



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie

ISBN: 978-88-945925-4-2

I QUADERNI DI AISSA

ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XX Convegno AISSA
Le scienze agrarie nella bioeconomia

Bologna, 16-17 febbraio 2023

Volume 5, 2024

Su iniziativa del Consiglio di Presidenza dell'Associazione si è dato vita al progetto editoriale "I Quaderni di AISSA". L'obiettivo è quello di raccogliere e valorizzare i contributi presentati ai convegni di AISSA, al fine di testimoniare il contributo all'avanzamento della scienza in ambito agrario, forestale e alimentare.

Questo volume è scaricabile dal sito: <https://www.aissa.it/home.php>

ISBN: 978-88-945925-4-2

Copyright: Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie – AISSA, 2024

Formattazione e correzione bozze a cura di Beatrice Viaggi

I QUADERNI DI



AISSA



ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XX Convegno AISSA

Le scienze agrarie nella bioeconomia

Bologna, 16-17 febbraio 2023

Volume 5, 2024

a cura di: Davide Viaggi e Massimo Tagliavini



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI
SCIENZE E TECNOLOGIE AGRO-ALIMENTARI



ergo consulting srl.



Conferenza Nazionale
per la Didattica Universitaria di
AGRARIA

Indice

<i>Introduzione: le scienze agrarie nella bioeconomia</i>	1
Viaggi D., Orlandini S.	
<i>Colture agrarie e bioeconomia</i>	7
Testa G., Cardarelli M., Proietti P.	
<i>Foreste e bioeconomia</i>	22
Magnani F., Matteucci G.	
<i>Produzioni animali e bioeconomia</i>	31
Fontanesi L., Nanni Costa L., Petracci M., Trevisi P.	
<i>Nuove frontiere della genetica agraria per la bioeconomia – il ruolo della genomica e dell’editing genico</i>	37
Barchi L., Moglia A., Lanteri S., Salvi S.	
<i>Innovazioni, sfide e opportunità nella protezione delle piante in un’ottica di bioeconomia</i> ...47	
Romanazzi G., Battilani P., Burgio G., Manachini B.R.I.	
<i>Il ruolo dei suoli nella bioeconomia</i>	63
Bonifacio E., Celi L., Dazzi C., Vittori Antisari L., Zaccone C.	
<i>Uso di biomasse come input nei processi produttivi agricoli</i>	70
Gigliotti G., Ciavatta C., Agnelli A., Miano T.M., Tambone F., Capra G.F.	
<i>Le scienze e tecnologie alimentari nella bioeconomia</i>	82
Dalla Rosa M.	
<i>Processi fermentativi nelle strategie “zero-waste”: dagli alimenti funzionali alle bioplastiche</i>	96
Rizzello C.G., Verni M., Pontonio E.	
<i>La digitalizzazione e le macchine intelligenti in agricoltura e zootecnia: il contributo della ricerca alla bioeconomia</i>	105
Rondelli V., Sartori L., Catania P.	
<i>Aspetti economici e di policy della bioeconomia</i>	115
Bartolini F., Boggia A., Canavari M.	

Le scienze agrarie nella bioeconomia

Viaggi D.¹, Orlandini S.²

¹Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari (DISTAL), Alma Mater Studiorum Università di Bologna

²Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze

Riassunto

La bioeconomia ha assunto crescente importanza in Europa. Questo contributo propone una riflessione sul ruolo delle scienze agrarie nella bioeconomia sulla base dei contenuti del convegno 2023 della Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie (AISSA). La comunità delle Scienze Agrarie presenta oggi un'ampia gamma di contributi di ricerca sul tema, che si intreccia con gli avanzamenti negli altri settori che contribuiscono alla Bioeconomia come sistema circolare. Più lenta è stata la reazione sul piano della didattica, dove comunque iniziano ad apparire corsi sull'argomento anche nel contesto italiano.

Abstract

The bioeconomy plays a growing role in the European Union. This paper provides a reflection on the role of Agricultural Sciences in the bioeconomy based on the outcome of the AISSA conference 2023. The community of agricultural scientists presents today a wide range of contributions to the topic, deeply connected with the advances in other sectors that contribute to the Bioeconomy as a circular system. The adaptation of teaching has been slower, in spite of the fact that some courses directly addressing the bioeconomy are now appearing in the Italian context.

Keywords: bioeconomy, research, education

Introduzione

Il convegno annuale 2023 della Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie (AISSA) (<https://www.aissa.it/>) ha affrontato il tema della bioeconomia e delle implicazioni del suo sviluppo per le Scienze Agrarie. La bioeconomia, pur fondata nel lavoro pionieristico di varie discipline nella seconda metà del secolo scorso, ha assunto crescente importanza in Europa fin dal settimo Programma Quadro per la ricerca. Tale importanza è aumentata in particolare dopo la pubblicazione della prima strategia europea nel 2012, poi rivista nel 2018 (European Commission, 2018). I programmi quadro successivi (Horizon 2020 e Horizon Europe), insieme all'iniziativa Bio-Based Industries Joint Undertaking (BBI JU), ora Circular Bioeconomy Europe (CBE JU) hanno favorito l'aumentare del peso della Bioeconomia nella ricerca e la sua integrazione nelle sfide sociali e ambientali alle quali la ricerca è chiamata a rispondere.

