecnologica un quadro normativo e tecnico chiaro, che ne guidi l'implementazione e ne favorisca l'accettabilità sociale. Solo attraverso un approccio integrato, che tenga conto delle specificità locali e valorizzi il ruolo attivo delle comunità, sarà possibile trasformare la sinergia tra agricoltura ed energia in un motore di cambiamento verso un futuro più equo, sostenibile e prospero per tutti.

A intervenire su tutte queste tematiche sono esponenti che rappresentano mondi diversi, il settore della ricerca, le imprese e le istituzioni a livello nazionale e internazionale. Tra gli autori troviamo **Stefano Amaducci**, Professore ordinario presso il Dipartimento di Produzioni Vegetali Sostenibili dell'Università Cattolica del Sacro Cuore; **Salvatore Carfi**, Direttore Area Coordinamento di Agea, l'Agenzia per le erogazioni in agricoltura;

Gian Piero Celata, Presidente del Cluster Energia, **Mirco Garuti**, Responsabile del Settore Ambiente ed Energia del CRPA - Centro Ricerche Produzioni Animali; **Piero Gattoni**, Presidente CIB-Consorziio Italiano Biogas; **Paolo Mascarino**, Presidente del Cluster Tecnologico Agrifood; la Presidente di FederUnacoma **Maria Teresa Maschio**, **Michela Morese**; focal point della FAO per energia e agricoltura; **Pietro Piccarolo** dell'Accademia dei Georgofili e **Vito Pignatelli** e **Matteo Monni**, rispettivamente Presidente e Vicepresidente di Itabia, l'Italian Biomass Association.

Contributi di rilievo sono venuti dalle interviste con **Francesco Lollobrigida**, Ministro dell'Agricoltura, della Sovranità alimentare e delle Foreste, **Massimiliano Giansanti**, Presidente di Confagricoltura, **Ettore Prandini**, Presidente di Coldiretti e **Andrea Rocchi**, Presidente del CREA, il Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria.

Nella terza sezione della rivista dedicata ai Focus sono pubblicati venti interventi di nostri ricercatori dei Dipartimenti Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei sistemi produttivi e territoriali (SSPT) e Tecnologie energetiche e Fonti Rinnovabili (TERIN).

Dall'insieme di articoli, interviste, focus emerge uno scenario ampio e variegato che evidenzia come l'integrazione di energie rinnovabili nell'agricoltura rappresenti una svolta fondamentale per anche per promuovere pratiche più sostenibili e ridurre l'impatto ambientale. Grazie a innovazioni tecnologiche e a politiche mirate, è possibile ottimizzare l'uso delle risorse e favorire un equilibrio tra produzione alimentare e tutela del pianeta. La collaborazione tra scienza, agricoltori e istituzioni diventa quindi sempre più essenziale per sviluppare soluzioni efficaci e durature. Perché solo attraverso un impegno condiviso sarà possibile garantire un futuro più verde e resiliente.

N. 1 Luglio 2025

Direttore Responsabile

Cristina Corazza

Coordinamento Editoriale

Paola Giaquinto

Comitato di direzione

Ilaria Bertini, Claudia Brunori, Alessandro Coppola, Alessandro Dodaro, Giorgio Graditi, Giulia Monteleone

Redazione

Laura Di Pietro, Roberto De Ritis, Laura Moretti

Lingua inglese

Fabiola Falconieri

Progetto Grafico

Paola Carabotta

Grafica e Impaginazione

Flavio Miglietta

Elaborazione Grafica Copertina

Maurizio Giuliani

Edizione web

Antonella Andreini

Stampa

Laboratorio Tecnografico
Centro Ricerche ENEA Frascati
Numero chiuso nel mese di luglio 2025

Registrazione

Tribunale Civile di Roma
Numero 42/2019 del 28 marzo 2019
(versione stampata)
Numero 43/2019 del 28 marzo 2019
(versione telematica)

Foto in copertina: elaborazione AI



15 Sostenibilità e gestione intelligente del territorio di Salvatore Carfi

- 1 Agricoltura ed Energia: un'alleanza a supporto della decarbonizzazione e dello sviluppo territoriale
di Giorgio Graditi
- 4 Agricoltura ed Energia: sinergie per un futuro sostenibile
di Cristina Corazza

GLI INTERVENTI

- 8 Agricoltura ed Energia: occorre un approccio integrato e multidisciplinare
di Claudia Brunori e Giulia Monteleone

GLI SCENARI

- 11 L'agricoltura come strumento per la mitigazione e l'adattamento al cambiamento climatico
di Stefano Amaducci
- 15 Sostenibilità e gestione intelligente del territorio
di Salvatore Carfi
- 17 Energia in agricoltura: le prospettive nell'ambito della transizione energetica
di Gian Piero Celata
- 21 Biogas: l'energia che nutre la terra
di Mirco Garuti
- 24 Il biogas agricolo: energia, sostenibilità e innovazione per la transizione ecologica
di Piero Gattoni
- 26 Sistemi Agroalimentari ed Energetici: integrazione e sfide future
di Paolo Mascarino
- 29 Energia pulita per lo sviluppo agricolo
di Maria Michela Morese
- 32 Agricoltura di precisione, innovazione digitale ed energia
di Pietro Piccarolo
- 35 La biomassa forestale: una risorsa importante per la bioeconomia e la transizione energetica
di Vito Pignatelli e Matteo Monni
- 41 Le attività agricole hanno un potenziale energetico enorme
di Maria Teresa Maschio

LE INTERVISTE

- 43 Francesco Lollobrigida: L'agricoltura è cruciale per la transizione energetica ed ecologica

Sommario



24 Il biogas agricolo: energia, sostenibilità e innovazione
di *Piero Gattoni*



29 Energia pulita per lo sviluppo agricolo
di *Maria Michela Morese*



32 Agricoltura di precisione, innovazione digitale ed energia
di *Pietro Piccarolo*

- 46** Massimiliano Giansanti: In agricoltura va sostenuta la crescita delle fonti rinnovabili
- 49** Ettore Prandini: Integrare il reddito degli agricoltori con la produzione di energia rinnovabile
- 51** Andrea Rocchi: Le aziende agricole protagoniste della transizione energetica

FOCUS ENEA

- 53** La sostenibilità energetica dei processi di filtrazione delle acque per uso agricolo
di *Daniele Pizzichini, Claudio Russo, Gian Paolo Leone, Federica Colucci*
- 57** L'integrazione del fotovoltaico nelle imprese agricole: soluzioni e opportunità
di *Nicola Colonna*
- 61** Comprendere il nexus acqua, energia e cibo
di *Luigi Petta, Gianpaolo Sabia, Nicola Colonna, Girolamo Di Francia*
- 64** Tecnologie smart per un'agricoltura sostenibile
di *Luca Nardi, Raniero Trinchieri, Giampaolo Caputo, Angiola Desiderio, Silvia Massa*
- 68** La Banca Dati Italiana LCA a supporto della circolarità nel settore agroalimentare
di *Valentina Fantin, Sara Cortesi, Caterina Rinaldi, Cristian Chiavetta*

- 70** Gli scarti della vite per produrre energia e fertilizzanti
di *Alice Avila*
- 72** Impatti socioeconomici degli impianti a biometano
di *Jacopo Bindi, Maria Rosaria Seminara, Giuseppe Pellegrini Masini, Alessandro Agostini*
- 75** Stima del potenziale di produzione di biometano in Italia
di *Alessandro Giocoli, Claudio Carbone, Nicola Pierro, Giuseppe Di Florio, Vincenzo Motola, Alessandro Agostini*
- 78** Tecnologie di metanazione a confronto: il progetto BIOMETHAVERSE
di *Roberta Roberto, Giampiero Sacchi, Alessandro Agostini*
- 81** L'agrivoltaico sostenibile tra ricerca, esperienze e paesaggi
di *Alessandra Scognamiglio, Simona De Iulii, Paola Delli Veneri*
- 86** Agrivoltaico e comunità energetiche rinnovabili: un binomio "green"
di *Matteo Caldera, Alessandra Scognamiglio, Grazia Fattoruso, Stefano Pizzuti*
- 90** Il progetto CESTA: un'applicazione delle tecnologie dell'IA ed IoT per l'agricoltura sostenibile
di *Walter Gaggioli, Francesco Rovense, Antonio Ricca, Flavio Fontana*

- 93** Il Solare termico a concentrazione al servizio dell'industria agroalimentare
di *Vincenzo Sabatelli, Michela Lanchi, Walter Gaggioli*
- 96** Come le piattaforme digitali trasformano le agrotecnologie per un futuro energeticamente sostenibile
di *Fiorenzo Ambrosino, Serena D'Onofrio, Angelo Mariano, Giovanni Ponti*
- 99** Digestione anaerobica di scarti agro-zootecnici per la produzione di biocarburanti avanzati
di *Giuseppe Lembo, Antonella Marone, Antonella Signorini*
- 104** Processi termochimici per produrre bioidrogeno da residui agroindustriali
di *Nadia Cerone e Luca Contuzzi*
- 108** Binomio energia-agricoltura per soluzioni e opportunità nella Cooperazione allo sviluppo
di *Giovanni Stoppiello*
- 111** Le bioraffinerie: un sistema integrato tra agricoltura e industria
di *Federico Liuzzi, Antonio Caporusso, Egidio Viola, Isabella De Bari*
- 114** Dalle *bug farms* nuove filiere sostenibili per la chimica verde
di *Massimiliano De Mei, Silvia Arnone, Ferdinando Baldacchino, Egidio Viola*
- 117** Biopesticidi a base di RNA: risparmio energetico e sicurezza ambientale
di *Salvatore Arpaia*

L'intervento

Agricoltura ed Energia: occorre un approccio integrato e multidisciplinare



di Claudia Brunori, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei sistemi produttivi e territoriali e Giulia Monteleone, Dipartimento Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili - ENEA

L'accordo sulla legge europea sul clima, pietra angolare del Green Deal europeo, fissa per l'UE l'obiettivo di conseguire entro il 2050 la neutralità climatica e di ridurre entro il 2030 le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55 % rispetto ai livelli del 1990. Poiché il consumo di energia è responsabile di gran parte delle emissioni di gas a effetto serra in tutti i settori dell'economia - compreso dunque il settore agricolo - l'UE deve aumentare l'uso di fonti energetiche rinnovabili e a basse emissioni di carbonio in tutti quei settori che dipendono ancora in larga misura dai combustibili fossili.

L'8 luglio 2020 la Commissione europea ha adottato le comunicazioni dal titolo "Energia per un'economia climaticamente neutra: strategia dell'UE per l'integrazione del sistema energetico" puntando su un sistema più circolare, imperniato sull'efficienza, sull'uso diffuso di energia elettrica più pulita, sulla promozione di combustibili rinnovabili e a basse emissioni di carbonio, su mercati efficaci, sulle infrastrutture così come su un quadro per la digitalizzazione e l'innovazione nei diversi settori economici.

Secondo la Strategia, l'approccio integrato e multidisciplinare può essere la soluzione per definire un percorso che consenta di conseguire gli obiettivi climatici preservando l'accessibilità, anche economica, dell'energia e la sicurezza dell'approvvigionamento da parte di tutti i settori economici, attraverso lo sviluppo di un sistema circolare, interconnesso, resiliente, intelligente, multimodale, equo e decarbonizzato, rafforzando nel contempo la competitività

e incoraggiando l'occupazione anche in quei settori - come quello agricolo - caratterizzati da piccole e medie imprese, tutelando la salute e l'ambiente, nonché promuovendo la crescita sostenibile e l'innovazione.

La crescente pressione sulle risorse naturali, aggravata dai cambiamenti climatici e dall'aumento della domanda energetica e idrica, impone una riflessione approfondita sull'efficienza e la sostenibilità dei sistemi e dei processi produttivi oggi adottati e sulla necessità di sviluppare approcci innovativi che consentano di individuare la sinergia tra soluzioni impiantistiche avanzate e strategie di utilizzo e recupero delle risorse. L'approccio integrato e multidisciplinare, la pianificazione e gestione coordinata di infrastrutture e settori, possono rappresentare il migliore percorso da intraprendere nella gestione del binomio agricoltura-energia.

La complessa interconnessione del binomio agricoltura-energia, per mezzo del sistema idrico nel Water-Energy-Food (WEF) Nexus, deve quindi essere analizzata e attentamente presa in considerazione nella pianificazione delle attività agricole, in linea con il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC, 2024) e con il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, 2023). La relazione tra energia e agricoltura, con particolare attenzione alla produzione alimentare si è evoluta e rafforzata nel tempo, divenendo sempre più dipendente da fertilizzanti minerali, irrigazione e macchinari. L'energia è necessaria in ogni fase delle catene alimentari.



Dall'altra parte, l'agricoltura e la silvicoltura sono sempre state una fonte tradizionale di energia generata da biomassa. La Strategia europea per l'integrazione dei sistemi energetici, inserisce, infatti, tra le proprie sfide la produzione di bioenergia, incluso il biogas, dai residui e rifiuti biologici, sottolineando come il biogas possa essere utilizzato in loco per ridurre il consumo di combustibili fossili nella stessa produzione alimentare o essere trasformato in biometano per consentirne l'immissione nella rete del gas naturale o l'uso nei trasporti. Il ruolo delle biomasse nella transizione energetica va oltre la mera produzione di energia. Esse rappresentano una componente fondamentale per costruire un nuovo modello economico, coniugando sostenibilità ambientale, sviluppo economico e inclusione sociale. Accanto alla valorizzazione delle biomasse, alcune realtà agricole sono idonee alla produzione integrata di energia elettrica e termica di origine solare, creando un potenziale per l'autoconsumo e, anche in questo caso, per l'immissione nella rete di energia rinnovabile.

Occorrono maggiori sforzi, si dichiara nella Strategia stessa, per valorizzare appieno il potenziale dell'integrazione dell'intero sistema energetico, sfruttando le sinergie ed evitando compromessi. Nel settore agricolo, grazie a nuove politiche comuni, gli agricoltori potrebbero essere incentivati a contribuire a una maggiore mobilitazione di biomassa sostenibile per l'energia, così come le comunità di energia rinnovabile potrebbero rappresentare un contesto giuridico solido per favorire l'utilizzo dell'energia prodotta in un ambito locale.

Le filiere locali sono più resilienti alle fluttuazioni dei mercati globali, rafforzando l'autonomia energetica del territorio, trasformando così le sfide globali in opportunità locali. In ENEA il Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei sistemi produttivi e territoriali ed il Dipartimento Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili operano in sinergia sul tema di agricoltura ed energia, mettendo a sistema competenze ed infrastrutture secondo un approccio olistico, sistemico, integrato e multidisciplinare.

Con riferimento ai processi agricoli, l'efficientamento delle risorse è perseguito sfruttando la digitalizzazione e sviluppando soluzioni avanzate per l'agricoltura 4.0, caratterizzata dall'implementazione di sistemi Internet of Things (IoT), sensori avanzati e analisi dei dati. L'applicazione si presta particolarmente per coltivazioni indoor, in vertical farm con l'obiettivo non solo di ottimizzazione energetica e uso efficiente delle risorse, ma anche di aumento della resilienza delle coltivazioni. Il sistema consente di monitorare in

tempo reale le condizioni delle colture ed automatizzare la gestione delle risorse, prevenendo anche eventuali problemi di salute dei vegetali.

ENEA sviluppa ed implementa anche strumenti e metodologie per valutare la sostenibilità dei processi di coltivazione, che consentono di confrontare processi e coltivazioni, individuando le soluzioni più efficienti e circolari. Le valutazioni sono effettuate con metodologie standardizzate e armonizzate a livello internazionale e sono raccolte nella Banca Dati Italiana di Life Cycle Assessment (BDI-LCA), sviluppata da ENEA attraverso il progetto Arcadia.

Un'attenzione particolare va dedicata alla risorsa idrica, necessaria sia per il settore agricolo che per il settore energetico. In linea con il nesso Water-Energy-Food, occorre implementare un sistema controllato che consenta di evitare situazioni di competizione per l'allocazione della risorsa idrica, acuiti nei periodi siccitosi. In ENEA a tal riguardo si sviluppano metodologie di analisi e valutazione a livello macro-territoriale finalizzate a mettere in luce le interconnessioni tra SEN, SII e settore agricolo, tenendo conto del bilancio idrico, dei livelli di stress idrico a livello di bacino e dei fabbisogni energetici connessi al sistema produttivo. Sempre in riferimento alla risorsa idrica, sono allo studio tecnologie di processo e materiali di filtrazione innovativi per il trattamento delle acque reflue per scopi irrigui più efficienti anche dal punto di vista dei consumi energetici e applicazioni legate allo sfruttamento di energia da fonti rinnovabili, come ad esempio quella derivante da impianti agrivoltaici.

Sul tema delle biomasse ENEA opera con studi e attività di R&D al fine di garantire sostenibilità delle filiere di produzione di bioenergia e biocarburanti, attraverso l'analisi tecnico-economico, ambientale e sociale, partendo dalla disponibilità delle materie prime domestiche. E' infatti un prodotto ENEA l'Atlante nazionale delle biomasse, per la stima del potenziale teorico dei residui e sottoprodotti dell'agroindustria in Italia. Inoltre, ENEA contribuisce alla valorizzazione degli scarti agricoli e forestali attraverso lo sviluppo di processi innovativi di trasformazione che abbiano come obiettivo la creazione di filiere di raccolta, trasporto e lavorazione delle materie favorendo così l'occupazione, in particolare nelle aree rurali, contrastando lo spopolamento e offrendo nuove opportunità di reddito agli agricoltori.

Con riferimento all'agrivoltaico, pilastro fondamentale per una transizione energetica sostenibile, esso rappresenta una soluzione per superare le barriere legate all'uso del suolo associate al fotovoltaico, e possiede un potenziale



adeguato a concorrere significativamente al conseguimento degli obiettivi energetici nazionali fissati per le rinnovabili. ENEA opera in questo contesto con studi e ricerche finalizzate a definire quelle soluzioni che possano fornire al tempo stesso un contributo importante alla domanda di energia a livello globale e svolgere un ruolo significativo nei futuri sistemi agricoli.

In conclusione, anche il binomio agricoltura-energia può beneficiare dei vantaggi derivanti da un approccio integra-

to sia nella conduzione di attività di sviluppo e innovazione che nella conduzione dei processi di gestione delle filiere agricole. Comunità energetiche, agrivoltaico, bioenergie, circolarità, sono tutti elementi di una filiera che può offrire soluzioni concrete per affrontare il cambiamento climatico e ridurre la dipendenza energetica, aprendo al tempo stesso anche nuove prospettive di sviluppo sostenibile per i territori.

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

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

DOI 10.12910/EAI2025-026



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

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

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

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

Configurazioni tecnologiche agrivoltaiche

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

ficano principalmente in:

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

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

Quadro normativo e armonizzazione

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

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

Progettazione, ottimizzazione e indicatori di performance

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

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

- Il rapporto tra resa colturale in condizioni agrivoltaiche e resa in piena luce (Crop Ratio).
- La produzione di energia per unità di superficie agricola (MWh/ha) e per potenza installata (kWh/kWp).
- L'efficienza d'uso dell'acqua, ovvero il rapporto tra resa colturale e volume d'acqua impiegato (kg/m³).
- Il costo di investimento iniziale per megawatt di potenza dual-use (€/MWp).

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

Piattaforme di simulazione e casi pilota

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

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

Innovazione Tecnologica: Agricoltura di Precisione e Intelligenza Artificiale

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

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

Aspetti paesaggistici, biodiversità e accettazione sociale

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

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

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

Conclusioni

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

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

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

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

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

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

Riferimenti bibliografici

- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Nik Zad, A., Colauzzi, M., Campana, P. E., & Amaducci, S. (2024). Simulation-Based Decision Support for Agrivoltaic Systems. *Applied Energy*, 369, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2021). Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
- Chatzipanagi, A., Taylor, N., & Jaeger-Waldau, A. (2023). Overview of the potential and challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union. EUR 31482 EN, Publications Office of the European Union. doi:10.2760/208702
- Haegel, N. M., Verlinden, P., Victoria, M., Altermatt, P., Atwater, H., Barnes, T., Breyer, C., Case, C., De Wolf, S., Deline, C., Dharmrin, M., Dimmler, B., Gloeckler, M., Goldschmidt, J. C., Hallam, B., Haussener, S., Holder, B., Jaeger, U., Jaeger-Waldau, A., ... Bett, A. W. (2023). Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. *Science*, 380(6640), 39–42. <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- Trommsdorff, M., Campana, P. E., Macknick, J., Fernández Solas, A., Gorjian, S., & Tsanakas, I. (2025). Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems. *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme*. <https://doi.org/10.69766/xaeu5008>
- Scognamiglio, A., & Toledo, D. (2021). **. *Sustainability*, 13(...):6871.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns). *Sustainability*, 13(12), 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>
- Zidane, T. E. K., Zainali, S., Bellone, Y., Guezgouz, M., Khosravi, A., Ma Lu, S., Tekie, S., Amaducci, S., & Elia Campana, P. (2025). Economic evaluation of one-axis, vertical, and elevated agrivoltaic systems across Europe: a Monte Carlo Analysis. *Applied Energy*, 391, 125826. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125826>

Sostenibilità e gestione intelligente del territorio

L'agrivoltaico sta emergendo come soluzione strategica per mettere insieme produzione agricola ed energia rinnovabile, valorizzando il territorio rurale. In Italia il settore ha ricevuto un forte impulso grazie ai finanziamenti del PNRR per realizzare nuovi impianti. I benefici includono una maggiore resa agricola e una riduzione del consumo idrico. Tuttavia, restano alcune sfide legate alla regolamentazione e alla competizione per l'uso del suolo.

DOI 10.12910/EAI2025-027



di Salvatore Carfi, Direttore Area Coordinamento Agea

L'agrifotovoltaico rappresenta oggi una delle più promettenti sinergie tra innovazione energetica e valorizzazione del territorio rurale. In Italia, l'integrazione fra agricoltura e produzione di energia rinnovabile si sta traducendo in una strategia concreta grazie all'impegno di Agea, che ha scelto di non puntare su superfici agricole già produttive ma di orientarsi verso terreni marginali, incolti o abbandonati.

Secondo le indicazioni fornite dal Ministro dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste, Onorevole Lollobrigida, la sostenibilità richiede una gestione intelligente del territorio, che passa attraverso il recupero delle aree marginali e l'introduzione di tecnologie non invasive ma integrative. **Il potenziale è enorme: secondo il Centro Studi Agea, oltre 3,7 milioni di ettari potrebbero essere recuperati e reimmessi nel circuito produttivo, generando ricadute occupazionali e**

sociali significative. Per identificare e classificare queste superfici, Agea sfrutta la Carta Nazionale dell'Uso dei Suoli, uno strumento digitale ideato dall'Agenzia basato sull'analisi di ortofoto, che consente di individuare con precisione le tipologie di suolo esistenti e le terre abbandonate, rendendo possibile il loro recupero agricolo. **L'obiettivo non è solo incrementare la capacità di generare energia pulita, ma anche restituire valore a suoli trascurati, favorendo un duplice beneficio: ambientale ed economico.**

Un prototipo innovativo per mappare le aree idonee all'agrifotovoltaico

La chiave di volta di questo processo è rappresentata da un innovativo prototipo per la mappatura delle aree idonee all'agrifotovoltaico. Uno studio pilota adottato da Agea si articola in tre fasi:

La prima è dedicata all'identificazio-

ne delle zone da escludere a priori. Si tratta di aree che, per vincoli normativi o caratteristiche fisiche, risultano inadeguate alla realizzazione di impianti solari. Tra queste vi sono i territori sottoposti a vincoli paesaggistici o culturali (come previsto dal D.Lgs 42/2004), le zone appartenenti alla rete Natura 2000, le aree a pendenza superiore al 15%, quelle boschive o già edificate, i terreni percorsi da incendi negli ultimi dieci anni e le aree a rischio idrogeologico elevato. Sono esclusi anche i terreni con coltivazioni arboree permanenti, la cui presenza sarebbe incompatibile con la corretta captazione della radiazione solare.

Nella seconda fase si passa alla valutazione dei parametri di idoneità. Questa seconda fase è probabilmente la più complessa, poiché tiene conto di una vasta gamma di indicatori. **La solarizzazione, ovvero la quantità di energia solare incidente in un anno su un metro quadro di superficie,**

rappresenta uno degli elementi più significativi, in quanto direttamente correlato alla produttività attesa dell'impianto. Anche l'esposizione gioca un ruolo fondamentale: l'orientamento ottimale dei pannelli può incrementare sensibilmente l'efficienza energetica. La pendenza, invece, incide sia sulla logistica di installazione sia sul rischio di ombreggiamento reciproco tra i pannelli, riducendo così la resa complessiva. A questi parametri tecnici si aggiungono quelli legati alla posizione. La vicinanza a zone di consumo – come aree industriali, artigianali o energivore – è preferibile, poiché minimizza le perdite di energia dovute alla dispersione lungo le linee elettriche. Anche la distanza da infrastrutture esistenti, come strade e cabine elettriche, è un elemento di valutazione importante: un sito più accessibile comporta minori costi di realizzazione e manutenzione. **Inoltre, la prossimità ad altri impianti agrifotovoltaici o eolici esistenti può rappresentare un vantaggio infrastrutturale, suggerendo l'esistenza di collegamenti già attivi alla rete.**

La destinazione d'uso del suolo: un criterio fondamentale

Un altro criterio fondamentale è la destinazione d'uso del suolo. Le aree incolte, ovvero non coltivate da più di 16 mesi, rappresentano una risorsa da valorizzare: la loro trasformazione in siti produttivi consente di evitare il consumo di suolo agricolo attivo, contribuendo al contempo al recupero di spazi abbandonati. Seguono, in ordine di priorità decrescente, i pascoli e i seminativi. La terza e ultima fase dell'analisi è la costruzione vera e propria della matrice di idoneità. In essa, ogni cella del territorio analizzato è classificata in base ai punteggi assegnati ai diversi parametri, che spaziano da valori di eccellenza (idoneità alta) a valori di



esclusione (idoneità nulla). **Il risultato è una rappresentazione dettagliata del territorio, in cui ogni area può essere immediatamente valutata in termini di potenziale agrifotovoltaico. A corredo della matrice, un sistema informatico permette di cliccare su ogni unità territoriale per visualizzare nel dettaglio i valori che hanno determinato il giudizio finale.**

Un esempio concreto dell'applicazione di questo approccio è lo studio condotto nel comune di Stigliano, in Basilicata, dove più del 64% del territorio è stato escluso per motivi tecnici e ambientali, ma è stato possibile identificare 143 chilometri quadrati come aree potenzialmente adatte all'installazione di impianti agrifotovoltaici. Il confronto tra i risultati del modello e i dati catastali consente inoltre di snellire le procedure autorizzative e di indirizzare gli investimenti verso interventi mirati e responsabili.

L'ultimo passo del processo è il confronto con il catasto, al fine di identificare le particelle esatte che risultano idonee. Questo passaggio, spesso trascurato nelle analisi teoriche, si rivela invece fondamentale per snellire

le procedure burocratiche e rendere il lavoro concretamente utilizzabile da amministrazioni pubbliche, operatori privati e progettisti.

Attraverso un approccio tecnologico e una visione a lungo termine, **l'Agenzia promuove un modello agrifotovoltaico innovativo e replicabile, capace di armonizzare agricoltura, energia e uso del suolo. Questo modello non rappresenta un compromesso, ma una sinergia concreta tra sostenibilità ambientale, innovazione e valorizzazione delle economie locali.**

In un contesto in cui la decarbonizzazione non è più un obiettivo astratto ma una urgenza imposta dalle direttive europee e dal cambiamento climatico, dotarsi di strumenti così avanzati e rigorosi è la chiave per coniugare sviluppo, sostenibilità e tutela del territorio. **L'agrifotovoltaico, se ben pianificato, può davvero essere la luce del futuro purché le aree di installazione siano individuate con criteri oggettivi funzionali allo scopo della produzione pulita energetica e non contrastanti con le pratiche e attività delle produzioni agricole e ambientali.**

Energia in agricoltura: le prospettive nell'ambito della transizione energetica

L'agricoltura italiana è un settore fondamentale per via del ruolo di primo piano nella filiera alimentare e produttiva, ed è particolarmente dipendente dal petrolio, con il carburante che rappresenta circa il 66% del suo consumo energetico. Tale situazione la rende fortemente esposta rispetto agli incrementi del costo dei combustibili fossili, legati anche al deterioramento ed alla variabilità delle situazioni internazionali.

DOI 10.12910/EAI2025-028



di Gian Piero Celata, Presidente Cluster Tecnologico Nazionale Energia

Il settore agricolo in Italia assorbe solo circa il 2% dei consumi energetici totali, in un contesto di sostanziale stabilità con riferimento agli ultimi 13 anni, evidenziando un modesto incremento di circa il 10%, passando da circa 2810 ktep del 2009 a circa 3100 ktep nel 2022), come riportato in tabella 1 (elaborazione ENEA ¹ su dati MASE, GSE, TERNA, SNAM Rete Gas, SGI, Ispra). Tuttavia, in considerazione del fatto che l'agricoltura italiana è un settore fondamentale per via del suo ruolo di primo piano nella filiera alimentare e produttiva, ed è particolarmente

dipendente dal petrolio, con il carburante che rappresenta circa il 66% del suo consumo energetico (pur diminuito rispetto al 77% del 2009), **il quadro la rende fortemente esposta rispetto agli incrementi del costo dei combustibili fossili, legati anche al deterioramento ed alla variabilità delle situazioni internazionali**. L'analisi della tabella 1 evidenzia inoltre che:

- i consumi elettrici sono di fatto costanti nel tempo;
- i combustibili gassosi sono più raddoppiati negli ultimi anni
- le energie rinnovabili sono cresciute di oltre 20 volte negli ultimi dieci anni,

raggiungendo però solo il 3,22% dei consumi totali (mostrando ampi margini di crescita)

Le regioni che superano i 100 ktep di consumo annuo sono nove (Piemonte, Lombardia, Toscana, Marche, Lazio, Campania, Puglia, Sicilia e Sardegna), con la Lombardia che supera i 450 ktep e la Sardegna che supera di poco i 100 ktep.

In questo quadro, al fine di ridurre i consumi energetici e perseguire la sostenibilità ambientale, l'azienda agricola può ridurre, prima di tutto, il consumo complessivo di energia attraverso un efficientamento ener-

¹ I consumi sono riferiti esclusivamente al settore Agricoltura, ossia alle produzioni vegetali e animali, caccia e servizi connessi che comprendono le coltivazioni agricole, la riproduzione delle piante, gli allevamenti di animali e le coltivazioni agricole associate all'allevamento di animali e le attività di supporto alla produzione vegetale (sementi e raccolta) ed animale. Sono escluse tutte le attività di trasformazione dei prodotti vegetali ed animali che sono incluse nel settore industria alimentare: non si dispone dei dati necessari per disaggregare i consumi energetici dell'industria alimentare in consumi energetici per la produzione di prodotti alimentari, per la produzione di bevande e per la produzione di tabacchi.

2009			2012			2017			2022		
	ktep	%sul totale		ktep	%sul totale		ktep	%sul totale		ktep	%sul totale
Prodotti petroliferi	2176,4	77,38	Prodotti petroliferi	1936,3	74,90	Prodotti petroliferi	2035,1	74,81	Prodotti petroliferi	2048,9	65,94
Combustibili gassosi	141,7	5,04	Combustibili gassosi	128,7	4,98	Combustibili gassosi	136,7	5,02	Combustibili gassosi	381,7	12,28
Energie rinnovabili	1,8	0,07	Energie rinnovabili	4,5	0,17	Energie rinnovabili	49,5	1,82	Energie rinnovabili	100,1	3,22
Calore derivato	12,7	0,45	Calore derivato	14,5	0,56	Calore derivato	11,4	0,42	Calore derivato	7,5	0,24
Energia elettrica	479,9	17,06	Energia elettrica	501,3	19,39	Energia elettrica	487,8	17,93	Energia elettrica	569,0	18,31
Totale	2812,6		Totale	2585,3		Totale	2720,4		Totale	3107,2	

Tabella 1: Consumi di energia in agricoltura¹. Fonte: Elaborazione ENEA su dati MASE, GSE, TERNA, SNAM Rete Gas, SGI, Ispra

getico nelle diverse fasi del processo produttivo che la caratterizza e in parallelo sostituire energia e combustibile fossili con fonti energetiche rinnovabili autoprodotte.

L'analisi dei consumi energetici

Analisi dei consumi energetici - Come primo passo del processo è fondamentale analizzare i consumi energetici dell'azienda, sia elettrici che termici, sia in termini complessivi che di "profili di consumo" (valutando meticolosamente l'andamento giornaliero, mensile e stagionale). Fatta questa analisi, per ciascuna utenza bisogna determinare i margini di miglioramento in termini di efficientamento valutando la sostituzione di tecnologie e/o di apparati che consentano una riduzione dei consumi energetici.

Parallelamente, definiti ed eventualmente ottimizzati i consumi di energia mediante l'efficientamento, occorre verificare le possibilità di autoproduzione di energia elettrica da fonte rinnovabile o di disponibilità

di energia rinnovabile in loco per usi termici.

Azioni di efficientamento - Partiamo dalle azioni di efficientamento dei consumi energetici dell'azienda agricola, che possiamo sintetizzare come segue: i) sostituire eventuali motori elettrici obsoleti con prodotti ad alta efficienza con azionamenti ad inverter; ii) installare lampade a LED per illuminazione; iii) migliorare l'isolamento degli edifici e la climatizzazione degli ambienti; iv) installare caldaie a condensazione, pompe di calore per la climatizzazione e produzione di acqua calda; v) recuperare i cascami di calore quando presenti (ad esempio calore da cogenerazione del biogas). L'opportunità di ridurre i consumi consente di ridurre il costo energetico dell'azienda, anche se a fronte di investimenti dei quali vanno valutati i tempi di payback e le opportunità di incentivi fiscali.

Tecnologie per la produzione di energia rinnovabile per autoconsumo - Le tecnologie impiegabili per produrre energia da fonte rinnovabile in un'a-

zienda agricola per l'autoconsumo sono diverse: i) pannelli solari per la produzione di energia termica; ii) pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica (anche per il pompaggio dell'acqua a scopi irrigui e/o di abbeveraggio), da installare in primo luogo sui tetti dei fienili, delle stalle, di altri edifici; iii) caldaie a biomasse (ad esempio per il riscaldamento di serre); iv) utilizzo del biogas con cogenerazione.

L'Agrivoltaico e la Valorizzazione energetica degli scarti agricoli

Due esempi specifici meritano una particolare attenzione nell'ambito delle tecnologie per la produzione di energia da fonte rinnovabile.

Agrivoltaico - Il primo riguarda l'integrazione del fotovoltaico con l'attività agricola, dando vita alla tecnologia denominata agrivoltaico, che estende così la superficie di installazione dei pannelli fotovoltaici oltre i tetti degli edifici e non entra in competizione con l'utilizzo della superficie agricola utilizzabile. L'integrazione permette



di continuare liberamente le colture agricole o l'allevamento e prevede un ruolo per gli agricoltori, che possono anche integrare il reddito aziendale vendendo l'energia elettrica in surplus proveniente dal fotovoltaico (entrata non soggetta alle oscillazioni delle produzioni agricole e dei relativi mercati) aiutando a prevenire l'abbandono dell'attività produttiva.

Le soluzioni fotovoltaiche innovative permettono l'installazione di moduli elevati da terra, e devono garantire le necessità dell'imprenditore agricolo, ovvero le attività di coltivazioni agricole e pastorale (necessità centrali nel progetto di un sistema agrivoltaico), adeguandosi alle necessità delle colture mediante la flessibilità del progetto e l'ampia disponibilità delle tecnologie e la modularità. Il risultato è un approccio multidimensionale: agricoltura, energia e paesaggio. L'ombreggiamento causato dalla presenza dei pannelli fotovoltaici deve essere benefico per le coltivazioni

per renderle più resilienti a fenomeni di stress termico e/o idrico (tra l'altro riducendo i consumi idrici necessari). La potenziale minore densità di potenza o intensità di occupazione del suolo (minor numero di moduli installati per unità di area e quindi minore potenza installata) per rendere disponibile la radiazione solare per le piante, denominata porosità dell'impianto, può essere compensata usando moduli fotovoltaici ad alta efficienza (ad esempio moduli bifacciali) o a sistemi a inseguimento su singolo o su doppio asse, che sono in grado di massimizzare la captazione solare e quindi migliorare la produzione di energia.

Nell'agrivoltaico il terreno disponibile viene quindi utilizzato due volte, per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico e per l'agricoltura, e non risulta vincolato all'uso energetico, in quanto le strutture ad esso dedicate possono essere sempre rimosse, mentre l'utilizzo agricolo

rimane sempre l'opzione prioritaria nell'impiego del terreno.

Questa specifica tecnologia è stata attenzionata dal PNRR che con la misura 1 (incrementare la quota di energia prodotta da fonti di energia rinnovabile), della Missione 2 (Rivoluzione verde e transizione energetica) Componente 2 (Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile) prevede di finanziare con 1.1 miliardi di euro l'installazione di almeno 1.04 GW di potenza da agrivoltaico con una produzione indicativa di almeno 1.300 GWh/anno entro il giugno 2026

Valorizzazione energetica degli scarti agricoli - La valorizzazione energetica delle biomasse residuali di origine agricola rappresenta un aspetto molto importante delle potenzialità che l'agricoltura ha nella produzione di energia verde. L'utilizzo delle biomasse residuali non entra in concorrenza nell'uso dei suoli con le produzioni alimentari, risolve il problema di sottoprodotti che, se non utilizzati

per usi alternativi, rischiano comunque di dover essere smaltiti, costituisce un'importante fonte di reddito, o attraverso un incremento dei ricavi (vendita dell'energia) o attraverso un risparmio di costi (autoconsumo dell'energia prodotta, sia termica che elettrica).

Un interessante esempio pratico a livello agricolo è rappresentato dall'Azienda agricola La Maremmana, operativa nella provincia di Grosseto, che ha realizzato una circolarità della propria economia utilizzando come fonte di energia reflui dell'allevamento di bufale, scarti di formaggi e siero provenienti dal caseificio, scarti agricoli e colture dedicate, sottoprodotti agro-industriali come la sansa. Il materiale di scarto agricolo viene processato in un digestore anaerobico che produce biogas con il quale a sua volta si produce, in cogenerazione, energia elettrica e calore. Già nella fase di avvio del progetto aziendale la produzione di energia elettrica era superiore alle capacità di autoconsumo della fattoria, con vendita e ricavi dell'energia elettrica in surplus, mentre il calore generato era totalmente

utilizzato presso l'azienda.

I vantaggi economici derivanti dall'investimento fatto consistono nell'abbattimento dei costi energetici (elettricità e calore), nella diversificazione dell'attività ed aumento del fatturato (vendita di energia elettrica non autoconsumata), nell'abbattimento/eliminazione dei costi di smaltimento del materiale di scarto, nella riduzione dei costi del fertilizzante sostituito dal digestato proveniente dal digestore anaerobico, che costituisce un ottimo compost.

I vantaggi ambientali sono costituiti dal sequestro di CO₂ grazie all'impianto di biogas e la semina su sodo, dalla stabilizzazione degli effluenti zootecnici con la digestione anaerobica, dal fertilizzante organico (digestato) meno impattante e più completo (nessun fertilizzante chimico ed aumento della sostanza organica dei terreni).

Recupero e valorizzazione dei materiali

Vale la pena di ricordare qui che la principale differenza tra l'Economia Circolare e gli altri approcci alla so-

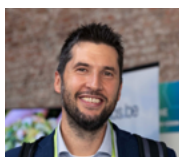
stenibilità risiede nell'idea di base che non è solo l'efficienza a contare (il ridurre le risorse impiegate per un bene o servizio), ma la contestuale riduzione – a parità di contenuto – del prelievo di risorse dalla natura, attraverso il recupero e la valorizzazione dei materiali e beni in uso, concetto perfettamente coniugato nell'esempio sopra riportato.

L'opportunità di intervenire nella riduzione dei consumi e dei costi energetici in agricoltura per un corretto allineamento con la transizione energetica fa parte della roadmap tecnologica del **Piano di Azione del Cluster Tecnologico Nazionale Energia**, che ha anche organizzato Workshop dedicati sull'argomento, nel corso dei quali sono stati presentati numerosi esempi virtuosi delle prassi descritte nel presente articolo, e collabora con il Cluster Tecnologico Nazionale Agri-food per attività energetiche in ambito agricolo e agroindustriale.

Biogas: l'energia che nutre la terra

Oltre ad avvalersi di fonti energetiche rinnovabili e minimizzare la produzione di rifiuti è necessario, nell'ottica di un'economia circolare e sostenibile, considerare la materia organica di scarto come una risorsa con un potenziale ancora da sfruttare. Dal punto di vista ambientale, gli impianti di digestione anaerobica che utilizzano letame e liquame sono doppiamente vincenti perché contrastano il cambiamento climatico sia per le emissioni di gas serra evitate dallo stoccaggio degli effluenti, sia perché il biogas sostituisce fonti fossili, accumulando "crediti" di CO₂ equivalente per unità di energia prodotta.

DOI 10.12910/EAI2025-029



di Mirco Garuti, Responsabile del Settore Ambiente ed Energia del CRPA - Centro Ricerche Produzioni Animali

La filiera agroalimentare comprende la produzione, la lavorazione, la distribuzione e il consumo di prodotti alimentari. Oltre alla sua rilevanza economica, l'industria alimentare ha anche un impatto significativo sulla salute pubblica, sulla sostenibilità ambientale e sull'equità sociale, temi questi che stanno portando a un cambiamento delle preferenze dei consumatori con ricadute sui sistemi produttivi zootecnici e agronomici.

La FAO definisce lo sviluppo agricolo "sostenibile" quando la gestione delle risorse naturali, delle tecnologie utilizzate e delle politiche adottate sono in grado di soddisfare i bisogni umani presenti e futuri e di preservare al contempo suolo e acqua. Il cibo e l'agricoltura sono alla base di tutti gli obiettivi di sviluppo sostenibile e **la necessità di trasformare i sistemi agroalimentari per renderli più efficienti, più inclusivi, più resilienti e più sostenibili, a beneficio delle persone**

e del pianeta, è imprescindibile.

Un altro aspetto legato allo sfruttamento delle risorse naturali nel sistema agroalimentare è legato alla eccessiva produzione di rifiuti. Ridurre, riutilizzare, riparare, rigenerare, riciclare e recuperare sono i fondamenti dell'economia circolare e sono alla base dell'incremento nell'efficienza dei processi, sia che essi riguardino la materia oppure l'energia. **Diventa chiaro come, in questo contesto, la scelta delle fonti energetiche necessarie alla filiera agroalimentare assuma un ruolo di rilievo.**

Oltre ad avvalersi di fonti energetiche rinnovabili e minimizzare la produzione di rifiuti **è necessario, nell'ottica di un'economia circolare e sostenibile, considerare la materia organica di scarto come una risorsa con un potenziale ancora da sfruttare.**

Residui agricoli, sottoprodotti della trasformazione alimentare sia di origine animale che vegetale, effluenti zootecnici ma anche i fanghi di de-

purazione e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani sono biomasse utilizzabili per generare energia attraverso impianti di digestione anaerobica per la produzione di biogas. Il biogas può essere valorizzato come energia elettrica e termica in cogenerazione oppure ulteriormente purificato a biometano per l'immissione nella rete del gas naturale o per la sua liquefazione ad uso di biocombustibile. **La digestione anaerobica è quindi una biotecnologia in grado di ridurre quantitativamente la massa di materia organica producendo energia rinnovabile.** Parallelamente produce un effluente risultante dal processo, **il digestato, ricco di nutrienti e ottimo fertilizzante per l'agricoltura.**

Digestione anaerobica e zootecnia, binomio vincente

Il settore zootecnico è cruciale nel sistema agroalimentare nazionale e si sta trovando ad affrontare sfide complesse interconnesse e riguar-

danti l'alimentazione e il benessere animale, la trasformazione in prodotti alimentari, la tutela ambientale. **Adottare approcci basati su ricerca scientifica e progresso tecnologico permetterà di produrre in modo più efficiente e sostenibile.**

Gli effluenti zootecnici dell'allevamento possono avere un impatto negativo sull'ambiente se non gestiti correttamente. In generale, emissioni in atmosfera di gas ad effetto serra come il metano, il protossido di azoto e l'anidride carbonica provenienti dallo stoccaggio non ottimale degli effluenti zootecnici possono influire negativamente sul cambiamento climatico. Dal punto di vista ambientale, **gli impianti di digestione anaerobica che utilizzano letame e liquame sono doppiamente vincenti perché contrastano il cambiamento climatico sia per le emissioni di gas serra evitate dallo stoccaggio degli effluenti, sia perché il biogas sostituisce fonti fossili, accumulando "crediti" di CO₂ equivalente per unità di energia prodotta.**

La produzione di biogas o biometano rappresenta per il proprietario dell'impianto un reddito aggiuntivo rispetto alla attività zootecnica e agricola. Inoltre, gli agricoltori possono utilizzare il digestato ricco di nutrienti biodisponibili per le piante (principalmente azoto e fosforo) e di sostanza organica per incrementare le rese delle colture vegetali.

Il corretto dimensionamento dello stoccaggio del digestato ne garantisce la gestione circolare, permettendo così di ottenere diversi vantaggi agronomico-ambientali, quali una riduzione delle emissioni dalla fase di stoccaggio e la possibilità di utilizzare il digestato in sostituzione a fertilizzanti di origine fossile nei tempi, nelle modalità e nelle dosi richieste dalla coltura vegetale.

Non solo biogas

Per arrivare ad una produzione alimentare sostenibile, anche la salute del suolo e l'uso circolare dei nutrienti giocano un ruolo importante e la digestione anaerobica può contribuire positivamente anche su questo aspetto, attraverso l'uso del digestato.

La perdita di sostanza organica nei terreni agricoli riduce le rese colturali compromettendo la produzione alimentare in generale. **Apportare carbonio organico al suolo mediante l'uso di ammendanti organici non significa semplicemente garantire salute e fertilità del terreno, ma anche sequestrare carbonio dall'atmosfera e quindi compensare le emissioni globali di anidride carbonica di origine antropica contrastando il cambiamento climatico.**

Il digestato contiene ancora materiale organico non degradato. Una volta che è apportato al suolo, può essere utilizzato per aumentare il contenuto di carbonio nel terreno quando vengono abbinata tecniche di agricoltura conservativa. L'agricoltura conservativa per definizione punta a "conservare" il suolo e salvaguardarne la fertilità, lo stato di salute e la sua biodiversità attraverso il minimo disturbo, la copertura permanente della superficie con residui colturali o cover crop e rotazioni colturali.

Per un'azienda agricola l'uso agronomico del digestato porta, oltre ad un beneficio ambientale, anche una riduzione di costi per l'acquisto di fertilizzanti di origine fossile. Per rendere il digestato adatto alle specifiche esigenze fertilizzanti esistono tecnologie in grado di separare, recuperare e delocalizzare i nutrienti. Tra le tecniche di trattamento del digestato, la separazione solido-liquido è senza dubbio quella più applicabile in azienda. **Essa rappresenta solo il primo anello di linee di post-trattamento del digestato più complesse volte**

ad una separazione dei nutrienti, quali processi per il trattamento della frazione solida (bio-stabilizzazione, compostaggio, essiccazione) e della frazione liquida (microfiltrazione, strippaggio, evaporazione, filtrazione a membrana e osmosi inversa). Questi rappresentano interessanti prospettive per un futuro mercato dei bio-fertilizzanti "su misura" che possono essere prodotti dal digestato solido.

Con il post-trattamento sul digestato liquido, inoltre, si punta ad ottenere una significativa riduzione del volume e a delocalizzare i nutrienti (in particolare azoto e fosforo sottoforma, tra l'altro, di ammonio solfato liquido e struvite) verso zone a bassa intensità zootecnica o ad utilizzarli come componenti per i fertilizzanti stessi.

Guadagnare con il biogas e non solo

Individuare nel digestato una fonte di reddito addizionale per i proprietari degli impianti di digestione anaerobica potrebbe non essere così lontano. I prezzi dei fertilizzanti minerali esercitano un effetto leva significativo, come si è potuto osservare nel 2022 quando sono raddoppiati e triplicati. **Nel momento in cui i fertilizzanti minerali diventano troppo costosi rispetto agli elementi nutritivi contenuti nel digestato o la loro disponibilità diventa limitata, il digestato prodotto localmente diventa automaticamente interessante.** Se a questo si aggiungono schemi di supporto per gli impianti di digestione anaerobica che siano il più completi possibile e che vadano oltre la sola incentivazione dell'energia rinnovabile prodotta ma includano anche il digestato, l'impianto di digestione anaerobica si può prefigurare ancora di più come una soluzione per promuovere l'economia circolare e la bioenergia. Ad esempio, nell'ambito del PNRR, il

decreto Pratiche Ecologiche favorisce interventi finanziabili con un contributo in conto capitale fino al 65% della spesa ammissibile per la diffusione di pratiche ecologiche (acquisto di attrezzature finalizzate alla minima lavorazione del suolo e per la distribuzione ottimizzata del digestato in campo con riduzione delle emissioni), per la creazione di poli consorziati per il trattamento centralizzato del digestato, per la sostituzione di trattori obsoleti e a bassa efficienza con mezzi più efficienti e alimentati esclusivamente a biometano, per interventi finalizzati a migliorare l'efficienza degli impianti esistenti per la produzione di biogas. Altre linee di intervento di future forme di supporto potrebbero riguardare la definizione e la implementazione di schemi di remunerazione per le pratiche di sequestro del carbonio nel suolo (carbon farming).

Biogas o biometano?

La digestione anaerobica è una tecnologia così versatile che permette di realizzare impianti di dimensioni molto diversificate. Si può andare da micro-impianti da 3-10 Sm³CH₄/ora, a impianti di piccole-medie dimensioni tra 15-130 Sm³CH₄/ora e fino a 150-500 Sm³CH₄/ora e grandi impianti da 500-1.200 Sm³CH₄/ora e oltre.

La scelta del dimensionamento dell'impianto dipende da molteplici fattori, primo fra tutti la **disponibilità di biomasse** che è strettamente legata al tema della presenza di allevamenti zootecnici, industrie di trasformazione dei prodotti alimentari

ma anche realtà agricole in grado di produrre, oltre a colture vegetali per il mercato del food e del feed, anche residui agricoli e colture vegetali dedicate alla bioenergia (ad esempio secondi raccolti, cover crop).

Altri aspetti che vanno presi in considerazione riguardano il **destino d'uso previsto per il biogas** generato (cogenerazione/purificazione a biometano, autoconsumo aziendale, comunità energetiche rinnovabili/autotrasporti/usi industriali, utilizzo della CO₂ rinnovabile del biogas) e, ovviamente, la **tipologia di schema incentivante a supporto del progetto**.

Realtà agro-zootecniche di piccole e medie dimensioni che non trovano sostenibilità economica nella realizzazione di un nuovo impianto di biometano o nella riconversione a biometano di un impianto biogas esistente, potranno dare il loro contributo alla transizione energetica producendo biogas per la cogenerazione. Con il decreto FER2 vengono delineati i meccanismi di incentivazione per una serie di fonti rinnovabili innovative, prevedendo un contingente di 150 MW di potenza elettrica installata per nuovi impianti alimentati a biogas e a biomasse solide da mettere a bando tramite le procedure dei registri basate su un meccanismo di offerta di ribasso percentuale rispetto alla tariffa di riferimento.

Scelte consapevoli

Il dibattito sulle dimensioni dell'impianto può essere controverso. I progetti biometano richiedono risorse significative per la loro imple-

mentazione, quali ad esempio l'allacciamento alla rete del gas naturale, i costi operativi per la logistica di approvvigionamento delle biomasse, per lo spandimento del digestato, per l'ordinaria gestione e per le specifiche manutenzioni. Sono quindi importanti i vantaggi derivanti dall'economia di scala del progetto, sia nella gestione di costi che nell'ottenimento dei ricavi dalla produzione di energia quando si parla di upgrade del biogas a biometano.