Anche il ruolo del mondo rurale nella bioeconomia è cresciuto nel tempo. Le produzioni alimentari e l'agricoltura sono da sempre i settori che offrono il maggiore contributo alla bioeconomia in termini, rispettivamente, di valore aggiunto prodotto e di occupazione. Le conclusioni del Consiglio Europeo del 26/4/2023 sulla bioeconomia accentuano questo ruolo, focalizzando l'attenzione proprio sull'economia rurale e facendo intravedere la necessità e l'intenzione di un coinvolgimento maggiore del settore agri-food nella bioeconomia (Council of the European Union, 2023). Ricerca ed educazione sono elementi centrali in questo processo, oltre al ruolo essenziale dell'innovazione (e quindi della terza missione) che consente la valorizzazione delle conoscenze in termini di impatto a beneficio della società.

L'Italia ha adottato la propria strategia sulla bioeconomia nel 2017, seguita dal piano d'azione per l'implementazione della strategia (Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2017, 2021). All'interno di questi, il settore agricolo e quello alimentare hanno assunto un ruolo preminente, anche in relazione alle specificità del nostro paese.

All'interno di questa complessa tematica, il convegno annuale 2023 di AISSA ha focalizzato l'attenzione in particolare sui seguenti aspetti:

- il modo in cui il concetto di bioeconomia influenza e modifica i contenuti delle scienze agrarie, considerando ricerca, didattica e terza missione;
- come le scienze agrarie possono contribuire allo sviluppo della bioeconomia;
- come la bioeconomia interagisce con gli altri trend tecnologici, quali ad esempio la digitalizzazione.

Ricerca

Sul piano della ricerca, la bioeconomia è stato uno degli ambiti di maggiore innovazione all'interno dei finanziamenti europei nell'ultimo ventennio (fp7, H2020, Horizon Europe, BBI, CBE). In questo percorso, il concetto di bioeconomia ha interagito nel tempo con l'attenzione all'economia circolare, alla sostenibilità, alla lotta al cambiamento climatico e alla resilienza, portando ad una revisione del concetto stesso di bioeconomia verso quello di bioeconomia circolare. Importante è stato il contributo del progresso tecnologico, che ha permesso di sviluppare processi virtuosi di produzione dell'energia, di riciclo e di riuso, di utilizzazione degli scarti e dei residui colturali, verso nuovi prodotti bio-based. Esiste inoltre un crescente interesse per la ricerca sulla bioeconomia nell'ambito delle discipline dell'innovazione e della formazione, universitaria e non.

Esistono almeno due macro-percorsi nella ricerca sulla bioeconomia. Uno è quello delle soluzioni che riguardano specifiche filiere, prodotti, settori innovativi (tecnologie, prodotti, etc.). L'altro è quello delle visioni e soluzioni di sistema, dove il centro dell'attenzione sono le relazioni e le interazioni.

La collocazione delle varie discipline delle scienze agrarie nel trattare la bioeconomia è stata illustrata durante il convegno, come evidenziato dalle presentazioni (disponibili sul sito <https://www.aissa.it/convegnoAISSA>) e dai contributi pubblicati in questo volume.

Un ruolo centrale è giocato dalle discipline che si occupano direttamente delle produzioni vegetali e animali, proprio per la loro funzione di produzione primaria di biomassa. L'ambito delle colture agrarie contribuisce allo sviluppo della bioeconomia su vari fronti. Innanzi tutto, attraverso lo studio di nuove colture utilizzabili per lo sviluppo di nuove filiere, in particolare quelle non food. Le applicazioni agronomiche sono anche importanti in connessione alla gestione del suolo e all'uso di materiali derivanti da processi circolari, nonché all'uso di input di origine biologica.

Il settore forestale sta traendo nuove opportunità dalla bioeconomia. Oltre ai tradizionali usi e alla discussa possibilità di utilizzo del legname come fonte di energia, diverse filiere innovative si profilano come potenzialmente importanti grazie anche a processi di innovazione di vario genere, quali l'edilizia sostenibile e l'insieme dei possibili usi di materiali di origine forestale per la chimica verde o il biochar.

Il tema delle produzioni animali è caratterizzato dalla tensione tra le esigenze alimentari crescenti, soprattutto in termini di proteine, e le emissioni climalteranti, accompagnati da tematiche di grande attenzione quali quelle delle emissioni azotate e degli antimicrobici. I tre

grandi ambiti di adattamento riguardano il miglioramento genetico, l'alimentazione e la nutrizione animale, e le tecnologie e pratiche di allevamento.