Tuttavia, anche **la semplice produzione di energia elettrica da biogas è funzionale alle aziende agro-zootecniche in grado di valorizzare l'energia termica del cogeneratore** e di privilegiare effluenti zootecnici, sottoprodotti e residui agricoli come biomasse in alimentazione all'impianto.

Per l'estrema versatilità della digestione anaerobica è ragionevole pensare anche a soluzioni alternative, come la realizzazione di impianti biometano centralizzati in cui le singole aziende agro-zootecniche non abbiano un impianto di digestione anaerobica di proprietà ma conferiscano biomassa (in particolare effluenti zootecnici) e riutilizzino il digestato sui terreni aziendali.

In conclusione, la digestione anaerobica si pone come una delle tecnologie più promettenti per affrontare le sfide dovute al cambiamento climatico e all'autonomia energetica dalle fonti fossili e che meglio si abbinano alle migliori pratiche zootecniche e agricole sostenibili per ridurre l'impatto ambientale della filiera-agroalimentare.

Il biogas agricolo: energia, sostenibilità e innovazione per la transizione ecologica

Le misure per lo sviluppo del biometano, accompagnate a quelle a favore della prosecuzione della produzione di energia elettrica e di pratiche ecologiche che spingono verso una maggiore sostenibilità, fanno del settore del biogas e del biometano agricolo italiano un fiore all'occhiello del Paese. L'approccio del modello "Biogasfattobene" ha innescato una vera e propria rivoluzione tecnologica, divenendo il motore principale per la nascita all'interno delle aziende agricole di modelli innovativi che hanno portato alla sperimentazione di nuove tecniche colturali, azioni rivolte al benessere animale, macchine agricole adeguate che hanno favorito la spinta verso l'agricoltura 4.0, insieme a una maggiore cura dei suoli.

DOI 10.12910/EAI2025-030



di Piero Gattoni, Presidente CIB-Consorzio Italiano Biogas

L'agricoltura è chiamata a giocare un ruolo strategico nella transizione energetica, ambientale e alimentare del nostro Paese. Oggi più che mai è evidente il cambio di paradigma già in atto nel settore.

L'azienda agricola da semplice consumatore di energia è diventata produttore di energia rinnovabile e fornitore di servizi per il territorio, non solo nel perimetro del sistema agroalimentare.

In questo contesto, **la tecnologia è la leva che ha permesso questo cambio di passo** che, seppur non immediato, è riuscito a imporsi nel sistema produttivo di molte aziende agricole.

Questa rinnovata posizione dell'azienda agricola ha nel tempo tratteggiato un vero e proprio modello che nel caso italiano si è tradotto nel c.d. "modello del Biogasfattobene", il cui obiettivo è produrre per più mercati in modo sostenibile.

L'approccio del "Biogasfattobene" ha nel tempo innescato una vera e propria rivoluzione tecnologica, divenendo il motore principale per la nascita all'interno delle aziende agricole di modelli innovativi che hanno portato alla sperimentazione di nuove tecniche colturali, azioni rivolte al benessere animale, macchine agricole adeguate che hanno favorito la spinta verso l'agricoltura 4.0, insieme a una maggiore cura dei suoli.

Nuove prospettive per la decarbonizzazione

Sotto il profilo agroecologico, infatti, tra le esternalità positive vi è certamente la tutela del suolo. Infatti, tra gli output del processo di produzione del biogas c'è anche quello del digestato, capace di aumentare la sostanza organica nei suoli e migliorare la resilienza climatica delle aziende, riducendo l'uso di fertilizzanti di sintesi prodotti da fonti fossili. Si tratta di un esempio concreto di economia circolare, dove ogni fase del processo, dalla produzione di energia alla gestione dei residui, contribuisce alla sostenibilità complessiva del sistema.

Allargando la prospettiva oltre il set-

tore primario, lo sviluppo della filiera del biometano ha aperto nuove prospettive per la decarbonizzazione del settore dei trasporti prima e delle grandi aziende energivore oggi, con una filiera made in Italy che genera occupazione e crescita del tessuto territoriale.

Il recente impulso dato dalle misure contenute nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha messo a disposizione risorse per il settore pari a 1,9 miliardi di euro con l'obiettivo di produrre circa 2,3 miliardi di mc di biometano entro il 2026.

Le misure per lo sviluppo del biometano, accompagnate a quelle a favore della prosecuzione della produzione di energia elettrica e di pratiche ecologiche che spingono verso una maggiore sostenibilità, fanno del settore del biogas e del biometano agricolo italiano un fiore all'occhiello del nostro Paese.

Gli investimenti in tecnologie che consentono la gestione efficiente dei reflui zootecnici, accompagnata con pratiche colturali avanzate e un uso efficace del digestato, rispondono oggi alla necessità di ridurre l'impron-

ta carbonica senza necessariamente ridurre le produzioni di qualità.

In questo senso, la recente cornice normativa sulla sostenibilità, oltre a proporre un quadro più chiaro sul percorso che le aziende dovranno intraprendere, offre un'importante opportunità per spingere sempre più aziende a investire in innovazione.

La crisi sanitaria del 2020 e poi la crisi ucraina seguita dalla delicata situazione geopolitica generale hanno accelerato il percorso di sviluppo del biometano anche a livello europeo. Infatti, le politiche europee, da ultimo il REPowerEU o il Clean Industrial Act, hanno indicato chiaramente l'importanza di **sviluppare il biogas e biometano come vettori chiave** per raggiungere gli obiettivi climatici, evidenziando anche ambiziosi target al 2030 di produzione di 35 miliardi di Smc di biometano all'interno degli Stati membri dell'Ue.

Il ruolo fondamentale della ricerca

Un ruolo determinante, infine, è svolto dalla ricerca, che rappresenta il motore dell'innovazione nel settore

del biogas e del biometano agricolo, e dove il CIB è fortemente impegnato, collaborando con università ed enti di ricerca a progetti regionali, nazionali ed europei che affrontano tematiche cruciali come l'utilizzo del digestato, il carbon farming, l'economia circolare e la valorizzazione dei sottoprodotti agricoli.

Per vincere la sfida climatica, è indispensabile continuare a sostenere politiche lungimiranti, che riconoscano e rafforzino il contributo strategico dell'agricoltura nella transizione. L'esperienza maturata nel corso degli ultimi anni dimostra che la strada che abbiamo percorso finora rappresenta una traiettoria percorribile, in grado di coniugare innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e competitività, offrendo un modello capace di valorizzare risorse locali e rafforzare i territori.

Proseguire su questo cammino significa consolidare un sistema in grado di rispondere efficacemente alle sfide dei nostri giorni, garantendo un futuro sostenibile.



Sistemi Agroalimentari ed Energetici: integrazione e sfide future

Grazie allo sviluppo tecnologico, la filiera agroalimentare oggi può disporre di driver (miglioramento genetico, agricoltura 5.0, digitalizzazione, filiere circolari, fotovoltaico, agrivoltaico e biogas, ecc.) che permettono alle imprese di affrontare la transizione ecologica restando competitive sul mercato, anche nei mutati scenari geopolitici ed economici attuali. La ricerca e l'innovazione ricoprono un ruolo cardine ai fini della crescita del settore, anche nel contesto dello sviluppo del modello dell'economia circolare.

DOI 10.12910/EAI2025-031



di Paolo Mascarino, Presidente di Federalimentare e del Cluster Agrifood Nazionale CL.A.N.

Sfide globali, ricerca e competitività

Il rapporto "Much more than a market" ¹ a cura di Enrico Letta ha introdotto il concetto di Quinta Libertà: la libera circolazione di ricerca, innovazione, istruzione e conoscenza all'interno del Mercato Unico Europeo. Ciò potrebbe tradursi come uno strumento fondamentale per liberare il pieno potenziale dei sistemi alimentari europei promuovendo la collaborazione transfrontaliera e la condivisione delle conoscenze. La Quinta Libertà consentirà all'industria alimentare di sfruttare il patrimonio di dati, competenze e capacità di ricerca dell'Europa. Questo fattore stimolerà la ricerca di frontiera, accelererà l'adozione di innovazioni digitali

e faciliterà lo sviluppo di nuovi modelli di business in grado di rispondere sia alla concorrenza globale che alle esigenze dei consumatori.

Nell'ambito della più ampia strategia europea per l'innovazione, tale Programma promuoverà la mobilità dei ricercatori, facilitando la collaborazione tra esperti di sistemi alimentari e il loro contributo allo sviluppo di nuove tecnologie. Dotando il settore dei più recenti risultati della ricerca e degli strumenti tecnologici più innovativi, l'Europa può costruire un'industria alimentare competitiva, innovativa e resiliente.

Emerge chiaramente come il nuovo contesto politico ed economico stia evolvendo molto velocemente generando impatti su tutte le dimensioni di cui si compone la sostenibilità: am-

bientale, economica e sociale. I costi a cui le imprese alimentari devono far fronte, infatti, sono sempre più alti a causa delle tensioni internazionali, così come le sfide che gli operatori del sistema devono affrontare rispetto agli effetti dei cambiamenti climatici sono molteplici - con l'aumento delle temperature, i suoli impoveriti e la scarsità idrica - e all'aumento della produzione da assicurare in previsione di una popolazione mondiale che raggiungerà i 10 miliardi nel 2050.

L'industria alimentare italiana pone la sostenibilità al centro delle proprie strategie

Grazie allo sviluppo tecnologico, la filiera agroalimentare oggi può disporre di driver (miglioramento genetico, agricoltura 5.0, digitalizzazione, filie-

¹ <https://www.consilium.europa.eu/media/ny3j24sm/much-more-than-a-market-report-by-enrico-letta.pdf>

re circolari, fotovoltaico, agrivoltaico e biogas, ecc.) che permettono alle imprese di affrontare la transizione ecologica restando competitive sul mercato, anche nei mutati scenari geopolitici ed economici attuali.

La ricerca e l'innovazione ricoprono quindi un ruolo cardine ai fini della crescita del settore, anche nel contesto dello sviluppo del modello dell'economia circolare. Per questo Federalimentare ritiene fondamentale incentivare progetti di innovazione che permettano alle imprese di rafforzarsi, e sostenere la ricerca, non solo attraverso lo sviluppo di tecnologie innovative, ma anche promuovendo il passaggio a scala industriale di quelle già esistenti.

Anche il Cluster Agrifood Nazionale CL.A.N. ha fatto propria questa visione nella sua Roadmap strategica² che affronta temi prioritari per il settore³, quali la decarbonizzazione dei sistemi produttivi, il riciclo degli imballaggi, alla luce della grande tradizione tecnologica dell'Italia che da anni sta studiando e sviluppando nuovi materiali per il packaging biodegradabili e compostabili, l'importanza delle Tecniche di Evoluzione Assistita, come il genome editing e la cisgenesi, per migliorare la produttività e la sostenibilità dell'agricoltura e le prospettive tecnologiche legate alle agroenergie. Quest'ultimo tema è affrontato in sinergia con il Cluster Tecnologico Nazionale Energia.

Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha consentito di incentivare riforme e investimenti finalizzati a promuovere la digitalizzazione e l'innovazione delle imprese, anche per quanto riguarda la transizione ecologica nel settore agroalimentare. Grazie ai fondi PNRR sono state finanziate dal MUR quattro piattaforme nazionali agroalimentari con cui

il CL.A.N. ha recentemente sottoscritto, insieme anche al Segretariato Italiano PRIMA, un accordo finalizzato alla costituzione di una **Rete per la Ricerca, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico (ReRITT)** per collegare le accademie e i centri di ricerca alle imprese. L'iniziativa è tesa a promuovere un approccio integrato Ricerca - Impresa che prenda in considerazione diversi aspetti: dall'uso delle risorse all'intensificazione produttiva ecosostenibile, allo sviluppo di processi e prodotti innovativi, fino ad arrivare alle attività di formazione e trasferimento tecnologico per favorire lo scambio di conoscenze tra i diversi attori della filiera.

Le imprese alimentari sono molto attente ai temi "green" per preservare l'ambiente attraverso l'utilizzo consapevole delle risorse e ridurre quanto più possibile l'impatto delle proprie attività. Tale impegno si sviluppa principalmente su quattro ma-

croaree strategiche d'intervento, tutte coerenti coi principi dell'Economia Circolare.

- uso efficiente degli input di base (in primis acqua ed energia, attraverso efficientamento e ottimizzazione dei processi);
- pieno sfruttamento delle materie prime agricole in tutte le loro componenti, che sono destinate all'alimentazione umana, alla mangimistica e ad altre filiere di utilità per valorizzare integralmente le risorse e minimizzare la produzione di rifiuti secondo i principi dell'economia circolare;
- eco-progettazione del packaging e corretta gestione degli imballaggi post-uso;
- prevenzione degli sprechi alimentari.

La sfida energetica

Le imprese alimentari assorbono meno di un decimo dei consumi finali



² <https://clusteragrifood.it/documenti-roadmap/>

³ <https://clusteragrifood.it/documenti-position-papers/>

di energia di tutta l'industria italiana. L'energia è necessaria (soprattutto sotto forma di calore ed energia elettrica) nei processi di produzione, trasformazione, conservazione dei prodotti di origine animale e vegetale e per il funzionamento delle macchine e climatizzazione degli ambienti produttivi e di lavoro.

Il settore sostiene e persegue la promozione della propria efficienza energetica, come importante motore della competitività industriale e soprattutto, come fattore di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Il costo dell'energia in Italia si traduce in uno svantaggio competitivo rispetto a quello pagato dai nostri principali competitor europei (Francia, Germania, Spagna). Il contenimento dei consumi energetici è il risultato sia delle nuove tecnologie che ottimizzano l'impiego dei fattori della produzione sia dell'impegno delle imprese per una maggiore sostenibilità delle produzioni. Non va dimenticato che, a migliorare il bilancio energetico della filiera, ci sono gli investimenti nell'economia circolare con la produzione di bioenergie: dal fotovoltaico sui tetti di capannoni e stabilimenti fino alla valorizzazione dei reflui degli allevamenti con il biogas ed il biometano. In questo contesto il **Piano Transizione 5.0** rappresenta una grande opportunità per il comparto dell'industria che può vedersi riconosciuto

un credito d'imposta nell'ambito di progetti di innovazione rivolti ad una riduzione dei consumi energetici, finalizzati a centrare gli obiettivi di decarbonizzazione e a rendere il settore più sostenibile.

Con questo strumento le imprese hanno la possibilità di avviare un percorso verso un modello energetico sempre più efficiente, con minore impatto ambientale e basato su fonti rinnovabili, rendendo così le aziende più autonome dalle fluttuazioni dei costi dell'energia.

Conclusioni

Il "Rapporto Draghi"⁴ sulla competitività europea ha richiamato la responsabilità degli Stati membri a promuovere sforzi collettivi per colmare il divario di innovazione con gli Stati Uniti e la Cina. Oggi l'Europa si trova inoltre a confronto con la necessità di:

1. **accelerare l'innovazione**, tenuto conto della posizione di forte debolezza dell'UE nelle tecnologie avanzate;
2. **ridurre gli elevati prezzi dell'energia continuando il processo di decarbonizzazione** e il passaggio a un'economia circolare;
3. fare in modo che lo sforzo per la decarbonizzazione sia accompagnato da una **modifica dell'algoritmo europeo che definisce il costo dell'energia** che prevede di pagare tutte le fonti al costo di quella più cara: il gas.

Si tratta del noto concetto del "**disaccoppiamento dal gas**". Senza questa revisione, le imprese e i cittadini non potranno beneficiare del minor costo delle fonti alternative;

4. affrontare la questione delle dipendenze in un mondo caratterizzato da una sempre più forte instabilità geopolitica, dove l'UE non può più fare affidamento su altri per garantire la propria sicurezza.

Il rapporto identifica nell'elevato gap di innovazione una delle principali cause della perdita di competitività europea e dei bassi livelli di produttività. Rispetto agli USA, infatti, che hanno iniettato enormi quantità di risorse verso settori tecnologici ad alto potenziale di crescita della produttività, in Europa gli investimenti sono rimasti concentrati su tecnologie mature e in settori in cui i tassi di crescita della produttività delle imprese di frontiera stanno rallentando.

Riconoscendo la ricerca e l'innovazione come i principali motori della produttività e del benessere, il **rapporto evidenzia l'urgenza di aumentare la spesa privata per la R&S, rafforzare l'efficacia di tale spesa, superare la frammentazione dell'ecosistema dell'innovazione dell'UE e i limiti dell'eccellenza accademica, sviluppare i "cluster di innovazione" e definire un sistema complessivo di finanziamento dell'innovazione più forte e adeguato.**

⁴ https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en

Energia pulita per lo sviluppo agricolo

Produrre il cibo e trasportarlo dal campo alla tavola rappresenta circa il 30% del consumo energetico globale e oltre il 30% delle emissioni di gas serra. Al contempo, la domanda alimentare è in forte crescita, trainata da una popolazione che si prevede raggiungerà i 10 miliardi entro il 2050. Ciò richiede un cambiamento radicale nel modo in cui il cibo viene prodotto, trasformato e consumato. La sfida è duplice: adottare soluzioni energetiche più sostenibili nel settore agricolo e incrementare la produzione per garantire la sicurezza alimentare per tutti.

DOI 10.12910/EAI2025-032



di Maria Michela Morese, Funzionario Senior delle Risorse Naturali e Responsabile del Team Energia, Ufficio per il Cambiamento Climatico, la Biodiversità e l'Ambiente della FAO

Le conseguenze incalzanti del cambiamento climatico sono un promemoria urgente: una transizione energetica rapida e su larga scala è essenziale. In questa transizione, l'energia rinnovabile offre una soluzione immediata ma anche a lungo termine per garantire l'accesso universale all'energia pulita, sostenendo al contempo lo sforzo globale per la decarbonizzazione delle economie.

I sistemi agroalimentari sono estremamente vulnerabili ai cambiamenti climatici, responsabili in media del 23% dell'impatto totale¹ dei disastri tra il 2007 e il 2022. L'energia è necessaria in ogni fase dei sistemi agroalimentari, ma la dipendenza dell'agricoltura e dei sistemi alimentari dai combustibili fossili contribuisce in modo significativo alle emissioni di gas serra (GHG). Produrre il cibo

e trasportarlo dal campo alla tavola rappresenta, a livello mondiale, circa il 30% del consumo energetico globale e oltre il 30% delle emissioni di gas serra. Al contempo, la domanda alimentare è in forte crescita, trainata da una popolazione mondiale in aumento che si prevede raggiungerà i 10 miliardi entro il 2050.

Un cambiamento radicale nel modo in cui il cibo viene prodotto, trasformato e consumato

La sfida è duplice: adottare soluzioni energetiche più sostenibili nel settore agricolo e, nello stesso tempo, incrementare la produzione per garantire la sicurezza alimentare per tutti. **Affrontare tale sfida richiede un cambiamento radicale nel modo in cui il cibo viene prodotto, trasformato e consumato.** Non possiamo

nutrire una popolazione in crescita e raggiungere parallelamente gli obiettivi climatici senza trasformare i nostri sistemi agroalimentari per renderli più efficienti, sostenibili e adattabili. Il passaggio a fonti energetiche più sostenibili e rinnovabili è un elemento chiave di questa trasformazione. Senza di essa, la decarbonizzazione entro la metà del secolo non sarà possibile.

I sistemi agroalimentari energeticamente intelligenti possono affrontare contemporaneamente sia la crisi alimentare che quella climatica, promuovendo la produzione e il consumo sostenibili, diversificando le fonti di reddito per gli agricoltori e consentendo un utilizzo efficiente dei rifiuti attraverso modelli di economia circolare. E l'opportunità di accedere a servizi e tecnologie che forniscono energia pulita deve essere accessibi-

¹ <https://openknowledge.fao.org/items/cd76116f-0269-43e4-8146-d912329f411c>

le a tutti coloro che ne hanno bisogno per prosperare. Questo è la nostra visione di "transizione energetica equa e giusta".

Investire in sistemi agroalimentari sostenibili ed energeticamente intelligenti non giova solo al pianeta, ma anche alle persone e all'economia. Aiuta agricoltori, pescatori e molti altri piccoli produttori ad adattarsi ai cambiamenti climatici, contribuisce a creare posti di lavoro nel settore energetico e a produrre prodotti alimentari di qualità superiore, migliorando al contempo la nutrizione e la salute. Vi sono chiari vantaggi economici e strategici per farlo.

Uno di queste è l'impiego di soluzioni energetiche rinnovabili per contrastare lo spreco alimentare. In un mondo in cui oltre 3 miliardi di persone non possono permettersi cibo sano, ogni anno vengono perse più di 526 milioni di tonnellate di cibo a causa della mancanza di sistemi di refrigerazione affidabili. Quando

il cibo avariato finisce in discarica, anche le risorse e l'energia utilizzate per la sua produzione vengono sprecate e il suo impatto climatico viene amplificato. Se lo spreco alimentare fosse un Paese, sarebbe il terzo maggiore emettitore di gas serra. **L'utilizzo di energia pulita, affidabile e conveniente per mantenere la catena del freddo lungo tutta la filiera alimentare contribuirà a contrastare lo spreco alimentare, aumentando al contempo gli utili.**

Conseguenze disastrose per la salute

Un altro esempio è la lotta all'inquinamento atmosferico e all'impatto sulla salute causati da metodi di cottura inquinanti. Circa 2,1 miliardi di persone nel mondo non hanno accesso a combustibili e tecnologie non inquinanti per cucinare, e devono fare affidamento sui combustibili tradizionali, con conseguenze disastrose per la loro salute. Donne e bambini

sono colpiti in modo sproporzionato, trascorrendo fino a 20 ore a settimana a raccogliere la legna per la preparazione dei pasti, tempo che viene sottratto alla loro istruzione, al lavoro retribuito e al loro benessere. **Ampliare l'accesso all'energia pulita, sia per la catena del freddo che per la cottura, potrebbe migliorare l'alimentazione e la salute di centinaia di milioni di famiglie, rallentare il cambiamento climatico, promuovere la parità di genere e ridurre la povertà.**

La FAO collabora con Paesi e partner per accelerare l'attuazione pratica di sistemi agroalimentari energeticamente intelligenti in tutto il mondo. Le nostre valutazioni hanno contribuito a identificare opportunità di produzione di energia rinnovabile e di riduzione delle emissioni di gas serra, attraverso lo sfruttamento di residui agricoli provenienti da fonti sostenibili:

- In **Uzbekistan** gli impianti solari ed eolici potrebbero generare fino a 240



TWh di elettricità all'anno, sufficienti a soddisfare la domanda energetica nazionale prevista entro il 2030, con un risparmio annuale di 110.000 tonnellate di CO₂eq.

- Nello stato Indiano del **Punjab**, l'utilizzo del 30% della paglia di riso, attualmente bruciata nei campi, potrebbe produrre notevoli quantità di bioenergia: 7,1 milioni di tonnellate di pellet, o quasi 2 miliardi di litri di etanolo di seconda generazione, e circa 714 tonnellate di biogas compresso. Tali iniziative contribuirebbero a ridurre le emissioni di gas serra e l'inquinamento causato dalla combustione delle colture e a creare ulteriori fonti di reddito per gli agricoltori.
- In **Ruanda**, la bioenergia da residui agricoli sostenibili potrebbe migliorare del 33% l'accesso a combustibili puliti per cucinare.
- Il **Vietnam** potrebbe ridurre le emissioni fino al 38% ricavando etanolo dalla manioca e fino al 42% utilizzando biogas derivato dal letame suino. Analogamente, in **Paraguay**, ricavare etanolo dalla canna da zucchero potrebbe ridurre le emissioni di gas serra fino al 40%.
- Nelle **Isole Salomone** e in **Gambia**, la FAO ha individuato opportunità per trasformare rifiuti organici, come liquami e residui agricoli, in energia pulita. Allo stesso tempo, collaboriamo con i partner sul territorio per implementare soluzioni che sfruttino il potenziale dei sistemi agroalimentari energeticamente intelligenti.
- In **Cambogia** e **Vietnam**, la FAO sta utilizzando l'intelligenza artificiale e

strumenti geospaziali per calcolare in tempo reale la disponibilità di residui agricoli per il biochar, ottimizzando l'uso del suolo, aumentando l'utilizzo dei residui agricoli e sostenendo investimenti nella bioenergia.

- L'Organizzazione lancerà presto un progetto agrivoltaico in **Giamaica** e un sistema fotovoltaico galleggiante in **Giordania** per integrare i sistemi alimentari ed energetici. Il primo combinerà la produzione agricola con l'energia solare per migliorare l'uso del suolo e diversificare le fonti energetiche, mentre il secondo alimenterà l'irrigazione e ridurrà l'evaporazione dai bacini idrici.

Questi esempi dimostrano come i sistemi agroalimentari energeticamente intelligenti siano fondamentali per affrontare la crisi alimentare e quella climatica. Le soluzioni agroalimentari energeticamente intelligenti dovranno crescere rapidamente e su larga scala per trasformare le filiere agroalimentari e raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi.

A tal fine, è necessario integrare le soluzioni per il sistema agroalimentare negli impegni climatici nazionali e internazionali e garantire finanziamenti adeguati a tali soluzioni. L'analisi della FAO² evidenzia la necessità per i governi nazionali di incrementare di almeno sei volte i finanziamenti climatici destinati ai sistemi agroalimentari rispetto ai contributi determinati a livello nazionale. Il settore rimane gravemente sottofinanziato³, ricevendo meno del 5% dei finanzia-

menti globali per il clima registrati nel 2019-20. **Destinare risorse ai sistemi agroalimentari e alle comunità agricole è vitale per sbloccare soluzioni per il sistema agroalimentare che siano a beneficio delle persone e del pianeta.**

Da oltre vent'anni, la FAO promuove l'accesso a un'energia moderna e sostenibile come pilastro fondamentale per trasformare i sistemi agroalimentari e renderli più efficienti, più inclusivi, più resilienti e più sostenibili. Questo approccio è guidato dalla Strategia della FAO sul cambiamento climatico⁴, ed è in linea con la sua missione di raggiungere le "Four Betters", quattro aree di intervento e miglioramento individuate dalla FAO: produzione migliore, nutrizione migliore, ambiente migliore, vita migliore per tutti, nessuno escluso. I progetti e le iniziative globali, regionali, nazionali e locali della FAO sono concepiti per aiutare ogni Paese a raggiungere i propri obiettivi in materia di azione per il clima e sviluppo sostenibile, fornendo consulenza strategica, assistenza tecnica e sostegno finanziario.

Ma il successo dipende da un'azione collettiva e globale.

Di fronte alle sfide che ci attendono, dobbiamo rinnovare il nostro impegno comune per un'agricoltura energeticamente intelligente, per aprire la strada a un futuro in cui l'energia pulita alimenti opportunità, crescita e sviluppo sostenibile.

² <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1735986/>

³ <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1735986/>

⁴ <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f6270800-ee7-498f-9887-6d937c4f575a/content>

Agricoltura di precisione, innovazione digitale ed energia

L'innovazione digitale ha contribuito a fare evolvere l'AP verso l'agricoltura 4.0, dando la possibilità, grazie a tecnologie smart, di gestire in modo sostenibile l'intera filiera agroalimentare. Un grande apporto è dato dall'impiego dell'intelligenza artificiale (IA), cioè della tecnologia che consente, grazie ad algoritmi avanzati e alla elevata capacità di calcolo, di interpretare, processare grandi quantità di dati (Big Data) e di produrre in tempo reale le soluzioni richieste.

DOI 10.12910/EAI2025-033



di Pietro Piccarolo - Accademia dei Georgofili

L'agricoltura di precisione (AP), rappresenta un modo di gestire i processi produttivi agricoli, attraverso la razionale gestione agronomica attuata sulla base della variabilità spaziale e temporale del suolo e delle colture.

Per questo si parla di un'agricoltura "sito specifica", cioè di una forma di gestione agronomica nella quale singole aree di uno stesso appezzamento e le colture presenti, vengono trattate come specifiche unità in funzione delle loro esigenze agronomiche, culturali e sanitarie.

Questo significa intervenire con tecniche gestionali mirate in modo da potere ottenere le stesse produzioni, od anche superiori, con minor consumo di risorse.

Sviluppo dell'Agricoltura di precisione

L'applicazione dell'Agricoltura di precisione si basa su cinque pilastri, in ciascuno dei quali l'innovazione è in continuo progresso:

- mecatronica (meccanica + elettronica) montata sul trattore e sulle macchine operatrici;
- sistemi di posizionamento geografico satellitare (GPS);
- rete di sensori e telecamere sia di prossimità che da remoto, per la rilevazione di immagini e dati ambientali, agronomici, sanitari, ecc.;
- software gestionali in grado di interpretare i dati provenienti dalle diverse fonti e di elaborare mappe e modelli gestionali;
- sistemi di connettività anche intermodale con tecnologie fortemente abilitanti.

Lo sviluppo dell'innovazione in questi singoli pilastri si traduce in una evoluzione dell'AP verso quella che viene definita agricoltura 4.0. In questi passaggi si distinguono step successivi, caratterizzati da un diverso livello tecnologico e di innovazione.

Un primo step, consentito dalla mecatronica e dal sistema di posizionamento satellitare della macchina abbinato al segnale RTK, è la **guida parallela, assistita**. E' così possibile ottenere il parallelismo nei passaggi contigui della macchina ed evitare le sovrapposizioni, ottenendo un aumento della capacità di lavoro.

Step successivi riguardano **crescenti livelli di evoluzione tecnologica nell'esecuzione delle diverse operazioni**.

Un esempio è dato dalla mappatura della produzione di un appezzamento che può essere fatta, da remoto (satelliti, piattaforme aeree, droni) o

direttamente in fase di raccolta attraverso un'analisi quantitativa, con sensori che misurano il flusso di prodotto, e anche qualitativa, con sensori in grado di rilevare le principali caratteristiche merceologiche del prodotto (Vis-Nir, rifrattometri, ecc.).

L'importanza del rateo variabile

Un'applicazione importante dell'AP è il rateo variabile, cioè la erogazione di un dato input, variabile in funzione di determinati parametri in specifiche operazioni, quali la semina, l'irrigazione, la concimazione, il diserbo, il trattamento fitosanitario. Può essere eseguito con mappe di prescrizione o in real-time. Nel primo caso si utilizzano informazioni acquisite prima dell'intervento; nel real-time invece si hanno sensori che consentono di regolare i tassi di applicazione durante l'avanzamento della macchina nello stesso istante in cui i dati vengono rilevati. Nella concimazione azotata in copertura con la tecnica del rateo variabile, ad esempio, si utilizzano sensori che forniscono l'indice vegetativo della coltura (NDVI), in funzione del quale viene regolata la dose di fertilizzante. **Il rateo variabile è una tecnica sempre più utilizzata in quanto consente una riduzione degli input veramente significativa.** Dalle sperimentazioni condotte risulta che mediamente si ottiene una riduzione del 10-20% di fertilizzante, del 10% circa di semente, e sino al 50% dei diserbanti.

Un'altra applicazione significativa legata alla geolocalizzazione delle macchine è rappresentata dal **Fleet management, messo a punto da alcune case costruttrici.** Si tratta di un sistema telematico che, grazie ai protocolli di comunicazione, consente di monitorare una flotta di macchine che operano anche a distanza tra loro, acquisendo in tempo reale i dati operativi delle stesse (spostamenti,

ore di lavoro, consumi di combustibile, ecc.), in modo da potere valutare le performance delle macchine e l'efficienza delle lavorazioni.

Nell'evoluzione dell'AP un ruolo importante è ricoperto dai droni di cui, negli ultimi anni, è aumentato l'impiego non solo per il monitoraggio e l'acquisizione di informazioni (dati e immagini) ma anche per svolgere diverse operazioni. Dai droni impiegati in pieno campo nella lotta contro la piralide e da quelli utilizzati in serra per l'allontanamento di insetti nocivi, si è passati ai droni impegnati a eseguire operazioni di precisione, compreso il rateo variabile. Non per i trattamenti fitosanitari, in quanto la legislazione europea, erroneamente, li equipara ai trattamenti aerei convenzionali.

Innovazione digitale

L'innovazione digitale ha contribuito a fare evolvere l'AP verso l'agricoltura 4.0, dando la possibilità, grazie a tecnologie smart, di gestire in modo sostenibile l'intera filiera agroalimentare. Un grande apporto è dato dall'impiego dell'intelligenza artificiale (IA), cioè della tecnologia che consente, grazie ad algoritmi avanzati e alla elevata capacità di calcolo, di interpretare, processare grandi quantità di dati (Big Data) e di produrre in tempo reale le soluzioni richieste. Oggi l'IA rappresenta il più grande concept per la creazione di macchine intelligenti. **Il suo utilizzo, attuato con le tecnologie abilitanti appropriate, porta a grandi cambiamenti in diversi settori della società.** **E' uno strumento certamente utile anche per il mondo agricolo che va perseguito, ma che richiede di saperlo usare correttamente; anzitutto richiede formazione e competenze specifiche. Le tecnologie abilitanti più appropriate sono: Internet of Thing (IoT), Machine Learning (ML) e Deep Learning (DL), Digital Twin.**

L'Internet of Thing (IoT), cioè l'internet delle cose, è la tecnologia che permette di collegarsi alla rete Internet, per cui il mondo della tecnologia e dell'informazione si integra strettamente con il mondo reale. Oltre monitorare i vari processi rendendo in continuo disponibile i dati, consente, attraverso l'IA, di generare prodotti intelligenti con capacità decisionale. Nel caso delle **Machine Learning (ML),** l'IA addestra la macchina ad imparare e questa aumenta l'apprendimento con l'esperienza (apprendimento automatico), senza bisogno di essere programmata. Ne consegue che con l'apprendimento automatico si può arrivare ad imitare il comportamento e l'intelligenza umana. Le ML non sono altro che una componente dell'IA. Con queste macchine è così possibile, ad esempio, l'identificazione automatica di specie infestanti sulla base dei loro parametri di forma e colore, attuando di conseguenza il diserbo selettivo senza essere state programmate. Ancora più avanzate sono le **Deep Learning (DL),** che attuano l'apprendimento approfondito tramite reti neurali artificiali. Macchine cioè in grado di eseguire operazioni in modo simile a quelle compiute dall'uomo escludendo il coinvolgimento diretto.

Il **Digital Twin,** cioè il gemello digitale, consiste nella rappresentazione virtuale di un'entità fisica reale (macchina, animale, operazione, impianto, ecc.), per cui, grazie all'IA e a tecnologie come IoT, è possibile attuare, sulla base del comportamento del gemello virtuale, valutazioni e anche analisi predictive sull'entità reale. Nel caso, ad esempio di un trattore che ha avuto un guasto durante l'impiego, essendo i dispositivi di monitoraggio inseriti nella macchina reale, i dati monitorati vengono in real time trasmessi al trattore gemello virtuale per consentirne l'interpretazione e trovare la soluzione al problema.

Essendo la trasmissione continua il guasto può essere anche prevenuto.

Robotica e difficoltà nella diffusione

L'innovazione delle macchine autonome ha portato alla costruzione dei robot agricoli. Sempre più sono i prodotti presentati dalle case costruttrici, sia per ambienti strutturati (serre, stalle) che per l'utilizzo in pieno campo, sia dallo spazio aereo (droni) che a terra (farmbot). I settori interessati sono i più diversi. Si va dalle operazioni in pieno campo di colture specializzate, all'impiego in vigneto e frutteto. Lo sviluppo avviene secondo tre direttrici: automazione di macchine esistenti; alta specializzazione per determinate operazioni; porta-attrezzi versatili. La navigazione in pieno campo è affidata ai dispositivi satellitari (GPS e RTK) a cui possono essere aggiunti dispositivi laser tipo LiDAR, scanner a onde radio, bumper (paraurti) e telecamere 3D o stereoscopiche per la visione, mentre quella in filari può anche essere assegnata a sistemi di navigazione indipendenti da quella satellitare. L'integrazione tra robotica e IA sta rivoluzionando il modo con cui i robot vengono realizzati.

A fronte di queste innovazioni, la fotografia dello stato dell'arte rivela che il parco macchine nazionale è molto obsoleto (vedi UNACOMA), mentre le tecnologie smart stentano a penetrare. Infatti, i dati dell'Osservatorio Smart AgriFood del Politecnico di Milano evidenziano che le aziende che hanno iniziato a investire in alta tecnologia sono solo il 41% del

totale. Un aiuto agli agricoltori a prendere decisioni informate viene dai **DSS**, cioè dai sistemi di supporto alle decisioni che sempre più si avvalgono delle moderne tecnologie digitali. La blockchain invece, è una tecnologia digitale che consente la tracciabilità della filiera agroalimentare a valle dell'agricoltura, non attraverso la gestione centralizzata dei dati, ma tramite la successione di blocchi di dati criptografati (nascosti) collegati tra loro e disponibili solo per gli attori della filiera. Garantisce così l'origine del prodotto evitando le contraffazioni.

L'energia

Quello dell'IA con le rispettive tecnologie abilitanti, per l'elevata capacità di calcolo, è un settore fortemente energivoro. Le stime, pur con ampio margine di incertezza, prevedono un consumo in forte crescita. Nella robotica, ma non solo, l'opzione elettrica diventa un'opzione sempre più diffusa, non solamente perché la propulsione elettrica comporta maggiore efficienza e assenza di emissioni gassose inquinanti, ma anche mezzi più compatti, leggeri e maneggevoli. Quindi una maggiore spesa di energia elettrica, a cui occorre far fronte potenziando le infrastrutture, ricorrendo a macchine in grado di autoalimentarsi, ad esempio con pannelli fotovoltaici, e realizzando soluzioni in loco basate sulle energie rinnovabili, al servizio non solo aziendale ma anche collettivo.

Già oggi la produzione nazionale di energia elettrica con fonti rinnovabili dell'agricoltura è significativa.

Il primo rapporto dell'Osservatorio sulle Agroenergie di Confagricoltura, realizzato con il sostegno dell'Enel, attesta che la **capacità installata è di ben 5 GW**, da cui deriva un contributo alla produzione di energia rinnovabile nazionale dell'ordine dell'11%. La fonte principale è il fotovoltaico con un'incidenza sul totale del 60%, mentre le bioenergie (vedi ITABIA) concorrono per il 38%. La prospettiva è per un'ulteriore significativo incremento entro il 2030. In questo orizzonte un ruolo importante può essere giocato dall'agrivoltaico (vedi Amaducci), attuato sui terreni agricoli e anche su terre e superfici non di aziende agricole.

Da un'indagine su 3536 aziende agricole riferita al 2024 nell'ambito del progetto "Agricoltura100" (Confagricoltura-Reale Mutua), risulta che il 18,6% delle imprese agricole produce energia con fonti rinnovabili, in modo autonomo o partecipando ad attività consortili di produzione energetica. Nel 46,6% di queste aziende l'autoproduzione copre almeno la metà del fabbisogno aziendale. Per quanto attiene l'utilizzo dell'energia prodotta, nel 32,2% delle aziende si ha l'autoconsumo, mentre nel 56,6% l'utilizzazione è mista (autoconsumo e vendita), senza prevalenza dell'una e dell'altra.

Per implementare la produzione di energia da fonti rinnovabili, sempre più attenzione e sostegno andrebbe rivolto alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), per le quali il ruolo dell'agricoltura nella gestione consortile potrebbe ulteriormente crescere.

La biomassa forestale: una risorsa importante per la bioeconomia e la transizione energetica

Le bioenergie - che l'IEA qualche anno fa ha definito "Il gigante trascurato nel campo delle energie rinnovabili" - rappresentano oggi la fonte rinnovabile che fornisce il maggior contributo ai consumi energetici finali a livello europeo e nel nostro Paese. La ragione principale di questo risiede nel fatto che la bioenergia è l'unica tra tutte le FER in grado di soddisfare le richieste di energia sotto forma di elettricità, calore e carburanti per i trasporti.

DOI 10.12910/EAI2025-034



di Vito Pignatelli, Presidente ITABIA
e Matteo Monni -Vice Presidente ITABIA, Italian Biomass Association

Come affermato nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza ^[1], scienza e modelli analitici dimostrano inequivocabilmente come il cambiamento climatico sia in corso, accelerando importanti trasformazioni dell'ecosistema e rendendo fenomeni estremi sempre più frequenti e acuti. Pur essendo l'ulteriore aumento del riscaldamento globale ormai inevitabile, è assolutamente necessario intervenire il prima possibile per mitigare questi fenomeni ed impedire il loro peggioramento.

Per intervenire e contrastare in modo efficace il riscaldamento globale serve una radicale transizione ecologica verso la completa neutralità climatica e lo sviluppo ambientale sostenibile, che limiti quanto più possibile le emissioni in atmosfera di CO₂ e altri gas climalteranti. Questo richiede l'adozione di strategie e

la definizione di obiettivi molto ambiziosi a livello globale ed europeo (es. Sustainable Development Goals, obiettivi Accordo di Parigi, European Green Deal) che puntino ad una progressiva e completa decarbonizzazione del sistema ('Net-Zero') e a rafforzare l'adozione di soluzioni di economia circolare, per proteggere la natura e le biodiversità e garantire un sistema alimentare equo, sano e rispettoso dell'ambiente.

Più in particolare, nell'ambito del Green Deal, la Commissione Europea ha adottato una serie di proposte per trasformare le politiche dell'UE in materia di clima, energia, trasporti e fiscalità in modo da ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 ^[2] e, in questo quadro, assume un ruolo decisivo lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili (FER) con la progressiva riduzione dell'u-

so di combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale) principali responsabili delle emissioni di CO₂.

Nel marzo 2023 l'UE ha concordato una legislazione più rigorosa per aumentare la propria capacità di produzione di energia rinnovabile, innalzando al 42,5% l'obiettivo minimo vincolante per il 2030 rispetto a quello attuale del 32%, con l'ambizione di raggiungere il 45%, il che corrisponderebbe quasi a raddoppiare la quota attuale di energie rinnovabili nell'UE.

Promuovere lo sviluppo di tutte le fonti rinnovabili

Per raggiungere questo obiettivo sarà necessario promuovere lo sviluppo di tutte le fonti rinnovabili, non solo di quelle che producono elettricità, ma anche per quel che riguarda l'energia termica (calore per riscaldamento e raffrescamento domestico e calore ad alta temperatura per usi

industriali) e quella consumata per i trasporti, e, in questa prospettiva, le bioenergie, intese come l'insieme di tecnologie utilizzabili per la produzione di energia o vettori energetici (combustibili e carburanti) a partire dalle biomasse, rivestono un'importanza fondamentale.

Quella delle biomasse è una categoria molto ampia, che include ogni sostanza organica di origine biologica, in forma non fossile, prodotta direttamente o indirettamente dalla fotosintesi e impiegabile per la produzione di energia o come materia prima nella biobased industry. Si tratta di una risorsa rinnovabile e ampiamente disponibile, sia sotto forma di residui (forestali, agricoli, industriali o civili) che di produzioni agro-forestali da coltivazioni dedicate, che, in funzione delle caratteristiche intrinseche, può essere destinata a diversi processi di trasformazione.

In ogni caso, le bioenergie - che qualche anno fa furono definite dall'IEA "Il gigante trascurato nel campo delle energie rinnovabili" [3] - rappresentano oggi la fonte energetica rinnovabile che fornisce il maggior contributo ai consumi energetici finali a livello europeo e nel nostro Paese, e la ragione principale di questo risiede nel fatto che la bioenergia è l'unica tra tutte le FER in grado di soddisfare le richieste di energia sotto forma di elettricità, calore e carburanti per i trasporti.

In particolare, soprattutto per quel che riguarda i consumi di energia per il riscaldamento (e il raffrescamento), che rappresentano più della metà dei consumi totali, il contributo della biomassa è fondamentale, come si può vedere dai grafici riportati in figura 1, ricavati dall'elaborazione di dati statistici di fonte EurObserv'ER [4]. Si può quindi affermare senza alcuna esitazione che, senza le biomasse, l'obiettivo di arrivare nel 2030 a ridurre del

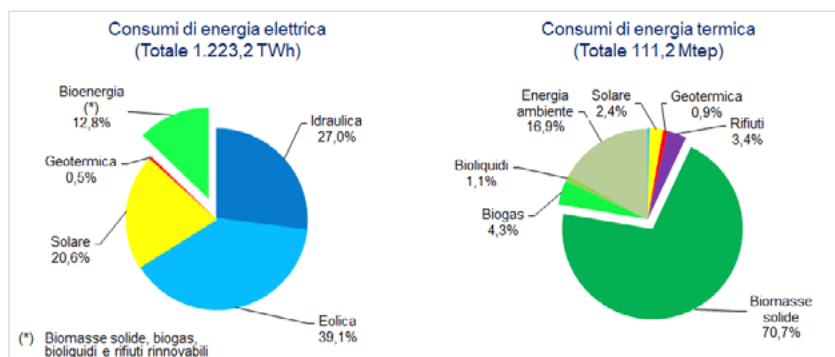


Figura 1 - Consumi di energia dalle diverse FER nella UE 27 (2023)

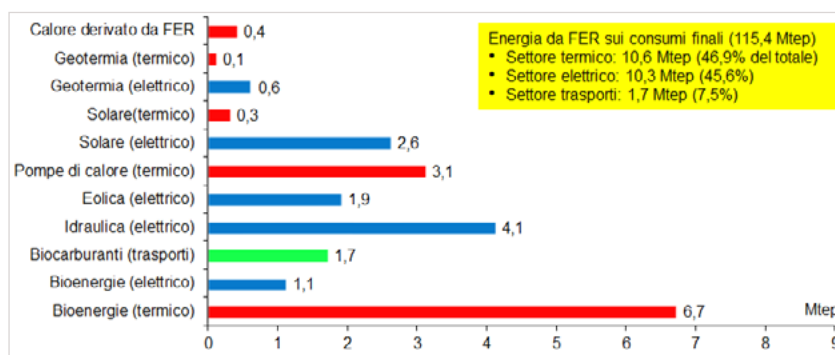


Figura 2 - Contributo delle diverse fonti rinnovabili ai consumi finali lordi di energia in Italia nel 2023

55% le emissioni di gas ad effetto serra attraverso la crescita delle energie rinnovabili è del tutto irrealizzabile.

In Italia, in accordo con le rilevazioni statistiche del GSE [5], la bioenergia copre nel 2023 il 42% del consumo finale lordo di energia rinnovabile e l'8,2% dei consumi totali, con un contributo significativo sia per quel che riguarda la produzione di energia termica che sotto forma di biocarburanti, che rappresentano e rappresentano ancora per molti anni l'opzione più importante per contribuire alla decarbonizzazione del settore dei trasporti, come mostrato in figura 2, frutto dell'elaborazione grafica di dati statistici di fonte GSE [5].

Programmabilità e versatilità

Nel nostro Paese, la produzione di energia dalle biomasse può conta-

re su tecnologie mature e un solido retroterra industriale, costituito da migliaia di impianti, in gran parte di taglia medio-piccola, presenti sull'intero territorio nazionale ed è una componente fondamentale sia del mix energetico odierno che di quello tendenziale. La **programmabilità e la versatilità** di questa fonte la rendono funzionale alla transizione verso un modello di generazione sempre più rinnovabile e partecipato dai consumatori.

I benefici ambientali della bioenergia sono altrettanto notevoli e richiedono di essere analizzati con specifico riferimento alle materie prime e alle tecnologie di conversione utilizzate. La bioenergia è infatti una **fonte rinnovabile continua e programmabile, ma non inesauribile**, e questo vuol dire che è necessario utilizzare le risorse



Figura 3 - Impianto di cogenerazione a biomasse di Calenzano (FI) della Biogenera S.r.l.

di biomassa con un ritmo di prelievo tale da permettere ai cicli naturali di ricostituire, senza alterare gli ecosistemi e, soprattutto, senza entrare in conflitto con la produzione di alimenti e mangimi per l'uso del suolo agricolo o la destinazione d'uso dei prodotti: in altre parole, l'uso delle biomasse a fini energetici ha un senso solo se pienamente "sostenibile".

I principali ambiti di provenienza delle biomasse per la produzione di energia sono i settori agricolo (inclusa la zootecnia), forestale e agroindustriale. Importante - anche se caratterizzato da aspetti e problematiche specifici - è anche il contributo legato alla gestione dei rifiuti urbani e, in misura molto minore, industriali.

In Italia il settore agricolo e forestale contribuisce solo per il 2,6% ai consumi finali di energia [6], ma, negli ultimi anni, è diventato uno dei maggiori produttori di energia dalle varie

fonti rinnovabili (in particolare bioenergie e fotovoltaico), al punto che, nel caso specifico, è stato coniato ed è ampiamente utilizzato il termine "agroenergie", associato ad una molteplicità di impianti di diverse tipologie e dimensioni distribuiti sull'intero territorio nazionale.

Un elemento di importanza fondamentale in qualsiasi iniziativa per la produzione di bioenergia è indubbiamente la filiera di approvvigionamento della biomassa che, sia per gli impianti a biogas che per quelli alimentati da biomasse legnose per la cogenerazione di elettricità e calore (come l'impianto di cogenerazione di Calenzano (FI) della società Biogenera S.r.l, mostrato in figura 3), determina le dimensioni ottimali dell'impianto. Le dimensioni ridotte (dell'ordine del MW o meno di potenza elettrica installata), oltre a rendere possibile l'approvvigionamento della

biomassa in ambito locale, facilitano l'utilizzazione del calore prodotto dai cogeneratori, specie per applicazioni in ambito agricolo/zootecnico (riscaldamento di serre, stalle ed edifici rurali, essiccazione di prodotti agricoli e, in qualche caso, produzione di pellet).

Dalla legna il contributo maggiore ai consumi energetici nazionale

Fra le diverse tipologie di biomassa per la produzione di energia, quella maggiormente diffusa è la biomassa legnosa, sotto forma di biocombustibili solidi (legna da ardere, cippato, pellet, carbone di legna). In Italia, i consumi totali di biocombustibili solidi nel settore termico ammontavano nel 2023 a 6,57 Mtep, di cui 5,99 Mtep (91,2%) per riscaldamento domestico, come si può vedere dalla tabella 1 [5]. In sostanza, fra tutte le fonti energetiche rinnovabili, la legna è quella che fornisce, in termini assoluti, il contributo maggiore ai consumi energetici nel nostro Paese.

La biomassa legnosa utilizzata in Italia è per la maggior parte di origine forestale, anche se non mancano alcuni esempi interessanti (e virtuosi, come nel caso della centrale a biomasse della società Fiusis S.r.l. di Calimera (LE), alimentata esclusivamente con potature ed espanti degli uliveti locali e premiata nel 2019 con il Rural Business Innovation Award come miglior esempio europeo della categoria Bio-based value chains [7]) di impiego di biomasse di origine agricola. Di conseguenza, la produzione di bioenergia è in larga parte legata al patrimonio boschivo e la sua sostenibilità è legata, in ultima analisi, all'adozione delle migliori pratiche disponibili per una corretta gestione del patrimonio boschivo.

I boschi, che nel 2020 coprivano nel mondo 4.060 milioni di ha, pari al 31%

Settore	Consumi energetici (ktep)
Consumi diretti	6.627
Residenziale	5.996
Commercio e servizi	80
Industria	515
Agricoltura	35
Produzione di calore derivato	336
Da impianti cogenerativi	250
Da impianti di sola produzione termica	85
Totale	6.963

Tabella 1 - Impieghi di biocombustibili solidi per la produzione di calore in Italia (2023)

della superficie terrestre mondiale ^[8]), sono una componente importante del patrimonio naturale di una nazione e costituiscono, nelle loro diverse tipologie (dalla foresta boreale ai boschi montani delle aree temperate, fino alle foreste pluviali e tropicali) una preziosa riserva di biodiversità, contribuendo in modo fondamentale alla tutela dell'ecosistema mondiale grazie alla loro capacità di assorbire e rimuovere CO₂ dall'atmosfera immagazzinandola nella biomassa e, in modo permanente, nel suolo. Gli alberi sono inoltre, con le loro radici, un efficace presidio contro l'erosione e la degradazione dei suoli, specie nelle aree montane.