L'ambito delle scienze e tecnologie alimentari ha un ruolo centrale non solo per il peso economico, ma anche per la sua funzione di collegamento verso il consumatore. I temi dell'economia circolare sono tra quelli più noti in relazione alla bioeconomia, con le nuove tecnologie per il riuso e riciclo degli scarti e dei sottoprodotti. Altre tecnologie riguardano l'efficientamento della filiera in termini di uso delle risorse. Infine un tema di crescente attenzione è quello del packaging anche in relazione alla sostituzione delle plastiche di origine fossile.

Il rilievo della genetica nella conservazione, miglioramento e utilizzo del patrimonio genetico è centrale nella bioeconomia e al cuore di alcune definizioni della stessa. I temi emergenti, oltre a quello della genotipizzazione e fenotipizzazione, sono quelli dei network per la conservazione delle risorse genetiche e quello del genome-editing che promettono di offrire opportunità di miglioramento genetico delle piante più veloci, mirate e sicure.

Il suolo e il suo studio hanno un ruolo fondamentale nella bioeconomia in quanto garantiscono la capacità produttiva di biomassa e il collegamento con gli agroecosistemi. In aggiunta, il suolo ha un ruolo sempre maggiore in relazione allo stoccaggio del carbonio attraverso l'aumento della sostanza organica nel terreno e quindi all'attivazione di misure di adattamento al cambiamento climatico.

Tra gli elementi di maggiore attenzione della chimica agraria troviamo la bioeconomia circolare e l'approccio end of waste. Quest'ultimo consiste nel portare un rifiuto a divenire un prodotto ed è quindi essenziale per un concetto più articolato di economia circolare. Questi temi si intrecciano naturalmente con quelli della protezione del suolo e della salvaguardia o incremento della sostanza organica.

Il tema della microbiologia copre una ampia gamma di applicazioni nelle quali le fermentazioni assumono un ruolo chiave, con un peso particolare per le strategie zero-wastes. Tra queste si ricordano le bioplastiche, gli alimenti funzionali, il contributo al miglioramento e all'efficientamento dei bioprocessi.

Il contributo dell'ingegneria agraria alla bioeconomia passa oggi in gran parte attraverso la digitalizzazione e l'agricoltura 4.0, caratterizzata dalla gestione smart dell'azienda, con uso di sistemi di supporto alla decisione. Le applicazioni vanno dalle ormai consolidate soluzioni sito-specifiche, alle crescenti utilizzazioni di robotizzazione (ad esempio della stalla) e dei veicoli a guida autonoma.

Le scienze economiche affrontano il problema sia nell'ambito degli aspetti concettuali e definatori della bioeconomia, sia su aspetti di carattere operativo, come il tema delle governance e delle politiche, del ruolo del consumatore e dell'interazione con la produzione di servizi ecosistemici.

Alcuni temi, come quello delle bioenergie, hanno un carattere fortemente trasversale.

Da tutti gli ambiti emerge la forte attenzione alle collaborazioni e alle interazioni, già attive o potenziali, al fine di affrontare le sfide della ricerca, ma anche l'esigenza di rapportarsi ad altri stakeholder in un contesto inter e transdisciplinare, orientato al riconoscimento del ruolo della ricerca nell'affrontare le sfide sociali. Tali esigenze sono un effetto diretto non solo dei collegamenti disciplinari, ma anche, ancora più alla radice, delle relazioni sistemiche tra i diversi settori in termini di flussi di biomassa e valore, elementi che la visione della bioeconomia tende ad evidenziare. Inoltre, per i suoi legami con gli ecosistemi, l'agricoltura e il settore food rappresentano ambiti strategici per portare la bioeconomia ad una visione

sistemica territoriale o globale, legata ad elementi quali la biodiversità e la gestione delle incertezze climatiche, ma anche i megatrend socio-economici e tecnologici. Infine rappresenta un ambito di sviluppo centrale nella visione di una bioeconomia in grado di fornire opportunità ad aree geografiche e gruppi sociali svantaggiati.

Didattica

Nel corso di una dedicata tavola rotonda sono stati affrontati i temi della didattica universitaria, grazie a specifici interventi programmati nell'ambito dei Tavoli di Coordinamento della Conferenza per la Didattica di Ag.R.A.R.I.A. (<https://conferenza.agraria.georgofili.it/>). Il quadro che è emerso rileva che fra i corsi offerti attualmente dai Dipartimenti di agraria negli Atenei italiani, sono una minoranza quelli che includono il tema della bioeconomia nel loro piano di studi tramite percorsi di laurea dedicati e corsi curriculari o facoltativi. Questo nonostante che gli aspetti evidenziati in precedenza siano oggetto dei programmi di insegnamento e siano quindi trattati e presentati agli studenti dei corsi triennali e magistrali. Sarebbe quindi auspicabile che i temi della bioeconomia fossero messi maggiormente in evidenza, in modo da consentire anche un migliore orientamento in ingresso, attirando così l'attenzione dei futuri studenti interessati ad acquisire queste competenze.

Altrettanto importante il tema della formazione continua, che potrebbe essere di interesse dei professionisti, dei tecnici, degli amministratori pubblici, degli imprenditori agricoli. In questo modo potrebbero essere introdotti nel settore agricolo concetti importanti a supporto dell'acquisizione di ruoli e competenze al passo con i cambiamenti attuali e futuri. Si potrebbe inoltre integrare l'apprendimento non più adeguato rispetto ai nuovi bisogni in campo professionale.