Una corretta gestione e manutenzione del bosco riveste pertanto un ruolo importante nell'ambito della bioeconomia e della transizione ecologica perché può fornire energia rinnovabile sotto forma di biocombustibili, biomateriali (legname per costruzioni e manifattura, cellulosa per l'industria cartaria, tessile e chimica) e prodotti alimentari di pregio (tartufi, funghi, castagne, frutti di bosco ecc.).

Il patrimonio forestale dell'Italia copre complessivamente circa 11 milioni di ettari (di cui 3,5 milioni inseriti in aree protette), pari al 36,4% dell'intera superficie nazionale. La superficie forestale nazionale è aumentata del 72,6% dal 1936 al 2015, principalmente a seguito della ricolonizzazione spontanea di terre agricole e pascolive abbandonate ^[9]).

Nonostante la presenza di un consistente patrimonio forestale, i prelievi legnosi interessano all'incirca il 18-37% degli accrescimenti annui di biomassa (media dell'Europa meridionale: 62-67%). La produzione annua media della selvicoltura nazionale negli anni 2000-2015 si può stimare intorno agli 8 milioni di m³, corrispondenti approssimativamente a 5-6 mi-

lioni di tonnellate, di cui il 60% circa è legna da ardere.

Opportunità di sviluppo del comparto forestale

Per dare un'idea delle opportunità di sviluppo del comparto forestale italiano, è opportuno sottolineare che la produzione nazionale di biomassa da operazioni di silvicoltura è stimata intorno ai 4-5 milioni di t/anno, mentre invece i consumi stimati per il solo riscaldamento domestico sono dell'ordine dei 16-17 milioni di t/anno, considerando un consumo sostanzialmente costante rispetto al dato ufficiale dell'ultima indagine ISTAT relativa agli anni 2020-2021 ^[10].

Ovviamente, lo sviluppo di questo comparto (e dell'industria ad esso collegata, a partire dai produttori di macchinario forestale e di macchine per la lavorazione del legno) è direttamente legato alla definizione di una strategia chiara e coerente di promozione della valorizzazione energetica e industriale delle biomasse. A tale riguardo, però, gli obiettivi stabiliti per il 2030 dal Piano nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) non sembrano essere particolarmente ambiziosi.

Infatti, per quel che riguarda la bioenergia nel suo complesso, a fronte di un aumento previsto della potenza installata degli impianti a fonti rinnovabili dai 57.979 MW del 2021 ai 131.043 MW del 2030, l'ultima versione del PNIEC del giugno 2024 prevede una significativa riduzione della potenza elettrica installata, dai 4.106 MW del 2021 ai 3.240 MW nel 2030 ^[11].

Questa riduzione è dovuta a due principali fattori:

- Il previsto phasing out dei grandi impianti per la produzione di elettricità da biomasse legnose e/o bioliquidi (per il divieto di utilizzare l'olio di palma e i suoi derivati), sostituiti progressivamente da impianti cogenerativi più

piccoli alimentati da filiere locali di approvvigionamento (potature, manutenzione del bosco o colture dedicate per gli impianti a biomassa e oli vegetali certificati di produzione nazionale per quelli a bioliquidi). Per quel che riguarda in particolare gli impianti alimentati a biomasse legnose, si tratta della prosecuzione di un trend consolidato, che ha visto la dimensione media degli impianti ridursi dai 6,7 MW del 2010 ai 2 MW del 2023 ^[12];

- La prevista riconversione di numerosi impianti a biogas dalla produzione elettrica a quella di biometano.

Per quel che riguarda invece il futuro delle biomasse per la produzione di calore, nel quadro più generale di una riduzione complessiva dei consumi finali lordi di energia per il settore termico (da 57,07 Mtep nel 2021 a 49,16 Mtep nel 2030), si prevede un contributo praticamente invariato per il riscaldamento e raffrescamento domestico e collettivo (da 7.477 ktep del 2021 a 7.464 ktep nel 2030).

Evitare un aumento delle emissioni inquinanti

Per evitare un aumento delle emissioni inquinanti causate dalla combustione della biomassa, con particolare riferimento al particolato, dovrà essere favorita con adeguate misure la sostituzione dei vecchi sistemi di riscaldamento con impianti ad alta qualità ambientale ed efficienza e promosso l'uso di biomasse locali con tracciabilità della filiera corta di approvvigionamento.

Il potenziale delle biomasse nazionali per la produzione di calore è però molto maggiore rispetto all'obiettivo previsto dal PNIEC. Secondo una recente stima ^[13] del Coordinamento FREE (Coordinamento Fonti Rinnovabili ed Efficienza Energetica), considerando le risorse legnose a disposizione, ed escludendo quelle già necessariamente impiegate per la

produzione di energia elettrica, è possibile puntare a un obiettivo al 2030 di 16,5 Mtep di energia termica prodotta da biomasse, di cui 8,5 Mtep da biomasse legnose, rispetto al valore di circa 7,5 Mtep indicato nel PNIEC.

In ogni caso, appare evidente che il potenziale produttivo del patrimonio forestale italiano è ancora decisamente sottoutilizzato. A fronte di una superficie boscata che, come si è detto, copre ormai quasi il 37% del nostro territorio e di una produzione nazionale di biomassa da questi boschi dell'ordine dei 4-5 milioni di tonnellate/anno, i consumi attuali di biomasse legnose per usi energetici (riscaldamento domestico, teleriscaldamento e produzione di energia elettrica) possono essere valutati intorno ai 20 milioni di tonnellate/anno. **Questa situazione evidenzia un grave ritardo delle filiere produttive bosco-legno-energia nazionali, le cui cause risiedono principalmente in questioni di tipo culturale e strutturale, che, per essere superate, richiedono diffusione delle conoscenze e adeguati investimenti in tecnologie.**

Un approccio moderno e pienamente sostenibile alla valorizzazione della risorsa boschiva dovrebbe prevedere in ogni caso un uso "a cascata" del legno, con una gestione che privilegi le utilizzazioni ad alto valore aggiunto (legno per mobili e arredi, materiale per edifici ecosostenibili, costruzioni navali ecc.), destinando all'uso energetico solo il materiale di risulta dalle operazioni di taglio, esbosco e lavorazione sul posto del legname.

In questo senso, una gestione ottimale del patrimonio forestale nazionale, con la progressiva conversione di boschi cedui a fustaie e un conseguente aumento dei tagli degli accrescimenti annui di biomassa, dall'attuale valore medio del 27-28% fino ad un 64-65%, in linea con quanto avviene negli altri paesi dell'Europa meridionale, si tradurrebbe in un raddoppio della produzione di biomassa, che arriverebbe facilmente a superare i 10 milioni di tonnellate/anno.

Un elemento fondamentale per la sostenibilità economica dell'uso energetico delle biomasse è costituito dai costi di produzione del biocombustibile, determinati principalmente dai sistemi di lavoro utilizzati, dall'organizzazione dei cantieri e l'esperienza degli operatori. Di conseguenza, la moderna meccanizzazione forestale gioca un ruolo di primaria importanza per lo sviluppo delle filiere bioenergetiche basate sulla valorizzazione dei boschi, consentendo di movimentare la risorsa biomassa con costi contenuti e garantendo al contempo elevati standard qualitativi,

Macchine e cantieri vanno modulati in riferimento alle specifiche qualitative del biocombustibile che si vuole produrre che, a loro volta, sono condizionate dal tipo di apparato impiegato per la loro conversione energetica. È necessario in ogni caso tener conto delle caratteristiche delle attività silviculturali eventualmente presenti sul territorio e delle relative interazioni con il locale tessuto economico e sociale, nonché di eventuali vincoli

ambientali, paesaggistici e simili.

Un'attenta valutazione di tutti questi aspetti è la premessa indispensabile per individuare, fra tutte le possibili soluzioni, quella che si adatta meglio ad una specifica realtà territoriale e presenta le migliori caratteristiche di sostenibilità ed economicità.

A puro titolo di esempio, nell'ambito del Progetto GESTA (Gestione Eco-Sostenibile Territorio Abruzzo), finanziato dal MASAF, un'iniziativa che ha suscitato un grande interesse è stata l'allestimento (ottobre 2023), su un'area protetta appartenente al Parco Nazionale Gran Sasso e Monti della Laga, di un cantiere forestale dimostrativo di una nuova modalità di lavoro basata sull'integrazione animale-macchina che mira a rendere più efficiente il lavoro con animali e più eco-compatibile quello con le macchine ^[14], consentendo una forte mitigazione degli impatti ambientali relativi all'introduzione della meccanizzazione in contesti ecologicamente sensibili (figura 4).

In conclusione, **la valorizzazione delle biomasse forestali può rappresentare un importante fattore di crescita economica e occupazionale.** Nel nostro Paese ci sono circa 6.500 imprese forestali con poco più di 12.000 addetti e nel complesso la filiera legno-energia conta oltre 14.000 imprese per un fatturato di oltre 4 miliardi di euro, superando i 72.000 addetti ^[13]. **Fatturato e occupati crescerebbero linearmente con l'aumento della produzione di biomassa nazionale.**

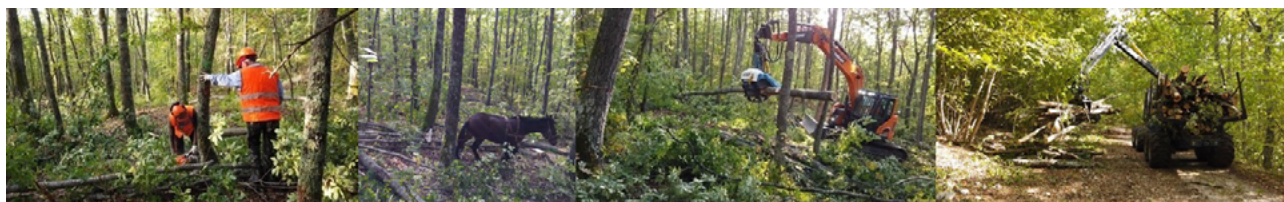


Figura 4 - Cantiere forestale dimostrativo basato sull'integrazione animale-macchina presso il Parco Nazionale Gran Sasso e Monti della Laga

Una crescita sostenibile delle filiere energetiche e/o industriali legate ad un corretto sfruttamento della biomassa implica necessariamente un incremento numerico di tutte quelle macchine e sistemi tecnologici che ne rendono possibile la raccolta, il condizionamento, il trasporto e lo stoccaggio.

A titolo puramente esemplificativo, da un'indagine completata a fine 2024 dal CNR IBE (con risultati in attesa di pubblicazione) in 10 Regioni Italiane dell'Italia Centrale e Meridionale è emerso che ogni 2.500 tonnellate di biomassa forestale raccolta è richiesto l'impiego di almeno un trattore e una gru. Di conseguenza, per l'indu-

stria del settore, un aumento della produzione annua di biomassa pari a 5 milioni di t richiederebbe l'impiego, e quindi la produzione, di almeno 4.000 nuovi mezzi solo per queste due tipologie di macchine.

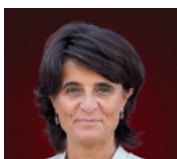
Bibliografia

-
- [1] Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza - #NEXTGENERATIONITALIA, 7 maggio 2021
 - [2] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_it
 - [3] IEA - Renewables 2018, Analysis and Forecasts to 2023 (2019)
 - [4] EurObserv'ER - The State of Renewable Energies in Europe 2024, aprile 2025
 - [5] GSE - Energia da fonti rinnovabili in Italia nel 2023, gennaio 2025
 - [6] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - Situazione Energetica Nazionale 2023, settembre 2024
 - [7] <https://rubizmo.eu/news/view/a6e02690-6bac-4f1d-9381-4e74d445f63b>
 - [8] FAO - Global Forest Resources Assessment 2020
 - [9] Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali - Rapporto sullo Stato delle Foreste (RaF) in Italia 2017-2018, marzo 2019
 - [10] ISTAT - Consumi energetici delle famiglie. Anni 2020-2021, dicembre 2022
 - [11] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - Piano Nazionale Integrato per L'Energia e il Clima, giugno 2024
 - [12] Elaborazione su dati GSE 2011 - 2025
 - [13] Coordinamento FREE - I benefici industriali e occupazionali della transizione energetica in Italia, marzo 2025
 - [14] <https://youtu.be/KRAnydHrXVo>
-

Le attività agricole hanno un potenziale energetico enorme

L'energia e l'agricoltura sono due comparti che hanno sempre più punti in comune. In questo contesto sta avendo un ruolo di crescente rilievo l'industria della meccanica agricola, che da sempre produce mezzi in grado di eseguire ogni tipo di lavorazione, e che è ora chiamata a sviluppare tecnologie più specifiche per le filiere bioenergetiche, dalle trattrici per impieghi forestali, ai mezzi per il trasporto della biomassa legnosa, dai macchinari per la raccolta delle colture energetiche ai sistemi per il recupero e il trattamento dei residui e per la gestione dei reflui zootecnici, oltre a tutti i sistemi elettronici per il monitoraggio delle operazioni e per la gestione ottimizzata della filiera.

DOI 10.12910/EAI2025-035



di Maria Teresa Maschio, presidente FederUnacoma

Il mondo agricolo è entrato a pieno titolo nel comparto dell'energia. L'esigenza di ridurre l'uso dei combustibili e dei carburanti d'origine fossile, per contenere le emissioni di gas serra e sostanze inquinanti, ha infatti assegnato un ruolo di primo piano al settore primario ed a quello forestale. Con una gestione moderna delle nostre attività agricole delle foreste, così rilevanti per l'economia del nostro Paese, è possibile ridurre sensibilmente i consumi legati ai cicli produttivi, ma anche produrre e gestire materie prime rinnovabili per uso energetico.

Le biomasse legnose ricavate dalla manutenzione dei boschi, i sottoprodotti delle patate e delle lavorazioni agricole, gli olii combustibili ottenuti da specifiche colture, o il biogas creato dalla fermentazione degli effluen-

ti zootecnici sono soltanto alcune delle differenti tipologie di materiali che possono essere impiegati per generare energia e che si caratterizzano per un consistente potenziale energetico.

Le biomasse d'origine agricola sono dunque una risorsa preziosa per le filiere bioenergetiche; una risorsa che sta attirando una crescente attenzione da parte del mondo tecnico e scientifico, degli attori politico-istituzionali, e naturalmente degli agricoltori più sensibili all'innovazione.

La questione energetica coinvolge l'agricoltura anche su un altro piano, quello dell'utilizzo dei terreni per l'installazione di pannelli fotovoltaici. Il tema è controverso dal punto di vista etico ed economico giacché comporta un radicale cambio di destinazione dei terreni stessi, non più utilizzabili

per produzioni agricole e quindi in qualche modo "snaturati", almeno fino a che non diverrà completamente matura la tecnologia dell'agrivoltaico, una tipologia di impianto che consente di sopraelevare le pannellature lasciando coltivabile il terreno sottostante.

Le "soglie di convenienza"

Le attività agricole, insomma, hanno un potenziale energetico enorme. Solo in Italia si stima che ogni anno i cicli produttivi legati al settore primario ed a quello agroindustriale generino circa 30 milioni di tonnellate di sottoprodotti. Una loro corretta valorizzazione potrebbe mettere in circolazione annualmente la stessa energia contenuta in 10 milioni di tonnellate di petrolio. Il punto è capire quali materie prime risultano

più convenienti, quali filiere attivare nei diversi distretti, quali tecnologie di conversione energetica sono più efficienti e soprattutto quali sono le condizioni che rendono le bioenergie remunerative per le imprese agricole. Il mondo universitario, gli enti di ricerca pubblici e privati, le organizzazioni professionali si sono misurati e anche oggi continuano a confrontarsi su questi temi, realizzando molti studi comparativi ed elaborando modelli d'impresa che possano ottimizzare le risorse e definire le "soglie di convenienza".

In questo processo un ruolo sempre più importante sta avendo l'industria della meccanica agricola, che da sempre produce mezzi in grado di eseguire ogni tipo di lavorazione, e che è ora chiamata a sviluppare tecnologie più specifiche per le filiere bioenergetiche, dalle trattrici per impieghi forestali, ai mezzi per il trasporto della biomassa legnosa, dai macchinari per la raccolta delle colture energetiche ai sistemi per il recupero e il trattamento dei residui e per la gestione dei reflui zootecnici, oltre a tutti i sistemi elettronici per il monitoraggio delle operazioni e per la gestione ottimizzata della filiera.

Le industrie costruttrici italiane si collocano ai primi posti nel mondo

Le industrie costruttrici - in modo particolare quelle italiane, che si collocano ai primi posti al mondo per qualità delle tecnologie e ampiezza di gamma - stanno investendo nella progettazione e nella messa a pun-

to di mezzi sempre più specifici. La meccanizzazione agricola infatti è un elemento cardine del comparto agroenergetico poiché rende razionali ed economicamente convenienti le articolate filiere connesse alla bioenergia, con particolare riferimento alle operazioni di raccolta, condizionamento e trasporto dei materiali.

Peraltro, il reperimento della biomassa legnosa, degli scarti e dei sottoprodotti delle attività agricole e forestali, ha una diretta valenza ambientale, contribuendo alla manutenzione dei territori e alla prevenzione del dissesto idrogeologico, così da conferire alla meccanizzazione per le filiere bioenergetiche una doppia valenza, economica e quella ambientale.

Restando sul tema della manutenzione dei territori, è bene ricordare che i suoli rappresentano anche il più grande deposito di carbonio del pianeta e che la loro conservazione costituisce uno strumento di fondamentale importanza per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, come esplicitamente riconosciuto dalla stessa Commissione Eu con la strategia denominata "Suoli sani a vantaggio delle persone, degli alimenti, della natura e del clima". Basti pensare che nella sola UE i costi associati alla degradazione del terreno sono stimati in oltre 50 miliardi di euro all'anno, mentre i servizi ecosistemici associati alle terre coltivate e ai generano ben 76 miliardi di euro, dei quali circa un terzo un è prodotto dalle attività agricole.

Ci sono dunque le condizioni per un salto di qualità nel campo delle

bioenergie ma anche in quello della manutenzione del suolo, e per una collaborazione sempre più positiva tra settore agricolo, industria meccanica, sistema energetico e mondo della ricerca; e c'è un indirizzo di carattere strategico voluto dall'Unione Europea con obiettivi precisi in termini di riduzione della dipendenza dalle fonti fossili e riduzione dei gas serra.

Tuttavia, uno sviluppo sostenibile dell'agricoltura, richiede investimenti per l'impiantistica, per la progettazione, la produzione e diffusione di una nuova meccanizzazione, per la formazione di personale che abbia le necessarie competenze, e questi sono possibili solo a condizione che vi sia una continuità nelle attività legislative e nell'azione di Governo, una prospettiva di medio e lungo periodo che consenta di programmare le attività e di pianificare in modo sicuro il ritorno degli investimenti.

E' un settore, quello delle energie rinnovabili, nel quale le politiche fiscali, il sistema di incentivi, la stabilità del mercato sono fondamentali nel determinare le soglie di convenienza e il ritorno economico per tutti i soggetti che partecipano alla filiera. Il mercato delle bioenergie è una realtà che deve essere consolidata, l'energia rinnovabile d'origine agricola è un'opzione che deve essere sostenuta in modo coerente perché possa diventare parte integrante delle attività aziendali, e che dev'essere trasmessa come know how tecnico e come criterio di gestione delle risorse anche alle generazioni future.

Le interviste

L'agricoltura è cruciale per la transizione energetica ed ecologica



Intervista con Francesco Lollobrigida, Ministro dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste

Nel contesto di un'agricoltura sempre più orientata alla sostenibilità e all'innovazione, il Ministro dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste, Francesco Lollobrigida, ha recentemente espresso la sua visione sul futuro del settore. Durante la sua partecipazione a eventi chiave come Macfrut 2025, ha sottolineato l'importanza di una gestione responsabile delle risorse idriche e delle opportunità offerte dalle energie rinnovabili. Il Ministro ha ribadito il suo sostegno all'installazione di pannelli fotovoltaici sui tetti delle aziende agricole, evitando l'uso di terreni coltivabili per la produzione energetica. Inoltre, ha evidenziato il ruolo dell'agrivoltaico come soluzione per coniugare produzione agricola e sostenibilità ambientale. In questa intervista, il Ministro approfondisce le strategie del governo per garantire un equilibrio tra sviluppo agricolo e transizione energetica, analizzando le sfide e le opportunità che attendono il settore nei prossimi anni.

Quali sono le strategie del Ministero per promuovere l'uso di energie rinnovabili nel settore agricolo?

Il Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste ha messo in atto diverse strategie concrete per promuovere l'utilizzo delle energie rinnovabili nel settore agricolo. Lo abbiamo fatto a partire dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, con il Parco Agrisolare, e ancora attraverso la promozione dell'Agrivoltaico, con pannelli solari elevati che permettono di coltivare la terra e produrre energia. Abbiamo stanziato finanziamenti mirati con i Programmi di Sviluppo Rurale, che hanno consentito alle Regioni di investire in impianti a biogas e biometano da reflui zootecnici o sottoprodotti agricoli.

Oggi, grazie a queste scelte, l'agricoltura italiana produ-

ce l'11% dell'energia rinnovabile elettrica, a dimostrazione che si può essere sostenibili senza rinunciare a produrre cibo, lavoro e a difendere il nostro territorio.

“Dobbiamo sostenere la produzione energetica, compatibilmente con quella agricola,”

In particolare, coltivazioni, allevamenti e silvicoltura si avvalgono delle bioenergie prodotte con biomasse e biogas. Anche l'idroelettrico e il fotovoltaico giocano un ruolo strategico. I prodotti agroalimentari e l'energia rappresentano due asset fondamentali per il Sistema Italia. L'agricoltura è cruciale per entrambe e sta contribuendo in modo significativo sia alla transizione energetica che a quella ecologica.

Come intende il governo bilanciare la necessità di aumentare la produzione energetica con la protezione del suolo agricolo?

Siamo convinti che la terra debba servire a produrre, non a speculare e che si debba sostenere la produzione energetica, compatibilmente con quella agricola.

Proprio per questo il Governo Meloni ha voluto regolamentare in modo chiaro l'installazione dei pannelli fotovoltaici a terra, salvaguardando le aree destinate alla produzione agroalimentare.

Abbiamo voluto mettere un freno a chi, negli anni, ha tentato di fare profitti facili a discapito dell'agricoltura, sottraendo terreno fertile per installare chilometri di pannelli solari. Un fenomeno che ha causato danni

concreti: ha consumato suolo agricolo, compromesso le nostre eccellenze produttive e deturpato i paesaggi italiani, che sono un patrimonio da difendere. Già entro il prossimo anno arriveremo a triplicare la produzione energetica prevista, senza sottrarre un solo metro quadro alla nostra agricoltura di qualità. Ringrazio gli agricoltori, primi custodi del nostro territorio, che ogni giorno si prendono cura di ciò che hanno di più caro: la loro terra e la natura, che coltivano con rispetto, sacrificio e passione per offrirci cibo sano e di qualità.

“Entro il 2026 triplicheremo la produzione energetica prevista,”

Continueremo a sostenere il loro lavoro con pragmatismo e azioni concrete, riconoscendone il valore come presidio fondamentale per l'ambiente, la biodiversità e il futuro del nostro pianeta.

Il MASAF ha gestito alcuni bandi del PNRR in modo diretto con interventi specifici per il settore agricolo ed agroalimentare. Quale è il bilancio ad oggi? E oltre alle azioni PNRR in corso ci sono ulteriori piani per incentivare gli agricoltori a investire in tecnologie energetiche sostenibili?

Il Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità alimentare e delle Foreste ha puntualmente conseguito tutti i target e milestone assegnati dalla Commissione europea relativamente alle misure di sua competenza. Nel 2024, il valore aggiunto dell'agricoltura italiana ha raggiunto i 42,4 miliardi di euro, secondo le stime preliminari dell'Istat. Un traguardo che pone l'Italia al primo posto in Europa per il comparto agricolo.

Un forte impulso è venuto anche dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e in particolare dalla sua rimodulazione che, rafforzando misure come il Parco Agrisolare e i Contratti di filiera, ha portato la dotazione di risorse da 5 a 8 miliardi di euro. Il Governo ha voluto dare un segnale chiaro: il settore primario è una priorità. Per questo abbiamo richiesto e ottenuto in sede europea un significativo incremento delle risorse.

Sul fronte dell'Agrisolare, in particolare, abbiamo pubblicato un bando da oltre 2 miliardi di euro, finanziando più di 21.000 imprese installando oltre 1.600 megawatt di potenza. Un risultato che ha quadruplicato l'obietti-

vo iniziale. Con azioni pragmatiche e concrete, stiamo rafforzando la capacità dell'agricoltura italiana di competere, innovare e continuare ad essere un modello per l'Europa intera.

“Con azioni pragmatiche e concrete, stiamo rafforzando la capacità dell'agricoltura italiana”

In che modo il Ministero sta affrontando il problema dell'aumento dei costi energetici per le imprese agricole?

È fondamentale proseguire nel lavoro che abbiamo avviato in questi due anni di Governo a tutela della capacità produttiva delle nostre filiere e delle eccellenze del Made in Italy.

Grazie alla rinnovata centralità dell'Italia in Europa, siamo passati dalle disastrose politiche di Timmermans a una nuova visione, presentata da Raffaele Fitto e Christophe Hansen, che ha messo al centro la Sovranità alimentare e il sostegno agli agricoltori.

Oggi l'Europa torna a trattare l'agricoltura con il rispetto che merita. La Pac, così come era stata concepita, aveva sacrificato la sostenibilità economica e sociale sull'altare di un ambientalismo ideologico, portando a regole inapplicabili e dannose per i nostri produttori.

È una svolta che rivendichiamo con orgoglio, perché nasce anche grazie al lavoro dell'Italia e alla nostra determinazione nel difendere il valore della terra, del lavoro e la nostra identità.

Come il Ministero intende supportare i piccoli agricoltori nell'affrontare le sfide della transizione ecologica e della digitalizzazione del settore agricolo?

L'innovazione e la ricerca rivestono un ruolo centrale per incrementare la produttività, il reddito e la sostenibilità dell'agricoltura, non solo dal punto di vista ambientale ma anche economico e sociale.

L'Europa ha bisogno di riprendere il suo cammino ispirandosi ai Trattati di Roma facendo proprio l'approccio adottato dall'Italia negli ultimi anni. Vogliamo un'agricoltura meno subordinata all'ambiente o, meglio, all'ideo-



logia ambientalista. Perché laddove c'è attività agricola c'è un profondo rispetto dell'ambiente e tutela del territorio.

“Innovazione e ricerca rivestono un ruolo centrale,,

Abbiamo investito oltre 870 milioni di euro in innovazione, dall'acquisto di macchinari avanzati alla sensoristica, fino alle nuove frontiere dell'agricoltura 4.0, riportando la ricerca sui temi più utili agli agricoltori riorganizzando il Crea e finanziando studi per un'agricol-

tura più efficiente e resistente ai cambiamenti climatici. Grazie all'impegno del Governo Meloni, l'Italia si proietta verso un'agricoltura sempre più moderna, pronta a rispondere alle grandi sfide del futuro con concretezza e visione.

“l'Italia si proietta verso un'agricoltura sempre più moderna, pronta a rispondere alle grandi sfide del futuro”

In agricoltura va sostenuta la crescita delle fonti rinnovabili



Intervista con Massimiliano Giansanti, Presidente di Confagricoltura

“Costi ed energia sono due riferimenti prioritari per ogni impresa agricola. A questi temi oggi si aggiungono i dazi degli Stati Uniti, sui quali il dialogo è ancora aperto. La nostra speranza è che Europa e Usa raggiungano un’intesa, così da evitare di attingere dal Pnrr o da altre risorse Ue per sostenere i comparti più esposti agli effetti di nuove tariffe. Una strada che sarebbe obbligata nel caso in cui si confermasse una guerra commerciale a tutti gli effetti”. In questa intervista il Presidente di Confagricoltura Massimiliano Giansanti fa il punto sulle tematiche dell’energia in agricoltura, sulle priorità e le sfide più stringenti. Nato a Roma nel 1974 è stato eletto presidente nazionale dell’Associazione nel 2017 e riconfermato nel maggio 2024. Nelle sue aziende agricole produce e utilizza energia da fonti rinnovabili.

Presidente Giansanti, quali sono le principali sfide che gli agricoltori italiani affrontano oggi in relazione ai costi e alla disponibilità di energia?

Riguardo al costo dell’energia, assistiamo a un’altalena, ma mediamente il costo italiano in bolletta resta ancora il più alto d’Europa. È un fattore che può portare a un fenomeno inflattivo che graverebbe sia sulla competitività delle nostre imprese sui mercati internazionali, sia sull’economia interna. Tra gli interventi che auspichiamo c’è il disaccoppiamento del prezzo dell’energia elettrica da quello del gas, così come è stato fatto in Spagna. Inoltre, bisogna sostenere la crescita della produzione energetica da fonti rinnovabili, con risorse per le imprese che vogliono investire, e con il rafforzamento delle reti distributive nazionali spesso sovraccaricate e non capaci di soddisfare tutte le domande di allaccio.

“Il caro energia è una priorità. Disaccoppiare il prezzo dell’energia elettrica da quello del gas,,

Nel febbraio scorso Confagricoltura ha pubblicato il Primo Rapporto dell’Osservatorio sulle Agroenergie, elaborato con il sostegno dell’Enel partendo dai dati raccolti da un gruppo di lavoro che ha analizzato database pubblici, report di mercato, oltre a un campione di 400 aziende agricole di medie-grandi dimensioni. Che fotografia emerge nell’ambito delle agroenergie, e quali sono le prospettive di sviluppo da qui al 2030?

La fotografia che emerge dal Rapporto è di un settore primario che ha colto appieno l’occasione offerta dalle agroenergie e che vuole proseguire su questa strada. Negli ultimi tredici anni il valore della produzione agricola legata alle rinnovabili, come attività connesse, è passato da 232 milioni a quasi 2.6 miliardi di euro (dati CREA). Il 2024 si è chiuso con 48mila impianti attivi e una capacità installata di circa 5 gigawatt.

Si tratta di un trend in costante crescita a cui bisogna continuare a dare ossigeno. Lo dimostrano i risultati della misura del Pnrr sul Parco Agrisolare che, come conferma l’analisi dell’Osservatorio, porterà all’installazione di circa 1,6 GW al 2026, con ben 22mila imprese coinvolte. Una crescita enorme se si pensa che inizialmente le previsioni parlavano di soli 0,4 GW.



Come si potrebbe incentivare l'efficienza energetica nelle aziende agricole senza compromettere la competitività del settore?

Il settore primario guarda alle rinnovabili anche nella prospettiva di un'autonomia energetica. I dati ci dicono che nel 2030 che aumenterà in tutti i settori l'energia rinnovabile; quella prodotta in agricoltura raggiungerà il 10% del totale nazionale. La chiave è l'autoconsumo che oggi, riguardo al fotovoltaico, si attesta al 17% con una possibilità di crescita fino al 30%.

“Il valore della produzione agricola legata alle rinnovabili, è passato da 232 milioni a quasi 2.6 miliardi,

Noi di Confagricoltura lo diciamo da tempo e siamo riusciti a far valere questo principio, oggi presente in alcune misure del Pnrr.

Altra strada da perseguire è quella delle comunità energetiche rinnovabili. Di recente abbiamo presentato ConfagriCER, una delle prime esperienze italiane con una impostazione a carattere nazionale. Stiamo procedendo con un progetto pilota, sviluppato con Confagricoltura Mantova, con il supporto di Edison, per la realizzazione di impianti fotovoltaici nelle aziende agricole locali che permetteranno un consumo diffuso dell'energia prodotta.

Ci sono poi esempi che possiamo citare, come quello all'interno del territorio Unesco del Prosecco: la CER “Borgoluce” che, grazie al supporto di Enel, consente a un luogo unico come quello delle colline di Conegliano e Valdobbiadene di fare un ulteriore passo nel percorso di transizione energetica. La Comunità Energetica, che accoglie al suo interno l'impianto realizzato nell'azienda Borgoluce, punta sulle energie pulite per condividere con i membri aderenti il beneficio economico legato all'energia autoconsumata virtualmente all'interno della CER, grazie agli incentivi statali messi a disposizione dal GSE.

Efficienza energetica vuol dire anche gestione razionale delle risorse naturali, attraverso le soluzioni tecnologiche offerte dall'agricoltura di precisione. E anche su questo fronte, il settore ha dimostrato di volere inve-


stire. Ma le imprese devono essere sostenute in questo percorso: per la prima volta, nel 2024 sono diminuiti gli investimenti in macchine e tecnologie 4.0, ed è un segnale da non sottovalutare.

Quali politiche nazionali ed europee potrebbero maggiormente supportare una transizione energetica sostenibile per il settore agricolo?

Gli aspetti su cui concentrarsi sono molti. Ne cito due: semplificazione burocratica delle procedure di accesso ai finanziamenti e delle agevolazioni fiscali. Molto importanti sono le recenti indicazioni arrivate dall'Agenzia delle Entrate sul sistema di tassazione degli impianti a biogas. L'indirizzo interpretativo conferma quanto la Confederazione aveva indicato dal 2014: evitare di discriminare, con diversi sistemi di tassazione, i produttori di agroenergie da impianti fotovoltaici o da fonti di origine agroforestali. La transizione si incentiva facilitando la vita alle imprese che vogliono efficientare e razionalizzare i loro processi. In tal senso, credo che sia importante proseguire lungo la strada tracciata dall'applicazione del Piano Industria 4.0 al nostro settore primario. Nel recente passato si è dimostrato un modello che ha dato il via a importanti investimenti in modelli tecnologici e digitali. Le ultime modifiche introdotte al Piano transizione 5.0, che ha l'obiettivo di sostenere la transizione dei processi di produzione verso un modello efficiente sotto il profilo energetico, sostenibile e basato sulle energie rinnovabili, fanno ben sperare che possa essere applicato anche alle macchine agricole.

“La ricerca scientifica ha raggiunto risultati importanti nella lotta ai cambiamenti climatici,

Non dimentichiamo neanche la ricerca scientifica, che ormai ha raggiunto risultati importanti sul fronte della lotta ai cambiamenti climatici. La Commissione Ue ha in corso la discussione per l'applicazione del regolamento sulle tecniche di evoluzione assistita. Un passo in avanti importante per la selezione di specie vegetali resistenti e che Confagricoltura aspettava da tempo. Bisogna fare presto e passare dalla fase sperimentale a quella



dell'applicazione in campo per contrastare fitopatie che hanno già dimostrato di poter mettere in crisi interi comparti.

Secondo lei, quali tecnologie emergenti potrebbero rivoluzionare il rapporto tra energia e agricoltura nei prossimi anni?

Come in ambito energetico, anche su questo piano la formula giusta è quella dell'equilibrio tecnologico studiato per le esigenze della singola azienda.

Il settore agricolo italiano - attraverso l'adozione di soluzioni innovative nel mercato energetico che trovano applicazione anche nell'ambito agricolo, come l'agrivoltaico, le CER, le BESS e le colonnine di ricarica - può svolgere un ruolo attivo nel rispondere all'energy trilemma, che si focalizza su tre aspetti fondamentali: sicurezza, economicità e sostenibilità.

L'Agrioltaico e le CER sono tra le innovazioni più interessanti per lo sviluppo delle energie rinnovabili in agricoltura.

L'agrivoltaico, ad esempio, rappresenta un'innovazione che genera valore aggiunto attraverso l'integrazione dell'agricoltura tradizionale con la produzione di energia solare. Questa tecnologia, grazie alla disposizione modulare flessibile, non solo riduce i costi variabili legati al consumo energetico delle aziende agricole, ma migliora anche la resa di una varietà di colture.

Rinnovabili, agricoltura di precisione, ma anche recupero di tecniche colturali antiche, che permettono di tenere viva la fertilità del suolo: il messaggio che danno i tanti imprenditori che stanno investendo in tal senso è chiaro, ovvero la diversificazione con la produzione di energia deve avere al centro la redditività e la produttività

aziendale. Le superfici coltivabili non devono essere intaccate. Solo in questo modo possiamo raggiungere una vera sostenibilità, sia ambientale che economica.

“L'Agrioltaico e le CER sono tra le innovazioni più interessanti per lo sviluppo delle rinnovabili in agricoltura,”

In questo lavoro ci viene in soccorso l'intelligenza artificiale e i sistemi di geolocalizzazione. Avere macchinari connessi ai satelliti significa monitorare le colture, sapere dove è necessario intervenire, e dove non lo è, con prodotti fitosanitari o con l'irrigazione. Fino ad avere analisi predittive di medio e lungo periodo con l'uso dell'intelligenza per processare, in tempo reale, quantità di dati fino a qualche anno fa inimmaginabili. È quello che fa la nostra piattaforma HubFarm, processando e incrociando i dati delle aziende e ricavandone statistiche e previsioni che diventano preziose per la pianificazione di strategie imprenditoriali.

Questo insieme di opzioni è oggi ancora più fondamentale, ad esempio, alla luce sia dell'irrigidimento delle regole europee sull'utilizzo dei prodotti fitosanitari, sia del costante aumento dei loro prezzi sui mercati internazionali. Se da una parte vengono tolti alcuni degli strumenti che fino a ieri erano fondamentali per la produzione agricola, dall'altra si devono dare agli agricoltori alternative valide. Ecco perché la politica deve fare di tutto per facilitare l'accesso alle nuove tecnologie da parte delle imprese.

Integrare il reddito degli agricoltori con la produzione di energia rinnovabile



Intervista con Ettore Prandini, Presidente della Coldiretti

Ettore Prandini è dal 2018 Presidente della Coldiretti, la più grande organizzazione agricola italiana ed europea, con circa 1,6 milioni di associati. Laureato in giurisprudenza, è un imprenditore agricolo con esperienza nel settore zootecnico e vitivinicolo. In questa intervista approfondiamo con lui le opportunità e le sfide del binomio agricoltura-energia in riferimento alle possibili criticità e alle prospettive di sviluppo. In particolare gli abbiamo chiesto in che modo Coldiretti supporta gli agricoltori nell'adozione di tecnologie energetiche innovative? E che cosa viene fatto per ottimizzare i consumi, ridurre gli sprechi e valorizzare gli scarti?

Innanzitutto abbiamo promosso una legge per equiparare il digestato, che è un sottoprodotto del biogas, ai fertilizzanti naturali, per favorire la sostenibilità ambientale e la fertilità del suolo. Come Coldiretti stiamo lavorando per superare le limitazioni imposte dall'UE all'utilizzo di digestato, affinché il suo impiego in agricoltura diventi diffuso e capillare. Sul tema delle energie rinnovabili abbiamo più volte sottolineato come sia possibile produrre energia green senza consumare il suolo agricolo fertile.

“Ricadute positive sulle colture e sul territorio,”

Mi riferisco alle comunità energetiche, agli impianti solari sui tetti e all'agrivoltaico sostenibile e sospeso da

terra. Queste soluzioni consentono di integrare il reddito degli agricoltori con la produzione di energia rinnovabile, arrivando ad avere una ricaduta positiva sia sulle colture sia sul territorio. Infine, per ottimizzare i consumi e ridurre gli sprechi, puntiamo alla tutela e al riuso della risorsa idrica nel settore agro-industriale ed energetico.

Quali politiche potrebbero incentivare ulteriormente la collaborazione tra il settore agricolo e quello energetico per promuovere un modello di azienda agricola sostenibile?

Uno dei problemi principali che riscontriamo è l'eccessivo carico burocratico per conseguire l'autorizzazione degli impianti di biogas e biometano e per questo chiediamo semplificazioni. Se vogliamo che il nostro Paese diventi davvero il simbolo di una transizione agroecologica, è necessario aumentare gli investimenti sull'innovazione, sia in ambito energetico sia in ambito agricolo. La nostra richiesta è che si portino questi investimenti a 6 miliardi entro il 2030, per poter sfruttare al massimo le nuove tecnologie, che ci consentirebbero di ottimizzare l'uso delle risorse, come l'acqua, grazie a centraline meteo collegate a satelliti e di migliorare l'efficienza delle operazioni, rendendo le aziende agricole davvero sostenibili. Infine, parlando ancora di investimenti necessari all'innovazione, ritengo che si debba porre la giusta attenzione all'intelligenza artificiale, sono gli italiani stessi a chiederlo. I dati Coldiretti/Censis affermano che oltre l'89% degli italiani ritiene prioritaria la realizzazione di investimenti pubblici, con particolare attenzione alle

nuove tecnologie, inclusa l'AI, specificamente rivolti a potenziare l'agricoltura italiana.

“Un eccessivo carico burocratico,,

Coldiretti ha firmato un accordo con Eni per migliorare l'efficienza energetica in agricoltura, promuovere iniziative legate all'economia circolare, allo sviluppo sostenibile e per rafforzare il ruolo dell'energia a servizio dell'agricoltura. Quali sono le iniziative più importanti che sono state previste e quali i risultati di maggior rilievo raggiunti ad oggi?

L'accordo che abbiamo firmato con Eni punta a favorire produzioni agricole sostenibili e a valorizzarne gli scarti e dei sottoprodotti, a sviluppare colture per utilizzo energetico sia per la produzione di biocarburanti HVO e biometano, sia per la filiera della chimica da fonti rinnovabili.

“Aumentare gli investimenti sull'innovazione,,

A questo si aggiungono anche iniziative di generazione di energia elettrica rinnovabile e azioni volte a favorire il riutilizzo delle acque per uso agricolo. In questi anni l'Italia ha fatto significativi passi avanti nel campo delle energie rinnovabili, con un aumento significativo della produzione energetica agricola, a cominciare dal biogas che ha visto il numero totale di impianti salire da 1.200 a oltre 2.400, rappresentando il 71,5% della potenza installata in questo settore.

Come l'agrivoltaico può contribuire a migliorare la sostenibilità ambientale e la competitività delle imprese agricole?

L'agrivoltaico sostenibile e sospeso da terra realizzato da agricoltori è uno strumento cruciale per sostenere la transizione green, perché è positivo per il reddito agricolo e per l'ambiente. Secondo uno studio di Col-

retti Giovani Impresa solo utilizzando i tetti di stalle, cascine, magazzini, fienili, laboratori di trasformazione e strutture agricole sarebbe possibile recuperare una superficie utile di 155 milioni di metri quadri di pannelli con la produzione di 28.400Gwh di energia solare, pari al consumo energetico complessivo annuo di una regione come il Veneto.

“L'agrivoltaico sostenibile è cruciale per la transizione green,,

Ci tengo però a ribadire l'importanza di guardarsi dalle speculazioni e da un agrivoltaico camuffato come tale, che di fatto sottrae il suolo dalla sua vocazione originale.

Quali sono le principali sfide degli agricoltori italiani in relazione al costo dell'energia?

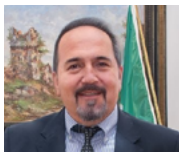
Le principali sfide degli agricoltori in tema energetico sono due: le tensioni internazionali, che inficiano sul prezzo dell'energia, e i cambiamenti climatici. Gli aumenti registrati dall'inizio dell'anno hanno avuto riflessi a cascata anche sui fertilizzanti, dove l'urea è rincarata del 10% nel giro di pochi giorni, con quotazioni in ascesa anche per gli altri fattori di produzione. Agli sbalzi dei mercati si aggiungono peraltro gli effetti dei cambiamenti climatici, che negli ultimi tre anni sono costati 20 miliardi all'agricoltura italiana, rendendo sempre più necessaria la messa in campo di strategie per proteggere le colture e contenere i costi, proprio a partire dalla digitalizzazione e dalle nuove tecnologie di cui parlavo prima.

Qual è il ruolo dell'agricoltura nella transizione energetica?

Senza dubbio un ruolo da protagonista e lo dimostrano i numeri: il 16% dell'energia rinnovabile consumata in Italia nasce dai campi e dalle stalle, fornendo un contributo strategico al fabbisogno nazionale grazie all'impiego di biomasse, biogas, bioliquidi e fotovoltaico. Il nostro Paese si conferma un protagonista assoluto nella transizione ecologica ed energetica, grazie anche a un'agricoltura che è la più green d'Europa.



Le aziende agricole protagoniste della transizione energetica



Intervista con Andrea Rocchi, Presidente del CREA

Il sistema agroindustriale italiano utilizza il 13% della energia complessivamente consumata nel Paese, molto meno di quanto avviene nell'Unione Europea (26% dei consumi totali). Siamo di fronte, quindi, ad un settore della nostra economia decisamente virtuoso, soprattutto se consideriamo il ruolo di assoluto rilievo, per quantità e qualità, che l'agroalimentare italiano assume nello scenario mondiale. In questa intervista Andrea Rocchi, presidente del CREA il principale ente pubblico italiano per la ricerca scientifica in campo agricolo, agroalimentare e agroindustriale delinea le linee di intervento prioritarie e le sfide da affrontare.

Quali sono le principali sfide che l'agricoltura italiana deve affrontare per diventare più sostenibile dal punto di vista energetico?

Il sistema agroindustriale italiano utilizza il 13% della energia complessivamente consumata nel Paese, molto meno di quanto avviene nell'Unione Europea (26% dei consumi totali). Siamo di fronte, quindi, ad un settore della nostra economia decisamente virtuoso, soprattutto se consideriamo il ruolo di assoluto rilievo, per quantità e qualità, che l'agroalimentare italiano assume nello scenario mondiale. L'agricoltura in senso stretto è ancor più parca, con consumi diretti di energia dovuti ai combustibili per trattori, serre e i trasporti, e consumi indiretti per la produzione di fitosanitari, fertilizzanti e impiego di materiali come la plastica (4,7 Mtep). Un contesto, pertanto, già favorevole ma comunque migliorabile.

“Siamo un settore virtuoso”

In questa direzione vanno una serie di attività di ricerca del CREA e di politiche pubbliche comunitarie e nazionali che spingono al contenimento e all'efficientamento dell'utilizzo dei mezzi tecnici per coltivazioni e allevamenti. Possiamo ricordare, tra l'altro, l'agricoltura di precisione, le Tecnologie di Evoluzione Assistita (TEA), l'ottimizzazione delle risorse irrigue, tutti funzionali a coniugare finalità ambientali e miglioramento dei redditi degli imprenditori agricoli. Ma la grande sfida (in realtà una opportunità) per l'agricoltura è contribuire alla indipendenza energetica del Paese senza perdere la prioritaria funzione di produzione di alimenti. Un interessante e promettente strumento è l'agrivoltaico.

Il CREA sta promuovendo progetti o ricerche sull'utilizzo delle energie rinnovabili in agricoltura, come l'energia solare o biomasse?

Il CREA è attivo da numerosi anni con progetti sulle bioenergie. Tra i progetti conclusi nel 2024:

- il grande progetto AGROENER Energia dall'agricoltura: innovazioni sostenibili per la bioeconomia, finanziato dal MASAF, che ha visto la partecipazione di oltre 14 UU00 e 90 ricercatori;
- il progetto di ricerca Biovoltaico, per la realizzazione di un impianto agrivoltaico a Bassano Romano (VT) per produzione ortofrutticole anche in regime biologico. (Centro CREA-IT);
- la realizzazione all'interno del CREA-IT (Accordo CREA-EGP) di tre tipologie impiantistiche di agrivoltaico

avanzato che combina l'agricoltura e la produzione di energia solare in modo innovativo e più efficiente, promuovendo un uso sostenibile delle risorse e riducendo l'impatto ambientale;

- progetto SO-FAST, finanziato dall'Unione europea (PNRR) con l'obiettivo di selezionare biomasse agroforestali residuali idonee per essere sottoposte a processi di conversione energetica utilizzando criteri basati sulla disponibilità e sul potenziale energetico di tali biomasse.

In che modo la transizione energetica può impattare le piccole aziende agricole rispetto a quelle di dimensioni maggiori?

La presenza degli impianti di Agrivoltaico e Agrisolare permette di creare una struttura aziendale energeticamente autosostenibile, con la possibilità di costituire una Comunità Energetica Rinnovabile (CER). Questa soluzione favorisce un notevole risparmio energetico e promuove un uso più efficiente delle risorse, contribuendo a un modello più sostenibile e collaborativo.

Esistono tecnologie emergenti che ritiene particolarmente promettenti per ridurre il consumo energetico nel settore agricolo?

Come dicevamo sopra, gli impianti di Agrivoltaico e Agrisolare, l'agricoltura di precisione, le TEA, sensori IoT, sono tutti strumenti che consentono una riduzione sostanziale dei consumi energetici e una gestione più efficiente delle risorse, favorendo un approccio agricolo sostenibile e integrato.

Qual è il ruolo del CREA nel promuovere innovazioni utili agli agricoltori per adottare pratiche agricole più efficienti dal punto di vista energetico?

Il ruolo del Crea può essere articolato in differenti punti/aree di disseminazione e divulgazione tecnico scientifica per quanto riguarda soluzioni soprattutto a piccola scala e per specifici contesti aziendali e produttivi: ad esempio recupero di biomasse specifiche (che richiedono particolari attrezzature o cantieristiche), oppure l'installazione e l'adozione di sistemi di generazione di biogas, produzione elettrica diretta da impianti agro fo-

tovoltaici o piccole turbine eoliche.

“Il trasferimento tecnologico è fondamentale,”

Fondamentale è il trasferimento tecnologico attraverso sistemi dimostrativi anche applicati e realizzati nelle nostre aziende sperimentali come, ad esempio, l'impianto agrivoltaico di prossima realizzazione presso l'azienda sperimentale del CREA-IT di Monterotondo; e il coinvolgimento, per il supporto tecnico scientifico, di stakeholder intermedi in contatto con gli agricoltori: associazioni, enti territoriali, piccole e medie imprese, startup.

Come CREA avete curato la stesura delle linee guida nazionali sull'agrivoltaico. Quali sono le indicazioni prioritarie?

Le linee guida predisposte dal CREA e le conseguenti regole operative definite dal GSE (Gestore dei servizi energetici) per l'incentivazione della realizzazione di sistemi agrivoltaici di natura sperimentale con il sostegno del PNRR, rappresentano un evidente esempio di attività di ricerca e di indagine messe al servizio della collettività con finalità e approcci di estrema concretezza. Obiettivo e filo conduttore è garantire la continuità dell'attività agricola, evitando la subordinazione dell'uso della terra e delle imprese agricole alla prevalente attività di produzione di energia, attraverso una costante azione di monitoraggio basata su indicatori semplici e significativi, raccolti con metodologia riconosciuta e rigorosa. Si è così scelto quale oggetto di ricognizione la Produzione Lorda Vendibile (PLV) agricola, usufruendo della Rete di Informazione Contabile Agricola (RICA), indagine svolta in tutta l'Unione Europea dal 1965, con la quale in Italia vengono rilevate ed elaborate dal CREA le principali informazioni economiche di circa 11.000 imprese agricole rappresentative dell'intero settore. Il monitoraggio, pertanto, è orientato ad utilizzare strumenti consolidati di analisi, come la RICA o il fascicolo aziendale, con l'obiettivo di riconoscere alle aziende agricole il ruolo di protagonista nella transizione energetica.

La sostenibilità energetica dei processi di filtrazione delle acque per uso agricolo

In Italia il consumo idrico imputabile al settore agricolo è prossimo al 40% dell'acqua prelevata (39 miliardi di m³/anno)^[1] proveniente da risorse idriche convenzionali come acquedotti e consorzi di irrigazione e bonifica (63%), acque sotterranee prossime al punto di utilizzo (17,9%), acque superficiali esterne come laghi e fiumi (11%) ed interne (4,7%). Gli effetti dei cambiamenti climatici come la riduzione delle disponibilità, aumento del fabbisogno, risalita del cuneo salino) impongono un cambio di paradigma generale per mitigare lo stato di stress idrico già marcato (Fig. 1), attraverso il ricorso a fonti idriche non convenzionali come acque reflue o desalinizzate^[2] sicure per la salute e l'ambiente.

DOI 10.12910/EAI2025-036

di Daniele Pizzichini, Claudio Russo, Gian Paolo Leone, Dipartimento Sostenibilità Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi Territoriali - Divisione dei Sistemi Agroalimentari Sostenibili - Laboratorio Bioeconomia Circolare Rigenerativa e Federica Colucci, Dipartimento Sostenibilità Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi Territoriali - Divisione dei Sistemi Agroalimentari Sostenibili - Laboratorio Innovazione delle Filiere Agroalimentari - ENEA

Se in Italia il principio di riuso delle acque è stato introdotto con il D.Lgs 152/1999 e recepito in modo esclusivo col DM n. 185/2003, è solo con il Reg. (UE) 2020/741 che la normativa è stata armonizzata, definendo le prescrizioni minime utili a definire la qualità dell'acqua, correlando i rispettivi ambiti di utilizzo irriguo, individuando le frequenze minime di controllo ed introducendo strumenti come il Piano di Gestione dei Rischi. **Il regolamento è stato attuato in Italia con il DL 39/2023 introducendo però una maggiore restrizione per elementi fertilizzanti ad impatto ambientale (azoto, fosforo) o agenti batterici pericolosi per la salute (Salmonella spp.) (Tab. 1) e semplificando l'iter autorizzativo per i dissalatori con capacità inferiore a 200 L/s.**

Trattamenti delle acque per l'agricoltura

Le tecnologie di trattamento di acque destinate all'uso agricolo possono essere classificate in estensive e intensive. Le prime includono fitodepurazione, utilizzo di invasi e recupero delle acque reflue in bacini di accumulo e si caratterizzano per il basso impatto energetico e per l'efficacia di abbattimento del carico organico ma richiedono tempi di contatto prolungati e superfici estese. I trattamenti intensivi includono processi di disinfezione (clorazione, irraggiamento UV) e di filtrazione volti alla riduzione del contenuto in solidi sospesi ed eventualmente di composti organici e inorganici. Questi trattamenti comprendono anche la filtrazione di profondità (filtri a sabbia, a carbone) e i processi a membrana, tra cui micro e ultrafiltrazione, nano-

filtrazione e l'osmosi inversa, queste ultime impiegate nel caso di acque salmastre/saline o abbattimento di contaminanti metallici o pesticidi^[4]. **In particolare i sistemi a membrana assicurano una qualità idrica elevata in linea con gli standard normativi più stringenti ma richiedono maggiori consumi energetici, soprattutto quelli per nanofiltrazione ed osmosi inversa che incidono fino all'80% sui costi di trattamento.**

Microfiltrazione (MF) / Ultrafiltrazione (UF) - I processi di MF e UF vengono applicati per rimuovere solidi sospesi e carica microbiologica delle acque, necessitano di pressioni tra 1-3 bar e comportano consumi tra 0,1-0,3 kWh/m³ (maggiori per la UF) con possibilità di riduzione a 0,05 kWh/m³ nel caso di MF applicata ad acque già parzialmente chiarificate come quelle in uscita dai depuratori biologici o a

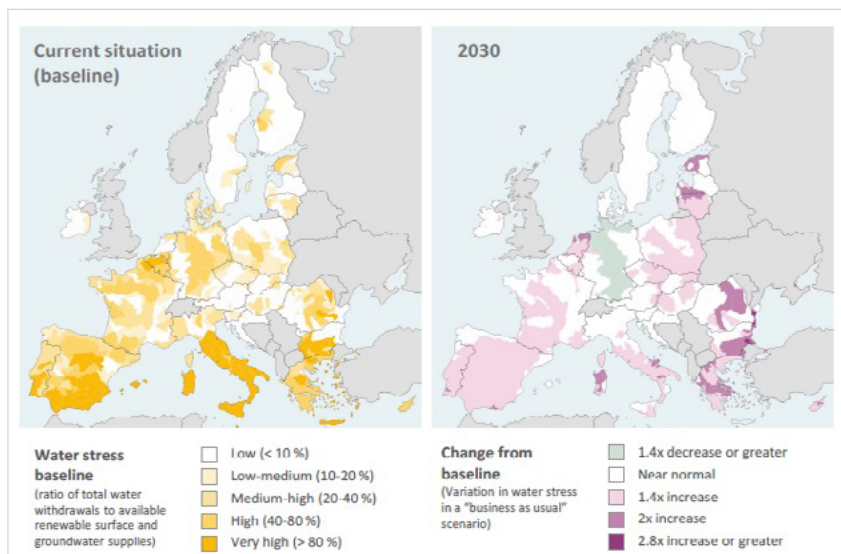


Figura 1 - Stress idrico nell'UE, confronto situazione 2021 - 2030 [3]

0,2 kWh/m³ nel caso di impianti UF su acque già trattate.

Un caso particolare è dato dai **bioreattori a membrana (MBR)** che si rivolgono al trattamento dei fanghi biologici con consumi totali per l'aerazione e filtrazione più alti (0,5 - 1 kWh/m³).

Nanofiltrazione (NF) / Osmosi Inver-

sa (OI) - I processi di NF e OI rimuovono composti organici o metallici, nutrienti e ioni. In ambito agricolo, intervengono in aree affette da ipersalinità delle risorse idriche come nel caso di acque salmastre, zone dove si ha l'incursione del cuneo salino o quando è possibile dissalare l'acqua di

mare per usi irrigui (es. Spagna, Cipro, Malta, Medio Oriente) (Fig. 2). **La NF viene usata per addolcire acque dure o salmastre e, nel contesto agricolo, trova impiego nel trattare acque di pozzo con nitrati o durezza elevata. La OI è utilizzata a valle di pretrattamenti (filtrazione sabbia, MF/UF).**

La NF opera a pressioni intermedie (tipicamente 5-15 bar, in base alla salinità) con consumi energetici che dipendono dal contenuto salino dell'alimentazione, in particolare ascrivibile ai sali bivalenti: in acque con salinità ridotta (TDS, 500-1000 mg/L), i consumi sono mediamente tra 0,3-0,5 kWh/m³, nel caso di acque salmastre (TDS, 2000-5000 mg/L) il fabbisogno energetico è prossimo a 1 kWh/m³ con valori sino a 2 kWh/m³ per salinità maggiore (TDS > 10.000 mg/L). L'OI richiede pressioni di esercizio elevate (fino a 50-70 bar) con consumi dipendenti dal livello di salinità dell'acqua trattata: per acque dolci o leggermente salmastre (TDS < 2.000 mg/L) i consumi sono mediamente pari a 0,3-0,6 kWh /m³, nel caso di acque salmastre (TDS 2.000-10.000 mg/L)

Classe di qualità	Obiettivo Tecnologico indicativo	Prescrizioni di qualità									
		E.coli (numero/100 mL)	BODs (mg/L O ₂)	TSS (mg/L)	Torbidità (NTU)	Legionella spp (ufc/L)	Nematodi intestinali	N _{tot} (mg/L) ⁽³⁾	P _{tot} (mg/L) ⁽³⁾	Salinità (psu)	Salmonella spp.
A	Trattamento secondario, terziario, filtrazione e disinfezione	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 1.000	≤ 1 uovo/L	In conformità al D.Lgs 152/2006 (tabella 2 ove applicabile,	In conformità al D.Lgs 152/2006 (tabella 2 ove applicabile,	≤ 10	assente
B	Trattamento secondario, terziario e disinfezione	≤ 100	In conformità alla direttiva 91/271/CE (allegato I, tabella 1)	In conformità alla direttiva 91/271/CE (allegato I, tabella 1)	-	≤ 1.000	≤ 1 uovo/L	tabella 3,	tabella 3,	≤ 10	assente
C	Trattamento secondario, terziario e disinfezione	≤ 1.000			-	≤ 1.000	≤ 1 uovo/L	allegato 5, parte III)	allegato 5, parte III)	≤ 10	assente
D	Trattamento secondario, terziario e disinfezione	≤ 10.000			-	≤ 1.000	≤ 1 uovo/L			≤ 10	assente

Classe di qualità: A: Colture alimentari da consumare crude la cui parte commestibile è a diretto contatto con le acque affinate e le piante da radice da consumare crude; B: Colture alimentari da consumare crude la cui parte commestibile è prodotta al di sopra del livello del terreno e non è a diretto contatto con le acque affinate; colture alimentari trasformate; colture per alimentazione animale (pascolo e colture da foraggio); colture non alimentari; C: Colture alimentari da consumare crude la cui parte commestibile è prodotta al di sopra del livello del terreno e non è a diretto contatto con le acque affinate; colture alimentari trasformate; colture alimentari non trasformate, comprese le colture utilizzate per l'alimentazione di animali da latte o da carne (solo per Irrigazione a goccia o altra tecnica di irrigazione che eviti il contatto diretto con la parte commestibile della coltura); D: Colture industriali, da energia e da sementi.

Tabella 1 - Classi di qualità e prescrizione di qualità delle acque affinate a fini irrigui in agricoltura
Fonte: Allegato A all'art. 7 del D.L. 39/2023



Figura 2 - Impianto di trattamento delle acque reflue di Rincón de León (Alicante, Spagna)^[5]

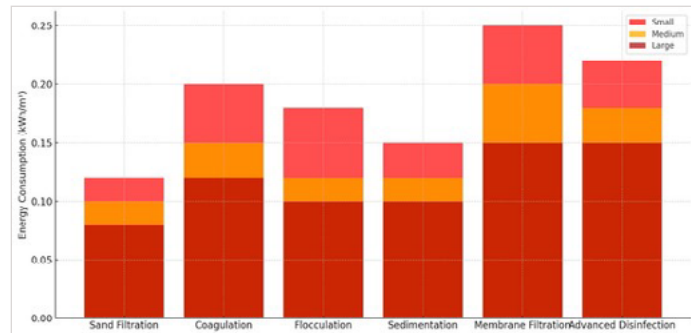


Figura 3 - Comparazione dei consumi energetici riferibili a diverse tecniche di procesamiento di acque superficiali, stimati anche in termini di economia di scala (kwh/m³).

sono pari a 1 – 2 kWh/m³, per acqua di mare (TDS, ~35.000 mg/L) si arriva sino a 3 – 5 kWh/m³. Consumi ridotti sono associati ai sistemi dotati di recupero energetico.

Costi di trattamento delle acque per l'agricoltura

Al netto del costo unitario dell'energia di ciascun Paese i costi operativi di trattamento di acqua affinata per usi irrigui dipendono dalle prescrizioni, più o meno stringenti, delle normative nazionali: in generale essi sono stimati tra 0,06 - 0,09 €/m³ nel caso di ricorso a filtrazione profonda e disinfezione, tra 0,14 - 0,20 €/m³ nel caso di trattamento con membrane seguito da disinfezione, fino a 0,45 USD/m³ in caso di UF, OI e disinfezione.

Vantaggi possono derivare da fattori di scala (Fig. 3) e dall'integrazione di fonti di energia rinnovabile come il fotovoltaico che in contesti produttivi

reali ha consentito una compensazione della domanda di energia tra il 20 e il 50%^[6]. In tale direzione vanno citate anche applicazioni legate allo sfruttamento di energia derivante da impianti agrivoltaici: un caso di studio è quello seguito da ENEA che, nell'ambito del programma di ricerca sul "Fotovoltaico ad alta Efficienza"¹, ha sviluppato un dissalatore di "prossimità" alimentato da impianto agrivoltaico.

Prospettive tecnologiche

Lo sviluppo di nuovi materiali rappresenta un driver importante di riduzione del consumo energetico: membrane a base di grafene o le loro varianti ibride permettono una significativa riduzione della resistenza idraulica e dunque del consumo fino al 30-50%; rivestimenti antimicrobici (nanoparticelle d'argento, biossido di titanio) possono agire sulla maggiore durata del ciclo di lavorazione, ridu-

cendo il costo dei prodotti chimici per la pulizia. L'integrazione di osmosi inversa e distillazione a membrana porta a stime di riduzione del 20%^[6]. Di particolare interesse la possibilità di sfruttare la concentrazione delle salamoie attraverso il recupero di energia derivante dal gradiente di salinità (SGE)^[7:8].

Conclusioni

Operare su alimentazioni "dolci", come le acque in uscita dai depuratori, o su acque salmastre/salate ricorrendo alle rinnovabili rende le tecnologie di filtrazione uno strumento valido per una agricoltura sostenibile, favorendo l'elevata qualità finale delle acque, il ricorso a fonti non convenzionali e la riduzione dello stress idrico nazionale.

per info: daniele.pizzichini@enea.it

¹ <https://www.ricercasistemmaelettrico.enea.it/accordo-di-programma-mase-enea-2022-2024/decarbonizzazione/fotovoltaico-ad-alta-efficienza.html>

Bibliografia

1. Andrea Barbabella, Virginia Ferruccio, and Chiara Montanini (2023). Troppa o troppo poca: l'acqua in Italia in un clima che cambia.
2. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) (2014). Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC) (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM)).
3. European Court of Auditors. (2021). Sustainable water use in agriculture: CAP funds more likely to promote greater rather than more efficient water use. Special report No 20, 2021. (Publications Office).
4. Pearce, G.K. (2008). UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs. *Desalination* 222, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.05.029>.
5. Melgarejo, J., Prats, D., Molina, A., and Trapote, A. (2016). A case study of urban wastewater reclamation in Spain: comparison of water quality produced by using alternative processes and related costs. *Journal of Water Reuse and Desalination* 6, 72–81. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.147>.
6. Skoczko, I. (2025). Energy Efficiency Analysis of Water Treatment Plants: Current Status and Future Trends. *Energies* 18. <https://doi.org/10.3390/en18051086>.
7. Rao, A.K., Li, O.R., Wrede, L., Coan, S.M., Elias, G., Cordoba, S., Roggenberg, M., Castillo, L., and Warsinger, D.M. (2021). A framework for blue energy enabled energy storage in reverse osmosis processes. *Desalination* 511, 115088. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115088>.
8. Manikandan, D., Karishma, S., Kumar, M., and Nayak, P.K. (2024). Salinity gradient induced blue energy generation using two-dimensional membranes. *npj 2D Materials and Applications* 8, 47. <https://doi.org/10.1038/s41699-024-00486-5>.

L'integrazione del fotovoltaico nelle imprese agricole: soluzioni e opportunità

L'articolo esamina l'adozione delle soluzioni fotovoltaiche nelle imprese agricole sia in relazione alle opportunità legate agli incentivi e alle misure del PNRR che alle esigenze specifiche delle imprese, descrivendo modelli di integrazione differenti in relazione agli obiettivi produttivi e identificando le linee di tendenza in atto, tra cui la progressiva elettrificazione delle operazioni aziendali nell'ottica della decarbonizzazione delle produzioni agricole.

DOI 10.12910/EAI2025-037

di Nicola Colonna, Divisione Sistemi Agroalimentari Sostenibili - ENEA

L'energia per molte imprese agricole e agroalimentari è un fattore della produzione cruciale ed il suo costo influenza in modo rilevante il costo finale del prodotto. Per tale motivo molte imprese agricole dal 2005, anno in cui la legislazione ha consentito di introdurre la produzione di energia come "attività connessa" (L. 266/2005) hanno investito in impianti di energia rinnovabile di diversa tipologia, tra cui il fotovoltaico che per entità dell'investimento, incentivi, semplicità, modularità e facilità di gestione ha avuto una diffusione rilevante ^[1].

Nel contesto della transizione energetica e della crescente attenzione verso la sostenibilità, l'integrazione dei sistemi fotovoltaici nelle aziende agricole offre molteplici vantaggi: riduzione dei costi, diminuzione dell'impronta carbonica, possibilità di disporre di energia in zone remote non raggiunte dalla rete elettrica e fonte di reddito aggiuntivo attraverso la vendita dell'energia prodotta

in eccesso. Nel nostro paese i dati disponibili più recenti (Gestore Servizi Energetici - GSE, 2024), mostrano che oltre 45.000 aziende agricole hanno in funzione impianti fotovoltaici (FV) la cui potenza media è pari a 63 kWp ^[2]. Se consideriamo che le imprese agricole in Italia sono più di un milione (1.133.023 ISTAT) ¹ la diffusione degli impianti FV è limitata a meno del 5% delle aziende agricole e rappresentano meno del 3% di tutti gli impianti FV installati nel nostro paese ma la taglia media degli impianti è più elevata rispetto a quelli dei settori residenziale e terziario e di conseguenza l'energia generata è quasi

il 10% dell'energia elettrica prodotta da tutti gli impianti del paese (Tab. 1). Questa fotografia, pur se recente, è de facto superata perché vi è stata, nel corso del 2024, una ampia adesione delle aziende agricole ed agroalimentari alla misura M2C1 "Parco agrisolare" del PNRR che ha previsto la possibilità di installare sulle coperture aziendali impianti FV sino a 1MW di potenza. Non sono disponibili i dati di consuntivo della misura ma i beneficiari ammessi sono stati quasi 23.000, per una potenza pari a 1.722 MW, da installare entro giugno 2026, la maggior parte dei quali in aziende agricole ².

Installati in aziende agricole	Valore	Confronti %
Impianti	45.560	2,85 degli impianti installati
Potenza, MWp	2.887	9,5 della potenza installata
Produzione lorda, GWh	2.984	9,7 dell'energia generata
Autoconsumi GWh	508	17% della produzione propria

Tabella 1: Potenza, produzione e autoconsumi degli impianti FV installati in aziende agricole italiane al 31 dicembre 2023 e confronto sul totale nazionale degli impianti FV.
Fonte: elaborazioni su dati GSE, Statistiche 2024

¹ 7° Censimento Generale dell'Agricoltura, ISTAT, 2020

² Decreto direttoriale, 5 maggio 25, MASAF

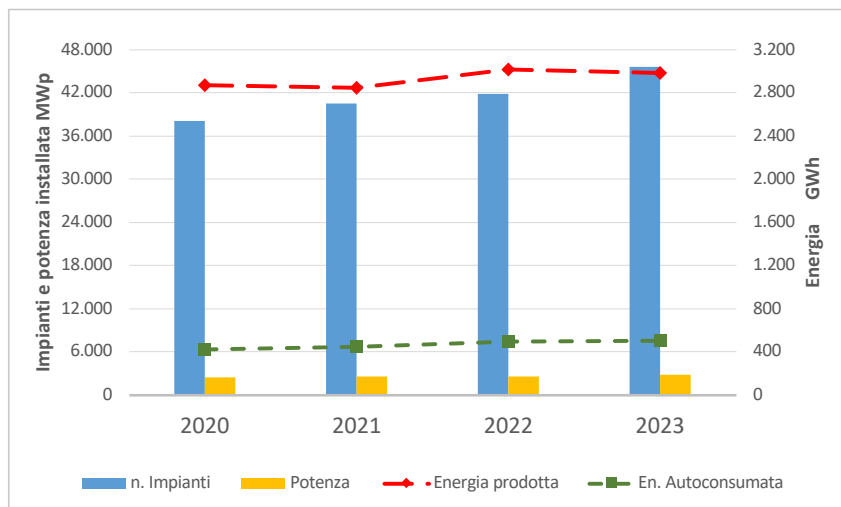


Figura 1: Numero di impianti, potenza installata ed energia prodotta e autoconsumata nelle aziende agricole italiane dal 2020 al 2023
Fonte: elaborazione su dati GSE, Statistiche fotovoltaico.

Un incremento importante, sia nel numero che nella potenza, che dimostra il forte interesse delle imprese agricole a produrre e vendere energia anche cogliendo l'opportunità di sostituire coperture obsolete o con amianto. Negli anni recenti, dal 2020 ad oggi, vi è stato un aumento del

numero di impianti in aziende agricole pari al 20% mentre la potenza installata è cresciuta di poco perché gli impianti sono mediamente più piccoli dei precedenti (Fig.1). La quota di autoconsumo dell'energia generata è cresciuta, pur se non supera il 17%, poiché molti impianti sono nati

esclusivamente per vendere energia sfruttando i diversi "conto energia" succedutisi dal 2006 in poi [3]. Non è possibile ricostruire una serie storica perché i metodi di rilevamento e l'attribuzione delle categorie Ateco sono stati modificati nel tempo ma dieci anni fa gli impianti erano meno della metà degli attuali.

Nel contesto agricolo i sistemi fotovoltaici possono essere implementati in differenti configurazioni e la loro modularità consente di soddisfare una domanda di energia dai pochi watt alle centinaia di kilowatt. La scelta dipende dalle specifiche esigenze dell'azienda, dalla disponibilità di spazi e superfici idonee, dalla capacità di investimento e dalle regole del sistema di incentivazione. Vi sono molte imprese che hanno realizzato impianti stand alone e/o comunque non collegati a forme di incentivazione ma attivando solo la formula del ritiro dedicato (RID) perché interessate soprattutto a soddisfare le proprie esigenze interne. Le imprese agricole sono potenzialmente motivate ad in-

Applicazione	Servizi Energetici	Benefici
Sistemi di irrigazione	Alimentazione pompe a basso consumo, sensori umidità suolo, centraline di controllo, trasmissione dati	Risparmio idrico ed energetico, irrigazione tempestiva, miglioramenti produttivi qualitativi.
Agricoltura di precisione	Alimentazione stazioni meteo distribuite in azienda e trasmissione dati wireless	Dati microclimatici aziendali spazializzati e tempestivi, interventi di precisione, ottimizzazione impiego degli input
Illuminazione strutture	Sistemi LED presso serre e stalle e sistemi di controllo parametri illuminazione	Ottimizzazione illuminazione colture, miglior controllo ore buio/luce, miglioramenti produttivi, benessere animale
Ventilazione e raffrescamento	Ventilatori e nebulizzatori in impianto avicolo, sensori controllo temperatura e umidità, automazione dei controlli e gestione attuatori	Riduzione mortalità animali, aumento produzione uova, risparmio energetico, riduzione emissioni
Robot autonomi	Stazione di ricarica solare per robot capaci di svolgere operazioni specifiche in autonomia	Monitoraggio stato colture, controllo meccanico infestanti, distribuzione mirata fitofarmaci, riduzione consumo gasolio, riduzione ore/uomo di lavoro

Tabella 2: Esempi di applicazioni reali di impianti FV in aziende agricole italiane, servizi e benefici ottenuti
Fonte: sintesi di casi studio di progetti raccolti dall'autore



Figura 2: Impianto fotovoltaico integrato su copertura di una stalla di bovine da latte in Sardegna

vestire nelle tecnologie fotovoltaiche da un insieme di fattori economici, ambientali e strategici. Analizzando le motivazioni, è possibile identificare i diversi driver che guidano la transizione energetica nel settore primario:

Motivazioni economiche

- Riduzione dei costi energetici
- Stabilità economica e prevedibilità dei costi
- Diversificazione del reddito
- Accesso a incentivi e finanziamenti

Obiettivi di decarbonizzazione e sostenibilità

- Riduzione dell'impronta carbonica
- Allineamento con gli obiettivi climatici nazionali e internazionali
- Adeguamento alle normative ambientali sempre più stringenti

Sostituzione dei combustibili fossili

- Riduzione della dipendenza da combustibili fossili
- Miglioramento della qualità dell'aria locale

Sicurezza e resilienza energetica

- Indipendenza dalla rete elettrica nazionale
- Resilienza agli eventi climatici estremi
- Continuità operativa
- Sicurezza alimentare

Vantaggi strategici e di mercato

- Miglioramento dell'immagine aziendale
- Accesso a mercati premium e Certificazioni
- Nuove opzioni produttive es. refrigerazione prodotti.

Ognuna di queste assume peso diverso in virtù del settore produttivo in

cui l'azienda opera, delle dimensioni aziendali, delle attività accessorie (es. agriturismo) e delle capacità imprenditoriali.

Con la progressiva diminuzione dei costi delle tecnologie fotovoltaiche e l'aumento dell'efficienza delle celle, oltre che la disponibilità di celle innovative semitrasparenti, è verosimile che l'adozione nel settore agricolo continuerà a crescere nei prossimi anni anche in combinazioni innovative come l'agrivoltaico. Le aziende che investono oggi in queste tecnologie non solo ottengono benefici economici immediati, ma si posizionano strategicamente per affrontare le sfide future legate alla sostenibilità e all'efficienza energetica e nella prospettiva delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) si col-

legano ad altre aziende del territorio con mutuo beneficio ^[4].

L'energia distribuita, e a basso costo, permette di cogliere opportunità sia lato gestione delle colture e degli allevamenti con sensori, attuatori, telecamere e tutti gli strumenti che consentono di acquisire dati ed informazioni, che di comandare "azioni" in tutta la superficie o i fabbricati aziendali. La rivoluzione dei "data" in agricoltura è basata in primis sulla disponibilità di energia che alimenta strumenti di acquisizione e sistemi di trasmissione dei dati autonomi e indipendenti, e distribuiti nell'azienda,

grazie ai moduli fotovoltaici integrati con batterie. Una ulteriore opzione è l'introduzione di macchine o robot totalmente elettrici le cui batterie possono essere ricaricate durante le ore diurne, grazie all'energia fotovoltaica, e che divengono esse stesse un sistema di accumulo dell'energia prodotta. La elettrificazione delle macchine, almeno per alcune specifiche operazioni culturali, è una soluzione che è già stata adottata da alcune aziende e, oltre a permettere di abbattere i costi operativi consente all'impresa di diminuire la propria impronta di carbonio.

Il fotovoltaico costituisce una opportunità di ampliamento delle opzioni produttive e operative dell'impresa rappresentando un elemento centrale della transizione energetica e ambientale cui le stesse aziende agricole sono chiamate a contribuire. In sintesi, esso rappresenta una soluzione "abilitante" capace sia di supportare la produzione che di aprire nuove opportunità lungo la filiera agroalimentare ed aumentare il valore aggiunto del settore.

per info: nicola.colonna@enea.it

Riferimenti Bibliografici

1. Carlo D., (2011). Valutazione della convenienza economica del fotovoltaico in azienda agricola. Agriregionieuropa anno 7 n°24, Mar 2011.
2. GSE - Gestore dei Servizi Energetici, (2024). Rapporto Statistico 2023: Solare fotovoltaico - Roma.
3. Colonna N., Lasorella M.V., Roffi L., (2023). Le fonti di energia rinnovabile per le aziende agricole biologiche tra obiettivi di sostenibilità e integrazione al reddito. Pp 275-289. In: Bioreport 2021-22 - L'agricoltura biologica in Italia. Edito da CREA/RRN
4. Confagricoltura, (2025). Primo rapporto sullo stato delle agroenergie. Rinnovabili in agricoltura: lo stato degli investimenti e le prospettive future. Roma.

Comprendere il nexus acqua, energia e cibo

La forte interconnessione tra il settore energetico, l'agricoltura e il settore idrico determina l'esigenza di adottare strategie condivise di gestione per governare i meccanismi di competizione per l'allocazione della risorsa idrica. Tali meccanismi si acquiscono soprattutto nella stagione estiva quando ad un calo delle precipitazioni corrispondono picchi di richiesta idrica dall'agricoltura e, contestualmente, si rilevano maggiori fabbisogni energetici per le esigenze di raffreddamento dei sistemi di produzione energetica, oltre ai maggiori fabbisogni dei settori residenziale e produttivo.

DOI 10.12910/EAI2025-038

di Luigi Petta, Gianpaolo Sabia, Laboratorio ENEA Tecnologie per la Gestione Circolare di Acqua e Reflui, Nicola Colonna, Divisione ENEA Sistemi Agroalimentari Sostenibili, Girolamo Di Francia, Laboratorio ENEA Energia e Data Science - ENEA

Le interconnessioni tra il sistema idrico integrato, il sistema energetico ed il sistema agricolo – alla base del cosiddetto Water-Energy-Food (WEF) Nexus – rappresentano un aspetto cruciale da considerare nella pianificazione degli usi delle risorse idriche al fine di garantire la sicurezza dell'approvvigionamento, l'efficienza e la sicurezza energetica, la sostenibilità ambientale, la competitività economica, l'innovazione tecnologica, la produzione e la trasformazione alimentare. In riferimento al contesto italiano tale esigenza viene richiamata nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC, 2024) e nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, 2023), alla luce degli obiettivi sanciti dalle politiche comunitarie in termini di sostenibilità, sicurezza energetica, gestione responsabile delle risorse idriche e produttività dei sistemi. Secondo i dati pubblicati nel database europeo Eionet, nel 2017 [1], la stima per i prelievi idrici in Italia ammonta a

39 miliardi di m³, con l'agricoltura che si conferma il settore più idroesigente, seguito dagli usi civili, dalla produzione industriale e dalla produzione di elettricità (a cominciare dal raffreddamento delle centrali termoelettriche). Dal punto di vista dei consumi energetici il settore agricolo richiede 6,3 TWh (Terna, 2023) pari al 2% dei consumi nazionali (287,4 miliardi di kWh) [2].

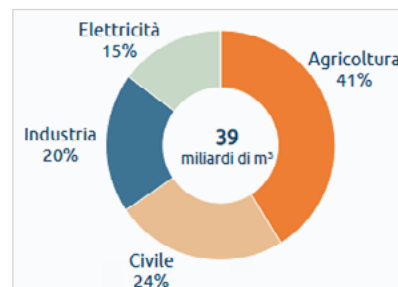


Figura 1 - Prelievo idrico in Italia distinto per settore (anno 2017) [1].

Idroelettrico e fonti rinnovabili

In Italia, la produzione di energia elettrica è caratterizzata da una

crescente quota di fonti rinnovabili, con particolare attenzione all'idroelettrico, che rappresenta circa il 15-20% del mix energetico nazionale. Le centrali idroelettriche sfruttano bacini, fiumi e invasi artificiali e pertanto il livello di produttività di tali fonti energetiche risulta fortemente sensibile alla disponibilità di risorse idriche, che possono variare a causa della siccità e dei cambiamenti climatici. La dipendenza dalle risorse idriche riguarda anche al settore termoelettrico, che richiede acqua per il raffreddamento degli impianti. Il consumo di acqua dolce da parte del sistema energetico nazionale (SEN), soprattutto per il raffreddamento e la produzione di vapore in centrali termoelettriche, è pari a circa 2 miliardi di m³/a, corrispondente a circa il 5% del fabbisogno idrico totale nazionale riferito al 2017.

La Figura 2 evidenzia i consumi di acqua sottratti dalle diverse tecnologie di generazione di energia, evidenziando l'importanza della risorsa idrica per il settore energetico nazionale sia per

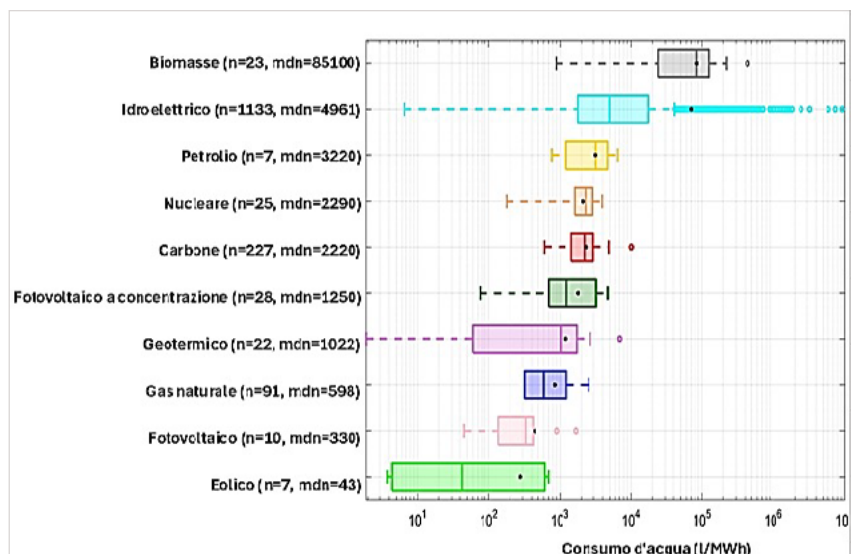


Figura 2 - Consumi di acqua blu delle varie tecnologie distinte per tipologia di fonte di produzione (n= numero di fonti bibliografiche analizzate, (mdn= mediana). Elaborazione ENEA dei dati tratti da [3].

il mix energetico attuale sia per gli scenari di sviluppo futuri, caratterizzati da una incidenza crescente delle FER.

La vulnerabilità del settore energetico

La vulnerabilità del settore energetico rispetto alla disponibilità di risorsa idrica si evidenzia soprattutto nei periodi di siccità prolungata, con possibili criticità nella gestione degli invasi legate alla salvaguardia degli usi prioritari (potabile e irriguo), ponendo a rischio tanto le produzioni agricole quanto gli obblighi produttivi dei gestori idroelettrici. In molti casi, inoltre, gli eventi siccitosi impongono l'adozione di pratiche alternative di approvvigionamento energetico (es. dissalazione, pompaggi). **Negli ultimi anni sono stati registrati prolungati periodi di scarse precipitazioni che hanno determinato situazioni di emergenza idrica in gran parte del territorio nazionale,** in particolare nell'estate 2003 così come nel 2017, sino alla più recente crisi del 2022. In quest'ultima occasione, si è

rilevato un calo di circa il 37% della produzione di energia idroelettrica rispetto all'anno precedente (30 miliardi di kWh prodotti a fronte dei 45 miliardi di kWh del 2021 [2]). Analoghe criticità hanno interessato le centrali termoelettriche, che rappresentano la principale fonte di elettricità del Paese (50,6% della potenza installata totale), con il fermo temporaneo di 5 grandi centrali dovuto alla magra del Po dell'estate 2022.

Per quanto riguarda il Servizio Idrico Integrato (SII), i consumi elettrici ascrivibili a tale settore ammontano a circa 7 TWh/anno, ovvero il 3% del consumo elettrico annuo italiano. Considerando le singole componenti si stima per il servizio acquedotto un consumo energetico annuale di 4350 GWh, di 577 GWh per il servizio fognatura e 2337 GWh per il servizio depurazione.

Emerge, quindi, anche per tale settore il carattere di sistema altamente energivoro [4].

I dati riportati evidenziano la forte interconnessione tra il settore energetico, l'agricoltura e il settore idrico,

da cui discende la necessità di strategie condivise di gestione al fine di governare i meccanismi di competizione per l'allocazione della risorsa idrica, che si acquiscono soprattutto nella stagione estiva in cui ad un calo delle precipitazioni corrispondono picchi di richiesta idrica da parte dell'agricoltura e, contestualmente, si rilevano maggiori fabbisogni energetici (per le esigenze di raffreddamento delle centrali termoelettriche ed i fabbisogni degli impianti idroelettrici, oltre ai maggiori fabbisogni dei settori residenziale e produttivo).

Il nesso Water-Energy-Food

In linea con il nesso Water-Energy-Food diviene, quindi, essenziale in sede di pianificazione un approccio innovativo di tipo organico e non più settoriale, in grado di combinare la salvaguarda del bilancio idrico e la sicurezza energetica e produttiva, nel quadro dei cambiamenti climatici in atto.

ENEA, nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico nazionale (RdS - PTR 2025-2027), nel progetto 1.11 "Risorsa idrica e sistema energetico" - Work Package 3 "Strategie di adattamento ai cambiamenti climatici per la salvaguardia della risorsa idrica", punta a sviluppare metodologie di analisi e di valutazione finalizzate a mettere in luce, a livello macro-territoriale, le interconnessioni tra SEN, SII e settore agricolo, tenendo conto del bilancio idrico, dei livelli di stress idrico a livello di bacino e dei fabbisogni energetici connessi al sistema produttivo. Tra le attività previste, il progetto si propone di effettuare un focus del settore depurativo, al fine di valutare il potenziale di produzione di acque reflue non convenzionali riutilizzabili a sostegno della domanda dei settori produttivi alleviando così le pressioni sulle risorse primarie. **Di fatto, tra le principali strategie di mitigazione e**

contrasto dei fenomeni di carenza idrica, tese a garantire la sicurezza alimentare ed energetica, il riutilizzo degli effluenti degli impianti di depurazione municipali assume un ruolo chiave. Questi vanno considerati come veri e propri “processi produttivi” in grado di garantire risorsa idrica quantitativamente rilevante e, soprattutto, con volumi pressoché costanti nel tempo ed un livello di qualità fit-for-purpose, cioè modulabile in base alle effettive esigenze d’uso.



Figura 3 - Mappatura degli impianti di depurazione italiani con carico generato maggiore o uguale a 2.000 abitanti equivalenti [5].

La rilevanza del contributo del settore depurativo rispetto alle richieste del comparto agricolo emerge già dal raffronto tra i quantitativi di acque reflue depurate ed i fabbisog-

gni idrici per scopi irrigui. Secondo una valutazione ENEA, riportata nel Blue Book 2024 [5], in Italia si contano 3.678 impianti al servizio di agglomerati con carico generato maggiore o uguale a 2.000 abitanti equivalenti con una volumetria complessiva di effluenti depurati di circa 5,9 miliardi di metri cubi all’anno che, se destinate al comparto agricolo, sarebbero in grado di soddisfare il 53% del fabbisogno irriguo nazionale.

Il riutilizzo delle acque reflue

In relazione al tema del riutilizzo delle acque reflue occorre inoltre considerare le recenti evoluzioni del contesto normativo di riferimento, rappresentate dal Regolamento EU 2020/741, applicato a partire da giugno 2023 e riportante le prescrizioni minime per la qualità dell’acqua da destinare a riutilizzo agricolo e le disposizioni sulla gestione dei rischi per la salute umana, animale e per l’ambiente. Ai fini della valutazione dei rischi, il regolamento prevede di considerare anche i contaminanti emergenti e le microplastiche ed a tale tematica il sopra menzionato progetto 1.11 RdS dedica specifiche attività di rilevamento e caratterizzazione analitica su effluenti depurati, nonché prove di laboratorio finalizzate alla valutazione dei rischi eco-tossicologici derivanti dall’esposizione ai contaminanti

emergenti ed alla valutazione di possibili tecnologie per la loro rimozione, valutando gli impatti sul settore della depurazione e le relative esigenze di investimento. **Del resto, il comparto depurativo dovrà presto adeguarsi e prevedere cicli di trattamento idonei a rimuovere tali inquinanti, finora non considerati dalla normativa di settore,** in base a quanto previsto dalla nuova Direttiva EU 3019/2024 sul trattamento delle acque reflue urbane e industriali.

Inoltre, per indagare le esigenze del settore agroalimentare, nel corso del progetto saranno monitorati i bilanci idrici ed energetici di alcune aziende target ad elevata idro-esigenza afferenti a settori quali l’orticolo, fiore all’occhiello della nostra agricoltura, strettamente dipendente dalla quantità e qualità dell’acqua non solo nella fase di coltivazione ma anche nei processi di lavorazione e confezionamento.

Il progetto nel suo complesso intende, quindi, ricavare elementi valutativi del WEF Nexus per i settori indagati in modo da facilitare e promuovere, in tali contesti, approcci alla gestione delle risorse maggiormente sostenibili nella prospettiva dei cambiamenti climatici e a garanzia della sicurezza energetica ed alimentare.

per info: luigi.petta@enea.it

Bibliografia

1. Troppa o troppo poca: l’acqua in Italia in un clima che cambia 2023. Italy Climate Report.
2. Dati statistici sull’energia elettrica in Italia. Terna 2023.
3. Yi Jin, Paul Behrens, Arnold Tukker, Laura Scherer, 2019: Water use of electricity technologies: A global meta-analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 115, 2019, 109391, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>.
4. Mancusi L., Morandi S., Volonterio M., Giudici F., 2018: Efficienza energetica del servizio idrico integrato, Rdse Area "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori energetici".
5. BLUE Book 2024: Servizio idrico integrato e filiera estesa dell’acqua. Utilitatis.

Tecnologie smart per un'agricoltura sostenibile

Soluzioni tecnologiche innovative consentono di raccogliere dati da sensori e utilizzarli per la miglior gestione aziendale finalizzata anche al risparmio di energia, in particolare nell'indoor farming. Le tecnologie smart nell'agricoltura non rappresentano semplicemente un'innovazione tecnica ma un cambiamento paradigmatico nel modo di concepire la produzione agricola. La possibilità di monitorare in tempo reale le condizioni delle colture, di automatizzare la gestione delle risorse e di prevenire potenziali problematiche attraverso l'analisi predittiva pone le basi per un'agricoltura più resiliente e sostenibile. In questo contesto, l'ottimizzazione energetica e l'uso efficiente delle risorse non sono solo obiettivi desiderabili ma necessità imprescindibili per garantire la sostenibilità a lungo termine del settore agricolo.

DOI 10.12910/EAI2025-039

di Luca Nardi, Silvia Massa ed Angiola Desiderio, Dipartimento Sostenibilità, Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Divisione Sistemi Agroalimentari Sostenibili - Laboratorio Agricoltura 4.0, Raniero Trinchieri, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione: accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali, Giampaolo Caputo, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, Divisione Smart Sector Integration e generazione distribuita da FER Laboratorio Energia e Data Science - ENEA

Agricoltura 4.0 e gestione intelligente delle risorse

Nel panorama dell'agricoltura contemporanea la digitalizzazione rappresenta una rivoluzione che sta trasformando radicalmente il settore primario. L'agricoltura 4.0, caratterizzata dall'implementazione di sistemi Internet of Things (IoT), sensori avanzati e analisi dei dati, ha registrato una crescita significativa con un incremento del 19% nel mercato italiano tra il 2022 e il 2023, raggiungendo per la prima volta il valore di 2,3 miliardi di euro.

Questa trasformazione consente alle aziende agricole di tutte le dimensioni di ottimizzare i processi produttivi, migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse (acqua, fertilizzanti, energia luce etc) e promuovere pratiche sostenibili riducendo, al contempo, l'utilizzo degli agrofarmaci e migliorando

la qualità delle produzioni. Particolarmente rilevante è l'applicazione di queste tecnologie nell'indoor farming, dove l'integrazione di impianti di illuminazione LED, sensori e data analytics permettono di ottenere un controllo preciso e mirato non solo delle condizioni ambientali ma anche dello sviluppo, della crescita e dello stato di salute delle piante (Fig.1; Fig. 2).

Con sistemi avanzati per la gestione energetica è possibile seguire e guidare i processi metabolici adattando i consumi alle reali necessità fisiologiche delle singole specie coltivate. Nelle coltivazioni in ambiente controllato, infatti, l'illuminazione LED, le tecniche di coltivazione idroponica e piani di fertilizzazione mirata, si adattano ai vari stadi di crescita delle piante in modo da ottenere il massimo risultato in termini di resa e qualità.

Il ruolo dei sensori nel monitoraggio e nella diagnostica

I sensori rappresentano gli elementi fondamentali che rendono possibile la digitalizzazione delle aziende agricole, fungendo da interfaccia tra il mondo fisico e quello digitale. La varietà di sensori impiegati nel settore agricolo è considerevole e ciascuno è progettato per monitorare parametri specifici. I sensori di temperatura ad infrarossi (IRT-) vengono tipicamente utilizzati per analizzare la temperatura fogliare, correlata all'attività stomatica. Integrando questi dati, con sensori di umidità, i sistemi di controllo calcolano il Deficit di Pressione di Vapore (VPD) ottimale (0.8-1.2 kPa per la fase vegetativa), regolando attivamente il processo di trattamento aria con umidificatori e ventilazione. Nelle coltivazioni che integrano impianti di illuminazione LED, questo equilibrio permette di

e generano segnali logici intelligenti che vengono trasmessi agli attuatori per l'irrigazione tempestiva e il controllo dell'illuminazione per la crescita delle piante. Questa automazione dei cicli decisionali riduce la necessità di intervento manuale e ottimizza l'allocazione delle risorse.

Il caso studio ENEA: una vertical farm sperimentale a gestione energetica avanzata

L'implementazione di tecnologie smart nell'agricoltura ha prodotto risultati tangibili come dimostrato dall'esperienza negli impianti di coltivazione idroponica realizzati in ENEA, dove l'adozione di strumenti IoT ha permesso di migliorare la crescita delle coltivazioni, risparmiare acqua e ridurre il tempo dedicato alle operazioni di monitoraggio. Questi vantaggi quantificabili testimoniano il potenziale trasformativo dell'agricoltura digitale in termini di efficienza operativa e sostenibilità ambientale.

Nel Centro di Ricerca della Casaccia è stata realizzata una vertical farm sperimentale all'interno di un container (Accordo attuativo n. 2021-2-HH.0 tra Agenzia Spaziale Italiana e Università degli Studi di Napoli Federico II, CUP F79C20000300005, in collaborazione con ENEA, Università degli Studi di

Roma 'Tor Vergata' e CNR) che rappresenta una soluzione innovativa per l'agricoltura in ambiente controllato, consentendo la coltivazione in spazi ridotti e con condizioni ottimizzate. In questo sistema, il controllo del clima viene effettuato da un gruppo frigo tradizionale ed è essenziale per garantire la crescita ottimale delle colture, ma rappresenta anche una delle principali voci di consumo energetico (Fig.4). Nell'ottica di progettare un impianto completamente ecocompatibile e per ottenere elevate efficienze termodinamiche, si è deciso di installare una macchina invertibile che, nominalmente, in raffrescamento, con aria a 35 °C e producendo acqua a 7 °C, potrebbe garantire un Coefficiente di prestazione (EER) di 4,93. Attraverso misure di portata, temperatura e assorbimento elettrico è stato possibile valutare le prestazioni termodinamiche del sistema che si prevede di migliorare adottando sistemi di accumulo termici, che possano favorire la stabilità di funzionamento con conseguente miglioramento delle prestazioni energetiche, ed integrando collettori fotovoltaici.

Le pompe di calore, se integrate con sensori di temperatura e umidità, possono operare in modo dinamico, adattando il loro funzionamento alle effettive necessità dell'ambiente di

coltivazione. I dati raccolti dai sensori vengono elaborati da algoritmi di controllo che modulano l'attività delle pompe, garantendo il mantenimento delle condizioni ideali con il minimo dispendio energetico. Questo approccio adattivo consente di risparmiare energia rispetto ai sistemi tradizionali a funzionamento costante.

L'analisi predittiva rappresenta un'evoluzione significativa nella gestione energetica dell'indoor farming. Attraverso l'elaborazione dei dati storici relativi alle condizioni ambientali e ai consumi energetici, i sistemi di controllo possono anticipare le necessità di raffrescamento o riscaldamento, attivando preventivamente gli impianti e ottimizzandone l'efficienza. Questa capacità previsionale si traduce in un ulteriore risparmio energetico e in una maggiore stabilità delle condizioni di crescita per le colture.

Mappe Daily Light Integral (DLI) per l'ottimizzazione dell'illuminazione in serra

L'integrale di luce giornaliera (DLI) rappresenta la quantità totale di luce fotosinteticamente attiva (PAR -Photosynthetically Active Radiation) che una pianta riceve nell'arco di una giornata espresso come moli di luce per metro quadro al giorno. Il DLI è

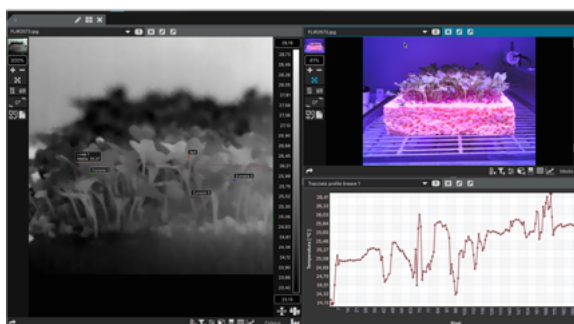


Figura 3 – Analisi termografica di una coltivazione di microverdure di Ravanello Daikon per la verifica delle temperature fogliari in piante sottoposte a stress idrico.



Figura 4 – Esterno container farm MICROx2 con pompa di calore ad alta temperatura (sx). Interno sistema di coltivazione automatizzata integrato di sensori IRT ed ambientali per la misurazione delle temperature ed umidità dell'aria, del substrato e della pianta (dx).

un parametro fondamentale per la crescita delle piante, in quanto influenza direttamente la fotosintesi e, di conseguenza, lo sviluppo e la produttività delle colture. La quantità di luce giornaliera necessaria alla pianta per potersi sviluppare completamente varia da specie a specie e dal tipo di prodotto che si vuole ottenere (Microverdure: 8-12 DLI; Ortaggi da foglia ed erbe 12-19 DLI; Fragole 20-24 DLI; Pomodori, Melanzane, Peperoncini e Cetrioli 24-35 DLI). La misurazione del DLI avviene attraverso sensori specializzati, quali i sensori PAR che registrano continuamente l'intensità luminosa, integrando i valori nell'arco delle 24 ore.

Le mappe DLI (Fig. 5) rappresentano una visualizzazione spaziale della distribuzione dell'integrale di luce giornaliera sul territorio italiano. La loro realizzazione richiede l'installazione di una rete di sensori di intensità luminosa distribuiti strategicamente all'interno ed all'esterno dello spazio di coltivazione. I dati raccolti vengono elaborati per creare rappresentazioni grafiche che evidenziano eventuali aree di carenza o eccesso di luce. Finora in Italia non erano disponibili mappe DLI. Recentemente l'ENEA vi ha posto rimedio creando mappe nazionali, mensili ed annuale, utilizzando le proprie banche-dati di misure a terra di radiazione solare e di mappe di radiazione solare per tutto il territorio italiano a diverse scale di dominio spaziale (con dettaglio fino al km quadro <http://www.solaritaly.enea.it/DLI/DLIMappelt.php>).

Queste mappe costituiscono uno strumento decisionale prezioso per gli operatori, consentendo di intervenire in modo mirato sull'illuminazione artificiale. I sistemi di illuminazione LED, controllati attraverso algoritmi basati sui dati DLI, possono compensare le carenze di luce naturale in specifiche aree della serra, garan-

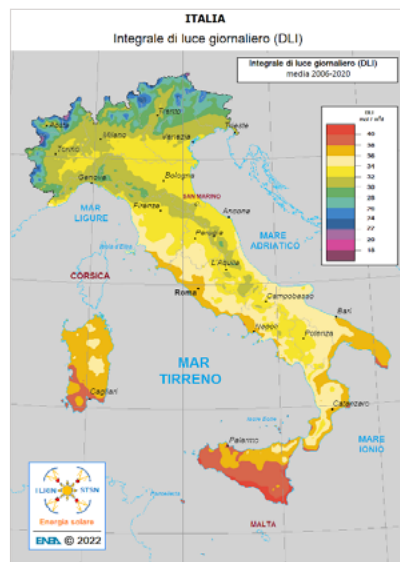


Figura 5 - Mappa DLI (integrale di Luce Giornaliera) dei valori medi annui (per l'intervallo annuo 2006-2020).

do a tutte le piante la quantità di luce ottimale per la loro crescita. Questa gestione precisa dell'illuminazione si traduce in una riduzione dei consumi energetici e in un miglioramento della qualità e della resa delle colture.

Conclusioni: verso un'agricoltura smart e sostenibile

L'integrazione di sensori, data analytics e tecnologie energetiche efficienti rappresenta la frontiera dell'agricoltura contemporanea, in particolare nell'ambito dell'indoor farming. Questo approccio multidisciplinare consente di affrontare le sfide della produzione alimentare con strumenti innovativi, orientati alla sostenibilità e all'efficienza. La raccolta e l'analisi dei dati trasformano l'agricoltura da settore tradizionale a settore ad alto tasso tecnologico aprendo possibilità precedentemente inimmaginabili.

Le tecnologie smart nell'agricoltura non rappresentano semplicemente un'innovazione tecnica ma un cambiamento paradigmatico nel modo di concepire la produzione agricola.

La possibilità di monitorare in tempo reale le condizioni delle colture, di au-

tomatizzare la gestione delle risorse e di prevenire potenziali problematiche attraverso l'analisi predittiva pone le basi per un'agricoltura più resiliente e sostenibile. In questo contesto l'ottimizzazione energetica e l'uso efficiente delle risorse non sono solo obiettivi desiderabili ma necessità imprescindibili per garantire la sostenibilità a lungo termine del settore agricolo.