Andando nello specifico dell'analisi dell'offerta formativa nazionale, su 24 Atenei analizzati nel corso del 2022 (Bari, Basilicata, Bologna, Bolzano, Catania, Firenze, Foggia, Milano, Molise, Napoli, Padova, Palermo, Perugia, Piacenza, Pisa, Politecnica delle Marche, Reggio Calabria, Salerno, Sassari, Teramo, Torino, Trento, Toscana, Udine) pochi sono i casi in cui la bioeconomia viene considerata. Ad esempio, la laurea magistrale in "Biotechnology for the Bioeconomy", del Dipartimento di scienze per gli alimenti, la nutrizione e l'ambiente dell'Università degli Studi di Milano, riporta il tema in modo esplicito nel nome, mentre è presente un curriculum - in lingua inglese - chiamato "Bioeconomics", all'interno del corso di laurea magistrale in "Sistemi agricoli sostenibili" del Dipartimento di scienze agrarie, alimentari e agro-ambientali dell'Università di Pisa. Altri Dipartimenti, inoltre, prevedono insegnamenti di bioeconomia nel piano di studi: "Innovative thinking in bioeconomy scenarios" - corso facoltativo all'interno della laurea magistrale in "Innovation development in agrifood systems" del Dipartimento di scienze del suolo, della pianta e degli alimenti dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro - e "Bio-economia" (anche nella versione in lingua inglese "Bio-economy") - all'interno del corso di laurea magistrale in biotecnologie per la sicurezza e la qualità agro-alimentare del Dipartimento di scienze agrarie e forestali dell'Università degli Studi della Toscana. Nei restanti casi, il tema della bioeconomia è incluso fra gli argomenti trattati negli insegnamenti, ma non risulta particolarmente evidente.

Una recente ricognizione effettuata dalla Conferenza di Ag.R.A.R.I.A - Coordinamento Nazionale dei Corsi di Laurea in Scienze Forestali e Ambientali - CoSFA (Enrico Marchi e Tommaso Anfodillo) ha rilevato che su 19 corsi LM 73 (verifica dai manifesti degli studi su sito University), solo in due casi Bioeconomia è nel titolo dell'insegnamento:

UNIPD - Forest Science: Forest Policy for a Bioeconomy Strategy

UNIMI - Valorization and Sustainable Development of Mountain Areas: Sustainable management and bioeconomy of mountain forests

Un sondaggio che ha coinvolto i Presidenti dei Corsi di Studio ha evidenziato, in modo non esaustivo ma comunque esemplificativo, che il tema della bioeconomia è comunque trattato in diversi contesti/discipline specifiche, affrontandone gli aspetti normativi e tecnologici. L'analisi del CoSFA conclude che il concetto di bioeconomia non sembra essere presente in modo diffuso e specifico nella didattica, sebbene in molti insegnamenti i principi della bioeconomia vengano trattati. Pochi insegnamenti trattano esplicitamente della strategia europea (2012). Rispetto ad altri paesi europei, gli studenti dei corsi forestali in Italia sembrano avere meno consapevolezza della bioeconomia e delle strategie collegate. Potrebbe essere necessario un invito ai presidenti dei CCS perché suggeriscano la lettura della strategia europea a tutti i docenti (ad esempio il documento Relazione sullo stato di avanzamento della strategia dell'UE per la bioeconomia di giugno 2022).

Altra recente indagine su un campione nazionale di studenti e insegnanti, ha evidenziato che la bioeconomia viene ritenuta una conoscenza molto importante che dovrebbe trovare maggiore spazio nei percorsi formativi in ambito nazionale. Si ritiene infatti che possa essere molto importante nei rapporti con le imprese e le pubbliche amministrazioni e quindi nell'offrire maggiori sbocchi occupazionali. Circa il 75% degli intervistati ritiene infine che le scienze agrarie possano essere leader nel settore della bioeconomia, in considerazione delle molteplici implicazioni legate alla gestione delle risorse, alle applicazioni biotecnologiche, al recupero e valorizzazione dei sottoprodotti, alla produzione e uso di energie rinnovabili nei processi di produzione e trasformazione.

Importante infine porre in evidenza che il tema ha attirato l'attenzione degli Atenei impegnati nella predisposizione delle proposte per i nuovi Dottorati di Ricerca di Interesse Nazionale (DIN). Infatti l'Università di Padova ha attivato il corso dal titolo "Scientific, Technological and Social Methods Enabling Circular Economy", a carattere fortemente multidisciplinare che si propone di formare giovani e ricercatrici e ricercatori qualificati con competenze e abilità, sia di natura tecnico-scientifica che di natura socio-economica, gestionale e giuridica che siano in grado di offrire soluzioni innovative ed efficaci per favorire la transizione dal modello di economia produttiva di tipo lineare al modello di economia circolare. Forte attinenza è possibile trovare anche nel DIN proposto dalla Scuola Universitaria Superiore di Pavia dal titolo "Sustainable Development and Climate change".

Conclusioni

La comunità delle Scienze Agrarie ha reagito nel tempo agli stimoli derivanti dalle strategie europee e italiane relative alla bioeconomia, presentando oggi un'ampia gamma di contributi sul tema. Più lenta è stata la reazione sul piano della didattica, dove comunque iniziano ad apparire corsi sull'argomento anche nel contesto italiano. Sicuramente questi ritardi sono legati alla scarsa conoscenza della bioeconomia da parte del pubblico italiano e del settore agricolo, che rende difficile sia riconoscere gli sbocchi occupazionali, sia avere chiara la centralità dei settori agricolo e food rispetto al tema della bioeconomia.

A questa difficoltà di orientamento contribuisce sicuramente la natura sistemica della bioeconomia e le ambiguità di alcune definizioni, che rendono a volte il tema più adatto ad

essere visto come preziosa competenza trasversale che come disciplina, e comunque lo rendono difficilmente riconducibile a chiari profili professionali.

È plausibile che diversi elementi di tendenza contribuiscano in futuro al consolidarsi dello studio della bioeconomia. Tra questi si ricordano le nuove tecnologie della genetica e della digitalizzazione, l'attenzione ad economie sostenibili e circolari, la necessità di una produzione nazionale e rinnovabile di energia, la gestione dei rifiuti, la minaccia del cambiamento climatico, le nuove forme di comunicazione e decisione. Questi temi contribuiranno ai trend, già in corso, di crescente interazione tra le filiere, di dialogo diretto tra produzione e consumatori/cittadini e di diffusione dell'idea di bioeconomia e di strategie sempre più integrative.

È auspicabile, e pare plausibile attendersi, che il mondo delle Scienze Agrarie abbia la capacità di affrontare questo tema svolgendo un ruolo da protagonista.

Bibliografia

- Council of the European Union, 2023. Conclusions on the opportunities of the bioeconomy in the light of current challenges with special emphasis on rural areas. Bruxelles.
- European Commission, 2018. A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment. Updated Bioeconomy Strategy. Bruxelles.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2017. La bioeconomia in Italia, Roma.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2021. Piano d'azione (2020-2025) per l'attuazione della strategia italiana per la bioeconomia BIT II.

Colture agrarie e bioeconomia

Testa G.¹, Cardarelli M.², Proietti P.³

¹Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente, Università degli Studi di Catania, Via Santa Sofia, 100, 95123 Catania

²Dipartimento di Scienze Agrarie Forestali, Università degli Studi della Tuscia, Via San Camillo De Lellis snc, 01100 Viterbo

³Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli Studi di Perugia, Via Borgo XX Giugno, 74, 06121 Perugia

Riassunto

Nel panorama mondiale, caratterizzato dal cambiamento climatico, dall'intensificazione dei sistemi colturali e dall'esponentiale crescita demografica, si è assistito a un progressivo aumento della produzione di rifiuti nelle aree urbane e agricole. In risposta alla crescente richiesta di sostenibilità e sicurezza alimentare, gli scarti prodotti dalle colture agrarie e dalla trasformazione dei relativi prodotti dovrebbero essere sottratti dal ciclo di smaltimento dei rifiuti per essere reintrodotti nei cicli produttivi in un'ottica di economia circolare. La bioeconomia risponde a questa esigenza.

In particolare, il focus di questo studio è evidenziare l'applicazione dei principi della bioeconomia nelle colture agrarie, con particolare riferimento alle innovazioni tese a ottimizzare e ridurre l'uso di risorse non rinnovabili anche attraverso la valorizzazione dei sottoprodotti.

Abstract

In the global scenario, characterized by climate change, intensification of cultivation systems and exponential population growth, there has been a progressive increase in waste production in urban and agricultural areas. In response to the growing demand for sustainability and food safety, the waste produced by agricultural crops and the transformation of the related products should be taken away from the waste disposal cycle to be reintroduced into the production cycles from a circular economy perspective. The bioeconomy meets this need. In particular, the focus of this study is to highlight the application of the bioeconomy principles in agricultural crops, with particular attention to innovations aimed at the optimization and reduction of the use of non-renewable resources also through the valorization of by-products.

Keywords: *agricultural crops, sustainability, waste, bioeconomy, circular economy, valorization of by-products*

Introduzione

L'industrializzazione e l'urbanizzazione, nonché l'intensificazione dell'agricoltura, hanno contribuito al miglioramento della qualità della vita, ma hanno comportato anche un aumento considerevole di risorse naturali utilizzate e di rifiuti generati. Secondo alcune stime, l'agricoltura da sola produce ogni anno circa 5 miliardi di tonnellate di biomassa di rifiuti a livello globale (Bharathiraja et al., 2017). I rifiuti, spesso smaltiti senza particolari trattamenti, impattano negativamente sull'ambiente (Gaur et al., 2020) e aumentano il rischio di diffusione di patogeni (Ravindran et al., 2018) tanto da generare lo stesso grado di preoccupazione dei rifiuti industriali in termini di gravità del pericolo. Va considerato che anche il trattamento dei rifiuti attraverso circuiti convenzionali di smaltimento, oltre all'elevato costo economico, spesso genera residui di difficile impiego e, di fatto, costituisce una causa di impatto ambientale in ragione degli elevati consumi energetici e di eventuali emissioni. Per questo è impellente la necessità di mettere in atto strategie che permettano di limitare lo sfruttamento delle risorse

ambientali, di ridurre la produzione di rifiuti e di reinserire gli stessi nei sistemi produttivi trasformandoli, quando possibile, in una risorsa in grado di generare reddito.