La crescita costante del mercato dell'agricoltura 4.0, testimoniata dall'aumento del 17% delle soluzioni di Smart Agriculture per un business da 140 milioni di euro, conferma la validità di questo approccio e lascia intravedere un futuro in cui la tecnologia e l'agricoltura saranno sempre più interconnesse a beneficio dei produttori, dei consumatori e dell'ambiente.

per info: luca.nardi@enea.it

La Banca Dati Italiana LCA a supporto della circolarità nel settore agroalimentare

La Banca Dati Italiana LCA, sviluppata da ENEA, è un'infrastruttura pubblica online che fornisce gratuitamente dati ambientali di alta qualità su processi produttivi italiani, utili per imprese, pubbliche amministrazioni e progettisti. Si pone come strumento rilevante per supportare la transizione del sistema produttivo nazionale, ed in particolare quello agroalimentare, verso l'economia circolare e l'efficienza delle risorse.

DOI 10.12910/EAI2025-040

di Valentina Fantin, Sara Cortesi, Caterina Rinaldi, Cristian Chiavetta, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Divisione Economia Circolare, Laboratorio Strumenti per la Sostenibilità e Circolarità di Sistemi Produttivi e Territoriali - ENEA

La Banca Dati Italiana di Life Cycle Assessment (LCA): metodologia e struttura

Nel contesto degli obiettivi europei per la sostenibilità ambientale, come quelli previsti dal Green Deal europeo e dal Piano di Azione per l'Economia Circolare, emerge la necessità di adottare strumenti concreti per supportare una transizione verso una economia più resiliente e a basse emissioni. In quest'ottica si inserisce la Banca Dati Italiana di Life Cycle Assessment (BDI-LCA), sviluppata da ENEA attraverso il progetto Arcadia (2019-2023), finanziato dal programma PON-Governance (<https://www.arcadia.enea.it/>). La BDI-LCA (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node>) è un'infrastruttura pubblica online che fornisce gratuitamente dati ambientali di alta qualità su processi produttivi italiani, utili per imprese, pubbliche amministrazioni e progettisti. I dati in essa contenuti possono essere utilizzati per effettuare studi LCA basati su dati nazio-

nali, favorendo l'adozione di strumenti certificativi come le Environmental Product Declarations, con impatti positivi su ecodesign, economia circolare, innovazione e competitività. Attualmente la banca dati contiene oltre 180 dataset relativi a 23 filiere produttive con una forte presenza nei settori edilizia e costruzioni (58%) e agroalimentare (25%) ed è in continuo aggiornamento. I dati sono conformi alle norme ISO 14040-44 e al formato ILCD ^[1], garantendo qualità e trasparenza. La banca dati è basata sul software SODA4LCA del Joint Research Centre della Commissione Europea, con il supporto dello strumento Metadata Edit (MEdit) sviluppato da ENEA (<https://medit.enea.it/>) per la gestione dei metadati.

Il progetto si avvale di un approccio partecipativo coinvolgendo gruppi di lavoro multidisciplinari per ciascuna filiera, producendo studi LCA affidabili, documentati nei Report LCA associati ai dataset. La "Metodologia Arcadia" codifica le fasi operative: dalla raccolta dati alla revisione cri-

tica indipendente. La banca dati può ospitare dataset relativi a prodotti di singole aziende, dati specifici per una determinata area territoriale e dataset conformi alla metodologia europea Product Environmental Footprint (PEF).

Il settore agroalimentare e gli studi LCA di filiera sviluppati per la Banca Dati Italiana LCA

Il settore lattiero-caseario e quello del pomodoro trasformato rappresentano due dei comparti più rilevanti all'interno della filiera agroalimentare nazionale; entrambi, tuttavia, contribuiscono ad un elevato consumo di risorse e all'emissione di gas ad effetto serra, a causa dell'utilizzo di fertilizzanti, sia di sintesi sia organici, e di agrofarmaci, del consumo di acque dolci e di combustibili fossili ^[2,3]. In tale contesto lo sviluppo di una banca dati nazionale LCA, che comprenda dataset relativi a prodotti lattiero-caseari e di trasformazione del pomodoro italiani, rappresentativi, dal punto di vista temporale, tecnolo-

gico e geografico, dei processi di produzione delle filiere, riveste un ruolo molto rilevante per l'applicazione di strategie circolari e sostenibili.

All'interno del progetto Arcadia sono stati realizzati diversi dataset (attualmente 44) per la BDI-LCA relativi al settore agroalimentare ed in particolare sulla produzione di latte crudo vaccino del Nord Italia e di prodotti derivati dal pomodoro da industria, a cui si aggiungono alcuni dataset relativi ad altri prodotti (mostarda di frutta, torrone, cipolle, latte e formaggio ovini, gelati, merendine, pandoro e panettone), sviluppati dai progetti LIFE EFFIGE (www.lifeeffige.eu) e LIFE MAGIS (www.lifemagis.eu), entrambi co-finanziati dal programma LIFE dell'Unione Europea.

Lo studio LCA di filiera sul latte crudo del Nord Italia è stato effettuato da ENEA in collaborazione con Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali – Produzione, Territorio, Agroenergia. Per lo studio della filiera del pomodoro da industria, ENEA ha collaborato con Ambiente Italia S.r.l., con il coinvolgimento dell'Associazione Nazionale Industriali Conserve Alimentari Vege-

tali, le organizzazioni interprofessionali OI Nord e OI Sud, il Consorzio Casalasco e le Regioni Emilia-Romagna e Campania.

Nei report LCA di filiera del latte crudo e del pomodoro ^[3], collegati a ogni dataset e che descrivono lo studio di ciclo di vita a partire da cui i dataset sono stati sviluppati, sono riportate le descrizioni di ciascuna filiera, delle sue caratteristiche peculiari, dei suoi prodotti rappresentativi e delle sue principali tipologie di impatto ambientale e socioeconomico. I documenti presentano, inoltre, i risultati dello studio in relazione alla produzione di 1 kg di latte crudo e 1 kg di prodotto derivato dal pomodoro (passata, concentrato, polpa, pelati, cubetti, succhi, salse di pomodoro, salsa pizza).

Prospettive e sviluppi futuri

Grazie ad un accordo tra ENEA e MASE (2024-2029) è previsto un piano di sviluppo della banca dati con strumenti di supporto (come un Help Desk), l'adesione a reti di banche dati europee e internazionali, l'estensione a nuovi settori e lo sviluppo di un modello di gestione a lungo termine. A

breve, inoltre, verranno inseriti circa 250 dataset sviluppati dal progetto ILCIDAF (<https://www.lcafoodilcidaf.it/>) relativi alle filiere di agrumi, olio, vino, pasta e pane, rendendo così l'agroalimentare il settore produttivo con il maggior numero di dataset presenti nella banca dati.

I dataset sviluppati possono essere utilizzati in modo gratuito da imprese, associazioni di categoria, consulenti, enti di ricerca e università per effettuare studi LCA, ottenere etichette ambientali di prodotto, valutare soluzioni di mitigazione e miglioramento dal punto di vista ambientale e, più in generale, per ottimizzare l'uso delle risorse con l'obiettivo finale di supportare la transizione ecologica e circolare nel settore.

Per partecipare allo sviluppo della BDI-LCA e contribuire con nuovi dataset, è possibile contattare il Laboratorio Strumenti per la Sostenibilità e Circolarità di Sistemi Produttivi e Territoriali dell'ENEA: lca.bancadatiitaliana@enea.it.

per info: valentina.fantin@enea.it

Bibliografia

1. JRC (2010), "ILCD Handbook. General Guide for Life Cycle Assessment-Detailed Guidance", Joint Research Centre, Commissione Europea.
2. Fantin V., Cortesi S., Frisone F., Rinaldi C., Sandrucci A., Tamburini A., Bava L., Zucali M., Gislone G., 2024. Sviluppo di dataset per il settore agroalimentare per la banca dati italiana LCA: il latte crudo vaccino prodotto in Nord Italia. In Atti del XVIII Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA, Pescara, 3-5 luglio 2024, Pescara, Associazione Rete Italiana LCA, 2024, ISBN: 9791221004571.
3. Cortesi S., Fantin V., Frisone F., Porta P.L., Rinaldi C., Cariani R., Canzanelli S., D'Amico E., Fregonese C., Sandrucci A., Tamburini A., Bava L., Zucali M., Gislone G. (2024), AGROALIMENTARE - Studi di Life Cycle Assessment di filiera e sviluppo di dataset per la Banca Dati Italiana LCA del progetto Arcadia. ENEA, 2024, ISBN: 9788882864675.

Gli scarti della vite per produrre energia e fertilizzanti

Dalla decomposizione termochimica dei residui della potatura si possono ottenere diversi sottoprodotti: gas di sintesi, oli combustibili per la produzione di energia elettrica e calore e il biochar, un fertilizzante che può aumentare la resilienza dei vigneti a fattori esterni. ENEA partecipa a un progetto da 1,5 milioni di euro, coordinato dal Crea, per la messa a punto di un protocollo per produrlo.

DOI 10.12910/EAI2025-041

di Alice Avila, Unità Relazioni e Comunicazione - ENEA

Dalla decomposizione termochimica degli scarti di potatura della vite si possono produrre fertilizzanti e ammendanti come il biochar, un carbone vegetale ottenuto dalle biomasse per migliorare la fertilità del suolo, oltre a gas di sintesi e oli combustibili per la generazione di energia elettrica e calore.

È questo uno dei risultati portanti di REVINE (Regenerative agricultural approaches to improve ecosystem service in Mediterranean vineyard), progetto internazionale da 1 milione e mezzo di euro coordinato dal Crea (Consiglio per la ricerca in agricoltu-

ra e l'analisi dell'economia agraria), al quale partecipa ENEA. Il progetto coinvolge quindici partner di sei paesi del Mediterraneo (Italia, Portogallo, Cipro, Egitto, Tunisia e Francia), oltre a enti di ricerca, aziende vitivinicole e associazioni di categoria e si avvia alla conclusione, dopo quattro anni di attività. L'obiettivo principale è stato aumentare la resilienza dei vigneti ai fattori esterni attraverso tecniche agricole che preservano la fertilità e la biodiversità dei suoli e riducono il consumo di acqua e l'uso di fertilizzanti chimici e pesticidi.

Nel Centro ricerche ENEA della Trisaia (Rotondella, provincia di Matera), i

ricercatori della Divisione di Bionergia, bioraffineria e chimica verde del Dipartimento Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili hanno messo a punto un protocollo per la produzione di biochar da scarti di potatura della vite, trattati tramite un processo termochimico di pirolisi in un impianto pilota che ne può lavorare 40 chili/ora.

Inoltre, i ricercatori ENEA hanno esaminato con la metodologia del Life Cycle Assessment l'impronta ambientale del biochar ricavato dagli scarti della vite e ne hanno studiato l'effetto sui microorganismi del suolo attraverso l'analisi del loro DNA.



Prove in vaso con il biochar presso il CREA-VE di Turi.



Biochar prodotto dall'ENEA Centro Ricerche Trisaia a partire da scarti di potatura della vite



L'agricoltura moderna deve affrontare sfide sempre più complesse

La tecnica utilizzata per l'analisi del DNA - il metabarcoding - ha studiato brevi sequenze di DNA di ciascuna specie. Ogni sequenza è una sorta di codice a barre utile per l'identificazione della specie stessa. Una successiva analisi bioinformatica ha confrontato i microrganismi rinvenuti nel terreno trattato con le specie microbiche presenti nei suoli non trattati con biochar. Da qui è emerso che il **biochar influenza in modo significativo e positivo la componente microbica del suolo. Un elemento di rilievo per la crescita delle piante e la loro resilienza.**

Come spiega la responsabile del progetto REVINE per ENEA, Fiammetta Alagna, "le conoscenze acquisite nel corso del progetto potranno essere utilizzate per lo sviluppo di biochar di nuova generazione per rispondere in maniera calibrata alla diversa natura dei suoli e delle piante coltivate. L'a-

gricoltura moderna, infatti, deve affrontare sfide sempre più complesse per far fronte a vere e proprie emergenze ambientali che vanno dalla desertificazione all'eccessivo utilizzo di pesticidi e fertilizzanti, dall'inquinamento atmosferico e del suolo ai cambiamenti climatici. In questo contesto, l'applicazione di pratiche colturali che siano al tempo stesso altamente produttive e sostenibili dal punto di vista ambientale risulta di fondamentale importanza per tutta la filiera agroalimentare".

La valorizzazione degli scarti mediante il loro riutilizzo costituisce uno strumento efficace per migliorare la sostenibilità e la circolarità delle produzioni agricole. Per questo ENEA partecipa anche ad altri progetti "nei quali stiamo approfondendo i meccanismi di azione del biochar. Ad esempio, tramite il sequenziamento dell'RNA prodotto in diversi organi e tessuti delle piante, si può valutare l'effetto del biochar sull'espressione genica, ovvero il processo per cui ogni cellu-

la è in grado di attivare, o esprimere, solo alcuni dei geni contenuti nel suo DNA e questo fornisce una sorta di fotografia dello stato fisiologico della pianta".

Il biochar prodotto da ENEA è stato sperimentato in un'azienda agricola pugliese (società agricola D'Alessandro a Conversano) su vigneti di Primitivo e Nero di Troia per la produzione vinicola, ma non è esclusa la sperimentazione su vigneti per la produzione di uva da tavola. Le altre aziende italiane partner di REVINE (l'azienda agricola San Marco a Turi, Ermes a Noicattaro e il consorzio Nu. Va.U.T - Nuove Varietà di Uva da Tavola, composto da ventitré produttori impegnati nella sperimentazione di nuove varietà) hanno impiegato altri fertilizzanti sviluppati nell'ambito del progetto, come consorzi microbici e compost, per rendere i vigneti più adattabili alle condizioni climatiche sempre più mutevoli.

per info: alice.avila@enea.it

Impatti socioeconomici degli impianti a biometano

In Italia, il biometano rappresenta un'opportunità per lo sviluppo di un'economia circolare, integrando la gestione sostenibile dei rifiuti organici con la produzione di energia rinnovabile. Attraverso la digestione anaerobica dei rifiuti organici, è possibile generare un gas rinnovabile compatibile con le infrastrutture esistenti del gas naturale. Questo processo riduce le emissioni climalteranti, valorizza le risorse locali, promuove l'occupazione nelle aree rurali e contribuisce alla sicurezza energetica nazionale.

DOI 10.12910/EAI2025-042

di Jacopo Bindi, Maria Rosaria Seminara, Giuseppe Pellegrini Masini, Alessandro Agostini Dipartimento Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili, Sezione Metodologie, Approcci e Strumenti per l'analisi della Sostenibilità delle Tecnologie Energetiche - ENEA

Nel contesto della transizione energetica, l'Unione Europea riconosce una grande rilevanza alla produzione di gas rinnovabili. Il biometano, in particolare, ha un ruolo chiave nella decarbonizzazione dei settori trasporti, industriale e del riscaldamento civile. Secondo il piano REPowerEU (European Commission, 2022), la produzione europea di biometano dovrebbe raggiungere i 35 miliardi di metri cubi entro il 2030. In questo modo il biometano contribuirebbe non solo alla riduzione delle emissioni climalteranti, ma anche alla sicurezza energetica e alla valorizzazione delle risorse locali. Oltre ai benefici ambientali, lo sviluppo del biometano offre rilevanti opportunità economiche e occupazionali, con benefici socio-economici su scala territoriale. **Tuttavia, la struttura geografica ed economica dei diversi territori europei risulta un fattore determinante per uno sviluppo efficace e sostenibile del mercato del biometano, richiedendo strategie specifiche adattate alle singole realtà locali (Sesini et al., 2024).** In Italia, il biometano rappresenta un'opportunità per

lo sviluppo di un'economia circolare, integrando la gestione sostenibile dei rifiuti organici con la produzione di energia rinnovabile. Attraverso la digestione anaerobica dei rifiuti organici, è possibile generare un gas rinnovabile compatibile con le infrastrutture esistenti del gas naturale. Questo processo non solo **riduce le emissioni climalteranti, ma valorizza le risorse locali, promuove l'occupazione nelle aree rurali e contribuisce alla sicurezza energetica nazionale.** In linea con gli obiettivi del Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC) e del Green Deal europeo, il biometano si configura come un vettore chiave per la decarbonizzazione dei settori agricolo, industriale e dei trasporti.

Effetti diretti e indiretti sull'occupazione

Dal punto di vista occupazionale, si attivano effetti sia diretti, legati alla fase di costruzione, gestione e manutenzione degli impianti, sia indiretti, che riguardano la logistica, la raccolta dei rifiuti e il comparto agricolo. Sebbene il contributo in termini assoluti sull'occupazione nazionale

possa risultare limitato, nei territori marginali o a bassa densità produttiva tali attività possono rappresentare una leva di sviluppo locale, favorendo la diversificazione economica e la resilienza delle imprese agricole.

Le aziende agricole, trasformando residui agricoli e reflui zootecnici in input produttivi, possono ridurre i costi di smaltimento e accedere a nuove fonti di reddito. Anche gli enti locali possono beneficiare di economie di scala nella gestione della frazione organica dei rifiuti urbani, riducendo i costi di trattamento e incrementando la produzione di energia da fonti rinnovabili distribuite. Il rafforzamento delle filiere locali per il conferimento dei substrati, la distribuzione dell'energia o l'utilizzo del digestato, rappresenta un'opportunità per distribuire i benefici economici sul territorio. **Uno dei nodi critici legati alla produzione di biometano è rappresentato dalla competizione per l'uso del suolo.** Se la produzione si basa esclusivamente su scarti e rifiuti, il rischio di conflitti è minimo. Ma l'aumento della domanda di biomasse può incentivare l'uso di colture dedicate, riducendo la superficie disponibile

per la produzione alimentare. Questo fenomeno può avere effetti rilevanti: aumento dei prezzi agricoli, pressione sulla biodiversità, sfruttamento eccessivo dei suoli, consumo d'acqua e disboscamento. Per queste ragioni, la normativa europea (RED II e RED III) scoraggia l'uso di colture alimentari per la produzione di biocarburanti, favorendo invece l'impiego di residui organici e sottoprodotti.

È quindi fondamentale che lo sviluppo del biometano si basi su filiere realmente sostenibili, che non compromettano la sicurezza alimentare né inducano cambiamenti indiretti nell'uso del suolo.

Resistenza dalla popolazione e redistribuzione dei benefici economici

La realizzazione di impianti di biometano, come nel caso di altre infrastrutture energetiche, può incontrare resistenze da parte della popolazione locale. Il timore di odori, traffico, rischi ambientali legati al digestato o della semplice invasività del progetto può generare opposizioni, talvolta anche in presenza di tecnologie moderne e controlli ambientali stringenti. Per questo motivo, **è fondamentale mantenere un controllo rigoroso sulla qualità dell'aria, soprattutto nelle aree densamente abitate e implementare sistemi di certificazione, tracciabilità e coinvolgimento degli stakeholder locali, al fine di garantire un uso sicuro e socialmente accettabile.** La letteratura evidenzia che l'accettabilità sociale dei progetti energetici è fortemente influenzata dal grado di coinvolgimento delle comunità locali nei processi decisionali e dalla trasparenza nella distribuzione dei benefici (Wüstenhagen, Wolsink, & Bürer, 2007; Walker & Devine-Wright, 2008). Modelli partecipativi – come consultazioni pubbliche, co-progettazione, comitati di

controllo – permettono di integrare le istanze locali nella definizione dei progetti e, quindi, di generare fiducia nel progetto. **Un ulteriore elemento determinante è la redistribuzione dei benefici economici:** quote delle entrate possono essere destinate a fondi per lo sviluppo locale, agevolazioni energetiche, servizi ambientali o investimenti sociali.

In questo modo, il biometano può diventare non solo un'opportunità per i produttori, ma anche per i territori che ospitano gli impianti.

ENEA, partner del progetto Biomethaverse, è responsabile della valutazione della sostenibilità ambientale, sociale ed economica delle tecnologie sviluppate. Questa valutazione viene fatta utilizzando metodi quantitativi e qualitativi. Il personale del Dipartimento tecnologie energetiche e fonti rinnovabili – Sezione Metodologie Approcci e Strumenti per l'Analisi della Sostenibilità delle Tecnologie Energetiche, sta conducendo una survey rivolta al mondo della ricerca, dell'industria, e degli amministratori per indagare i potenziali impatti sociali del biometano che abbiamo delineato.

È atteso un significativo numero di risposte che permetta l'analisi quantitativa dei risultati. Per un'analisi più approfondita, in grado di affrontare gli aspetti più contraddittori e quelli meno evidenti, è stato realizzato un workshop di discussione con esperti scientifici, sia in ambito tecnico che socio-economico, politici e membri di associazioni di produttori di biogas e di reti ambientaliste. I diversi temi socio-economici sono stati discussi nel corso di alcune ore confrontando background, punti di vista e conoscenze diverse, talvolta anche in conflitto. **Inoltre, a partire da questi risultati saranno individuate categorie d'impatto e stakeholder lungo il ciclo di vita del biometano con le quali sarà avviato uno studio Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) al fine di garantire un approccio integrato e sostenibile alla produzione di metano da idrogeno verde.**

Criticità rilevanti

Il biometano rappresenta oggi una soluzione concreta per coniugare obiettivi di decarbonizzazione, resilienza energetica e sviluppo territoriale sostenibile. Tuttavia, il pieno



potenziale del biometano non può essere raggiunto senza affrontare in modo consapevole alcune criticità rilevanti. **La competizione per l'uso del suolo, la qualità e la tracciabilità delle biomasse impiegate, la percezione degli impatti ambientali da parte delle comunità locali e la distribuzione dei benefici economici sono nodi centrali da governare attraverso un approccio multidimensionale.** La sostenibilità non può essere concepita solo in termini tecnologici

o ambientali: essa richiede una forte attenzione alla dimensione sociale e territoriale, alla coerenza tra politiche e strumenti, alla partecipazione degli attori locali. **Diventa fondamentale integrare l'innovazione tecnologica con forme avanzate di governance partecipativa, orientate all'inclusione degli stakeholder e alla trasparenza dei processi.**

Solo adottando una **visione sistemica e territoriale della transizione**, fondata su una prospettiva di giustizia ener-

getica attenta alla distribuzione equa dei benefici, al riconoscimento delle istanze locali e alla partecipazione effettiva, il biometano potrà svolgere un ruolo decisivo nella costruzione di un sistema energetico sostenibile, equo e resiliente, contribuendo concretamente alla neutralità climatica e allo sviluppo locale.

per info: jacopo.bindi@enea.it

Bibliografia

- European Commission. (2022). REPowerEU Plan. Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0230>
- Nghiem, L. D., Koch, K., Bolzonella, D., & Drewes, J. E. (2017). Full-scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: Bottlenecks and possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 354–362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.062>
- Sesini, M., Creti, A., & Massol, O. (2024). Unlocking European biogas and biomethane: Policy insights from comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114521. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114521>
- Walker, G., & Devine-Wright, P. (2008). Community renewable energy: What should it mean? *Energy Policy*, 36(2), 497–500. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.019>
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5), 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>

Stima del potenziale di produzione di biometano in Italia

La produzione di biometano è in crescita in tutta Europa: tra il 2021 e il 2022 è passata da 3,5 a 4,2 miliardi di m³. Anche in Italia, si sta diffondendo la riconversione degli impianti a biogas esistenti in impianti a biometano, soluzione che può garantire la redditività futura di molte strutture nate per la produzione elettrica incentivata e ora avviate alla scadenza delle tariffe. Uno studio ENEA ha stimato che l'Italia potrebbe produrre fino a circa 5,6 miliardi di m³ annui di biometano utilizzando esclusivamente le biomasse elencate nell'allegato IX, parte A della RED II, come letame, scarti agricoli, FORSU e fanghi di depurazione.

DOI 10.12910/EAI2025-043

di Alessandro Giocoli^a, Claudio Carbone^b, Nicola Pierro^c, Giuseppe Di Florio^b, Vincenzo Motola^d, Alessandro Agostini^b

^a Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili - Divisione Strumenti e Servizi per le Infrastrutture Critiche e le Comunità Energetiche Rinnovabili - Laboratorio Analisi e Modelli per le Infrastrutture Critiche ed i Servizi essenziali - ENEA

^b Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili - Sezione Metodologie, Approcci e Strumenti per l'analisi della Sostenibilità delle Tecnologie Energetiche - ENEA

^c Dipartimento tecnologie energetiche e fonti rinnovabili - Divisione Bioenergia, bioraffineria e chimica verde - Laboratorio Tecniche e Processi per le Bioraffinerie - ENEA

^d European Commission, Joint Research Centre

La transizione verso un sistema energetico sostenibile e decarbonizzato è diventata una delle principali priorità strategiche dell'Unione Europea. Con la Direttiva RED II del 2018, l'UE ha chiesto agli Stati Membri di aumentare significativamente la quota di energie rinnovabili entro il 2030. In risposta, l'Italia ha elaborato il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), aggiornato nel 2024, che fissa un obiettivo di produzione annua di biometano pari a circa 4,9 miliardi di m³ al 2030 per il settore termico e trasporti.

Il Green Deal Europeo e, successivamente, il pacchetto legislativo Fit for 55 hanno reso vincolante la riduzione delle emissioni del 55% entro il 2030, aggiornando la RED II con la RED III e innalzando al 42,5% il target europeo di energie rinnovabili. Parallelamente, con il piano REPowerEU del 2022, la Commissione ha spinto verso

un'accelerazione della produzione di biometano, con un nuovo obiettivo comunitario di 35 miliardi di m³ entro il 2030, quale risposta alla crisi energetica aggravata dal conflitto russo-ucraino.

L'Italia, secondo produttore europeo di biogas, ha un ruolo cruciale nel raggiungimento degli obiettivi europei. Il settore italiano del biogas ha preso slancio a partire dal 2008 grazie all'introduzione della "Tariffa Omnicomprensiva", che incentivava la produzione elettrica da fonti rinnovabili, differenziando gli incentivi in base alla materia prima utilizzata e alla taglia dell'impianto. Questo schema ha favorito la diffusione di impianti di cogenerazione a biogas: tra il 2008 e il 2014 il numero di impianti è passato da 239 a 1796, con una potenza installata cresciuta da 365 a oltre 1400 MWel e una produzione elettrica annuale aumentata da 1599 a 8198 GWhel. Tuttavia, la revisione del si-

stema di incentivi nel 2014 ha reso gli investimenti meno attrattivi, causando una stagnazione del settore.

Negli ultimi anni, la priorità si è spostata dalla produzione elettrica da biogas alla produzione di biometano, che consente un uso più flessibile e una maggiore sostituzione del gas naturale fossile. Il biometano si ottiene dalla purificazione del biogas grezzo attraverso impianti di upgrading, fino a ottenere un contenuto di metano superiore al 97%, rendendolo adatto all'immissione nella rete gas o all'uso nei trasporti. La produzione di biometano è in crescita in tutta Europa: tra il 2021 e il 2022 è passata da 3,5 a 4,2 miliardi di m³. **Anche in Italia, si sta diffondendo la riconversione degli impianti a biogas esistenti in impianti a biometano, soluzione che può garantire la redditività futura di molte strutture nate per la produzione elettrica incentivata e ora avviate alla scadenza delle tariffe.**

Un meccanismo di supporto specifico

Dopo l'approvazione del PNIEC nel 2019, l'Italia ha introdotto un meccanismo di supporto specifico per i biocarburanti avanzati, con l'obiettivo di coprire l'8% del consumo energetico del settore trasporti al 2030. In risposta, nel 2022 erano già attivi 48 impianti a biometano, segnando una crescita rapida del settore. Il PNRR ha dato un'ulteriore spinta, stanziando risorse per impianti nuovi o riconvertiti, con il vincolo che questi entrino in esercizio entro il 30 giugno 2026. Il Decreto del 15 settembre 2022 ha previsto cinque bandi per assegnare le risorse: i primi quattro non hanno esaurito i fondi, mentre il quinto (chiuso a gennaio 2025) ha saturato la disponibilità, il che potrebbe consentire di superare i 2,3 miliardi di m³ previsti entro la metà del 2026, pur-

ché gli impianti vengano completati nei tempi stabiliti.

Uno studio ENEA ha stimato che l'Italia potrebbe produrre fino a circa 5,6 miliardi di m³ annui di biometano utilizzando esclusivamente le biomasse elencate nell'allegato IX, parte A della RED II, come letame, scarti agricoli, FORSU e fanghi di depurazione (Figura 1). Solo riconvertendo tutti gli impianti a biogas esistenti, si potrebbe già ottenere un volume annuo di circa 2,2 miliardi di m³ (Figura 2). Questo potenziale è paragonabile ai 4,1 miliardi di m³ di gas naturale estratto in Italia nel 2022 e rappresenta un'opportunità concreta per ridurre la dipendenza energetica dall'estero.

Sostenibilità economica degli impianti

Oltre agli importanti benefici ambientali in termini di riduzione delle

emissioni climalteranti, il biometano consente una gestione sostenibile dei reflui zootecnici e dei rifiuti organici, e il digestato residuo può essere impiegato come fertilizzante naturale, riducendo il consumo di concimi chimici. Tuttavia, le prospettive di sviluppo del settore dipendono fortemente dalla sostenibilità economica degli impianti, i cui costi variano a seconda della dispersione geografica delle biomasse, della logistica, delle tecnologie e della continuità degli incentivi. In assenza di sostegni economici, la redditività degli impianti a biometano è limitata. A oggi, due cicli di incentivi hanno favorito la crescita: quelli del 2018 e quelli del 2022 finanziati dal PNRR.

Nel breve termine, sarà essenziale rispettare le scadenze del PNRR per non perdere gli incentivi e comprometterne il raggiungimento degli

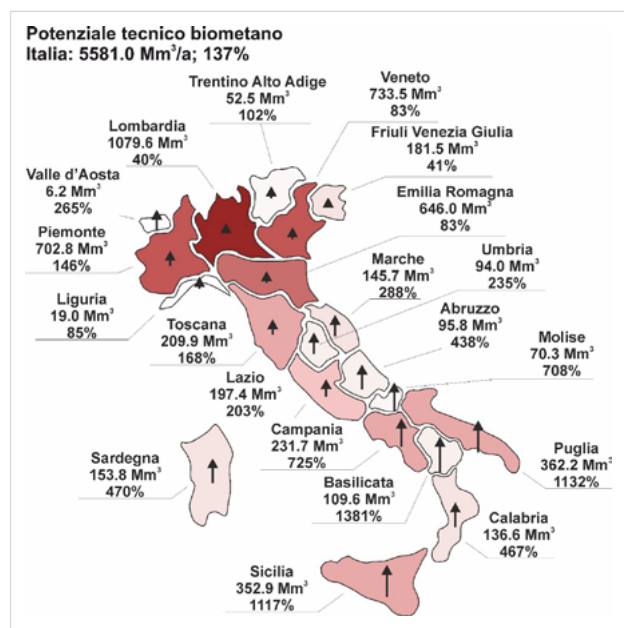


Figura 1 - Potenziale tecnico di biometano espresso in milioni di m³/anno (Mm³/a). L'intensità del colore è proporzionale alla potenzialità tecnica di ciascuna regione mentre la lunghezza delle frecce è proporzionale al possibile incremento della potenza installata (espresso in %) per ciascuna regione italiana rispetto alla potenza installata degli impianti a biogas nel 2021 (si veda Figura 2).

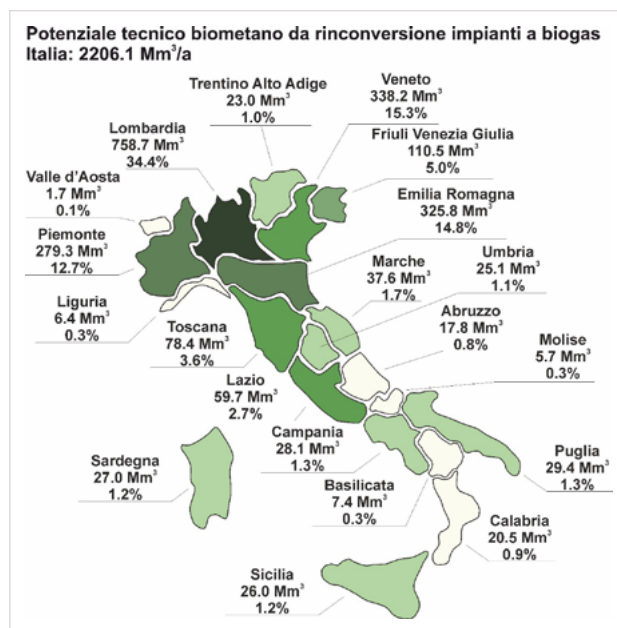


Figura 2 - Potenziale tecnico di biometano da riconversione degli impianti a biogas presenti sul territorio nazionale nel 2021.



obiettivi del PNIEC. A medio termine, l'Italia dovrà quasi raddoppiare la produzione di biometano per raggiungere l'obiettivo al 2030, il che richiederà nuove risorse economiche ancora non pianificate. A lungo termine, dopo la fine del ciclo di sostegni (ovvero, dal sedicesimo anno di attività degli impianti), si porrà il problema della sostenibilità economica in assenza di nuovi strumenti di supporto. Senza interventi, molti impianti rischieranno di non essere più economicamente sostenibili, con effetti negativi sulla produzione nazionale di biometano e sugli sviluppi futuri del settore. **Per**

garantire uno sviluppo duraturo, sarà necessario incrementare la domanda interna di biometano. Le industrie appartenenti ai settori cosiddetti "hard to abate" potrebbero assolvere agli obblighi del sistema europeo di scambio delle quote di emissione (EU ETS) acquistando biometano certificato. Inoltre, lo sviluppo del biometano impone investimenti in infrastrutture, soprattutto nel Mezzogiorno e in Sardegna, che ospitano il 54% delle aziende agricole italiane ed il 44% della superficie agricola utilizzata. In tali territori italiani risiede un enorme potenziale di produzione di biometano

no ancora poco valorizzato. **Lo sviluppo della filiera italiana del biometano richiede il superamento di criticità economiche, logistiche e normative, nonché l'adozione di una normativa stabile e di incentivi duraturi nel tempo, oltre a modelli di governance partecipativi. Investimenti in infrastrutture, digitalizzazione, innovazione tecnologica, semplificazione amministrativa e collaborazione tra stakeholder saranno fondamentali per garantire la continuità e il successo del settore.**

per info: alessandro.giocoli@enea.it

Tecnologie di metanazione a confronto: il progetto BIOMETHAVERSE

Il biometano può contribuire in modo significativo al conseguimento degli obiettivi europei di riduzione delle emissioni climalteranti al 2030 e di neutralità climatica entro il 2050. Inoltre, la sua produzione incrementa la resilienza del sistema energetico, riducendo la dipendenza dalle importazioni e attenuando l'impatto dei costi energetici su famiglie e imprese.

DOI 10.12910/EAI2025-044

di Roberta Roberto, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili – Sezione Supporto Tecnico Strategico - ENEA, Giampiero Sacchi, Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, Alessandro Agostini, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili – Sezione Metodologie, Approcci e Strumenti per l'analisi della Sostenibilità delle Tecnologie Energetiche - ENEA

Il biometano rappresenta una valida alternativa al gas fossile, grazie alla sua elevata flessibilità in termini di utilizzo, stoccaggio e distribuzione, che ne consente l'adattamento alla domanda energetica. Può essere immesso direttamente nelle reti di trasporto e distribuzione esistenti, in miscela con il gas naturale, oppure essere compresso o liquefatto per l'impiego nel settore dei trasporti. In virtù di queste caratteristiche, il biometano può contribuire in modo significativo al conseguimento degli obiettivi europei di riduzione delle emissioni climalteranti al 2030 e di neutralità climatica entro il 2050. Inoltre, la sua produzione incrementa la resilienza del sistema energetico, riducendo la dipendenza dalle importazioni e attenuando l'impatto dei costi energetici su famiglie e imprese ^[1].

In questo contesto si inserisce il **piano REPowerEU** ^[2], presentato dalla Commissione Europea il 18 maggio 2022, che evidenzia la necessità di accelerare lo sviluppo del biometano come misura strategica per ri-

durare l'importazione di gas naturale, favorire la transizione energetica e promuovere un'economia circolare. Il piano fissa un obiettivo ambizioso: raggiungere una produzione annua di 35 miliardi di metri cubi di biometano entro il 2030, rispetto agli attuali circa 22 miliardi di metri cubi di biogas e biometano complessivi ^[3].

A sostegno di questa strategia, **la Commissione ha pubblicato un documento di lavoro** ^[4] **che delinea una serie di interventi volti a valorizzare il potenziale europeo in materia di biogas e biometano. Tra le azioni prioritarie figurano: l'incremento degli investimenti, la riduzione dei costi produttivi, l'analisi delle criticità infrastrutturali, la promozione dell'innovazione e l'attivazione di strumenti finanziari dedicati.**

In questo ambito si colloca anche il lancio del **Partenariato Industriale per il Biometano (Biomethane Industrial Partnership - BIP)**, avvenuto il 28 settembre 2022. Il partenariato riunisce decisori politici, industria, associazioni di settore, società civile e mondo accademico, con l'obiettivo

di facilitare il coordinamento tra i diversi attori e sostenere l'attuazione del piano REPowerEU, favorendo l'espansione della produzione e dell'uso del biometano nel sistema energetico europeo.

Il biometano può essere prodotto attraverso una pluralità di tecnologie, con differenti livelli di maturità tecnologica e commerciale. Attualmente, la via più consolidata è l'upgrading del biogas ottenuto dalla digestione anaerobica di biomasse organiche, processo che genera anche un sottoprodotto, il digestato, utilizzabile come fertilizzante. Il biogas grezzo necessita di un trattamento di purificazione per la rimozione di contaminanti quali H₂S, acqua, ammoniaca, silossani e particolato, seguito da un processo di upgrading finalizzato alla separazione della CO₂ e di altri composti minori ^[5]. Le tecnologie di upgrading oggi disponibili comprendono tecniche di adsorbimento, assorbimento (chimico o fisico), e separazione a membrana o criogenica. Nella maggior parte dei casi, la CO₂ separata viene rilasciata in atmosfera. Tuttavia, un'ef-

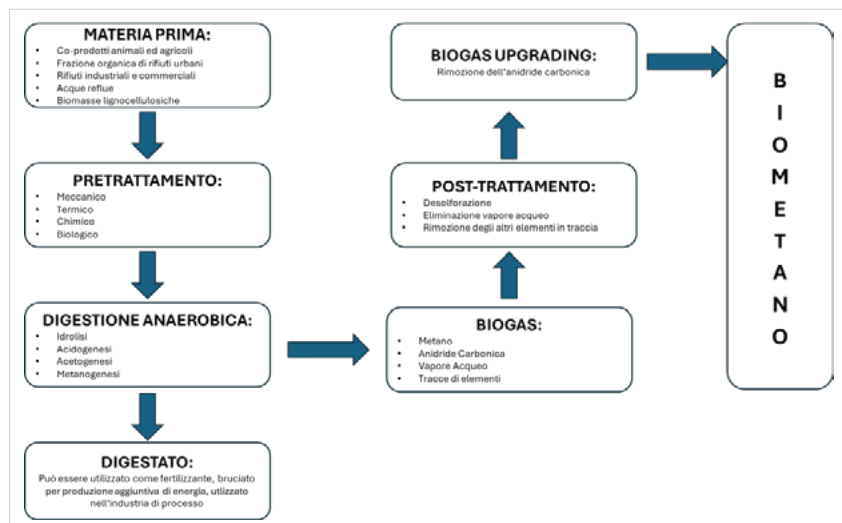


Figura 1: Processo di produzione del biometano tramite upgrading del biogas derivante dalla digestione anaerobica di biomasse organiche.

ficienza di separazione non ottimale può comportare il rilascio di metano insieme alla CO_2 , vanificando il bilancio emissivo positivo del biometano rispetto al gas fossile. In tale ottica, le tecnologie di metanazione rappresentano un'opzione interessante: esse consentono di convertire la CO_2 del biogas in ulteriore biometano, utilizzando idrogeno prodotto da fonti rinnovabili [6].

In linea con questi sviluppi, il progetto europeo BIOMETHAVERSE [7] (Demonstrating and Connecting Production Innovations in the BIOMETHAnE uniVERSE) è stato finanziato nel quadro della call HORIZON-CL5-2021-D3-03-16 "Innovative biomethane production as an energy carrier and a fuel". Il progetto mira a diversificare le tecnologie per la produzione di biometano in Europa, aumentarne l'efficienza economica e promuovere l'adozione di soluzioni innovative. Esso contribuisce al raggiungimento delle priorità delineate nell'Azione 8 del SET Plan e dalla Task Force 5 del Partenariato Industriale per il Biometano.

Avviato nell'ottobre 2022 e della du-

rata di 4,5 anni, BIOMETHAVERSE coinvolge 22 partner provenienti da 9 Paesi europei, con competenze che coprono l'intera filiera delle energie rinnovabili e del biogas. Il progetto sviluppa e testa tecnologie avanzate basate su processi termochimici, biologici e bioelettrochimici, focalizzandosi sia sul miglioramento della digestione anaerobica, sia sulla metanazione della CO_2 contenuta nel biogas. Cinque dimostratori impiantistici, ubicati in Francia, Grecia, Italia, Svezia e Ucraina, implementano altrettanti percorsi innovativi per la produzione di biometano, fondati su differenti combinazioni di tecnologie chimiche, biologiche ed elettrochimiche:

- **Francia (ENGIE):** Elettrometanogenesi in-situ ed ex-situ, basata sull'utilizzo diretto di elettricità per alimentare batteri metanigeni in un reattore bioelettrochimico, senza impiego di idrogeno;
- **Grecia (BLAG):** Upgrading termocatalitico del biogas, mediante reazione con idrogeno rinnovabile all'interno di un reattore catalitico;
- **Italia (CAP):** Metanazione biologi-

ca ex-situ del biogas, integrata con pretrattamento della biomassa tramite ozonolisi e produzione di idrogeno rinnovabile;

- **Svezia (RISE):** Metanazione biologica del syngas ottenuto dalla gassificazione termica, mediante batteri metanigeni operanti a temperatura mesofila o termofila;
- **Ucraina (MHP):** Iniezione diretta di idrogeno nel digestore anaerobico per la metanazione in-situ della CO_2 , sfruttando il ricircolo del biogas come sistema di agitazione.

I cinque concetti tecnologici adottano un approccio integrato alla sostenibilità e alla circolarità, minimizzando la produzione di sostanze di scarto, emissioni e perdite energetiche, con l'obiettivo di ridurre i costi complessivi e aumentare la produzione di biometano.

Gli obiettivi principali del progetto sono: dimostrare una maggiore efficienza economica e capacità innovativa nella produzione di biometano; aumentare la sostenibilità tramite la riduzione delle emissioni di gas serra; garantire la replicabilità e la scalabilità dei percorsi dimostrati; favorire l'introduzione sul mercato delle tecnologie sviluppate e formulare raccomandazioni di policy.

ENEA coordina il work package del progetto dedicato alla valutazione e ottimizzazione dei processi innovativi di produzione di biometano. Esso ha come obiettivo l'ottimizzazione tecnico-economica dei processi mediante modellistica avanzata, il loro upscaling a scala commerciale, e la valutazione integrata della sostenibilità delle tecnologie applicate nei pilot, a livello ambientale, economico e sociale.

I dimostratori vengono modellati mediante simulazioni di processo al fine di ottenere bilanci di massa ed energia accurati, funzionali alla valutazione tecnico-economica, ambientale e

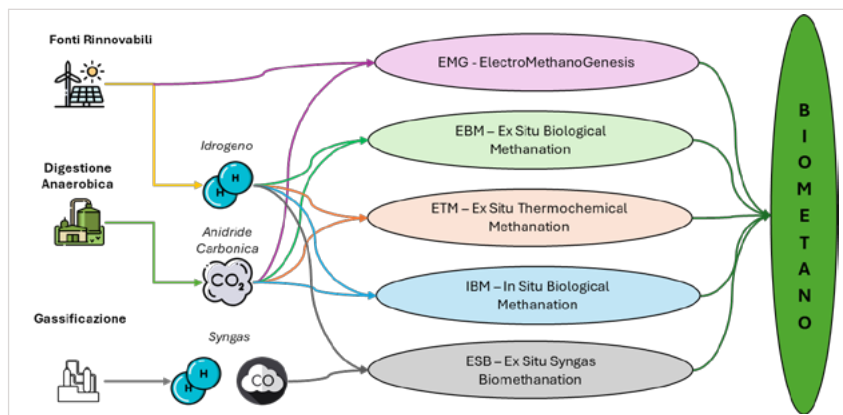


Figura 2: Percorsi innovativi per la produzione di biometano sviluppati nei cinque dimostratori del progetto BIOMETHAVERSE.

biocarburanti convenzionali. Particolare attenzione è rivolta alle emissioni dirette di gas serra, misurate in loco tramite strumentazione avanzata.

I risultati ottenuti permettono di individuare le configurazioni tecnologiche più sostenibili, fornendo indicazioni per l'eco-design e contribuendo all'ottimizzazione delle soluzioni sviluppate nell'ambito del progetto BIOMETHAVERSE. L'analisi è infine estesa a scenari su scala di mercato, con l'obiettivo di valutarne la replicabilità e fornire orientamenti strategici a operatori, decisori politici e stakeholder del settore.

sociale. Le prestazioni sono analizzate in termini di efficienza, costi e

impatti ambientali, con un confronto rispetto ai combustibili fossili e ai

per info: alessandro.agostini@enea.it

REFERENCES

1. [Online]. Available: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/11/GfC-study-The-optimal-role-for-gas-in-a-net-zero-emissions-energy-system.pdf>
2. "COM(2022) 230 final, COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI, Piano REPowerEU." [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230>
3. "EBA, Statistical Report 2024." [Online]. Available: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2024/>
4. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033922121>
5. R. Muñoz, L. Meier, I. Diaz, and D. Jeison, "A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 14, no. 4, pp. 727–759, Dec. 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9379-1.
6. I. Angelidaki et al., "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
7. [Online]. Available: <https://www.biomethaverse.eu/>

ACKNOWLEDGEMENT

Questo lavoro è stato supportato dal programma di ricerca e innovazione Horizon Europe dell'Unione Europea, nell'ambito dell'Accordo di Sovvenzione n. 101084200 (progetto BIOMETHAVERSE)

L'agrivoltaico sostenibile tra ricerca, esperienze e paesaggi

L'agrivoltaico sostenibile rappresenta un'innovativa sinergia tra produzione di energia rinnovabile e agricoltura, con benefici per l'ambiente e l'economia locale. La ricerca sta perfezionando soluzioni tecnologiche per ottimizzare l'integrazione tra fotovoltaico e coltivazioni, mentre le esperienze sul campo dimostrano la fattibilità del modello. L'impatto sul paesaggio è una sfida da gestire con una progettazione attenta, favorendo armonia visiva e tutela del territorio.

DOI 10.12910/EAI2025-045

di Alessandra Scognamiglio, Simona De Iulius, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili - Sezione Supporto Tecnico Strategico, Paola Delli Veneri, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili - Divisione Solare Fotovoltaico - ENEA

L'agrivoltaico, e cioè la combinazione sulla stessa unità di suolo di generazione energetica da fotovoltaico e di produzione agricola, costituisce un approccio fondamentale per conseguire gli obiettivi energetici stabiliti nell'ambito delle politiche energetiche nazionali e segnatamente dal PNIEC (131 GW di rinnovabili al 2030, di cui circa il 60% - 79 GW - di solare, aggiornamento luglio 2024). Tale approccio è anche oggetto di una specifica misura di incentivazione, che prevede un investimento di 1,1 miliardi di euro per la realizzazione di circa 1,1 GW di agrivoltaico.

Impatto visivo sul paesaggio

Tuttavia, nonostante i molti benefici associati all'impiego di questo approccio - oramai riconosciuto in ambito internazionale come fondamentale strumento a supporto del miglioramento della resilienza del settore agricolo in vista degli effetti negativi del cambiamento climatico - **la sua implementazione incontra ancora resistenze legate principalmente alle visibili trasformazioni che l'inserimento dell'agrivoltaico induce**

sul paesaggio. Sebbene in generale meglio percepito dalle comunità rispetto al semplice fotovoltaico a terra, la necessità di "coprire" vaste porzioni di suolo con moduli fotovoltaici incontra resistenze legate all'impatto visivo delle realizzazioni, ed anche alla stessa esperienza spaziale dello spazio che questi impianti occupano. In ENEA a partire dal 2021 si è lavorato alla costruzione del concetto di **"Agrivoltaico Sostenibile", in una visione che declina la dimensione energetica e quella agricola in un dominio comune e percepibile, che è quello del paesaggio.**

Dunque, sostenibili sono quegli interventi che supportano una trasformazione sostenibile del paesaggio, valorizzando il potenziale ecologico di una certa area.

In accordo con i principi dell'Ecologia del Paesaggio, il paesaggio può essere considerato un sistema di segni, che costituisce l'immagine visibile di una struttura funzionale caratterizzata da un comportamento ecologico. Una variazione nell'aspetto del paesaggio corrisponde ad una modifica di un certo parametro ambientale, che può essere misurata ricorrendo

a specifici metodi ed indicatori; ad esempio, un paesaggio che da verde diventa giallo può indicare un incremento di siccità in una certa zona. In altre parole, le variazioni delle grandezze ambientali trovano una forma visibile nelle trasformazioni del paesaggio.

Se questo è il tema generale, **è necessario elaborare strumenti di analisi metodologici orientati al progetto, che supportino la diffusione degli impianti agrivoltaici, in una logica "sistemica" che legga il singolo impianto come un sottosistema ecologico e spaziale del paesaggio stesso**, ed includente a sua volta i sottosistemi di cui esso si compone (ad esempio il suolo, le strutture di supporto, i moduli, le stesse colture, etc.). Ed inoltre è necessario caratterizzare le trasformazioni indotte dalla presenza dell'agrivoltaico alle varie scale, quella del singolo sistema agrivoltaico, ed alla scala del paesaggio al quale esso appartiene, ed a tal fine è necessario disporre anche di dati sperimentali che possano supportare buone pratiche.

In questa direzione si sono mosse alcune delle attività di ricerca che

sono state finanziate nell'ambito del progetto "Fotovoltaico ad alta efficienza" del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico. Gli studi hanno avuto l'obiettivo di orientare il progetto di sistemi agrivoltaici secondo criteri di sostenibilità che possano consentire prestazioni ottimali e in modo che la inevitabile conseguente trasformazione del paesaggio possa essere anch'essa sostenibile. In entrambi i casi il risultato della ricerca è stato tradotto in linee guida: linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto dei sistemi agrivoltaici e linee guida per la localizzazione e l'integrazione paesaggistica degli impianti agrivoltaici.

Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici

Le Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici sono state sviluppate dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Architettura (DiARC), in collaborazione con il gruppo di ricerca del Dipartimento di Agraria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, e con ENEA. Un significativo contributo è stato fornito dall'Associazione Italiana Agrivoltaico Sostenibile (AIAS) che ha garantito un confronto costante durante lo svolgimento dell'attività di ricerca.