In questo contesto l'evoluzione dell'agricoltura, in una logica di bioeconomia, ossia *di un'agricoltura basata sull'uso efficiente delle risorse biologiche rinnovabili (piante, animali e microrganismi) come materiale per la produzione energetica, industriale, alimentare e mangimistica e che considera gli scarti come una risorsa, ossia come co-prodotti utilizzabili in nuove filiere in una logica di affrancamento dalle materie prime fossili verso un'economia circolare e sostenibile*, offre un'importante opportunità per fronteggiare importanti sfide ambientali quali la diminuzione delle risorse, il cambiamento climatico e la degradazione dei suoli, garantendo contemporaneamente sviluppo economico e opportunità di lavoro, anche in aree marginali, e mettendo al centro la salute e il benessere dei cittadini.

Bioeconomia: definizione e concetti principali

La definizione di bioeconomia (*BE – bioeconomy*), al di là di quanto sopra riportato, si è evoluta nel tempo e presenta diverse sfaccettature in relazione al contesto. Beluhova-Uzunova et al. (2019) evidenziano come la visione bioeconomica cambi a seconda degli obiettivi specifici e generali che si intendono perseguire. La Commissione Europea la definisce come *“produzione di risorse biologiche rinnovabili e loro conversione per la produzione di prodotti di valore, come cibo, foraggio, prodotti da matrici biologiche e bioenergia per facilitare la produzione di produzioni sostenibili e ridurre l'utilizzo di combustibili fossili”* (European Commission, 2022). Carus & Dammer (2018) invece evidenziano la relazione esistente tra economia circolare e bioeconomia, introducendo il concetto di bioeconomia circolare (*CBE – Circular bioeconomy*) quale *“interazione tra bioeconomia ed economia circolare, avente l'obiettivo di ottenere prodotti da matrici biologiche, di utilizzare rifiuti organici e di ridurre le emissioni di gas serra”*.

Bioeconomia e colture agrarie

La multidisciplinarietà della bioeconomia coinvolge diversi settori produttivi accomunati dall'esigenza di innovazione d'uso e di convertire le risorse (Nowak et al. 2021). I settori coinvolti sono l'agricoltura, la silvicoltura, la pesca, l'alimentazione, la produzione di carta, cellulosa e materiali industriali, e, infine, le applicazioni biotecnologiche ed energetiche (European Commission, 2012). L'agricoltura è il principale comparto produttivo e rappresenta il settore con il maggiore potenziale per la bioeconomia dal momento che soddisfa i bisogni alimentari, ma dovrebbe anche preservare l'ecosistema e la diversità biologica, pure sostenendo gli obiettivi dell'UE in materia di clima ed energia (Nowak et al. 2021).

Gli studi più recenti in termini di valorizzazione delle colture agrarie in un'ottica di sviluppo della bioeconomia si concentrano principalmente su diverse tipologie di colture tra cui quelle tessili (canapa), le oleaginose (camelina, ricino, cardo), le graminacee (canna, panico, miscanto), altre specie erbacee (malva, topinambur), oltre che su residui colturali adatti alla valorizzazione agronomica per migliorare le produzioni agricole e ridurre il relativo impatto ambientale, alla trasformazione industriale e alla conversione in energia (Matyka e Radzikowski, 2020).

Nell'ambito della bioeconomia rientra anche l'utilizzo di terreni marginali per la coltivazione di piante da indirizzare a trasformazioni industriali con l'obiettivo di valorizzare

terre improduttive e/o degradate, evitando la competizione per l'uso del suolo con le colture alimentari.

Tutto ciò, peraltro, contribuisce al raggiungimento degli obiettivi di Agenda 2030 e delle più recenti politiche della Commissione Europea in materia di sostenibilità ambientale (Gibbs & Salmon, 2015).

Applicazioni nelle colture erbacee

Il ricino: coltura dalle ampie possibilità

Il ricino (*Ricinus communis* L.) è una coltura oleaginosa appartenente alla famiglia delle Euphorbiaceae ed è originaria dall'Asia o Africa (Xu et al., 2021). Le principali area di coltivazione sono India, prima esportatrice globale di ricino, seguita da Cina, Brasile, Europa e alcuni paesi africani (Reddy, 2023). Il ricino è una delle piante non alimentari con la più estesa area di coltivazione (circa 1,3 milioni di ha nel mondo) (FAO, 2019).

Negli ultimi decenni, un interesse crescente è stato rivolto a questa coltura grazie al suo alto contenuto oleico (35-65%) ed all'elevata percentuale di acido ricinoleico, utilizzato come fonte unica di acidi grassi (85-90%). Quest'ultimo è stato particolarmente rivalutato per le grandi applicazioni industriali, farmaceutiche ed energetiche (Yadav e Anjani, 2017).

Nel passato il ricino veniva utilizzato come potente lassativo; già gli antichi Egizi avevano colto l'importanza di questa coltura introducendola nei loro antichi ricettari (Dawson, 1929). Oggi l'olio di ricino, estratto dai semi attraverso processi meccanici e chimici, ha invece un ampio panorama applicativo: il suo olio e derivati vengono utilizzati come lubrificanti, liquidi idraulici e nei freni; è utilizzato nella preparazione di saponi, cere e grassi; trova applicazioni nell'industria edile come materiale di rivestimento e per la produzione di vernici. Inoltre, viene tutt'oggi utilizzato come medicinale e nell'industria farmaceutica come lassativo e nella cura dei capelli (Patel et al., 2016; Salihu et al., 2014). Tuttavia, la possibilità di utilizzare l'olio di ricino per la produzione di biocarburanti, rende il ricino protagonista del settore energetico. Attraverso l'estrazione dell'olio e con processi di purificazione e transesterificazione è possibile ottenere biodiesel. Il biodiesel ottenuto dal ricino non è tossico, non ha odori e ha un'alta miscibilità e un basso numero di cetani (CN; 43.7) rispetto al diesel (CN;51). Inoltre, la presenza di ossigeno nel biodiesel determina una combustione più pulita che insieme alla maggiore viscosità riduce le emissioni di SO₂ evitando l'aggiunta di composti solforici (Carrino et al., 2020).

Trovano applicazione industriale anche i sottoprodotti del ricino (Figura 1), derivanti dai processi di estrazione dell'olio. Attraverso pretrattamenti, fermentazione e processi di digestione anaerobica, è possibile utilizzare il pannello di estrazione, le capsule e la biomassa lignocellulosica ottenuta da foglie e racemi per l'ottenimento di bioetanolo e biometano (Testa et al., 2023), evidenziando il valore di questa specie in un approccio circolare di utilizzo dell'intera pianta e degli scarti.

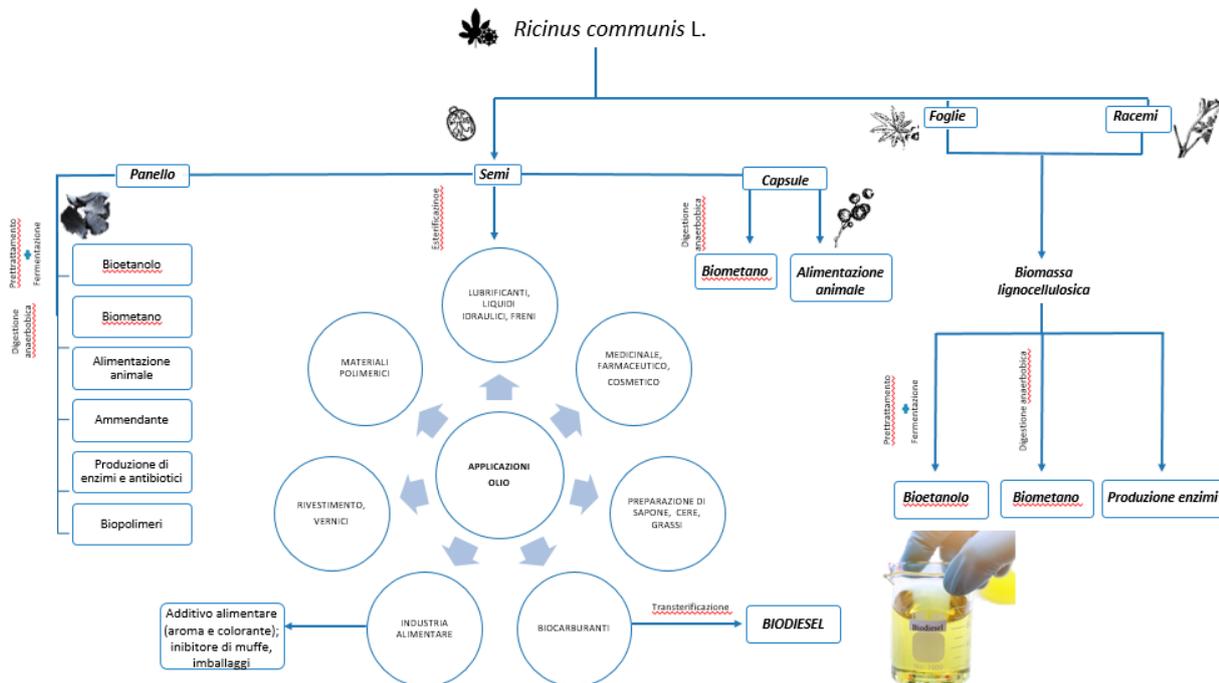


Figura 1. Applicazioni industriali di ricino (*Ricinus communis* L.) e dei suoi scarti.