Le linee guida hanno l'obiettivo di definire approcci e metodi finalizzati alla costruzione di strumenti di supporto alla fase di impostazione, concezione e di verifica dei livelli di sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici. Sono rivolte a progettisti, imprenditori agricoli, aziende e decisori per supportare i processi decisionali nell'ambito della progettazione di sistemi agrivoltaici rispondenti a obiettivi di sostenibilità ambientale. I sistemi agrivoltaici,

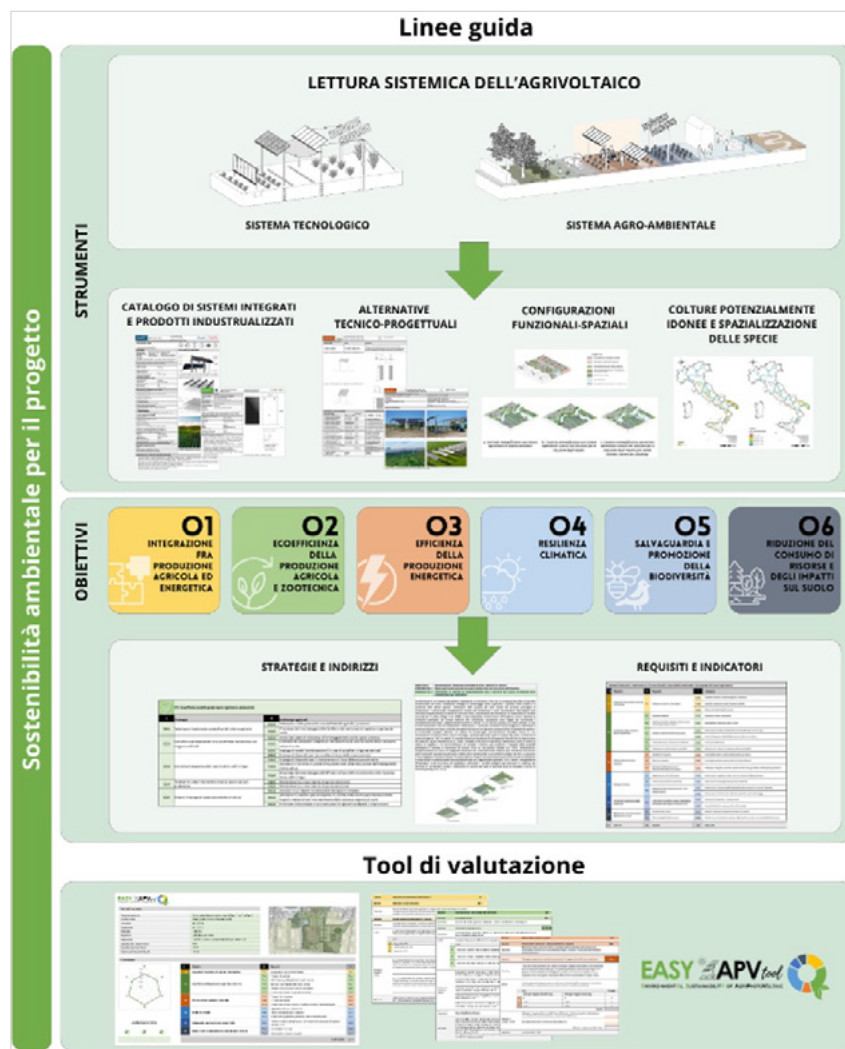


Figura 1: Principali contenuti delle Linee guida e relazione con il Tool di valutazione dei livelli di sostenibilità ambientale. Da: V. D'Ambrosio, E. Tersigni, A. Scognamiglio, E. Cervelli, M. Losasso, S. Pindozi, M. Rigillo, F. Castaldi, C. Girardi, F. Marandino, S. Mokrane, P. F. Recchi, G. Santomartino, Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici; Report "Sistemi Agrivoltaici: indirizzi per la sostenibilità ambientale del progetto", dicembre 2024, Progetto "Fotovoltaico ad alta efficienza" (Linea di Attività 2.7) del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico.

infatti, devono essere concepiti e verificati in base a specifiche prestazioni ambientali e tecnologiche per favorire l'equilibrio degli ecosistemi e degli habitat, per il contenimento della pressione antropica sul paesaggio ambientale, per l'utilizzo di sistemi di risorse rinnovabili e naturali e per la riduzione degli impatti climatici che

coinvolgono i fattori produttivi. I principali contenuti delle Linee guida riguardano:

- l'inquadramento dei sistemi agrivoltaici in relazione agli aspetti di sostenibilità ambientale per il progetto, nonché rispetto al quadro normativo vigente;
- la lettura sistemica del sistema

tecnologico e del sistema agro-ambientale che caratterizzano i sistemi agrivoltaici;

- la spazializzazione delle colture potenzialmente adatte ai sistemi agrivoltaici in Italia;
- la sistematizzazione di un Catalogo di sistemi integrati e prodotti industrializzati per impianti agrivoltaici;
- la schedatura di alternative tecnico progettuali per la realizzazione di sistemi agrivoltaici;
- la definizione di obiettivi, strategie e indirizzi per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici;
- la predisposizione di un sistema di requisiti e di indicatori ambientali e tecnologici per la rispondenza agli obiettivi di sostenibilità di progetti di sistemi agrivoltaici, confluito nell'E-ASY APV Tool "EnvironmentAI Sustainability of AgriPhotoVoltaic", strumento per la valutazione degli interventi.

Le Linee Guida per la localizzazione e l'integrazione paesaggistica dei sistemi agrivoltaici

Le Linee Guida per la localizzazione e l'integrazione paesaggistica dei sistemi agrivoltaici, redatte dal Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale (DADI) dell'Università della Campania Luigi Vanvitelli in collaborazione con ENEA, sono finalizzate a garantire una corretta integrazione degli impianti agrivoltaici nei paesaggi agricoli italiani, promuovendo al contempo la transizione energetica e la tutela paesaggistica.

Il percorso metodologico proposto si articola in cinque step principali:

1. Identificazione delle aree non idonee alla localizzazione di impianti, in base alla normativa vigente (D.M. 21 giugno 2024) e ai vincoli paesaggistici stabiliti dal Codice dei beni culturali

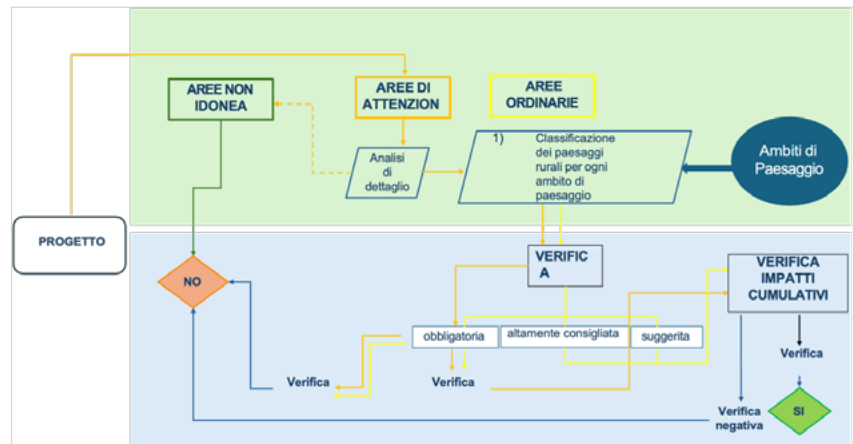


Figura 2: Percorso metodologico per un'adeguata integrazione degli impianti agrivoltaici nel paesaggio. Galderisi A., De Biase C., Limongi G., Scognamiglio A.; Report "Sistemi Agrivoltaici e Paesaggio; strumenti di supporto alle decisioni per una corretta integrazione", dicembre 2024, Progetto "Fotovoltaico ad alta efficienza" (Linea di Attività 2.8) del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico.

(D.Lgs. 42/2004).

2. Individuazione delle aree di attenzione che, pur essendo idonee, richiedono valutazioni di dettaglio per particolari valori culturali, agricoli o visivi, e per le quali è richiesta la rispondenza a specifici criteri progettuali.

3. Classificazione dei paesaggi agricoli, considerando morfologia, trama agricola, colture, permanenze storiche, reti infrastrutturali e vegetazione. Questa classificazione tiene conto anche della pressione urbanistica, distinguendo tra paesaggi periurbani, interclusi, a media o bassa pressione.

4. Definizione dei criteri di integrazione paesaggistica articolati in quattro categorie:

- Morfologici, per la coerenza le trame e la struttura del paesaggio;
- Dimensionali, per controllare che le tessere di agrivoltaico non siano sproporzionate rispetto alla dimensione media delle tessere del paesaggio;
- Geometrici, per fare in modo chela trama dell'agrivoltaico sia coerente

con la struttura del paesaggio, in particolare rispetto all'allineamento con le colture e all'orientamento dei campi.

- Visivi, per salvaguardare visuali panoramiche e identitarie.

5. Verifica dei criteri e valutazione degli impatti cumulativi, indispensabili soprattutto nelle aree non idonee o di attenzione. Si stabiliscono soglie di estensione e distanza tra impianti per limitare l'effetto di artificializzazione del paesaggio legato alla concentrazione degli impianti in aree particolarmente adatte dal punto di vista tecnico e dunque economico (e. g.: prossimità alle cabine elettriche di distribuzione, vincolistica favorevole, etc.), e controllare la percezione visiva del paesaggio.

Il documento fornisce esempi applicativi e matrici per ciascuna tipologia di paesaggio analizzato nella Regione Campania, favorendo una progettazione sostenibile e integrata degli impianti agrivoltaici.

per info: alessandra.scognamiglio@enea.it

L'AGRIVOLTAICO IN ITALIA

PNRR 2021, Missione 2 «Rivoluzione verde e Transizione Ecologica».

Investimento 1.1 «Sviluppo Agri-voltaico» per sostenere la realizzazione di impianti agrivoltaici di natura sperimentale. Il bando ha incentivato 1.548 MW con 776 milioni di contributi in conto capitale, mentre i ribassi sulla tariffa base (85 €/MWh) sono stati tra il 2% e il 12,1% per le aste e fino al 30% per i registri.

Gli interventi dovranno essere completati entro giugno 2026.

D.M. 22 dicembre 2023, n. 436

Il decreto regola l'accesso ai fondi del PNRR dedicati all'agrivoltaico ed in particolare:

Chi può accedere ai fondi:

- Imprese agricole singole o associate, comprese le cooperative agricole.
- Imprenditori agricoli professionali, ai sensi dell'articolo 2135 del codice civile.
- Imprese agroindustriali, purché in partenariato con almeno un'impresa agricola.
- Società agricole di persone, capitali o cooperative.
- Consorzi costituiti tra imprese agricole o agroindustriali.
- Soggetti pubblici o privati che realizzano impianti in aree agricole in forma di partenariato con soggetti agricoli.

Le condizioni principali per l'accesso:

- Gli impianti devono essere agrivoltaici avanzati, cioè realizzati in modo da non compromettere l'attività agricola e integrarla, prevenendo sistemi di monitoraggio specifici.
- Il contributo a fondo perduto può coprire fino al 40% delle spese ammissibili, ed è cumulabile con gli incentivi tariffari previsti dal decreto legislativo 199/2021.

Riapertura del Bando Agrivoltaico PNRR

- Il MASE ha disposto, con Decreto Direttoriale n. 123 del 27 marzo 2025, la riapertura dei termini per accedere agli incentivi PNRR dedicati all'agrivoltaico.
- Dal 1° aprile 2025 fino al 30 giugno 2025 le imprese agricole possono presentare nuove domande per circa 323 milioni di euro residui, nell'ambito della misura "Sviluppo Agrivoltaico" finanziata dal PNRR.
- L'incentivo combina un contributo a fondo perduto (fino al 40% dei costi ammissibili) e una tariffa incentivante sull'energia elettrica prodotta e immessa in rete.
- Restano valide le regole del Decreto MASE 22 dicembre 2023 (cosiddetto "Decreto Agrivoltaico"), che stabilisce criteri e modalità per questi progetti. La riapertura del bando consente di utilizzare tutte le risorse PNRR rimanenti, dopo che la prima call del 2024 non aveva esaurito i fondi disponibili.

Agrivoltaico vs. Rinnovabili

L'agrivoltaico nel 2024 si conferma al primo posto per potenza delle operazioni tra le energie rinnovabili, con 22,7 GW e 541 iniziative per 17,3 miliardi di euro di possibili investimenti (fonte: Irex Annual Report 2025). Supera quindi il fotovoltaico che, sebbene registri 893 operazioni (48,7% del totale delle iniziative mappate nel 2024) si ferma a 16,4 GW e 12,2 miliardi di euro di investimenti.

L'agrivoltaico nei vigneti a Salaparuta, Forlì e Gioia del Colle di Alice Avila, Unità Relazioni e Comunicazione - ENEA

Un laboratorio a cielo aperto per testare, insieme a enti di ricerca, startup e aziende agricole, l'integrazione tra energia solare e agricoltura per produrre vino. È l'"Agrivoltaico Open Labs" di Enel Green Power a Salaparuta, in provincia di Trapani.

L'impianto agrivoltaico dimostrativo ha una potenza massima di 44 kilowatt picco e dispone di una tecnologia sviluppata dalla startup italiana Sentnet, con moduli bifacciali disposti in verticale. Una tecnologia che, come sottolinea Enel Green Power, consente l'integrazione con le attività agricole, "con una superficie coltivabile maggiore del 90% grazie al ridotto ingombro della struttura fotovoltaica rispetto a tecnologie convenzionali. Anche qui, come nell'impianto verticale di Colfiorito, abbiamo adottato il sistema di raccolta dell'acqua piovana brevettato da Sentnet e integrato con la struttura fotovoltaica. In questo modo la pioggia viene raccolta nelle canalette disposte sotto i pannelli e condotta nelle vasche di condotta. Da qui è possibile riutilizzare l'acqua per irrigare le colture". Inoltre, l'impianto dispone di una rete intelligente di sensori per monitorare sia la produzione energetica sia quella agricola.

A Colfiorito, invece, si producono lenticchie e zafferano. Anche questo impianto agrivoltaico pilota ha una potenza massima di 44 kilowatt picco e beneficia dei sensori intelligenti per monitorare la produzione di energia, il microclima tra i filari, le condizioni del suolo e il consumo di acqua, con un vantaggio diretto sulla produzione.

Un altro impianto agrivoltaico all'avanguardia realizzato su un vigneto è quello del Gruppo Caviro adiacente alle Cantine Caviro, a Forlì. Costato 1 milione e mezzo di euro, è composto da oltre 1300 pannelli solari bifacciali su una superficie pari a 1 ettaro e mezzo. Come spie-

ga il Gruppo, l'impianto "assolve a due funzioni specifiche: la produzione di energia pulita rinnovabile e la protezione della vite" ed è stato progettato per permettere la migliore inclinazione possibile dei pannelli fotovoltaici proprio per proteggere le viti dai danni atmosferici. Da ricordare inoltre la Vigna agrivoltaica di comunità, a Gioia del Colle (Bari), il cui vino biologico è stato presentato all'ultimo Vinitaly. Un esempio virtuoso di viticoltura sostenibile grazie alla produzione di energia pulita e al minimo consumo di risorse naturali. La viticoltura con la pergola fotovoltaica ombreggiante consente, tra l'altro, il minor fabbisogno di acqua per l'irrigazione, la generazione di un microclima più fresco, la protezione dagli eventi climatici estremi, la minore esposizione a malattie e la maturazione più lenta dell'uva, con una conseguente diminuzione del contenuto di zucchero. Dunque, un vino migliore e più naturale.

Agrivoltaico e comunità energetiche rinnovabili: un binomio “green”

ENEA e Comune di Saluggia hanno stipulato una convenzione finalizzata allo studio di una comunità energetica rinnovabile (CER) con un impianto solare agrivoltaico (AGRI-FV). Questo progetto innovativo intende coniugare due elementi chiave della transizione ecologica: le CER, il cui obiettivo è fornire benefici ambientali, economici e sociali ai propri membri e al territorio in cui operano, e l'agrivoltaico, soluzione tecnologica che fa coesistere agricoltura e produzione energetica in modo armonico.

DOI 10.12910/EAI2025-046

di Matteo Caldera, Alessandra Scognamiglio, Grazia Fattoruso, Stefano Pizzuti, Dipartimento Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili - ENEA

Le comunità energetiche rinnovabili (CER) sono una delle configurazioni di autoconsumo diffuso introdotte dal D.lgs. 199/2021 e dai provvedimenti attuativi MASE^[1], ARERA^[2] e GSE^[3]. Esse sono finalizzate a promuovere la generazione distribuita da fonti rinnovabili massimizzando l'energia condivisa tra i membri, favorendo il loro ruolo attivo e consapevole nei confronti di produzione e uso razionale dell'energia. I sistemi agrivoltaici (AGRI-FV) combinano la produzione di energia solare con le attività agricole nello stesso terreno e sono strumenti di innovazione che favoriscono nuove tecniche di coltivazione e di gestione agricola contribuendo alla gestione sostenibile del suolo.

Per questi e altri motivi, **nel PNIEC CER e AGRI-FV sono tra le soluzioni preferenziali per raggiungere gli obiettivi energetici al 2030 e ad essi sono riconosciuti incentivi pubblici in conto esercizio e in conto capitale, tra cui il PNRR.**

Le CER costituite sono in costante crescita e, parallelamente, il bando PNRR sull'agrivoltaico ha ricevuto più di 600 richieste con i progetti am-

messi alle aste che hanno saturato il contingente disponibile. Tuttavia, **ad oggi in Italia non risultano operative CER con impianti AGRI-FV (CER AGRI-FV). Il loro abbinamento è quindi innovativo e potenzialmente replicabile, soprattutto nei piccoli comuni con vocazione agricola.**

Gli obiettivi di una CER AGRI-FV nel Comune di Saluggia

In questo contesto, ENEA e il Comune di Saluggia (VC) hanno stipulato una convenzione finalizzata allo studio di una CER AGRI-FV. **Il Comune di Saluggia, con un passato legato alla filiera energetica nucleare, intende promuovere iniziative concrete e innovative a favore della sostenibilità ambientale e sociale, dell'efficientamento energetico e delle fonti rinnovabili.** Date le caratteristiche territoriali e la vocazione agricola, Il Comune è interessato a valutare la realizzazione di una CER abbinata all'agrivoltaico anche per ottimizzare l'uso del suolo, da cui è nata la convenzione con ENEA che ha effettuato lo studio di seguito riportato.

Producendo energia “green” senza cambiare la destinazione e la pro-

duktività agricole del sito su cui sarà installato l'impianto solare, la CER-AGRI-FV genererà un incentivo sull'energia condivisa e ricavi dalla vendita di energia elettrica (benefici economici) che saranno utilizzati per la collettività (benefici sociali).

L'individuazione dell'area utile per l'installazione dell'impianto

Per individuare le aree agricole comunali idonee alla realizzazione del campo agrivoltaico si è utilizzata una **metodologia di analisi spaziale multi-criteriale messa a punto nel laboratorio di Geomatica di ENEA CR Portici** nell'ambito delle attività della Task Agrivoltaico Sostenibile @ENEA e del Progetto europeo SYMBIOSYST. La metodologia include criteri di idoneità legati alla produzione fotovoltaica, topografici, ambientali, meteorologici, agricoli che influenzano la produzione energetica e agricola dei sistemi agrivoltaici, oltre a criteri vincolistici e normativi. In particolare, per l'elaborazione dei livelli informativi geografici sono state usate fonti open data ufficiali e validate (Corine Land Cover, Digital Elevation Model, ecc.), oltre ai dati specifici del territo-

rio riportati nel GeoPortale regionale [4]. **Altro fattore considerato nella determinazione delle aree idonee è la Capacità di Uso Suolo (Land Capability Classification – LCC).** La classificazione prevede la suddivisione della capacità d'uso dei suoli in 8 classi, nelle classi da I a IV sono inclusi i suoli adatti all'attività agricola. La DGR Piemonte 31/07/2023 n.58-7356 [5] indica le aree agricole di classe d'uso suolo I e II idonee all'installazione di impianti agrivoltaici di Tipo 1, come definiti nelle Linee Guida in Materia di Impianti Agrivoltaici (2022) del MASE.

I criteri di adeguatezza

I criteri di adeguatezza considerati, elaborati come variabili geografiche e opportunamente ponderati attraverso il metodo AHP, sono combinati in un'analisi di overlay spaziale generando un indice di idoneità dei terreni per sistemi agrivoltaici e le aree non idonee sono state escluse in base a diversi criteri/vincoli [6].

Con tale metodologia si sono ricavate le mappe delle aree agricole comunali

idonee all'installazione agrivoltaica, classificate rispetto alla tipologia di colture e rispetto alle classi di capacità d'uso del suolo, Figura 1, da cui risulta che le aree agricole idonee coprono una superficie complessiva di 1699 ha, di cui le aree agricole di classe d'uso suolo I e II coprono una superficie agricola complessiva di 625 ha mentre la maggior parte delle aree agricole idonee ricadono nella classe di capacità d'uso suolo III.

Per poter individuare il sito di realizzazione dell'impianto AGRI-FV è necessario considerare anche il vincolo delle CER, in base al quale gli impianti e i clienti finali della configurazione devono trovarsi nell'area convenzionale sottesa alla stessa cabina primaria. Dalla mappa interattiva delle cabine primarie pubblicata dal GSE [7] risulta che Saluggia è divisa in tre aree afferenti a cabine primarie distinte. L'area convenzionale è stata scelta sulla base della disponibilità di aree idonee sopra descritta e dell'analisi delle utenze di consumo ipotizzate per la CER.

Dimensionamento preliminare dell'impianto AGRI-FV

La soluzione individuata è **un impianto agrivoltaico avanzato di tipo monoassiale elevato a inseguimento**, con i moduli a un'altezza da terra di almeno 2,1 m. La Figura 2 ne riporta un rendering. Il sistema consente diverse tipologie di produzione agromica: a spalliera, orticola o seminativa. La scelta è ricaduta su questa soluzione sulla base delle indicazioni della Regione Piemonte [5] e per la sua flessibilità alle colture tipiche del territorio (fagioli, soia, mais, grano) e adattabilità a colture diverse caratterizzate da uno sviluppo verticale maggiore e con diverse esigenze di ombreggiamento.

Per quanto riguarda la taglia dell'impianto, essa non può superare 1 MW per poter accedere all'incentivo sull'energia condivisa dedicato alle CER, in base all'art. 8 del D.lgs. 199/2021 e al Testo Integrato ARERA sull'Autoconsumo Diffuso [2]. Pertanto, l'impianto ha potenze di picco e nominale, rispettivamente, di 955 kWp e 800 kW. Il sistema è composto da 55 vele (attuatori) e 28 moduli fotovoltaici per vela, per un totale di 1540 moduli collegati a 8 inverter.

Tenendo conto dell'ubicazione e della tecnologia dell'impianto agrivoltaico, la produzione annua calcolata con il simulatore PVGIS [8] è pari a 1.227 MWh, a cui corrisponde una produzione specifica, calcolata rispetto alle potenze di picco e nominale, rispettivamente, pari a 1.285 kWh/kWp e 1.534 kWh/kW. Si sottolinea come la taglia e le caratteristiche dell'impianto agrivoltaico siano da intendersi come valori preliminari da verificare in sede progettuale.

Valutazione tecnico-economica della CER AGRI-FV

La CER AGRI-FV analizzata è ubicata nell'area sottesa alla Cabina primaria

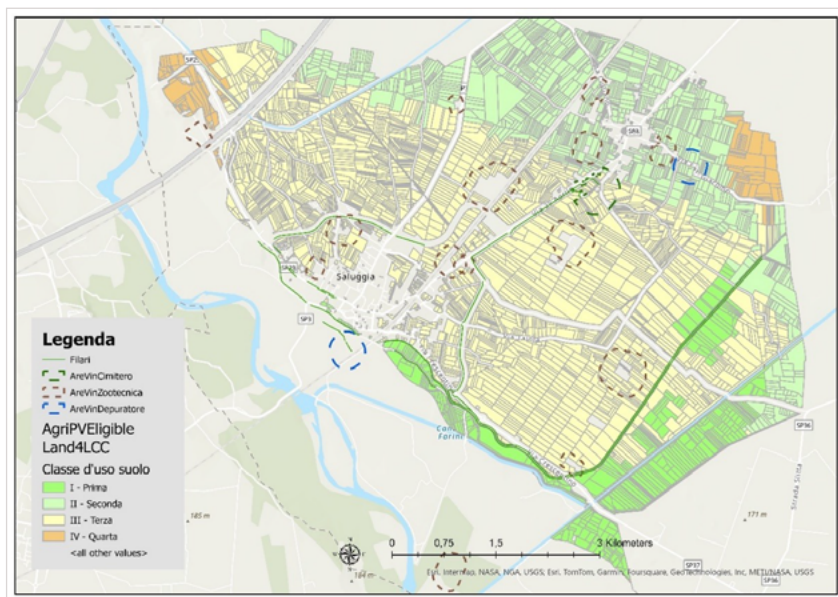


Figura 1. Mappa comunale delle aree agricole idonee ai sistemi agrivoltaici, classificate per capacità d'uso suolo. Le Classi I e II (in verde) sono definite idonee



Figura 2: Rendering del sistema agrivoltaico avanzato proposto

Scenario	% POD residenziali e PMI	POD Comunali ¹	POD residenziali	POD PMI
1 - best case	100%	14	849	62
2 - intermedio	50%	14	425	31
3 - cautelativo	20%	14	170	12

¹ esclusi i POD di pubblica illuminazione

Tabella 1: Scenari di consumo

“Crescentino”, che è stata selezionata in quanto presenta il maggior numero di utenze elettriche intestate al Comune e un significativo numero di utenze private (famiglie e imprese). Su indicazione del Comune, **la configurazione include l’impianto agrivoltaico e, lato consumatori, comprende le utenze del Comune e 849 utenze residenziali, oltre a 62 PMI ar-**

tigianali, agricole commerciali, così suddivise: 42 negozi - bar - attività, 12 aziende agricole, 8 attività artigianali - piccole officine. Le utenze residenziali sono suddivise in 9 cluster con differenti potenze del contatore di rete, prelievi annuali e loro suddivisione in fasce orarie. Per le utenze comunali è stata condotta un’analisi dettagliata dei prelievi di energia

elettrica nel periodo compreso tra dicembre 2018 e dicembre 2022 desunti dalle bollette fornite dal Comune.

Sono stati quindi considerati 3 scenari di consumo, riportati in Tabella 1, e 4 modelli di business (BM), riportati in Tabella 2. Per quanto riguarda gli scenari di consumo intermedio e cautelativo, gli utenti dei singoli cluster sono stati ridotti in modo proporzionale sulla base della relativa percentuale indicata in Tabella 1. In tutti i BM i guadagni maturati dalla CER sono redistribuiti in pari quote ai suoi membri (escluso il Comune) e i costi di realizzazione e di O&M dell’impianto agrivoltaico sono a carico del Comune in quanto proprietario dell’impianto. Sulla base dell’analisi dei costi, si è considerato un CAPEX chiavi in mano per la realizzazione dell’impianto pari a 1,59 milioni di euro IVA inclusa, mentre i costi annuali necessari per il funzionamento agronomico del sistema sono stimati pari a 11.100 euro e i canoni annuali opzionali per la gestione del sistema ammontano a 15.060 euro.

Le simulazioni energetiche ed economiche della CER AGRI-FV sono condotte con il software RECON di ENEA [9]. La Figura 3 riassume i risultati dell’analisi energetica per il BM 1. In generale, la diminuzione delle utenze finali riduce l’autoconsumo diffuso e le emissioni di CO₂ evitate. La Figura

	BM 1	BM 2	BM 3	BM 4
Investimento per impianto agri-FV da parte del Comune	Full-equity	Contributo PNRR CER ¹	Full-equity	Contributo PNRR CER ¹
Destinatario dei ricavi da vendita di energia elettrica dell’impianto agri-FV	Comune	Comune	CER	CER
Quota guadagni della CER riconosciuti al Comune	0%	0%	25%	25%
Quota guadagni della CER redistribuiti ai membri della CER (escluso il Comune) o reinvestiti in servizi	95%	95%	70%	70%
Quota guadagni della CER destinati ad autofinanziamento della CER	5%	5%	5%	5%

¹ contributo in conto capitale PNRR M2 C2 Investimento 1.2

Tabella 2: Modelli di business

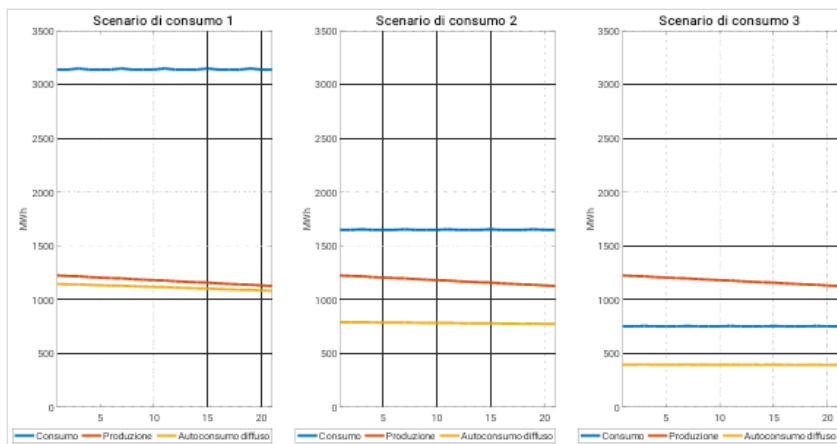


Figura 3. Risultati dell'analisi energetica nel BM 1 nei tre scenari di consumo.

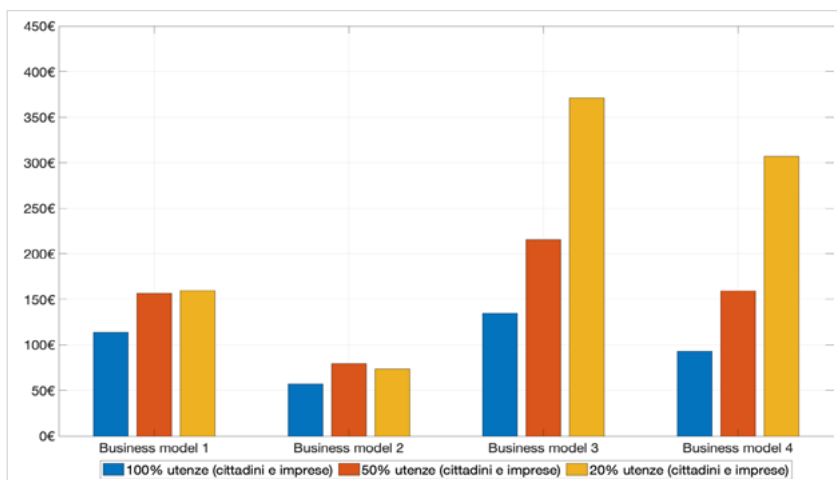


Figura 4. Quota media annua redistribuita per singolo membro della CER (cittadino, PMI).

4 riporta la quota annuale di guadagno che la CER riconosce al singolo cittadino o PMI membri. In alternativa alla redistribuzione dei guadagni, la CER potrebbe reinvestirli in servizi a vantaggio della collettività. Il Comune ottiene maggiori benefici nei BM 1 e BM 2, introitando i ricavi dalla vendita di energia dell'impianto agri-FV e rinunciando alla quota di redistribuzione dei guadagni dalla CER.

I risultati descritti sono stati ricavati da simulazioni preliminari con dati di input che richiedono una verifica in fase di progettazione, tenendo conto dell'evoluzione normativa oltre che degli aspetti fiscali e delle implicazioni connesse alla particolare forma giuridica della CER, che non sono considerati nel presente studio.

Ringraziamenti:

Si ringraziano l'Amministrazione del Comune di Saluggia, in particolare il Sindaco Libero Farinelli, e la geom. Ombretta Perolio per la collaborazione e i dati forniti per le analisi svolte.

per info: matteo.caldera@enea.it

Riferimenti bibliografici:

- Decreto Ministeriale MASE 7 dicembre 2023, n. 414.
- ARERA, Testo Integrato Autoconsumo Diffuso - TIAD. Allegato A alla deliberazione 727/2022/R/eel come integrato e modificato dalla deliberazione 15/2024/R/eel.
- GSE, Decreto CACER e TIAD - Regole operative per l'accesso al servizio per l'autoconsumo diffuso e al contributo PNRR. Allegato 1 al Decreto Direttoriale del Dipartimento Energia MASE del 22 aprile 2024, n. 170.
- Geoportale Regione Piemonte, Carta dei Suoli 1:50000. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:37c6413b-b07f-4f4c-9344-f2e43ea52bbd
- D.G.R. Piemonte 31/07/2023, n. 58-7356. B.U. R. Piemonte Suppl. Ord. 03/08/2023, n. 2
- G. Fattoruso, D. Toscano, A. Venturo, A. Scognamiglio, M. Fabbri, G. Di Francia. A spatial multicriteria analysis for a regional assessment of eligible areas for sustainable agrivoltaic systems in Italy. Sustainability, 2024, 16(2), 911; <https://doi.org/10.3390/su16020911>
- GSE, Mappa interattiva delle cabine primarie. <https://www.gse.it/servizi-per-te/autoconsumo/mappa-interattiva-delle-cabine-primarie>
- EC Joint Research Centre, Photovoltaic Geographical Information System - PVGIS. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en?prefLang=it
- ENEA, RECON: Simulatore per la valutazione economica delle Comunità energetiche rinnovabili. <https://recon.smartenergycommunity.enea.it/>

Il progetto CESTA: un'applicazione delle tecnologie dell'IA ed IoT per l'agricoltura sostenibile

Nel settore agricolo anche il settore dei Consumer Products sta vivendo una profonda trasformazione, guidata dalla digitalizzazione, dall'introduzione dell'intelligenza artificiale (IA) ed Internet of Things (IoT), e da una crescente attenzione alla sicurezza alimentare ed all'innovazione. In questo contesto, numerosi studi evidenziano che le imprese agroalimentari devono adattarsi costantemente per restare competitive.

DOI 10.12910/EAI2025-047

di Walter Gaggioli, Francesco Rovense, Antonio Ricca, Flavio Fontana Dipartimento tecnologie energetiche e fonti rinnovabili Divisione Smart Sector Integration e fonti energetiche rinnovabili distribuite - ENEA

L'analisi dei dati del 7° Censimento generale dell'agricoltura italiana ^[1], evidenzia una progressiva trasformazione del settore. Il numero di aziende agricole è diminuito, mentre la superficie agricola utilizzata si è ridotta in misura molto più contenuta. Ad oggi, in Italia operano circa 1.130.000 aziende, con una dimensione media di 11 ettari, ancora sotto la media UE, ma in crescita rispetto al passato. Negli ultimi dieci anni, le aziende su terreni non di proprietà sono aumentate del 36.9%, e molte svolgono anche attività connesse come agriturismo (37.8%), servizi conto terzi (18 %) e produzione di energia rinnovabile (15.9%, con un aumento del +214.4%). La trasformazione delle aziende agricole si estende anche alla struttura societaria. Il numero delle aziende individuali è in forte contrazione a favore di quelle società di persone o capitali. Questa trasformazione va di pari passo alla nuova riforma della Politica Agricola Comune, che punta ad un sistema più solido e resiliente alle crisi, come COVID-19 ed eventi climatici estre-

mi. Anche il settore dei Consumer Products sta vivendo una profonda trasformazione, guidata dalla digitalizzazione, dall'introduzione dell'intelligenza artificiale (IA) ed Internet of Things (IoT), e da una crescente attenzione alla sicurezza alimentare ed all'innovazione. In questo contesto, numerosi studi evidenziano che le imprese agroalimentari devono adattarsi costantemente per restare competitive. I principali cambiamenti derivano dall'evoluzione delle preferenze dei consumatori, sempre più orientati verso prodotti sostenibili e rispettosi dell'ambiente ^[2], e dalla maggiore frequenza e gravità di eventi climatici estremi che alterano gli habitat di molte specie, mettendo a rischio la stabilità degli ecosistemi ^{[3][4][5]}.

Il ruolo fondamentale delle tecnologie dell'agricoltura di precisione

In questo scenario in rapida evoluzione, le tecnologie dell'agricoltura di precisione assumono un ruolo fondamentale per migliorare efficienza, sostenibilità e redditività del settore. L'integrazione di IA e IoT permette di

monitorare e gestire in tempo reale molte variabili: sensori nei campi e nei sistemi produttivi rilevano dati su umidità, temperatura, stato delle colture e meteo ^[6]. Tali dati, elaborati da algoritmi di IA, ottimizzano irrigazione, fertilizzazione e trattamenti fitosanitari, riducendo sprechi e massimizzando le rese ^{[6][7]}. L'agricoltura digitale consente non solo di aumentare la produttività ^{[8][9]}, ma anche di prevedere con più precisione stress, malattie o carenze nutrizionali, favorendo interventi rapidi e mirati ^[10]. **Studi recenti ^[11] mostrano che l'adozione di queste tecnologie può ridurre i consumi e migliorare la sostenibilità economica ed ambientale delle aziende agricole.** In futuro, queste stesse tecnologie consentiranno ai robot agricoli di adattarsi alle diverse condizioni ambientali e colturali, aumentando ulteriormente la loro versatilità ed efficacia per svolgere numerose mansioni ^[12].

Tuttavia, la diffusione della robotica in agricoltura presenta ancora criticità legate a manutenzione, gestione e regolamentazione, richiedendo spesso competenze specialistiche

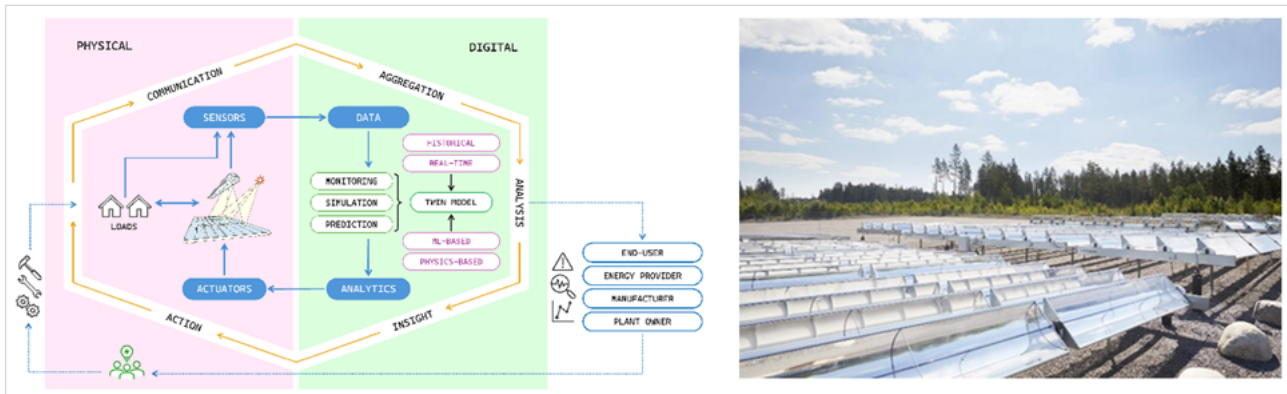


Figura 1: Sinistra: Struttura della piattaforma CESTA; Destra: impianto CST

esterne al settore, che attualmente limitano il loro utilizzo a progetti pilota^[13]. Una delle principali tendenze attuali è l'integrazione di AI, IoT e tecnologie geospaziali^[14] che consente il monitoraggio continuo delle colture e lo sviluppo di strategie predittive ed interventi mirati per ottimizzare l'efficienza produttiva. Ne sono esempio servizi come quelli offerti dalle start-up PreAgri^[15] e FarmWise^[16], che propongono soluzioni in abbonamento o pay-per-use. Queste aziende utilizzano algoritmi di AI per elaborare immagini satellitari e/o acquisite con droni, per monitorare la salute delle colture, rilevando criticità e fornendo raccomandazioni operative. Un progetto pilota in California ha dimostrato che tali tecnologie possono aumentare le rese fino al 15% e ridurre significativamente il consumo d'acqua^[17]. Parallelamente, la questione energetica rappresenta una delle principali sfide per l'agricoltura contemporanea che richiede notevoli quantità di elettricità e calore^[18]. **Secondo la FAO, il settore agricolo utilizza circa il 30% dell'energia globale impiegata nella produzione alimentare^[19].** La forte dipendenza dai combustibili fossili lo rende vulnerabile a variazioni di prezzo e possibili interruzioni delle forniture, evidenziando la necessità urgente di **adottare soluzioni sostenibili che assicurino mag-**

giore autonomia e resilienza^[20]. Una delle soluzioni più promettenti a queste sfide è l'adozione di sistemi basati sull'**agrivoltaico^[21]** per la generazione di energia elettrica e sugli **impianti solari termodinamici** (Concentrating Solar Thermal - CST in inglese) per la produzione di energia termica^{[22][23][24]}.

Il progetto Cyber Enterprise for Solar Thermal Applications (CESTA)

L'efficacia di questi sistemi dipende sempre più dall'integrazione tra generazione di energia e soluzioni digitali per la gestione intelligente delle risorse e dei processi produttivi. In questo contesto si inserisce il progetto **Cyber Enterprise for Solar Thermal Applications (CESTA)**, in cui i ricercatori di ENEA svilupperanno una piattaforma digitale multifunzionale e modulare per la gestione delle risorse energetiche e produttive, applicabili anche in ambito agricolo. Nata con l'obiettivo di creare soluzioni operative intelligenti per l'integrazione degli impianti CST in sistemi energetici complessi multivettore, **la piattaforma CESTA sottende l'integrazione di servizi avanzati basati sulle tecnologie più innovative per l'ottimizzazione delle risorse, come modelli di digital twin e strumenti basati sull'AI.** L'adozione di tali tecnolo-

gie punta a rendere accessibile anche ad utenti base funzionalità sinora ad essi precluse quali previsioni accurate degli scenari operativi e delle condizioni meteorologiche, una avanzata capacità di simulazione dei processi, ed una acquisizione ed elaborazione ottimizzata dei dati in tempo reale. In aggiunta, la struttura modulare e digitalizzata introdotta da CESTA facilita le procedure di espansione della rete di risorse gestite.

Scenari innovativi per le "fattorie del futuro"

L'approccio di base promosso dalla piattaforma CESTA risiede nella digitalizzazione delle tecnologie in campo, permettendo in tal senso una gestione più efficiente delle risorse attraverso una ottimizzazione del loro utilizzo ed una riduzione ponderata degli investimenti. Difatti, CESTA abbraccia un approccio metodologico capace di combinare modelli avanzati per la simulazione delle tecnologie coinvolte e previsioni basate sull'intelligenza artificiale, ed in particolare sul machine learning.

La combinazione di tali avanzamenti tecnologici rende CESTA capace di effettuare il monitoraggio e la gestione intelligente dei consumi, la manutenzione predittiva ottimizzata degli impianti e l'integrazione efficace delle fonti rinnovabili nel sistema ener-

getico. Le innovazioni tecnologiche legate a CESTA offrono significativi vantaggi economici: per gli impianti CST, si prevede una riduzione fino al 70% del rapporto tra costi operativi e ricavi, grazie anche alla maggiore durata dei componenti ottenuta con la diagnostica e la manutenzione predittiva. Questo rende le tecnologie CST più competitive e abbassa il costo livellato del calore prodotto. **L'ap-**

plicazione di CESTA nel campo dell'agricoltura apre la strada a scenari innovativi per le "fattorie del futuro".

Grazie alla capacità di gestire in modo integrato non solo gli impianti CST ed agrivoltaici, ma anche tutti i sistemi agricoli digitalizzati, le innovazioni di CESTA avranno un impatto sulla sostenibilità ambientale e sulla resilienza energetica, grazie ad una indotta riduzione della dipendenza dalle fonti

fossili tradizionali e delle inefficienze sistemiche, rafforzando di fatto la sicurezza energetica nazionale. **Le aziende agricole potranno diventare così autentici "smart hubs", capaci di gestire contemporaneamente la produzione di energia rinnovabile e delle colture agricole.**

per info: walter.gaggioli@enea.it

Riferimenti:

1. Istat. 7 Censimento generale n.d. <https://www.istat.it/statistiche-per-temi/censimenti/agricoltura/7-censimento-generale/> (accessed June 3, 2025).
2. Commissione Europea. COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI Una strategia "Dal produttore al consumatore" per un sistema alimentare equo, sano e rispettoso dell'ambiente n.d.
3. Luca Mercalli; Alessandra Buffa; Guglielmo Ricciardi; Cambiamento climatico e sistema alimentare Documento di posizione n.d.
4. Slow Food. Cambiamenti climatici e sistemi agro-alimentari n.d.
5. Symbola. GreenItaly 2024 Un'economia a misura d'uomo contro le crisi I Quaderni di Symbola n.d.
6. Sharma K, Shivandu SK. Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors Int* 2024;5:100292. <https://doi.org/10.1016/J.SINTL.2024.100292>.
7. Lakhier IA, Yan H, Zhang C, Wang G, He B, Hao B, et al. A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agric* 2024, Vol 14, Page 1141 2024;14:1141. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE14071141>.
8. Colizzi L, Dimauro G, Guerriero E, Lomonte N. Artificial intelligence and IoT for water saving in agriculture: A systematic review. *Smart Agric Technol* 2025;11:101008. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2025.101008>.
9. Aijaz N, Lan H, Raza T, Yaqub M, Iqbal R, Pathan MS. Artificial intelligence in agriculture: Advancing crop productivity and sustainability. *J Agric Food Res* 2025;20:101762. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2025.101762>.
10. Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D. Machine Learning in Agriculture: A Review n.d. <https://doi.org/10.3390/s18082674>.
11. Papadopoulos G, Arduini S, Uyar H, Psiroukis V, Kasimati A, Fountas S. Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. *Smart Agric Technol* 2024;8:100441. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2024.100441>.
12. UK-RAS White papers. The Future of Robotic Agriculture n.d.
13. AgroNotizie. Robotica agricola, rivoluzione lenta n.d. <https://agronotizie.imagelinetwork.com/agrimeccanica/2025/04/02/robotica-agricola-rivoluzione-lenta/87018> (accessed June 3, 2025).
14. Kamilaris A, Kartakoullis A, Prenafeta-Boldú FX. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Comput Electron Agric* 2017;143:23–37. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.09.037>.
15. Preagri. Precision Agriculture n.d. <https://www.preagri.com/index.htm> (accessed June 3, 2025).
16. FarmWise®. Feeding Our World and Our Future n.d. <https://www.farmwise.io/> (accessed June 3, 2025).
17. Gminsights. AI in agricoltura dimensione del mercato e condivisione, rapporto di crescita 2025-2034 n.d. <https://www.gminsights.com/it/industry-analysis/ai-in-agriculture-market> (accessed June 3, 2025).
18. Majeed Y, Usman Khan M, Waseem M, Zahid U, Mahmood F, Majeed F, et al. Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports* 2023;10:344–59. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.032>.
19. (FAO) F and AO of the UN. Production and Resources – B9: Management of energy in the context of CSA. n.d.
20. Benoit M, Mottet A. Energy scarcity and rising cost: Towards a paradigm shift for livestock. *Agric Syst* 2023;205:103585. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2022.103585>.
21. Mazzeo D, Di Zio A, Pesenti C, Leva S. Optimizing agrivoltaic systems: A comprehensive analysis of design, crop productivity and energy performance in open-field configurations. *Appl Energy* 2025;390:125750. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125750>.
22. Australia's Sundrop farms are designed for the desert | WIRED n.d. https://www.wired.com/story/sundrop-farms-australian-desert/?utm_source=chatgpt.com (accessed May 30, 2025).
23. How to grow tomatoes in the desert | Alfa Laval n.d. https://www.alfalaval.com/media/stories/fresh-water/how-to-grow-tomatoes-in-the-desert/?utm_source=chatgpt.com (accessed May 30, 2025).
24. 36.6MWh Integrated Energy System based on CSP, Australia n.d. https://www.aalborgcsp.com/projects/integrated-energy-systems/366mwh-integrated-energy-system-based-on-csp-australia?utm_source=chatgpt.com (accessed May 30, 2025).

Il Solare termico a concentrazione al servizio dell'industria agroalimentare

A livello nazionale, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima prevede di triplicare la produzione di energia termica solare, passando da 2,8 TWh nel 2021 a 8,1 TWh nel 2030, con un valore di mercato stimabile in 3 miliardi di euro. Un obiettivo che, se raggiunto, consentirebbe di rafforzare il posizionamento del solare termico nel panorama delle tecnologie strategiche per la transizione energetica italiana.

DOI 10.12910/EAI2025-048

di Vincenzo Sabatelli, Michela Lanchi, Walter Gaggioli - Divisione Smart Sector Integration e generazione distribuita da FER - ENEA

Il solare termico è una tecnologia rinnovabile che sfrutta l'energia solare, abbondante in Italia, e rappresenta una risorsa strategica per il Paese. Questa tecnologia può essere facilmente integrata con altre soluzioni energetiche rinnovabili, creando sinergie vantaggiose sia dal punto di vista economico che ambientale.

Il solare termico trova applicazione non solo nel settore residenziale (produzione di acqua calda e climatizzazione degli ambienti) mediante tecnologie a bassa temperatura, ma anche in ambito industriale (produzione di calore di processo, teleriscaldamento, ecc.) mediante tecnologie a concentrazione, settore quest'ultimo con le maggiori potenzialità di crescita.

Da dati IEA ^[1], il calore rappresenta circa il 50% dei consumi finali di energia di cui solo il 10% è prodotto da rinnovabili termiche. Si tratta quindi di un settore con elevato potenziale di decarbonizzazione. Tale potenziale è ancora più evidente nel settore industriale dove circa il 74% del fabbisogno energetico è rappresentato da calore, di cui circa il 50% è richiesto a temperature medio-basse (comprese

tra 100 e 400°C) che possono essere ottenute mediante tecnologie solari termiche a concentrazione già consolidate ^[2].

A livello nazionale, il PNIEC - Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima prevede di triplicare la produzione di energia termica solare, passando da 2,8 TWh nel 2021 a 8,1 TWh nel 2030, con un valore di mercato stimabile in 3 miliardi di euro ^[3]. Un obiettivo che, se raggiunto, consentirebbe di rafforzare il posizionamento del solare termico a concentrazione nel panorama delle tecnologie strategiche per la transizione energetica italiana.

Potenzialità del settore agro-alimentare

Il settore agro-alimentare si distingue dagli altri comparti industriali per la molteplicità dei processi di lavorazione e la grande diversificazione dei prodotti. La quota di energia associata alla produzione di beni alimentari dipende dal tipo di alimento (se di origine animale o vegetale), dalle tecniche e tecnologie utilizzate per la lavorazione, dai processi implementati per la trasformazione e conservazione, dalle modalità di tra-

sporto. Basti pensare che per ogni chilogrammo di bene alimentare prodotto, il consumo di energia (elettrica o termica) varia da un minimo di circa 0.5 kWh a un massimo di 61 kWh, a seconda dello specifico sotto-settore dell'industria agro-alimentare tra i quali: la lavorazione e conservazione dei prodotti animali e vegetali, la produzione di olii, la produzione di prodotti da forno, l'industria lattiero-casearia, la produzione di mangimi.

La filiera agro-alimentare consta di diverse fasi di lavorazione (dalla materia prima al prodotto finito) caratterizzate da consumi energetici specifici non facilmente quantificabili se non in maniera approssimata data la variabilità delle tecnologie utilizzate che di diversificano per sotto-settore e per tipologia di prodotto da trattare. Tuttavia, in maniera indicativa circa il 33% dei consumi di energia è attribuibile alle principali operazioni quali: riscaldamento, essiccazione, refrigerazione, surgelazione, sterilizzazione e sanificazione. Un'ulteriore 50% dei consumi totali è destinato a soddisfare la richiesta energetica per i processi ausiliari quali: la generazione di calore di processo, la produzione di vapore e aria compressa,

la produzione di freddo. La restante aliquota, pari a circa il 17%, è mediamente distribuita su tutti gli altri sotto-processi.

In questo contesto, i livelli termici operativi che caratterizzano i vari processi produttivi del settore agro-alimentare, suddivisibili in bassa temperatura (< 150°C) e media temperatura (150-400°C), sono particolarmente idonei ad una alimentazione termica da solare a concentrazione in applicazioni distribuite di piccola e media taglia.

Possibili applicazioni del solare termico a concentrazione a bassa e media temperatura

Di seguito si riportano alcuni esempi di possibili casi applicativi del solare termico a concentrazione a bassa e media temperatura nel settore agro-alimentare:

Deodorizzazione degli olii

La deodorizzazione è il procedimento tipico dell'industria alimentare mediante il quale vengono neutralizzati i cattivi odori relativi a una determinata sostanza. Tale operazione è essenziale per gli oli e i grassi destinati all'alimentazione umana. La deodorizzazione sottovuoto solitamente richiede 4-5 h operative quando l'olio viene riscaldato tra i 200 e i 240 °C; per raggiungere tali temperature è richiesto vapore a temperatura superiore ai 400 °C.

Per l'accoppiamento del processo con la tecnologia solare a concentrazione si può ipotizzare la produzione di vapore per via solare mediante un generatore di vapore interno al serbatoio di accumulo termico, del tipo termocilindro, abbinato ad un impianto solare a concentrazione a collettori lineari (parabolici o Fresnel) che utilizza sali fusi binari come fluido termovettore e materiale per l'accumulo, operanti in un intervallo termico compreso tra

290 e 550 °C. Da un'analisi condotta da ENEA emerge che il costo del calore prodotto, in termini di LCOH, si attesterebbe mediamente tra i 7 e i 10 c€/kWh, considerando una località italiana favorevole in termini di irraggiamento (Brindisi) e un costo specifico del campo solare (collettori parabolici lineari) tra 200 e 260 €/m².

Maltazione

La maltazione è il processo tipico dell'industria della birra che consente di trasformare l'orzo in malto mediante germinazione controllata. Nel processo di maltazione, l'essiccazione rappresenta lo step più energivoro, richiedendo un flusso di aria a temperature di 60-90 °C per evitare il danneggiamento degli enzimi prodotti nella fase di germinazione. Tipicamente nelle malterie industriali l'aria viene riscaldata da un fluido termovettore (olio diatermico), a sua volta riscaldato da una caldaia a gas. In alcuni casi la temperatura di ingresso dell'olio diatermico nello scambiatore aria/olio è compresa tra 150 e 250 °C. Per l'accoppiamento di questo processo di essiccazione con la tecnologia solare a concentrazione si può ipotizzare l'adozione di un impianto a collettori lineari Fresnel utilizzando olio diatermico, in modo da mantenere inalterato il circuito di riscaldamento,

la componentistica del processo di maltazione, e l'interfaccia di scambio termico con la sorgente di energia (scambiatore olio/aria)(Figura 1).

Per lo stoccaggio termico si può ricorrere ad un innovativo sistema mono-serbatoio sviluppato da ENEA, basato sull'utilizzo di cementi ottenuti dal riciclo di scarti metallici da lavorazioni meccaniche. Questa soluzione di accumulo è caratterizzata da un basso costo, facile reperibilità dei materiali e modularità; la densità effettiva di accumulo può inoltre essere incrementata attraverso l'aggiunta di materiale a cambiamento di fase (PCM).

Da un'analisi tecnico-economica condotta da ENEA emerge che il costo del calore prodotto, in termini di LCOH, si attesterebbe mediamente tra i 5 e i 7 c€/kWh, considerando un sito del Centro Italia (Pomezia) di interesse per l'industria di settore e un costo specifico del campo solare (collettori Fresnel) compreso tra 150 e 200 €/m².

Refrigerazione industriale

I magazzini refrigerati, come le celle frigorifere industriali o commerciali rappresentano una tecnologia particolarmente energivora. In molti processi dell'industria agro-alimentare sono necessarie temperature com-

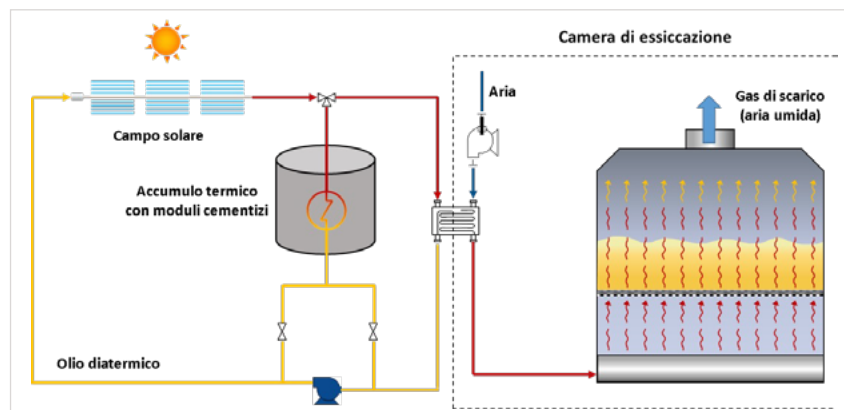


Figura 1 – Schema di integrazione della tecnologia CST con il processo di maltazione

prese tra -20°C e -30°C per la surgelazione e conservazione dei prodotti alimentari. A queste temperature il COP delle macchine a compressione, tipicamente utilizzate per la refrigerazione industriale, scende a valori intorno a 1.6 rendendo competitive le macchine ad assorbimento acqua/ammoniaca a semplice effetto alimentate da impianti solari a concentrazione a media temperatura ($T < 300^{\circ}\text{C}$). Tali impianti sono alimentati con olio diatermico a temperature variabili tra 120 e 170°C , in base alle temperature dell'acqua di raffreddamento proveniente da una torre evaporativa. Per tale applicazione si è ipotizzato il ricorso ad un impianto solare a concentrazione a collettori lineari (parabolici o Fresnel), mentre per lo stoccaggio termico si è ipotizzato un sistema a doppio serbatoio con acqua pressurizzata operante a circa 190°C con caldaia di integrazione alimentata a metano.

Da un'analisi tecnico-economica condotta da ENEA, applicata a un caso di studio relativo ad una cella frigorifera della potenza di 110 kW operante per 20 h alla temperatura di -25°C , emerge che per un costo specifico del campo solare (comprensivo della quota di accumulo termico) tra 150 e 200 €/m², il costo del kWh frigorifero si attesterebbe, per installazioni in aree del Centro-Sud Italia, mediamente tra 0.13 e 0.16 €/kWh contro i circa 0.20 €/kWh per la macchina a compressione di vapore.

Esempi applicativi in Italia

Nonostante le notevoli potenzialità offerte dal settore, attualmente le installazioni di impianti solari a concentrazione per la produzione di calore di processo a temperature medio-basse destinate al settore agro-alimentare sono piuttosto limitate. Di seguito si citano alcuni casi applicativi in Italia:

- **Birrificio Peroni:** L'impianto costituito da collettori parabolici lineari di piccola taglia, realizzato dalla ditta Absolicon, produce calore per il pastorizzatore del birrificio barese, coprendo parte del fabbisogno annuale. La superficie captante è di circa 660 m² per una potenza termica di 400 kW.
- **Caseificio Nuova Sarda Industria Casearia:** L'impianto del tipo Linear-Fresnel, realizzato da CSP-F Solar, produce calore per le lavorazioni dei formaggi, il raffreddamento e la generazione di energia elettrica. La superficie captante dei collettori è di circa 1000 m², per una potenza termica di 470 kW.

Attività ENEA a supporto del settore

ENEA fornisce supporto al settore industriale nel miglioramento tecnologico dei diversi prodotti attraverso: analisi modellistiche, sviluppo e ottimizzazione energetica di prodotti commerciali e/o prototipi preindustriali, messa a punto di metodi per la caratterizzazione energetica, realizzazione e gestione di impianti prototipali o sperimentali e co-svi-

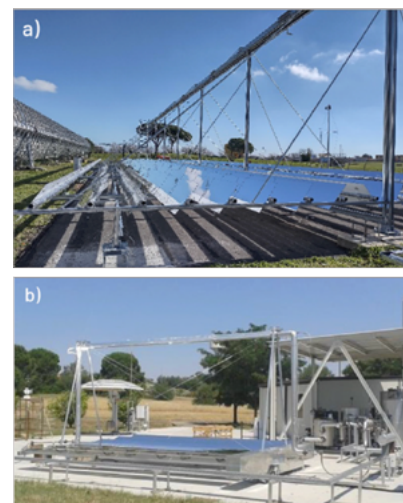


Figura 2 - a) facility ENEA-SHIP presso C.R. ENEA Casaccia; b): facility ENEA Trisaia per la qualificazione di componenti solari termici a media temperatura.

luppo con stakeholder industriali. In tale ambito ENEA utilizza una rete di laboratori avanzati e infrastrutture sperimentali per lo svolgimento delle diverse attività di ricerca, come:

- il parco del solare termico a concentrazione del Centro Ricerche della Casaccia (Figura 2a);
- la fornace solare e l'impianto di sputtering del Centro di Ricerca di Portici;
- il laboratorio, accreditato ACCREDIA, del Centro Ricerche di Trisaia (Figura 2b), unico riferimento nazionale per la certificazione dei componenti solari termici a bassa e media temperatura, a supporto dei vari strumenti di incentivazione nazionali.

per info: vincenzo.sabatelli@enea.it

Bibliografia

1. IEA. "Renewables 2021 - Analysis and forecast to 2026".
2. Epp, Bärbel, and Dirk Krüger. "Overview of global solar process heat market and trends." (2020).
3. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. "Piano nazionale integrato per l'energia e il clima (PNIEC)". Giugno 2024

Come le piattaforme digitali trasformano le agrotecnologie per un futuro energeticamente sostenibile

Le tecnologie ICT, nello specifico Internet of Things, Blockchain ed Intelligenza Artificiale, sono un elemento chiave nell'evoluzione dell'agrifood in relazione ai progetti di ricerca nei quali l'ENEA è impegnata. Le tecnologie informatiche sono l'abilitatore tecnologico per questa riorganizzazione dell'agroalimentare e delle agrotecnologie, senza il quale non sarebbe pensabile un cambiamento radicale. Tramite gli European Digital Innovation Hub ENEA si pone al centro dell'azione di trasferimento tecnologico sollecitata dall'Europa per promuovere la digitalizzazione avanzata delle Pmi (agricole e non) del nostro sistema Paese.

DOI 10.12910/EAI2025-049

di Fiorenzo Ambrosino, Serena D'Onofrio, Angelo Mariano, Giovanni Ponti - ENEA

La FAO nel documento "How to Feed the World in 2050" ^[1] evidenzia la problematica di garantire la sicurezza alimentare globale entro il 2050, quando la popolazione avrà superato il tetto dei 9 miliardi di individui, con un aumento richiesto di più del 70% della produzione agricola ed un impatto significativo in termini di ambiente e di energia. Per rispondere a questa sfida è necessario dotarsi da subito di strumenti e di buone pratiche che ci consentano di rafforzare la sostenibilità e l'efficienza energetica delle agrotecnologie. Anche l'European Environment Agency nel suo rapporto "The state of soils in Europe" ^[2] sottolinea come il settore agrifood sia profondamente energivoro al punto da richiedere delle azioni da svolgere nei vari paesi comunitari per la transizione verso la sostenibilità. Sicuramente uno dei vettori principali per questa transizione è l'innovazione digitale, che funge da abilitatore tecnologico della trasformazione e veicola sistemi più intelligenti basati sulle tecnologie

ICT. Le tecnologie ICT, nello specifico Internet of Things, Blockchain ed Intelligenza Artificiale, sono un elemento chiave nell'evoluzione dell'agrifood in relazione ai progetti di ricerca nei quali l'ENEA è impegnata. Uno di questi è il Centro Nazionale Agritech ^[3], un'iniziativa PNRR che si propone di modellare i futuri sistemi agricoli e rurali per garantirne la sostenibilità e l'efficienza attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie e metodologie per la tracciabilità, la qualità, la sicurezza, misurazioni e certificazioni per valorizzare e tutelare la tipicità nelle filiere agroalimentari (Spoke 9). Altro progetto è METROFOOD-IT ^[4], del programma nazionale di infrastrutture di ricerca, che si propone di supportare la ricerca e l'innovazione nel settore agroalimentare fornendo servizi integrati, accelerando la digitalizzazione dei sistemi agroalimentari e la loro efficienza, la rintracciabilità e la sostenibilità.

Internet of things e agricoltura di precisione

L'uso dell'Internet of Things (IoT) nell'agricoltura richiede l'integrazione di vari dispositivi connessi, sensori e attuatori, di software e di strumenti di analisi dati all'interno delle procedure per l'agrifood per consentire lo "smart farming" o agricoltura di precisione. I sensori IoT raccolgono dati su vari aspetti della coltivazione come le condizioni ambientali, lo stato del suolo, la disponibilità di nutrienti, la salute delle piante, il benessere degli animali. Questi dati confluiscono in piattaforme digitali che possono analizzarli per ricavare pattern o produrre insight che, a loro volta, possono aiutare il coltivatore nelle scelte e nella gestione dei processi e delle risorse.

L'obiettivo finale è quello di aumentare l'efficienza, la produttività e la sostenibilità in ambito agricolo, riducendo i consumi energetici e la produzione di rifiuti. In questo contesto, ENEA, con la sua competenza in ambito analisi e gestione dati su

architetture distribuite, collabora nel Centro Nazionale Agritech all'analisi dei dati dai sensori IoT relativi al monitoraggio e all'attuazione di sistemi di fertirrigazione in alcuni campi sperimentali, con l'obiettivo di rendere più "intelligente" l'uso delle risorse idriche e nutritive.

Blockchain, tracciabilità e sostenibilità

La blockchain è un registro digitale distribuito che registra transazioni in modo sicuro e immutabile, garantendo l'integrità dei dati registrati. Ogni blocco è collegato al precedente con firme crittografiche, e un opportuno meccanismo di consenso distribuito rende impossibile modificare le informazioni registrate anche molto tempo prima. Applicando questa tecnologia alle filiere agroalimentari si può garantire la tracciabilità dei prodotti lungo i vari passaggi, rispondendo alle crescenti richieste di trasparenza dei consumatori. La trasparenza e immutabilità delle informazioni relative alle varie fasi permettono di conoscere l'origine esatta del prodotto e le varie certificazioni (biologiche, DOP, ecc), riducendo il rischio di frodi rendendo più difficile contraffare le informazioni, responsabilizzano gli operatori perché ogni dato è sempre verificabile e ciò aumenta la fiducia nei consumatori che, tramite l'uso di app e QRcode, possono conoscere informazioni come data di raccolta, luogo e metodi produttivi scegliendo prodotti di qualità e sostenibili.

Con il Centro Nazionale Agritech, spoke 9, ENEA promuove la blockchain, insieme all'utilizzo di sensori IoT e Data Space opportunamente relazionati tra loro, per aumentare la fiducia e la trasparenza di tutto il processo di tracciabilità: si definiscono infatti principi di utilizzo e dimostratori su diversi casi d'uso reali relativi ad aziende italiane sele-

zionate all'interno del progetto e appartenenti a sei diverse filiere agroalimentari come quella della carne, della pasta, dei prodotti caseari, del riso, dell'olio di oliva e dei prodotti vegetali [5]. Tra le ricadute positive di queste tecnologie sulla sostenibilità ambientale ed energetica si può citare il fatto che i consumatori preferiscono prodotti tracciabili e certificati, incentivando metodi di produzione a basso impatto ambientale, che evitano sprechi di risorse e inefficienze produttive.

IA per l'ottimizzazione e il supporto alle decisioni

Gli algoritmi di intelligenza artificiale applicati all'agricoltura permettono alle macchine di rielaborare le facoltà cognitive umane su grande scala in maniera automatica in diversi modi. Ad esempio, apprendono pattern, analizzano l'andamento dei dati, effettuano decisioni, in questo modo risolvono problemi complessi per complementare ed affiancare le pratiche agricole. Gli strumenti guidati dai dati, possono essere sfruttati in diversi campi di applicazione: analisi predittive, sistemi di monitoraggio, sistemi di gestione automatica, ottimizzazione dell'uso di risorse. Un ambito in cui viene utilizzato un approccio di questo tipo, è fornito dai sistemi di supporto alle decisioni, che consentono di ottimizzare il processo decisionale elaborando le strategie più opportune o supportando il coltivatore nelle sue attuazioni.

Tra i suddetti argomenti, **l'ENEA si occupa di collaborare all'individuazione di strategie di ottimizzazione dei consumi di risorse, sulla base dei sensori di monitoraggio sul campo agricolo nell'ambito del Centro nazionale Agritech.** Inoltre, ha contribuito alla realizzazione di un **sistema di supporto alle decisioni** basato sulle tecniche di riconoscimento delle

coltivazioni agricole attraverso analisi spettroscopiche non distruttive. Questo sistema di supporto tramite machine learning permette di individuare in maniera affidabile la cultivar di alcuni particolari tipi di nocciole, ma è ampiamente replicabile come meccanismo di azione per classificare altre cultivar e riconoscere altri prodotti agroalimentari.

Piattaforme digitali integrate: il futuro delle agrotecnologie

In generale, l'adozione di un sistema digitalizzato integrato dedicato al settore dell'agroalimentare è di fondamentale importanza per promuovere una visione olistica dei dati e dei processi. Si veda ad esempio il recente articolo di Di Bitonto et al [6] che esplora il ruolo delle infrastrutture di calcolo e dell'intelligenza artificiale come supporto per una rivoluzione delle pratiche agricole: nella Fig.1 sono rappresentati i componenti digitali interconnessi e interoperabili che consentono la creazione di ecosistemi digitali per l'agricoltura.

Questi sistemi digitali integrati facilitano tutte le operazioni di monitoraggio e attuazione delle tecniche agricole con l'obiettivo finale dell'ottimizzazione dell'uso dell'energia e della riduzione dell'impronta carbonica del settore primario, con un significativo impatto sul consumo del suolo e dell'acqua. **Le tecnologie informatiche sono l'abilitatore tecnologico per questa riorganizzazione dell'agroalimentare e delle agrotecnologie, senza il quale non sarebbe pensabile questo cambiamento radicale.** Certamente questa trasformazione presenta degli ostacoli, quali ad esempio i costi di implementazione, i problemi di attivazione dei processi per le piccole e piccolissime aziende, la necessità di formazione alle tecnologie digitali per gli agricoltori e non ultimo il tema della sicurezza e della privacy

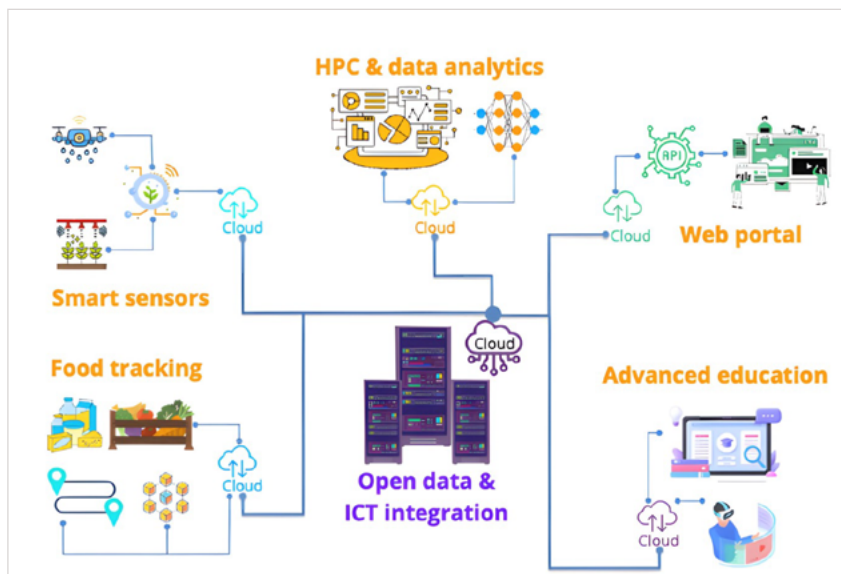


Figura 1: Sistema digitale integrato per l'agrifood

dei dati. Tramite gli European Digital Innovation Hub, su questi aspetti ENEA si pone al centro dell'azione di trasferimento tecnologico sollecitata dall'Europa per promuovere la di-

gitalizzazione avanzata delle piccole e medie imprese (agricole e non) del nostro sistema Paese.

Nell'ambito del progetto METROFOOD-IT, ENEA collabora alla realiz-

zazione di una piattaforma digitale strettamente integrata con la componente fisica fornendo servizi a supporto della digitalizzazione dei sistemi agroalimentari per il miglioramento della qualità e della sicurezza, per garantire la rintracciabilità e la trasparenza, per rafforzare la sostenibilità e la resilienza, in un'ottica di supporto all'economia circolare. In particolare, ENEA svolge il compito di supporto per i sistemi per lo storage dei dati, per l'accesso autentificato e sicuro alle risorse, per la standardizzazione delle procedure di scambio dati, per gli algoritmi di ottimizzazione basati sull'Intelligenza Artificiale, perseguendo l'obiettivo di sviluppare soluzioni sempre più personalizzate ed intelligenti con un significativo impatto sulle filiere agroalimentari e sui modelli di business ad esse collegati.

per info: giovanni.ponti@enea.it

Riferimenti

1. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf
2. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137600>
3. <https://agritechcenter.it/>
4. <https://www.metrofood.it/>
5. Farina G, Kocian A, Brunori G, Chessa S, Lai MB, Nardi D, Schifanella C, Bonura S, Masi N, Comella S, et al. Interoperable Traceability in Agrifood Supply Chains: Enhancing Transport Systems Through IoT Sensor Data, Blockchain, and DataSpace. *Sensors*. 2025; 25(11):3419. <https://doi.org/10.3390/s25113419>
6. Di Bitonto P, Magarelli M, Novielli P, Romano D, Diacono D, De Trizio L, et al. From data to nutrition: the impact of computing infrastructure and artificial intelligence. *Explor Foods Foodomics*. 2024;2:810–29. <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00063>

Digestione anaerobica di scarti agro-zootecnici per la produzione di biocarburanti avanzati

Il piano europeo REPowerEU pone un'attenzione significativa al biometano per ridurre la dipendenza dal gas naturale e aumentare la sicurezza energetica. Un obiettivo chiave è arrivare al traguardo di 35 miliardi di metri cubi (bcm) all'anno entro il 2030 con un aumento sostanziale della produzione attuale. Questo articolo analizza il ruolo strategico degli scarti agro-industriali nella filiera dei biocarburanti avanzati - ottenuti da biomasse residuali senza competizione con le produzioni alimentari - esplorando le potenzialità della digestione anaerobica, le innovazioni tecnologiche e le prospettive di sviluppo di un settore cruciale per l'economia circolare e la transizione energetica.

DOI 10.12910/EAI2025-050

di Giuseppe Lembo, Antonella Marone, Antonella Signorini - Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione: accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali - Laboratorio Idrogeno e nuovi Vettori Energetici - ENEA

L'attenzione verso la sostenibilità e la riduzione dell'impatto ambientale nel settore energetico ha posto i biocarburanti al centro della transizione ecologica. In particolare, i biocarburanti avanzati, ottenuti da biomasse residuali e rifiuti organici non in competizione per l'uso del suolo con le produzioni agricole a destinazione alimentare o mangimistica, rappresentano un'alternativa concreta ai combustibili fossili, in quanto il loro utilizzo contribuisce alla riduzione delle emissioni di gas serra ed alla diversificazione delle fonti energetiche.

In particolare, in Europa, il piano REPowerEU pone un'attenzione significativa al biometano per ridurre la dipendenza dal gas naturale (la fonte di energia primaria maggiormente utilizzata a livello europeo e nazionale) e aumentare la sicurezza energetica riducendone l'importazione da paesi terzi. Un obiettivo chiave è quello di aumentare la produzione di biometano a 35 miliardi di metri cubi

(bcm) all'anno entro il 2030, cosa che richiederà un incremento sostanziale rispetto alla produzione attuale.

In questo contesto, la digestione anaerobica (DA) emerge come una tecnologia chiave per produrre biogas, dal quale, dopo purificazione, si ottiene il biometano.

Permettendo la valorizzazione di residui colturali, reflui zootecnici e sottoprodotti delle industrie agroalimentari la DA rappresenta la tecnologia più importante - e potenzialmente di maggior interesse - per la produzione di energia rinnovabile da parte delle aziende agricole, migliorando al tempo stesso la sostenibilità delle colture. Infatti, in aggiunta alla produzione di energia dagli scarti, come sottoprodotto della DA si ottiene il digestato che può essere utilizzato come biofertilizzante organico, poiché contiene importanti nutrienti come azoto, fosforo e potassio, ed ha un impatto positivo sulla struttura del suolo.

Il ruolo strategico degli scarti agro-industriali

La digestione anaerobica è un processo biochimico che degrada la sostanza organica in assenza di ossigeno, producendo biogas, composto principalmente da metano (55-65%) e anidride carbonica (35-45%), con piccole quantità di impurità come acido solfidrico e ammoniacale. Il processo coinvolge una comunità microbica di bacteria e archaea che lavorano sinergicamente: i bacteria gestiscono le prime tre fasi (idrolisi, acidogenesi, acetogenesi), mentre gli archaea sono responsabili della metanogenesi finale. Questi microrganismi, appartenenti a domini evolutivi distinti, hanno diverse esigenze fisiologiche e caratteristiche ecologiche, ma cooperano attraverso una forma particolare di mutualismo nota come sintrofia. L'incremento dell'efficienza complessiva del processo di digestione anaerobica è un obiettivo strategico per massimizzare la produzione di biogas e biometano, nonché per migliorare la qualità del digestato.

Per questo motivo, la DA è al centro di numerose attività di ricerca, sviluppo tecnologico e dimostrazione condotte dal gruppo di esperte/i del Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili (TERIN) dell'ENEA.

Questo articolo analizza il **ruolo strategico degli scarti agro-industriali** nella filiera dei biocarburanti, esplorando le potenzialità della digestione anaerobica, le innovazioni tecnologiche e le prospettive di sviluppo di un settore cruciale per l'economia circolare e la transizione energetica.

Uno degli aspetti più interessanti della DA applicata agli scarti agro-zootecnici è la sua flessibilità: questa tecnologia consente infatti di trattare una vasta gamma di matrici, dalle deiezioni animali e sottoprodotti dei caseifici e dei birrifici alle acque di vegetazione dei frantoi, dai residui delle distillerie agli scarti della lavorazione di cereali, barbabietole, patate e scarti di macellazione. Per questo motivo nel nostro Paese è presente un'alta differenziazione locale e stagionale delle biomasse utilizzabili ai fini della digestione anaerobica. Inoltre, è importante sottolineare che non tutti gli scarti agricoli sono uguali: la loro composizione chimica, il contenuto di sostanza secca, la presenza di lignina, cellulosa o zuccheri semplici influenzano profondamente la resa del processo di digestione.

Di conseguenza, negli impianti più moderni si tende a praticare la co-digestione, ovvero la miscelazione di diversi tipi di scarti. Questa, oltre a far fronte alla disponibilità stagionale, consente di bilanciare le caratteristiche dei substrati e di garantire un apporto di carbonio ed azoto ottimale per la crescita dei microorganismi. La pratica della co-digestione permette inoltre di diluire carichi organici eccessivi e picchi di concentrazione di sostanze potenzialmente inibenti e quindi, di ottimizzare la produzione

di biogas. La co-digestione, però, richiede una maggior capacità di gestione ed un'approfondita conoscenza del processo anaerobico che la rende un argomento di ricerca importante. Ad esempio, la co-digestione del liquame di allevamenti bovini con substrati altamente fermentescibili è stata oggetto, negli anni 2010-2013 delle attività di ricerca nell'ambito del progetto MAREA (SOS-ZOOT - D.M. 13459/7303/10), finanziato dal MiPA-AF. In particolare, i ricercatori ENEA hanno sviluppato un Disegno sperimentale statistico per individuare la composizione ottimale della miscela di substrati ai fini di aumentare le rese energetiche dalla digestione del liquame (Marone et al., 2015; Varrone et al, 2014).

Il processo a "doppio stadio"

Un differente approccio, utilizzato per ottimizzare il processo di digestione anaerobica, consiste nella separazione e controllo delle diverse fasi della DA in due reattori distinti, in un processo detto "a doppio stadio". Nel primo stadio avvengono le reazioni di idrolisi e acidogenesi con produzione di un biogas ad elevato contenuto (30-50%) di bioidrogeno. Nel secondo stadio, alimentato con gli effluenti del primo, si svolgono prevalentemente le fasi di acetogenesi e metanogenesi, con produzione di un biogas con un contenuto in metano maggiore di circa il 20% rispetto al processo convenzionale in un singolo stadio. I biogas prodotti possono essere recuperati separatamente o miscelati per formare l'idrometano, una miscela di gas combustibili, che purificati dalla CO₂ può essere utilizzata come biocarburante. Una miscela di idrogeno e metano, chiamata **hythane**[®], è un marchio registrato con un contenuto di idrogeno compreso tra il 10 e il 25% in volume (Fulton et al., 2010). Combinando i

vantaggi dell'idrogeno e del metano, l'hythane[®] è considerato uno dei combustibili gassosi più rilevanti nel processo di transizione da un modello basato sui combustibili fossili a una società fondata sull'idrogeno come modalità principale per la produzione di energia.

Al di là del valore aggiunto apportato dalla produzione di idrogeno verde, il processo a due stadi presenta diversi vantaggi rispetto al processo di digestione anaerobica convenzionale a singolo stadio quali: maggiore stabilità e maggiore resa energetica, ed al contempo la durata del processo è ridotta, tutti fattori che contribuiscono ad aumentare la produttività energetica ed a diminuire le emissioni di gas serra (GHG) (Lembo et al., 2022).

L'esperienza dell'ENEA su questo tema è stata sviluppata negli anni attraverso attività di ricerca e di sperimentazione condotte in passato nell'ambito di diversi progetti, come il **progetto METISOL** (2011-2013- finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Accordi di Programma ENEA-MSE sulla Ricerca di Sistema Elettrico (2012-2014; 2015-2017) e il già citato progetto MAREA. Quest'ultimo in particolare, in collaborazione con il CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria), ha portato alla progettazione e realizzazione di un impianto pilota a due stadi (brevetto ENEA/CREA n. 0001416926), costituito da un reattore di fermentazione accoppiato a un digestore anaerobico, funzionante con siero di latte e liquame animale (Fig. 1).

Attualmente, all'interno del **progetto AGRITECH** (task 8.2.1) finanziato con fondi PNRR, l'ENEA è impegnata nello studio di un processo avanzato di digestione anaerobica (DA) a due stadi finalizzato alla massimizzazione della conversione energetica complessiva del residuo della filiera della



Figura 1. Impianto prototipo processo doppio stadio per la produzione di idrometano (brevetto ENEA/CREA n. 0001416926).

produzione delle arance, il così detto "Pastazzo".

La biometanazione

Per poter impiegare su una scala più ampia e diversificata, rispetto alla più semplice produzione di energia elettrica in azienda, il metano contenuto nel biogas è necessario sottoporlo ad un processo di purificazione chiamato **upgrading**, che rimuove la CO_2 , oltre all' H_2S e altre impurezze presenti in tracce, permettendo di ottenere metano praticamente puro (> 97%), identico al gas naturale, conosciuto con il nome di "biometano". Il biometano così ottenuto è un "green gas" con caratteristiche tali da renderlo idoneo all'immissione nella rete di distribuzione del gas e per tutti gli usi finali attualmente coperti dal gas naturale contribuendo, in parte, alla decarbonizzazione di settori difficili da elettrificare. Le tecnologie di upgrading commercialmente disponibili si basano principalmente sulla rimozione della CO_2 tramite metodi chimico-fisici come water scrubbing, pressure swing adsorption (PSA), assorbimento con soluzioni di ammine o carbonati e separazione con membrane. Sebbene efficienti, queste tecnologie hanno costi operativi elevati che riducono la profittabilità, specialmente in impianti esistenti che devono essere sottoposti a re-vamping (Angelidakis et al., 2018). In questo contesto, il processo bio-

logico di biometanazione, che consiste nella riduzione biologica della CO_2 (contenuta nel biogas) a metano mediante H_2 operata da specifici microrganismi (Agneessens et al., 2018; Fang et al., 2020), riveste un particolare interesse perché potenzialmente utilizzabile su impianti di piccola-media taglia (≤ 300 kW), come sono appunto la maggior parte degli attuali impianti di biogas da reflui di allevamenti zootecnici presenti in Italia.

La metanazione biologica rientra nell'ambito delle tecnologie definite "Power to Gas" (PtG), che consentono la conversione dell'energia elettrica in energia chimica sotto forma di metano (PtM). Con la finalità di contribuire alla decarbonizzazione, la tecnologia richiede che l'idrogeno utilizzato per la riduzione della CO_2 a metano, sia prodotto in modalità "green", quindi per elettrolisi dell'acqua, alimentata da energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (fotovoltaico ed eolico). Data la natura intermittente e la crescente penetrazione di queste fonti nel mix energetico, in particolare del fotovoltaico, la metanazione della CO_2 si configura come una delle soluzioni più promettenti per lo stoccaggio energetico su larga scala del surplus di elettricità prodotta da queste fonti in alcuni momenti della giornata. Questa tecnologia consente quindi di trasformare l'energia elettrica eccedente in un vettore energetico ad alta densità e facilmente immagazzinabile, contribuendo in modo significativo alla gestione degli sbilanciamenti tra produzione e domanda elettrica, nonché alla stabilità e flessibilità della rete (Kougias et al., 2017).

Numerose attività di ricerca, già svolte e attualmente in corso a livello internazionale si focalizzano, principalmente, su due tipologie di processo: la biometanazione "ex-situ", in cui la reazione di biometanazio-

ne si compie in un reattore dedicato a valle di quelli in cui avviene la DA e, la biometanazione "in-situ", in cui la conversione della CO_2 in metano viene effettuata iniettando idrogeno all'interno dello stesso impianto di DA. Per entrambi i processi, la diffusione dell'idrogeno nella fase liquida è il fattore limitante poiché la bassa solubilità ne riduce la biodisponibilità per i microrganismi. Tuttavia, mentre per il processo ex-situ si può lavorare sulla configurazione dei reattori, per quello in-situ esiste il vincolo della configurazione dell'impianto AD, che nella maggior parte degli impianti a biogas è del tipo continuo a serbatoio agitato "CSTR" (Continuously Stirred-Tank Reactor).

Il processo di biometanazione in-situ è stato oggetto di attività di ricerca del gruppo di esperte/i del dipartimento TERIN dell'ENEA negli ultimi anni. Nell'ambito delle attività relative al Programma di Ricerca sul Sistema Elettrico, (2019-2021;) è stato sviluppato un reattore pilota ibrido CSTR, progettato per ridurre al minimo le modifiche da apportare a un digestore esistente. In questo impianto pilota la biomassa microbica è stata arricchita tramite l'immobilizzazione su supporti mentre il rimescolamento liquido per l'omogeneizzazione dei nutrienti veniva ottenuto tramite il ricircolo del biogas arricchito con idrogeno, favorendo al contempo la solubilizzazione dell' H_2 nella fase liquida. (Fig. 2). Con questa configurazione si è ottenuta una miscela gassosa costituita da 79.6% CH_4 , 18.0% H_2 , 2.4% CO_2 , con un incremento della concentrazione di metano nel biogas del 56%. (Lembo et al., 2023, 2021; Signorini e Rosa, 2021).

In generale, il processo di biometanazione in-situ risulta particolarmente interessante in quanto non richiedendo la costruzione di un ulteriore reat-



Figura 2: Reattore pilota ibrido (60L) di biometanazione *in situ*, alimentato con reflui dell'industria casearia.

tore a valle del preesistente, consentirebbe di apportare modifiche minori su quelli già in funzione, riducendone i costi di revamping. D'altra parte, un eccesso di H_2 ed una diminuzione della CO_2 disciolta ad di sotto di certi valori possono alterare la stabilità del processo fino alla sua interruzione. Quindi, data la complessità intrinseca della DA, ci sono ancora alcune difficoltà tecniche da risolvere prima che questa tecnologia possa essere utilizzata su larga scala.

Attualmente, nell'ambito del progetto Piano di Ricerca sull'Idrogeno (POR-H2 - LA2.1.8), finanziato con fondi PNRR, sono in corso due attività di ricerca parallele sul processo di upgrading biologico *in-situ* del biogas.

In una di queste, caratterizzata da un elevato potenziale innovativo, è in fase di studio un nuovo concetto denominato **BEPtG (Bioelectrochemical Power-to-Gas)**, che prevede l'integrazione di una cella di elettrolisi microbica (MEC) all'interno di un digestore anaerobico (DA). Questa tecnologia sfrutta la capacità dei microrganismi elettroattivi (Electroactive Bacteria, EAB) di scambiare elettroni con un materiale elettrodico. L'energia elettrica rinnovabile fornita al sistema consente la riduzione bioelettrochimica della CO_2 a CH_4 , attraverso la produzione *in-situ* di elettroni e/o idrogeno (Fig. 3).

Nell'ambito della seconda linea di attività, è in fase di sviluppo un nuovo processo di biometanazione ibrido (*in-situ* + *ex-situ*), in collaborazione con il Dipartimento SSPT dell'ENEA. Il gruppo di lavoro del Dipartimento TERIN è attualmente impegnato nella sperimentazione di un processo *in-situ* in cui solo una parte della CO_2 viene ridotta a CH_2 mediante l'aggiunta di una quantità ottimale di idrogeno, tale da non compromettere il corretto funzionamento del processo di digestione anaerobica, ma da consentire un incremento del contenuto di metano nel biogas (Fig.3).



Figura 3. Reattore sperimentale (1L) per l'integrazione di un sistema bioelettrochimico (BEPtG) nel digestore anaerobico per l'upgrading del biogas attraverso la riduzione *in-situ* della CO_2 a CH_4 .

A questo stadio segue un processo *ex-situ*, in cui il biogas arricchito e l'idrogeno vengono ulteriormente convertiti in biometano grazie all'azione di colture idrogenotrofiche arricchite. Tale configurazione consente di

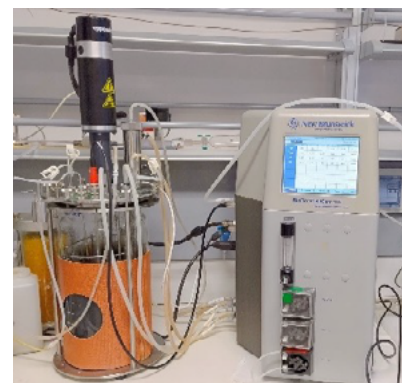


Figura 4. Apparato sperimentale (15L) per l'ottimizzazione del processo di upgrading biologico *in-situ* per la produzione di una miscela arricchita in metano.

utilizzare un reattore separato per la fase *ex-situ* di dimensioni significativamente ridotte, ottimizzando così l'efficienza complessiva del sistema.

La digestione anaerobica degli scarti agro-zootecnici rappresenta una soluzione strategica e sostenibile per la produzione di energia rinnovabile e per la valorizzazione dei residui organici, contribuendo in modo significativo alla transizione ecologica e all'economia circolare.

L'evoluzione verso processi a due stadi e l'integrazione di tecnologie innovative, come l'upgrading biologico e i sistemi bioelettrochimici, hanno dimostrato su scala sperimentale di poter incrementare l'efficienza, la flessibilità e la sostenibilità della filiera biogas-biometano. I risultati ottenuti nei progetti ENEA, in collaborazione con Università ed altri Enti di ricerca, evidenziano come l'ottimizzazione dei parametri di processo e la valorizzazione di substrati diversificati possano garantire una produzione più elevata e qualitativamente migliore di "green gas" utilizzabili come biocarburanti avanzati (bioidrogeno e biometano), riducendo al contempo le emissioni di gas serra e i costi operativi.

Le prospettive future sono orientate verso una sempre maggiore integrazione tra produzione di biogas,

utilizzo di idrogeno verde da fonti rinnovabili e innovazione tecnologica, con l'obiettivo di rendere questi processi sempre più efficienti, sca-

labili e competitivi. In questo contesto, la sinergia tra ricerca scientifica, innovazione industriale e politiche di sostegno sarà fondamentale per

consolidare il ruolo dei biocarburanti avanzati nel panorama energetico nazionale ed europeo.

per info: giuseppe.lembo@enea.it

Riferimenti Bibliografici

- Agneessens, L.M., Ottosen, L.D.M., Andersen, M., Berg Olesen, C., Feilberg, A., Kofoed, M.V.W., 2018. Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation. *Bioresour. Technol.* 258, 33–40.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., Kougias, P.G., 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol. Adv.* 36, 452–466.
- Bailera, M., Lisbona, P., Romeo, L.M., Espatolero, S., 2017. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69, 292–312.
- Fang, W., Zhang, X., Zhang, P., Wan, J., Guo, H., Ghasimi, D.S.M., Morera, X.C., Zhang, T., 2020. Overview of key operation factors and strategies for improving fermentative volatile fatty acid production and product regulation from sewage sludge. *J. Environ. Sci. (China)* 87, 93–111.
- Kougias, P.G., Treu, L., Benavente, D.P., Boe, K., Campanaro, S., Angelidaki, I., 2017. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Bioresour. Technol.* 225, 429–437.
- Lembo, G., Rosa, S., Marone, A., Signorini, A., 2023. In Situ Biogas Upgrading in a Randomly Packed Gas-Stirred Tank Reactor (GSTR). *Energies* 16. <https://doi.org/10.3390/en16073296>
- Lembo, G., Rosa, S., Miritana, V.M., Marone, A., Massini, G., Fenice, M., Signorini, A., 2021. Thermophilic anaerobic digestion of second cheese whey: Microbial community response to H₂ addition in a partially immobilized anaerobic hybrid reactor. *Processes* 9, 1–16.
- Lembo, G., Signorini, A., Marone, A., Carbone, C., Agostini, A., 2022. Hydrogen and Methane Production by Single- and Two-Stage Anaerobic Digestion of Second Cheese Whey: Economic Performances and GHG Emissions Evaluation. *Energies* 15. <https://doi.org/10.3390/en15217869>
- Marone, A., Varrone, C., Fiocchetti, F., Giussani, B., Izzo, G., Mentuccia, L., Rosa, S., Signorini, A., 2015. Optimization of substrate composition for biohydrogen production from buffalo slurry co-fermented with cheese whey and crude glycerol, using microbial mixed culture. *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.008>
- Varrone, C., Marone, A., Fiocchetti, F., Giussano, B., Isso, G., Mentuccia, L., Rosa, S., Signorini, A. Optimization of substrate composition for biohydrogen and methane production from buffalo slurry co-fermented with cheese whey and crude glycerol. 22th European Biomass Conference & Exhibition (22th EU BC & E) 23–26 June, 2014, Hamburg, Germany

Processi termochimici per produrre bioidrogeno da residui agroindustriali

La crescente necessità di ridurre le emissioni di gas serra e promuovere fonti energetiche sostenibili favorisce lo sviluppo di tecnologie innovative per la produzione di idrogeno rinnovabile. Tra queste, i processi termochimici applicati ai residui agroindustriali costituiscono una soluzione sostenibile e complementare all'elettrolisi, in grado di valorizzare biomasse di scarto e contribuire alla transizione verso l'economia circolare. Questo articolo presenta le attività di ricerca condotte da ENEA per la produzione di bioidrogeno attraverso la gassificazione di biomasse residuali integrata con sistemi avanzati di separazione dell'idrogeno con membrane a base di Palladio. Gli studi sperimentali, condotti su scala pilota e pre-pilota, hanno permesso di ottimizzare i parametri operativi e dimostrare la fattibilità tecnica dell'intero processo, ottenendo idrogeno ad alta purezza ed efficienza. I risultati evidenziano il potenziale di questa filiera per lo sviluppo di sistemi decentrati e scalabili di produzione di idrogeno rinnovabile, con applicazioni concrete nel contesto della decarbonizzazione industriale e della valorizzazione energetica delle biomasse residuali.

DOI 10.12910/EAI2025-051

di Nadia Cerone, Luca Contuzzi Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica verde - Laboratorio Tecnologie, Processi e Impianti per la Valorizzazione di Biomasse, Residui e Rifiuti - ENEA

La transizione energetica globale, orientata alla riduzione delle emissioni climalteranti e alla sicurezza degli approvvigionamenti, ha attribuito all'idrogeno un ruolo sempre più centrale quale vettore energetico strategico per uno sviluppo sostenibile. Grazie alla sua elevata densità energetica per unità di massa e alla possibilità di essere utilizzato senza generare emissioni dirette di carbonio, l'idrogeno rappresenta un'alternativa pulita ai combustibili fossili, con potenzialità di impiego nei settori più difficili da decarbonizzare, quali il trasporto pesante, l'industria ad alta intensità energetica e la generazione elettrica. La costruzione di un mix energetico basato sulla complementarità di diverse soluzioni tecnologiche rappresenta l'unica via percorribile per un processo di decarbonizzazione

sostenibile. In questo contesto, i processi termochimici per la produzione di bioidrogeno da residui dell'agroindustria si affermano come una via di particolare interesse scientifico e industriale. Essi non solo consentono di valorizzare i residui agricoli ed industriali, ma contribuiscono anche a risolvere problemi di gestione dei rifiuti, promuovendo un'economia circolare e, soprattutto, non competono con la filiera alimentare.

Tra le diverse tecnologie termochimiche, la gassificazione si distingue per la sua versatilità, permettendo la conversione di un'ampia gamma di biomasse in syngas. Questo processo avviene a temperature elevate (tipicamente 800-1000 °C) in presenza di un agente gassificante controllato (aria, ossigeno, vapore o miscele di essi). Il syngas risultante è una miscela composta principalmente da idrogeno

(H₂), monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e una minore quantità di idrocarburi aromatici ed ossigenati. L'ottimizzazione delle condizioni operative della gassificazione è fondamentale per massimizzare la resa in H₂, il rapporto H₂/CO e per la riduzione delle molecole organiche condensabili (tar), parametri critici per la successiva fase di upgrading del syngas.

L'integrazione della gassificazione: un passaggio cruciale

L'integrazione della gassificazione con sistemi avanzati di separazione rappresenta un passaggio cruciale per la produzione di bioidrogeno ad alta purezza, rendendo il processo competitivo e coerente con le esigenze dei settori industriali emergenti. In questo ambito, le membrane metalliche a base di palladio (Pd) si

configurano come una delle tecnologie più promettenti per la separazione dell'idrogeno. Realizzate tipicamente in lega Pd-Ag, al fine di migliorarne la stabilità meccanica, la permeabilità e la resistenza all'avvelenamento da specie come CO, H₂S o composti aromatici, queste membrane sono in grado di operare a temperature elevate (300-600 °C) e in un intervallo di pressione di 4-8 bar, garantendo un'elevata selettività nei confronti dell'idrogeno che permette di raggiungere livelli di purezza superiori al 99,99%. Un ulteriore avanzamento è rappresentato dai reattori a membrana catalitici (Catalytic Membrane Reactors, CMR), che integrano la reazione di shift del gas d'acqua ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$) con la separazione simultanea dell'idrogeno attraverso la membrana. Questa configurazione consente di rimuovere l'idrogeno man mano che si forma, spostando l'equilibrio della reazione in favore della conversione e superando così i limiti imposti dalla termodinamica in sistemi tradizionali. Il risultato è un processo più compatto ed efficiente, che consente la produzione diretta di idrogeno ad alta purezza da syngas ottenuto da biomassa, riducendo al contempo i costi e la complessità impiantistica. **L'integrazione della gassificazione e dei CMR a membrane metalliche offre pertanto una traiettoria tecnologica altamente promettente per lo sviluppo di sistemi decentralizzati e scalabili di produzione di idrogeno rinnovabile. Questa sinergia è particolarmente rilevante nell'ottica della decarbonizzazione dei settori industriali e della promozione di un'economia circolare, contribuendo alla diffusione di vettori energetici puliti e alla riduzione delle emissioni nette di gas serra.**

Attività di ricerca e sviluppo in ENEA

Le attività di ricerca sviluppate da ENEA rappresentano un contributo rilevante allo sviluppo di tecnologie innovative per la produzione sostenibile di bioidrogeno, con un approccio integrato che coniuga processi termochimici di gassificazione e sistemi avanzati per la separazione selettiva dell'idrogeno. Il lavoro si è concentrato, in particolare, nell'ottimizzazione delle condizioni operative di un gassificatore a letto fisso in controcorrente da 200 kWth, con una capacità di trattamento compresa tra 20 e 30 kg/h di scarti dell'agro-industria quali gusci di mandorle e nocchie. Questa configurazione ha permesso di esplorare in dettaglio l'effetto di parametri chiave, come i rapporti di equivalenza (ER) tra ossigeno e biomassa e tra vapore e biomassa, sulla qualità del syngas, le rese di processo e l'efficienza energetica.

Le sperimentazioni hanno evidenziato l'importanza di una regolazione precisa dell'ER per ottimizzare il contenuto di idrogeno e il rapporto H₂/CO, oltre che del tempo di residenza del syngas nel letto del reattore, parametro fondamentale per ridurre la produzione di tar. Le sperimentazioni effettuate hanno infatti dimostrato che il contenuto di tar diminuisce di circa il 10% per ogni secondo di permanenza nel letto reattivo. Inoltre, i risultati hanno mostrato il significativo effetto dell'aggiunta di vapore sulla concentrazione di idrogeno nel syngas che aumenta grazie alle reazioni di water gas e water gas shift entrambe favorite dalla presenza del vapore, sia nel caso di gassificazione con aria che con ossigeno come agenti gassificanti e per tutte le biomasse utilizzate.

Parallelamente, **una seconda linea di ricerca ha riguardato lo sviluppo e la sperimentazione di reattori a mem-**



Figura 1: Impianto PRAGA (uPdRAft GASification) presso il Centro Ricerche ENEA Trisaia



Figura 2: Gusci di mandorle



Figura 3: Gusci di nocchie

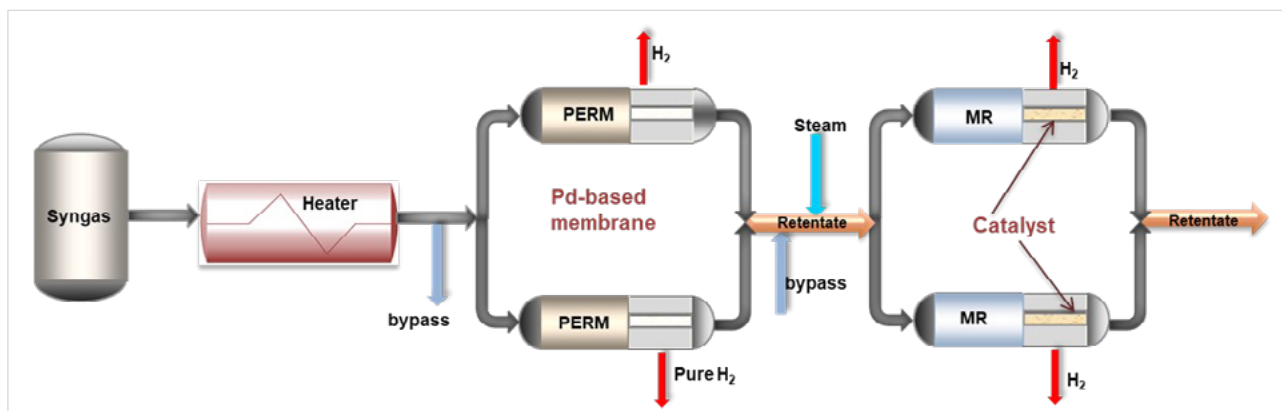


Fig.4 - Separazione dell'idrogeno

brana catalitici (CMR) per la conversione e la separazione simultanea dell'idrogeno (fig.4). Questi sistemi, basati su membrane metalliche in lega Pd-Ag, sono stati sperimentati a scala pre-pilota (capacità: 0,25 Nm³/h di syngas) in condizioni operative comprese tra 300 e 350 °C e pressioni di esercizio tra 4 e 8 bar. I CMR permettono di combinare in un'unica unità la reazione di water-gas shift (WGS) e la rimozione in situ dell'idrogeno prodotto, sfruttando la selettività della membrana per spostare l'equilibrio della reazione e migliorare l'efficienza complessiva del processo. Questa integrazione consente di ottenere, in un solo stadio, elevate conversioni di CO in CO₂ e H₂, nonché un flusso continuo di idrogeno con purezze superiori al 99%, riducendo il numero di unità di processo necessarie rispetto agli schemi convenzionali. I risultati sperimentali hanno confermato con successo il potenziale della tecnologia. A titolo di esempio, da 1 kg di gusci di mandorla si possono ottenere 2.4 m³ di syngas da una gas-sificazione in controcorrente con aria e vapore come agenti gassificanti e da questi 1 m³ of H₂ ultrapuro usando 0.105 m² di membrana al palladio. Le prove sperimentali condotte in diverse configurazioni e condizioni operative hanno dimo-

strato l'affidabilità e le prestazioni delle membrane Pd-Ag anche in presenza di concentrazioni significative di CO, confermandone la stabilità chimica e la robustezza nel tempo. **Le attività condotte da ENEA costituiscono dunque una solida base scientifica e tecnologica per la validazione e la futura industrializzazione di sistemi integrati per la produzione di bioidrogeno.**

Progetti e conclusioni

Gli sviluppi descritti nelle sezioni precedenti sono stati ottenuti da ENEA in collaborazione con partner nazionali e internazionali, nell'ambito di diversi progetti, tra cui:

- **HY-TRACTOR** - "Trattore agricolo a celle a combustibile alimentato a idrogeno" (Industria 2015)
- **AMBITION** "Advanced biofuel production with energy system integration" (H2020)
- **BRISKI and II** "Biofuels Research Infrastructure for Sharing Knowledge" (H2020)
- **RISENERGY** "Accelerating Europe's Green Energy Transformation through Innovation and Collaboration" (HE).

Il Technology Readiness Level (TRL) della gassificazione di biomassa per la produzione di idrogeno è attual-

mente stimato tra 5 e 7, in base alla metodologia di valutazione adottata. Sebbene i sottoprocessi principali coinvolti nel ciclo di conversione siano tecnologicamente maturi, è ancora necessario dimostrarne l'integrazione e il funzionamento continuo su scala rilevante per raggiungere livelli TRL più elevati.

I progetti citati hanno contribuito significativamente all'avanzamento dell'integrazione tra i diversi processi, testando con successo l'intera filiera, dai residui agricoli fino alla produzione di idrogeno, e raggiungendo un TRL pari a 6.

La produzione di bioidrogeno tramite processi termochimici applicati a residui agro-industriali si conferma una strategia efficace e sostenibile per la valorizzazione della biomassa e il supporto alla transizione energetica. Le attività di ricerca condotte da ENEA hanno dimostrato la fattibilità tecnica e l'efficienza del processo di gassificazione e dei sistemi avanzati di separazione dell'idrogeno mediante membrane a base di palladio, ottenendo risultati promettenti in termini di purezza, resa e selettività dell'idrogeno prodotto. Un controllo accurato dei parametri operativi, come il rapporto aria/biomassa e l'aggiunta di vapore, risulta essenziale per ottimizzare la qualità del syngas e



ridurre la formazione di catrami. Inoltre, l'impiego di reattori catalitici a membrana ha permesso di superare i limiti termodinamici convenzionali, migliorando l'efficienza complessiva del processo. Tuttavia, sono necessari ulteriori sforzi di ricerca per approfondire la stabilità a lungo termine di catalizzatori e membrane su scala pre-pilota e pilota, al fine di validare l'efficacia dell'intero processo.

Questi risultati aprono la strada allo sviluppo di impianti modulari e scalabili, adatti a contesti decentralizzati, che possono contribuire in modo significativo alla decarbonizzazione del settore industriale e alla promozione di un'economia circolare basata sul riutilizzo dei rifiuti organici.

La tecnologia rappresenta quindi una valida alternativa per la produzione di idrogeno rinnovabile, con

potenziali applicazioni in diversi settori energetici e industriali, a supporto della diffusione di soluzioni pulite e sostenibili per il futuro scenario energetico.

per info: nadia.cerone@enea.it

Riferimenti bibliografici

1. Gasification of Agroresidues for Syngas Production, Nadia Cerone and Francesco Zimbardi, *Energies* 2018, 11, 1280; doi:10.3390/en11051280
2. Pre-pilot scale study of hydrogen production from biomass syngas via water-gas shift in Pd-Ag catalytic membrane reactor and dedicated hydrogen permeation unit, Nadia Cerone, Francesco Zimbardi, Luca Contuzzi, Silvano Tosti, Laura Fabbiano, Giuseppe Domenico Zito, Onofrio Carnevale, Vito Valerio, *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 95, 18 December 2024, Pages 1204-1214, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.139>
3. Biomass gasification for hydrogen production, Joakim Lundgren, Berend Vreugdenhil, Yadi Ganjkhanlou, Robert Baldwin, *IEA Bioenergy*, February 2025
4. Effects of Oxygen and Steam Equivalence Ratios on Updraft Gasification of Biomass, Nadia Cerone and Francesco Zimbardi, *Energies* 2021, 14(9), 2675; <https://doi.org/10.3390/en14092675>
5. Multiparametric Study of Water-Gas Shift and Hydrogen Separation Performance in Membrane Reactors Fed with Biomass-Derived Syngas, *Hydrogen* 2025, 6(1), 6; Nadia Cerone, Luca Contuzzi, Carmine Florio, Giuseppe Domenico Zito, Laura Fabbiano and Francesco Zimbardi <https://doi.org/10.3390/hydrogen6010006>

Binomio energia-agricoltura per soluzioni e opportunità nella Cooperazione allo sviluppo

L'articolo descrive soluzioni tecnologiche legate alle bioenergie per far fronte alle rilevanti criticità che si riscontrano nel settore agricolo dell'Africa subsahariana, principalmente legate al mancato accesso all'energia. ENEA opera da anni nel settore della Cooperazione allo Sviluppo, anche attraverso la realizzazione e il trasferimento di tecnologie particolarmente adatte a superare le criticità del settore agricolo e appositamente ideate per soddisfare i fabbisogni energetici degli utenti, dei consumatori e del mercato.

DOI 10.12910/EAI2025-052

di Giovanni Stoppiello Divisione Bioenergia, Bioraffinerie e Chimica Verde - ENEA

Nei Paesi Prioritari per la Cooperazione Italiana allo Sviluppo e in particolare in quelli dell'Africa subsahariana, lo scenario che si registra a livello globale di insostenibile ed eccessivo consumo di energia nel settore agricolo, risulta essere molto diverso, ma non per questo con minori problematiche. Il consumo energetico del continente che ospita circa il 15% della popolazione mondiale, di cui circa il 70% provvede al proprio sostentamento in agricoltura (WEF on Africa, 2016) è rimasto sostanzialmente costante, pari a solo il 4% del consumo globale di energia nei sistemi agroalimentari ^[1].

Tuttavia, le emissioni di gas serra relative al settore agricolo sono aumentate di circa il 30% dal 2000 al 2022, con una componente del 43% dovuta al land use change (rispetto al 15% per attività di pre- e post- produzione) e con il più alto indice di intensità emissiva per valore prodotto (6.0 kg CO₂eq/IS\$, fonte 2024 FAOSTAT). Inoltre, solo una quota minore dell'ener-

gia viene utilizzata direttamente nelle aziende agricole mentre la maggior parte è impiegata nella fase di cottura dei cibi (nel 2019 circa il 35% della popolazione africana adoperava ancora combustibile legnoso per cucinare, con ingenti danni alla salute e all'ambiente ^[1]).

I piccoli agricoltori, responsabili fino all'80% del l'approvvigionamento alimentare nell'Africa subsahariana, mancano di infrastrutture energetiche essenziali, con più di due terzi delle comunità rurali ancora prive di elettricità. Ciò comporta gravi carenze in ogni fase della catena agroalimentare, che ne limitano la produttività agricola, ostacolano la crescita economica, mettono a repentaglio la sicurezza alimentare e la resilienza rurale rispetto ai cambiamenti climatici in corso ^[2].

Ingente perdita di cibo e prodotti agricoli

L'impatto più significativo derivante da tale stato di cose è sicuramente l'ingente perdita di cibo e di prodot-

ti agricoli che si registra soprattutto nelle fasi di post-raccolto. Nell'Africa sub sahariana, la stima della perdita di cibo è di circa il 37% o 120-170 kg/anno pro capite ^[3]. Ogni anno si perdono volumi significativi di cibo dopo il raccolto, stimati pari a 4 miliardi di dollari solo per i cereali (valore superiore all'aiuto alimentare totale ricevuto durante l'ultimo decennio, e corrispondente al valore annuo delle importazioni di cereali ^[4]). Più del 50% delle perdite avviene nella lavorazione post-raccolto, nella trasformazione alimentare, nei mercati al dettaglio e nel consumo ^[5]. Ciò è sostanzialmente dovuto allo scarso accesso all'energia che impedisce una adeguata trasformazione dei prodotti stagionali, alla impossibilità di adoperare sistemi di refrigerazione per i prodotti deperibili, alla carenza di infrastrutture come le reti stradali e ferroviarie.

Mentre le perdite di cibo riducono i redditi per gli agricoltori, si acuisce l'emergenza alimentare che ad oggi coinvolge circa 733 milioni di per-

sone [6], e al tempo stesso l'acqua, i fertilizzanti, l'energia e il terreno utilizzati per la stessa produzione vanno anch'essi in spreco. Si determina pertanto l'espansione di ecosistemi fragili, fenomeni di deforestazione, sovra-sfruttamento delle risorse idriche e naturali, incremento delle emissioni di gas serra.

Il potenziale delle bioenergie per il settore agricolo nei Paesi in via di Sviluppo

Le tecnologie ad energia rinnovabile assumono un ruolo fondamentale nel soddisfare le esigenze di elettricità, calore, raffreddamento e trasporto dei sistemi alimentari, grazie anche alla loro caratteristica intrinseca di poter essere implementate in maniera distribuita sul territorio, su scala medio piccola e in sistemi modulari che meglio si adattano ai fabbisogni dei produttori e dei consumatori, oltre a poter essere realizzate con sistemi off-grid da installare in aree non coperte dalla rete elettrica.

Nel settore delle bioenergie, le attuali e più innovative tecnologie permettono di accoppiare alla generazione energetica e/o di biocarburanti anche il recupero di acqua da utilizzare per la fertirrigazione, la produzione di prodotti naturali quali biochar e fertilizzanti da adoperare nei campi, la formazione di biomateriali secondari. Allo stesso tempo, gli impianti a biomassa possono essere alimentati dagli stessi scarti e residui di lavorazione agro-alimentare, offrendo in tal modo soluzioni per la loro gestione e smaltimento, in un'ottica di piena circolarità dei sistemi produttivi.

L'ingente e distribuita disponibilità di tali matrici organiche favorisce lo sviluppo di sistemi energetici di piccola scala, che possono essere quindi dislocati negli stessi siti di utilizzo finale. Piccoli impianti di cogenerazione a biomassa possono fornire in loco

l'energia elettrica necessaria per una serie innumerevole di operazioni: macinazione, pressatura, setacciatura, packaging e tutti i processi post-raccolto. L'energia termica prodotta può essere utilizzata sia in ambito domestico che produttivo, per attività quali il clean cooking, l'essiccazione e il pretrattamento dei prodotti alimentari, il riscaldamento di ambienti e di incubatori, la produzione di energia frigorifera

Competenze e tecnologie ENEA

ENEA opera da anni nel settore della Cooperazione allo Sviluppo, anche attraverso lo sviluppo e il trasferimento di tecnologie particolarmente adatte a superare le criticità del settore agricolo e appositamente ideate per soddisfare i fabbisogni energetici degli utenti, dei consumatori e del mercato. Un esempio di tali sistemi è dato dagli impianti di gassificazione a basso costo e adatti alla containerizzazione (20 - 100 KWe, con un consumo di combustibile circa 1,5 kg/KWe), mediante i quali è possibile produrre gas combustibile a partire da biomasse lignocellulosiche (legno, tutoli di mais, gusci di frutta secca, noccioli, sarmenti, etc.), a sua volta utilizzabile in sistemi cogenerativi o per diretti utilizzi termici.

ENEA ha inoltre sviluppato sistemi di trasformazione per la produzione di biochar (resa del 30%) da utilizzare come fertilizzante nei terreni a



Figura 1: gassificatore di biomasse di tipo downdraft, centro Ricerche ENEA Trisaia.

più bassa produttività e con scarsità di acqua. La tecnologia si basa sul processo di pirolisi sviluppato in un reattore a tamburo rotante, posto su uno skid trasportabile insieme alla restante componentistica ausiliaria. L'impianto prevede il recupero energetico dai gas combustibili di risulta, utilizzabili per la produzione di calore o energia frigorifera. Inoltre, attraverso un secondo processo di trasformazione è possibile generare carboni attivi, utili per la filtrazione e la purificazione delle acque.



Figura 2: Impianto di pirolisi su skid, centro Ricerche ENEA Trisaia.

Non meno importante risulta essere lo studio di prototipi di stufe domestiche per il clean cooking, che utilizzano scarti e/o i residui delle produzioni agroforestali. I prototipi sono progettati e sviluppati per essere realizzati in maniera semi-artigianale, favorendo quindi lo sviluppo di filiere di produzione e commercializzazione locali. Trattandosi di stufe a gassificazione, oltre alla produzione di energia termica utile per la cottura degli alimenti, tali apparecchi offrono come sottoprodotto il biochar.

L'ampio know how sui processi biologici di conversione delle biomasse ha permesso di sviluppare prototipi di digestione anaerobica di piccola scala e adatti al trasporto (particolarmente adatti a piccole comunità e/o insediamenti, come scuole, mense, agglomerati rurali e produttivi), con i quali si produce biogas a partire da biomasse umide (rifiuti organici domestici, residui agricoli, scarti di



Figura 3: prototipo di impianto mobile di digestione anaerobica (6 m³, 2/3 KWt), centro Ricerche ENEA Casaccia.

cibo e dei mercati alimentari, letami e liquami, etc.). Il biogas può essere direttamente bruciato per fornire calore o accoppiato a motori a combustione interna, per la produzione di energia elettrica in cogenerazione.

L'impianto produce come sottoprodotto il digestato utile come fertilizzante, e permette il ricircolo e/o il riutilizzo dell'acqua coinvolta nel processo biologico.

per info: giovanni.stoppiello@enea.it

Il progetto KijaniBox

L' ENEA è attualmente impegnata nel progetto KijaniBox: Transforming African Organic Waste into Green Energy for Cooling (HORIZON EU CL5-2023-D3-02) nell'ambito del quale verranno realizzati in Africa (Kenya, Uganda, Senegal) tre impianti dimostrativi di digestione anaerobica per la conservazione al freddo dei prodotti agroalimentari. Gli impianti saranno di tipo modulare e semovibile, con una configurazione tecnologica tale da permettere la loro dislocazione negli stessi siti produttivi e di stoccaggio. Il biogas prodotto verrà alimentato direttamente ad un bruciatore per fornire l'energia termica utile ad una macchina frigorifera ad adsorbimento (chiller), il basso consumo elettrico e la particolare configurazione impiantistica permetterà di utilizzare pannelli solari fotovoltaici per rendere l'intero sistema autonomo e indipendente dalla rete elettrica.

Per tali impianti dimostrativi sono previste tre diverse applicazioni in condizioni operative reali, corrispondenti a: mercati ortofrutticoli, aziende zootecniche e siti di lavorazione degli alimenti (frutta). Per ognuna di tali applicazioni, gli impianti verranno modulati in base ai prodotti da conservare e alle particolari esigenze di conservazione (quantità, temperature, cicli di raffreddamento), e i biodigestori saranno alimentati con gli stessi scarti di produzione e lavorazione.

Bibliografia

1. IRENA, FAO, Renewable Energies for Agri-food systems – Towards the SDGs and Paris Agreement, 2021
2. Beyond Silos - Strengthening Nexus Collaboration to Power Food Systems with Off-Grid Solar, GOGLA, 2025
3. <https://www.wri.org/insights/3-ways-reduce-food-loss-waste-africa>
4. https://www.ifad.org/documents/38714170/41335091/food_loss_advantage.pdf
5. <https://www.fao.org/food-systems/news/news-detail/countdown-to-2030-sharing-country-experiences-for-delivering-food-loss-and-waste-reduction-under-sdg-12.3/en>

Le bioraffinerie: un sistema integrato tra agricoltura e industria

Le bioraffinerie possono rappresentare un ponte di collegamento tra agricoltura e industria, e l'adozione di colture adattabili ai cambiamenti climatici, e dai bassi input agronomici, permette di recuperare terreni degradati e generare occupazione locale e resilienza socioeconomica. La creazione di sinergie tra mondo agricolo e industriale, unita al coinvolgimento attivo di imprese e centri di ricerca, rende possibile la nascita di ecosistemi produttivi locali sostenibili e virtuosi. Grande attenzione viene riservata alla valutazione della sostenibilità ambientale, economica e sociale delle filiere con studi di fattibilità e elaborazione di business case per i prodotti ottenuti, al fine di garantire la coerenza tra gli obiettivi ambientali e le esigenze del mercato.

DOI 10.12910/EAI2025-053

di Federico Liuzzi, Antonio Caporusso, Egidio Viola, responsabile laboratorio, Laboratorio Tecniche e Processi per le Bioraffinerie; Isabella De Bari responsabile della Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde - ENEA

L'intensivo utilizzo di combustibili fossili ha causato un incremento costante delle emissioni di CO₂, contribuendo significativamente al cambiamento climatico. Per contrastare tale fenomeno, l'Unione Europea ha promosso il Green Deal, un programma strategico con l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050. Tra i target intermedi, spicca la riduzione del 55% delle emissioni entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. In quest'ottica, il settore dei trasporti, uno dei principali responsabili delle emissioni, è posto sotto particolare attenzione, soprattutto nei comparti definiti hard-to-abate, per i quali sono in corso strategie dedicate alla sostituzione dei carburanti fossili con soluzioni sostenibili.

Il regolamento ReFuelEU Aviation impone l'introduzione progressiva di carburanti sostenibili per l'aviazione: si parte da una quota del 2% nel 2025, con un obiettivo del 70% nel 2050, di cui almeno il 35% costituito da e-fuels. In parallelo, FuelEU Ma-

ritime mira a una riduzione dell'80% delle emissioni nel trasporto marittimo entro il 2050. Queste iniziative pongono le basi per una transizione su larga scala, in cui le biomasse giocano un ruolo centrale in quanto unica risorsa rinnovabile capace di fissare direttamente il carbonio atmosferico, rappresentando una soluzione chiave per la produzione sia di bioenergia che di biocarburanti avanzati.

La valorizzazione delle biomasse, soprattutto residuali, consente un'azione immediata verso la defossilizzazione dei processi, facilitando l'integrazione di sistemi flessibili ed efficienti di bioraffinazione. Questo modello industriale si fonda su un approccio "a cascata", in cui tutte le componenti della biomassa, cellulosa, lignina, lipidi, proteine, vengono separate e trasformate per produrre molteplici categorie di prodotti: carburanti come bioetanolo, biodiesel ed e-fuels; biochemicals come acidi organici, polifenoli e enzimi; biomateriali come bioplastiche e lubrificanti;

energia da combustione della lignina o digestione anaerobica; e prodotti a uso agricolo e ambientale, come fertilizzanti e biochar (Figura 1).

Le prime bioraffinerie si basavano su biomasse di prima generazione, come zuccheri da barbabietola e cereali. Tuttavia, l'utilizzo di materie prime alimentari ha sollevato un dibattito etico e sociopolitico per problemi legati alla competizione food vs. fuel. L'evoluzione del settore ha quindi privilegiato l'impiego di biomasse lignocellulosiche (paglia, potature, stocchi), residui agroindustriali, rifiuti organici e colture dedicate coltivate su suoli marginali, ossia terreni idonei alla coltivazione di specie non alimentari a basso rischio di cambiamenti indiretti dell'uso del suolo (ILUC).

In Italia, secondo i dati dell'Atlante ENEA, vi sono circa 20 milioni di tonnellate annue di biomasse residuali agroindustriali disponibili su base secca, 7 milioni di tonnellate annue di FORSU e 4 milioni di fanghi di depurazione.

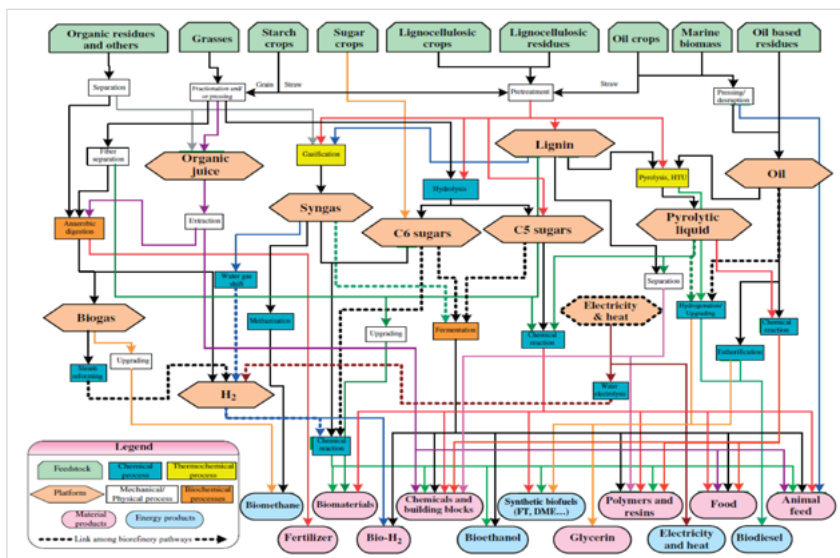


Figura 1: Processi di bioraffineria multiprodotto per la valorizzazione sostenibile di biomasse residuali attraverso tecnologie di conversione integrate (<https://task42.ieabioenergy.com/>).

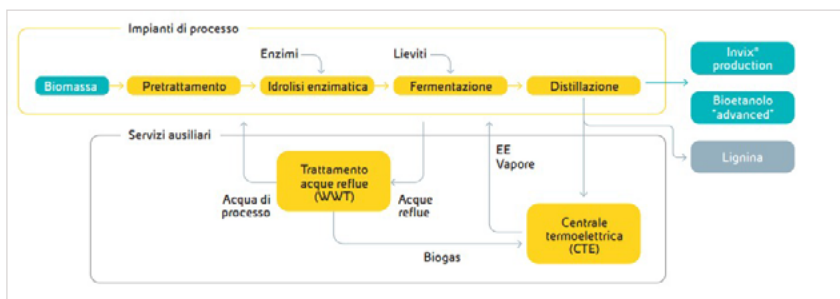


Figura 2: Schema di processo di ENI Versalis nella bioraffineria di Crescentino con la tecnologia PROESA® (<https://versalis.eni.com>).

La bioraffineria di Crescentino

Un esempio rilevante in ambito industriale è rappresentato dalla bioraffineria di Crescentino (VC), di ENI Versalis, uno dei primi impianti europei su scala industriale per la produzione di bioetanolo di seconda generazione (Figura 2). Il cuore tecnologico del processo è la piattaforma PROESA®, sviluppata per trattare biomasse lignocellulosiche. Il ciclo produttivo prevede il pretrattamento della biomassa, il frazionamento fisico e chimico dei componenti, l'idrolisi enzimatica della cellulosa e la successiva fermentazione degli zuccheri per la produzione di etanolo.

La lignina, che altrimenti potrebbe

essere considerata un sottoprodotto di scarto, viene valorizzata in un'ottica di economia circolare. Essa viene destinata a un impianto di cogenerazione per la produzione combinata di energia elettrica e termica, contribuendo all'autosufficienza energetica dell'intero processo produttivo.

Negli anni a ridosso del 2010 ENEA ha collaborato con l'azienda Mossi & Ghisolfi, che prima di ENI possedeva l'impianto, in progetti nazionali ed europei come PRIT (PON Ricerca e Competitività 2007-2013 PON01_01966), e BIOLYFE (Settimo Programma Quadro R&ST 2007-2013, FP7-239204), utili allo sviluppo della tecnologia. Questi progetti prevedevano la pro-

gettazione di impianti dimostrativi, per la produzione di bioetanolo, alimentati con colture dedicate come Arundo donax, una pianta erbacea perenne particolarmente interessante per le sue rese elevate (30-50 t/ha/anno), costo contenuto (30-50 €/t) e buona adattabilità ai suoli marginali. L'Arundo è utilizzabile anche per la fitodepurazione, ampliandone il valore ambientale. **Altro caso emblematico è la bioraffineria di Matrica (Figura 3) a Porto Torres (Sardegna)**, nata dalla joint venture tra Versalis (gruppo ENI) e Novamont. Questo impianto utilizza il cardo selvatico (*Cynara cardunculus* L.) come materia prima, coltivato su terreni non destinati alla produzione alimentare. Dalla spremitura dei semi si ottengono oli vegetali utilizzati per la sintesi di biopolimeri, bioplastiche, lubrificanti, ingredienti cosmetici e prodotti per l'agricoltura sostenibile. Le parti non oleose del cardo vengono anch'esse trasformate in bioprodotti, secondo un modello di economia circolare. ENEA ha collaborato con Matrica attraverso il progetto BIT3G (Cluster Chimica Verde - PON 2007-2013), mirato allo sviluppo di tecnologie integrate per la conversione e valorizzazione dei residui.

Bioraffinerie come ponte di collegamento tra agricoltura e industria

Le bioraffinerie possono rappresentare un ponte di collegamento tra agricoltura e industria, e l'adozione di colture adattabili ai cambiamenti climatici, e dai bassi input agronomici, permette di recuperare terreni degradati e generare occupazione locale e resilienza socioeconomica. La creazione di sinergie tra mondo agricolo e industriale, unita al coinvolgimento attivo di imprese e centri di ricerca, rende possibile la nascita di ecosistemi produttivi locali sostenibili e virtuosi. Grande attenzione viene riservata alla valutazione della



Figura 3: Impianti Matrice a Porto Torres (<https://www.matrice.it/>).

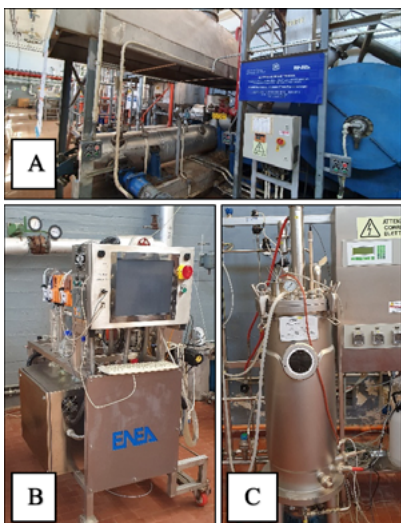


Figura 4: Impianti ENEA (A) Impianto StELe, (B) Impianto ad alto carico di solidi, (C) Fermentatore scala pilota 50 L

sostenibilità ambientale, economica e sociale delle filiere con studi di fattibilità, elaborazione di business case per i prodotti ottenuti e analisi del ciclo di vita (LCA), al fine di garantire la coerenza tra gli obiettivi ambientali e le esigenze del mercato. Il risultato atteso è una nuova visione industriale, fondata su efficienza, rigenerazione, cooperazione e innovazione, con

impatti misurabili sui settori tradizionali e una spinta concreta verso una chimica italiana più verde, autonoma e competitiva.

Nel contesto italiano e della ricerca europea, il centro ENEA della Trisaia, in Basilicata, si distingue per ospitare il primo e più grande impianto pilota europeo dedicato al pretrattamento di biomasse lignocellulosiche: lo StELe (Steam Explosion Legno). Si tratta di un'infrastruttura flessibile, progettata per valorizzare una vasta gamma di residui agricoli e forestali, promuovendo modelli sostenibili di economia circolare.

L'impianto, con una capacità di trattamento pari a 300 kg/h (Figura 4A), si basa sulla tecnologia della Steam-Explosion, un processo idrotermico sostenibile che impiega vapore saturo ad alta pressione (10 - 20 bar) e temperatura (180 - 230 °C) per la destrutturazione delle biomasse e il frazionamento delle tre componenti: cellulosa, emicellulosa e lignina. A completare la filiera sperimentale è presente un reattore ad alto carico di solidi (Figura 4B), progettato per l'idrolisi enzimatica della cellulosa. In questa fase, le catene polimeriche vengono convertite in zuccheri semplici, principalmente glucosio. Questi zuccheri, ottenuti da materie prime non alimentari, vengono infine convertiti biologicamente in un bioreattore pilota da 50 litri (Figura 4C) in bioprodotto ad alto valore aggiunto, come bioetanolo o oli microbici.

Negli ultimi anni ENEA ha proseguito la sua collaborazione con interlocu-

tori industriali in diversi contesti progettuali tra i quali COMETA e PERCIVAL finanziati dal MIUR nell'ambito dei PON 2014-2020.

Nonostante i progressi della ricerca, è ancora necessario migliorare i processi e le tecnologie puntando a :

- Migliorare il frazionamento delle materie prime;
- Ridurre i consumi energetici e utilizzare solventi rinnovabili e recuperabili;
- Aumentare le rese dei processi di biotrasformazione e valorizzare la CO₂ prodotta;
- Progettare nuove configurazioni reattoristiche per aumentare le rese di processo;
- Migliorare la fattibilità economica dei processi anche attraverso la produzione e successivo recupero dei biocatalizzatori.

Per quanto concerne i prodotti finali è necessario:

- ottimizzare i processi di downstream seguendo i principi della chimica sostenibile;
- migliorare l'efficienza energetica/integrazione termica dei processi di purificazione;
- ottimizzare processi per la coproduzione di biocombustibili e chemicals con reintegro del carbonio nel suolo (es. Biochar).
- Ripensare le filiere produttive in ottica bio-based non è solo una necessità ambientale, ma un'opportunità concreta per valorizzare le risorse locali e creare sinergie tra agricoltura, ricerca e industria.

per info: federico.liuzzi@enea.it

Sitografia:

- https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueu-aviation_en
- <https://task42.ieabioenergy.com/>
- <https://www.enea.it/it/progetti.html>
- <https://www.novamont.it/bit3g>
- <https://www.matrice.it/>
- <https://versalis.eni.com>

Dalle *bug farms* nuove filiere sostenibili per la chimica verde

Le *bug farms* rappresentano una straordinaria risorsa per la bioeconomia circolare, poiché consentono di valorizzare biomasse residuali, bioconvertendole in molecole ad alto valore aggiunto. Di fatto, queste nuove realtà, inizialmente pensate per scopi alimentari, principalmente zootecnici, si stanno sempre più rivelando un potente alleato nella transizione ecologica anche nel settore chimico e dei materiali bio-based. Le prospettive dell'impiego degli insetti nella chimica verde sono molto promettenti. Tuttavia, a causa di normative poco chiare di una legislazione ancora in via di definizione per molti prodotti derivati da insetti e dell'accettabilità sociale rispetto l'uso alimentare, la scalabilità e la standardizzazione della produzione su larga scala sono ancora in fase di consolidamento. Superare questi ostacoli richiede investimenti in ricerca, formazione e, soprattutto, un quadro normativo favorevole alla bioeconomia circolare.

DOI 10.12910/EAI2025-054

di Massimiliano De Mei, Silvia Arnone, Ferdinando Baldacchino, Egidio Viola. Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica verde, Laboratorio Tecniche e Processi per le Bioraffinerie - ENEA

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza ambientale e la necessità di ridurre la dipendenza dalle fonti fossili hanno stimolato lo sviluppo della cosiddetta chimica verde. Questa branca della chimica si propone di progettare prodotti e processi chimici che riducano o eliminino l'uso e la generazione di sostanze pericolose. In questo contesto emergono nuove filiere produttive basate su fonti biologiche alternative, tra cui spiccano le cosiddette *bug farms*, allevamenti intensivi di insetti, destinati alla produzione industriale di biomassa, dalla quale estrarre lipidi, chitina e proteine.

Queste nuove realtà, inizialmente pensate per scopi alimentari, principalmente zootecnici, si stanno sempre più rivelando un potente alleato nella transizione ecologica anche nel settore chimico e dei materiali bio-based.

Le *bug farms* sono strutture destinate all'allevamento intensivo di insetti, condotto in ambienti altamente controllati, dove temperatura, umidità, luce e alimentazione sono ottimizzati per garantire una crescita rapida e sostenibile. Le specie più comuni sono *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor* e *Acheta domesticus* caratterizzate da un'alta efficienza di conversione dei substrati su cui si alimentano, rappresentati da scarti e sottoprodotti dei mercati e dell'industria agro-alimentare.

Una straordinaria risorsa per la bioeconomia circolare

Le *bug farms* rappresentano quindi una straordinaria risorsa per la bioeconomia circolare, poiché consentono di valorizzare biomasse residuali, bioconvertendole in molecole ad alto valore aggiunto.

Dalla biomassa di insetti prodotta si possono estrarre infatti molecole che trovano crescente applicazione

in vari settori industriali. La chitina, un polisaccaride strutturale presente nell'esoscheletro degli insetti (così come nei crostacei e nei funghi), può essere utilizzata per la produzione di pellicole protettive per gli alimenti o per la realizzazione di biosensori; il chitosano, derivato della chitina attraverso processi di deacetilazione, è una molecola altamente interessante per le sue proprietà mucoadesive, chelanti, bioattive, antibatteriche e filmogene.

Chitina e chitosano derivati da insetti offrono un'alternativa sostenibile e più etica rispetto a quelli ottenuti dai crostacei, con minore impatto ambientale e rischio allergenico inferiore. Le applicazioni sono molteplici: dalla produzione di bioplastiche biodegradabili, ai film alimentari ed edibili, a sistemi di rilascio controllato per farmaci e flocculanti ecologici per il trattamento delle acque, per la chiarificazione dei vini e per il finissaggio

dei tessuti. Anche proteine e lipidi rappresentano una grande risorsa. Le proteine degli insetti possono essere idrolizzate o fermentate per produrre peptidi funzionali con proprietà antimicrobiche e antiossidanti, amminoacidi o precursori chimici, i quali poi possono essere impiegati per la produzione di basi per la sintesi di biopolimeri e fertilizzanti organici. Oltre a ciò, dalle larve di *Hermetia illucens* è possibile estrarre olii ricchi di acido laurico, miristico e palmitico, ideali per la produzione di saponi naturali, tensioattivi per detersivi ecologici, lubrificanti biodegradabili e materie prime per bioplastiche.

Le bug farms, rispetto alle colture oleaginose (come palma e soia), possono produrre quantità comparabili di olii in spazi ridotti e senza necessità di disboscare o compromettere la biodiversità.

Non bisogna poi dimenticare il frass, il residuo solido della digestione degli insetti, valido fertilizzante organico e biostimolante alternativo ai fertilizzanti di sintesi. Sebbene venga prevalentemente utilizzato in agricoltura come ammendante, vi sono progetti che mirano a estrarne frazioni bioattive capaci di stimolare la crescita delle piante o fungere da substrato per colture microbiche produttive e per valorizzarlo come substrato per fermentazioni industriali, per la produzione di bioetanolo, biogas e metaboliti secondari, come terpenoidi ed alcaloidi.

I 12 principi della chimica verde

La chimica verde si fonda su dodici principi elaborati da Anastas e Warner (1998), tra cui l'uso di materie prime rinnovabili, la riduzione dei rifiuti, l'uso di solventi e reagenti più sicuri, e la produzione di materiali biode-

gradabili. Le *bug farms* si inseriscono perfettamente in questi paradigmi; gli insetti, infatti, sono alimentati con scarti agroindustriali, riducendo così la competizione con le colture alimentari; la produzione è a basso impatto con ridotti consumi di acqua, spazio ed energia; la filiera è a rifiuti quasi nulli, perché ogni parte del ciclo biologico dell'insetto può essere valorizzata e si integra bene nei processi chimici bio-based, con la conversione dei componenti in prodotti chimici e materiali biodegradabili.

Sono noti vari casi di "buone pratiche", come ad esempio le due aziende statunitensi TômTex e CruzFoam, che stanno esplorando la produzione di materiali plastici partendo da chitina derivata da insetti; i film ottenuti mostrano eccellenti proprietà meccaniche, biodegradabilità e versatilità d'uso, competendo con le plastiche tradizionali nei settori del packaging e dell'imballaggio.

Inoltre, progetti europei, come HI-Tech coordinato dall'Università di Torino in collaborazione con il CNR, oppure XFlies, in collaborazione con l'Università degli Studi della Basilicata, o Nextalim in Francia, stanno sviluppando tensioattivi derivati da lipidi di *Hermetia illucens*, ottenendo prodotti detersivi per la casa e l'industria completamente biodegradabili, privi di composti tossici e con un basso profilo eco-tossicologico.

L'ENEA sta conducendo studi su *Hermetia illucens*, utilizzata per la valorizzazione di fanghi di depurazione di acque reflue urbane e per il recupero di olio ad alto contenuto di acido oleico da scarti alimentari, metodo tanto innovativo da portare al deposito di un brevetto, e sull'ottimizzazione di diete per *Tenebrio molitor*. Sono at-

tualmente in corso anche esperimenti per valorizzare il frass (il residuo organico prodotto dagli insetti) come fertilizzante per i suoli, anche trasformandolo in biochar, un materiale simile al carbone con interessanti proprietà agronomiche.

Le prospettive dell'impiego degli insetti nella chimica verde sono molto promettenti. Tuttavia, a causa di normative poco chiare di una legislazione ancora in via di definizione per molti prodotti derivati da insetti e dell'accettabilità sociale rispetto l'uso alimentare, la scalabilità e la standardizzazione della produzione su larga scala sono ancora in fase di consolidamento. Superare questi ostacoli richiede investimenti in ricerca, formazione e, soprattutto, un quadro normativo favorevole alla bioeconomia circolare.

Le *bug farms* rappresentano quindi una delle frontiere più promettenti per lo sviluppo di filiere sostenibili nella chimica verde. L'integrazione di insetti nella produzione industriale di composti chimici e materiali rinnovabili consente non solo di valorizzare rifiuti organici, ma introduce un modello produttivo efficiente, resiliente e conforme ai principi della sostenibilità.

Se supportata da politiche adeguate e investimenti mirati, questa filiera potrebbe diventare uno dei pilastri fondamentali della transizione ecologica, dimostrando che anche i più piccoli organismi possono avere un impatto enorme sul futuro dell'industria chimica.

per info: massimiliano.demei@enea.it

Bibliografia

1. Anastas, P.T., Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
2. Van Huis, A. et al. (2013). *Edible insects: Future prospects for food and feed security*. FAO Forestry Paper 171.
3. Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V., Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33.
4. Varelas, V. (2019). Food wastes as a potential new source for edible insect mass production for food and feed: a review. *Fermentation* 5(3), 81.
5. Diener, S., Zurbrügg, C., Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 27(6), 603-610.
6. Newton, G.L. et al. (2005). The black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a manure management/resource recovery tool. *Symposium on the State of the Science of Animal Manure and Waste Management*.
7. López-Marcos, M. C. et al. (2022). Chitosan derived from insects: a sustainable alternative. *International Journal of Biological Macromolecules*, 222, 1642-1650.
8. European Commission (2020). *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*.

Biopesticidi a base di RNA: risparmio energetico e sicurezza ambientale

Nell'ambito del Green Deal, la Commissione Europea ha proposto di ripristinare gli ecosistemi danneggiati entro il 2050, riducendo del 50% l'uso dei pesticidi chimici entro il 2030. L'agricoltura intensiva richiede molta energia, soprattutto per la produzione e l'uso in campo di pesticidi, con impatti ambientali significativi. La ricerca si sta orientando verso soluzioni più sostenibili come i prodotti di origine biologica e le biotecnologie verdi, in particolare l'RNA interferente (RNAi), una tecnica innovativa per proteggere le colture in modo mirato e sicuro. In Europa, la normativa sui biopesticidi basati sulla tecnologia RNAi è ancora da definire, ma questo approccio rappresenta una promettente alternativa ecocompatibile per il futuro dell'agricoltura.

DOI 10.12910/EAI2025-055

di Salvatore Arpaia - Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica verde - Centro Ricerche Trisaia - ENEA

Nel giugno 2022, nell'ambito del green deal, la Commissione Europea ha adottato una proposta per ripristinare gli ecosistemi danneggiati e recuperare la natura, dai terreni agricoli, ai mari, alle foreste e agli ambienti urbani, entro il 2050. Fra le misure da attuare a tal fine, la Commissione auspica la riduzione del 50% l'uso e il relativo rischio dei pesticidi chimici, nonché la dismissione dei pesticidi più pericolosi, entro il 2030. Insieme ai rischi per l'ambiente, la salute umana e la sicurezza degli alimenti, l'uso massiccio di prodotti chimici di sintesi aggrava in maniera sensibile il fabbisogno energetico e l'emissione di CO₂ del settore agricolo.

Gli agroecosistemi sono degli ecosistemi modificati dall'uomo per massimizzare le rese di una singola specie, normalmente uniforme dal punto di vista genetico. Una delle conseguenze di questa 'forzatura' della biologia delle piante coltivate, è una certa sensibilità alle avversità di tipo biotico o abiotico; la persistenza di questo

disegno innaturale dell'ecosistema implica l'uso di fonti complementari di energia per sostenere le produzioni e per controllare la crescita e lo sviluppo di componenti indesiderati della comunità (e.g. patogeni, fitofagi ed erbe infestanti). **Questo fabbisogno energetico aggiuntivo dovuto alla produzione ed all'uso dei pesticidi riduce sostanzialmente l'efficienza energetica delle coltivazioni rispetto ai sistemi naturali.** Va inoltre ricordato che la necessità dell'impiego di macchine agricole e pesticidi dipende ancora dalla disponibilità di combustibili fossili come fonte energetica più comune (oltre il 95%), in contrasto con i valori-obiettivo in materia di energie rinnovabili fissati dall'Unione Europea per far sì che almeno il 27% del consumo finale di energia entro il 2030 provenga da energia ricavata da fonti rinnovabili.

Costi diretti e indiretti per l'uso dei pesticidi

Sebbene i costi energetici diretti per l'uso in campo di pesticidi varino no-

tevolmente a seconda delle colture, per l'Italia si stima che il solo settore orticolo richieda annualmente circa 2 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) con un'emissione di circa 5 milioni di tonnellate di CO₂. Inoltre, i costi indiretti legati alla produzione di pesticidi, attrezzature agricole, e fertilizzanti comprendono circa il 90% dell'energia utilizzata in agricoltura.

La produzione di pesticidi richiede un elevato consumo energetico, con stime che variano tra il 17% e il 26% del consumo finale di energia per l'agroindustria e tra il 2,8% e il 5% per il solo settore agricolo. La produzione di insetticidi richiede in media l'impiego di oltre 200 MJ/kg di principio attivo; in particolare, nel settore della produzione di vegetali freschi in campo e in serra riscaldata il consumo di energia per i fitosanitari e per la lavorazione del terreno aumenta in maniera significativa, raggiungendo valori di 6000-7000 MJ/ha. **Il consumo energetico necessario per la produzione industriale di nuove**

molecole chimiche è aumentato in maniera esponenziale nel corso degli anni (Figura 1).

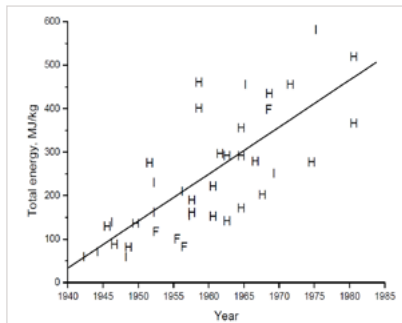


Figura 1: Esigenze energetiche per la produzione di pesticidi. H=erbicidi, F= fungicidi, I= insetticidi (da Green, 1987).

L'uso di pesticidi è aumentato del 70% tra il 2000 e il 2022, con le Americhe che rappresentano la metà dell'uso globale di pesticidi nel 2022. Le emissioni di gas serra dai sistemi agroalimentari sono aumentate del 10% tra il 2000 e il 2022 (FAO, 2024).

Le considerazioni sui costi in termini energetici ed ambientali dell'uso, comunque ancora necessario, dei pesticidi in agricoltura spingono urgentemente verso la ricerca di mezzi innovativi a minore impatto per la difesa fitosanitaria in un contesto di aumentata pressione causata dagli stress biotici come conseguenza del cambiamento climatico e dalla continua comparsa di specie aliene invasive nei nostri territori (Ismail et al., 2025).

Nonostante gli sforzi che si stanno compiendo, particolarmente nell'area europea, per ridurre gli impatti energetici ed ambientali della difesa fitosanitaria, è evidente la necessità di innovazioni in questa area che possano contribuire a velocizzare il processo di sostenibilità delle attività agricole. In campo fitoiatrico è stato promosso lo sviluppo di prodotti fitosanitari definiti a basso rischio, caratterizzati da un basso impatto tossicologico e ambientale come

estratti vegetali, microorganismi o semiochimici.

La ricerca su nuove biotecnologie

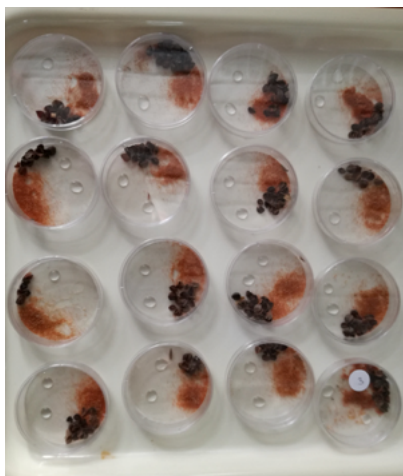
La ricerca si sta concentrando anche su nuove biotecnologie come l'RNA interferente (RNAi), che sfrutta un meccanismo naturale di silenziamento genico per difendere le piante da patogeni e insetti dannosi, producendo principi attivi altamente specifici e sicuri. La biomolecola chiave per l'attivazione del processo è un RNA a doppia elica (dsRNA) che agisce in natura per proteggere gli organismi eucarioti da agenti esterni, ad esempio i virus. Le possibilità applicative della tecnica del RNAi alla difesa fitosanitaria riguardano l'opportunità di silenziare geni fondamentali per lo sviluppo di patogeni o insetti fitofagi in modo da impedire i danni alle coltivazioni o alla salute umana ed animale. Un dsRNA può essere disegnato in laboratorio in modo complementare a qualsiasi gene di interesse da silenziare, se il genoma dell'organismo bersaglio è noto, in quanto il dsRNA opportunamente sintetizzato è in grado di identificare in maniera univoca la sequenza di RNA messaggero da silenziare, con la conseguenza di bloccare la produzione di una particolare proteina.

Le tecniche che finora hanno condotto a prodotti già applicati a livello commerciale possono essere raggruppate in due approcci: il silenziamento indotto dalla pianta ospite (host induced gene silencing, HIGS) che prevede la modificazione genetica di una specie coltivata o il silenziamento genico indotto tramite un trattamento fitosanitario (spray induced gene silencing, SIGS). Ibridi di mais ottenuti applicando l'approccio HIGS sono disponibili per la coltivazione in campo già da qualche anno negli USA; in Europa, come noto, l'applicazione di piante geneticamente

modificate per coltivazione incontra molte resistenze e la loro coltivazione rimane confinata alla penisola iberica. Le industrie stanno mirando all'utilizzo del RNAi per produrre **un insetticida di origine biologica da utilizzare come un tradizionale spray sulle colture in campo**; il primo insetticida a base di dsRNA (Ledprona®), è stato approvato negli USA nel 2023. Il meccanismo di azione specifico e la bassa persistenza nell'ambiente degli acidi nucleici, che vengono rapidamente degradati in campo, rappresentano notevoli proprietà intrinseche di compatibilità ambientale di queste molecole. Inoltre, poiché gli acidi nucleici sono naturalmente presenti in tutti gli alimenti, nei mammiferi sono sviluppate una serie di barriere istologiche e fisiologiche che rendono estremamente improbabili effetti negativi sulla salute umana (OECD, 2024).

Le attività ENEA

Presso i laboratori TERIN in Trisaia sono in corso attività di ricerca volte allo sviluppo di una molecola di dsRNA attiva contro un insetto invasivo di origine africana, il coleottero *Aethina tumida*, che sta causando ingenti danni all'apicoltura in Calabria e che recentemente è stato rinvenuto anche in Sicilia. Per consentire la finalizzazione di questo sistema modello, l'ENEA ha destinato il finanziamento ricevuto tramite il 5x1000 per l'anno 2023. In particolare, si stanno studiando da un lato la specificità di azione delle molecole esclusivamente contro gli insetti bersaglio e dall'altro il perfezionamento della produzione di dsRNA attraverso un percorso di bioraffineria tramite la fermentazione di colonie di ceppi non patogeni del batterio *Escherichia coli*. **L'obiettivo finale sarà quello dell'ottenimento di un biopesticida a base molecolare efficace nell'uso ed efficiente nel**



Biosaggio di laboratorio su insetti con molecole di dsRNA

sistema di produzione. Dal punto di vista legislativo, negli USA i prodotti a base di dsRNA sono già considerati come biopesticidi; questa speciale categoria di prodotti non è contemplata dalla legislazione dell'Unione Europea, pertanto l'approvazione di questi prodotti dovrà essere valutata considerando gli stessi requisiti e i dati sperimentali a supporto stabiliti dalle normative vigenti, come avviene per i tradizionali prodotti di sintesi. Come previsto dal quadro legislativo, la valutazione della sicurezza del prodotto finale, inclusi coformulanti, coadiuvanti, nanomolecole, insieme a quella del principio attivo, è necessaria l'espressione di un parere favorevole all'uso commerciale. Il Regolamento n. 1107/2009/CE prevede

che la Commissione possa adottare documenti di orientamento tecnici, come già avvenuto per feromoni e prodotti microbiologici per semplificare l'iter di approvazione per i prodotti a basso rischio; un documento che prenda in considerazione l'RNAi non è però ancora stato elaborato.

La tecnologia del RNAi rappresenta un'opportunità promettente per un'agricoltura più sostenibile, l'approfondimento delle valutazioni di rischio specifico, anche con l'appoggio delle crescenti opportunità offerte dalla bioinformatica, ne potrà ulteriormente rafforzare il suo ruolo futuro.

per info: salvatore.arpaia@enea.it

Bibliografia

- FAO. 2024. Pesticides use and trade – 1990–2022. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 89. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd1486en>
- Green, 1987. Energy in pesticide manufacture, distribution and use. In: Energy in World Agriculture. No. 2, 166-177
- Ismail M, Rodriguez-Saona C, Arpaia S, Costi E, 2025. Editorial: Latest research advances in biology, ecology, and integrated pest management of invasive insects. Front. Agron. 7:1621134. doi: 10.3389/fagro.2025.1621134
- OECD, 2023. Considerations for the Human Health Risk Assessment of Externally Applied dsRNA Based Pesticides Series on Pesticides No. 110, 99 pp.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
Laboratorio Tecnografico - Centro Ricerche ENEA Frascati

www.enea.it

NEL PROSSIMO NUMERO PARLEREMO DI:

Biotechnologie: tra ricerca, innovazione e sviluppo tecnologico

Le biotechnologie sono oggi uno dei settori più dinamici e strategici per affrontare le grandi sfide globali. Dalla salute umana all'agricoltura, dall'industria all'ambiente, il loro impatto si estende in ambiti sempre più cruciali: biotechnologie rosse e verdi per la medicina e il settore nutraceutico; verdi e gialle per l'agroalimentare e la sicurezza alimentare; bianche per i processi industriali sostenibili; blu per la tutela della biodiversità marina; grigie per il risanamento ambientale.

In questo scenario, ENEA è in prima linea con una ricerca integrata e multidisciplinare, orientata a costruire un futuro più sostenibile.

Per questo, il prossimo numero della rivista Energia, Ambiente e Innovazione è interamente dedicato alle biotechnologie: un viaggio attraverso le più recenti scoperte, applicazioni e prospettive della ricerca ENEA, con uno sguardo concreto su soluzioni in grado di trasformare il nostro modo di vivere, curare, produrre e proteggere l'uomo e il pianeta.

Articoli scientifici, interviste, casi studio e approfondimenti offriranno una panoramica aggiornata sulle frontiere della biotecnologia, valorizzando il ruolo chiave della ricerca pubblica e privata – startup, imprese e centri di eccellenza – in un contesto in cui l'innovazione è sempre più motore di sviluppo sostenibile e transizione ecologica.

eai.enea.it