Modello di bioraffineria per la produzione di olio e biometano utilizzando ricino

Il ricino mostra un elevato potenziale di conversione nei processi di bioraffinazione. Un recente studio condotto presso l'Università di Catania (Testa et al., 2023), dopo aver valutato gli effetti della concimazione azotata sulla resa di seme ed olio, ha studiato la possibilità di valorizzare energeticamente la biomassa residua della lavorazione del seme con la produzione di biometano. Per ridurre l'effetto inibente della lignina presente nei residui, è stato valutato l'effetto di un pretrattamento biologico che prevedeva l'utilizzo di due funghi 'White rot fungi' (*Pleurotus ostreatus* e *Irpex lacteus*). Dai risultati della sperimentazione è emerso che la fertilizzazione azotata ha comportato un aumento della resa di semi ed olio e una differenza nella composizione del residuo delle capsule, e che il pretrattamento fungino del residuo delle capsule ha mostrato un effetto positivo sul potenziale metanigeno del residuo, incrementandolo rispetto al residuo non trattato. I diversi pretrattamenti fungini hanno inoltre messo in evidenza una diversa risposta in relazione alla degradazione della cellulosa ed alla resa potenziale in biometano, evidenziando quanto sia importante la scelta della tipologia di pretrattamento (Figura 2).

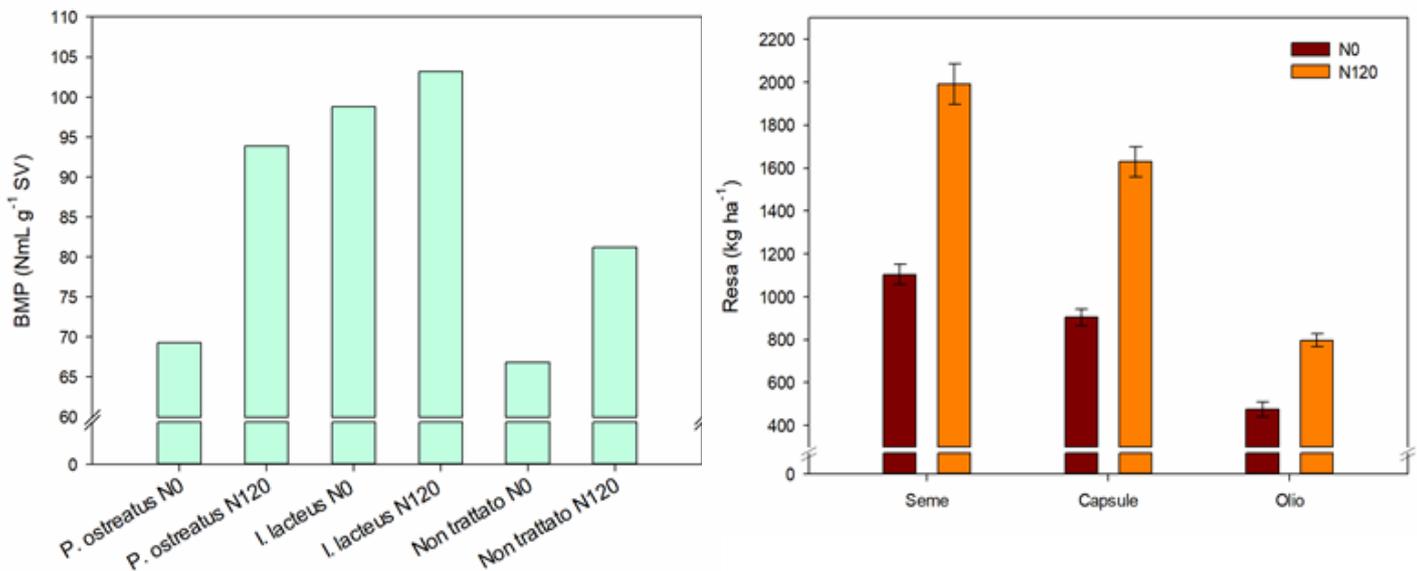


Figura 2. Produzione di biometano (NmL g⁻¹SV) in relazione ai diversi trattamenti allo studio (sinistra); Resa in seme, capsule e olio (kg ha⁻¹) in relazione ai diversi livelli di concimazione (destra).

Applicazioni alternative delle Brassicaceae: Il controllo di *Rhizoctonia solani* tramite l'ammendamento del suolo con tessuti di *Brassica* spp

Le *Brassicaceae*, comunemente utilizzate per scopi alimentari o energetici (biodiesel) e per la difesa delle colture (utilizzandone gli scarti), possono contribuire alla riduzione dell'utilizzo di input chimici. Sono numerosi gli studi condotti nella difesa da attacchi di nematodi. Uno studio condotto da Ascencion (2015), mette in evidenza il potenziale derivante dall'utilizzo dei residui fogliari di *Brassica rapa*, *Brassica napus* e *Brassica juncea* che possono contrastare gli effetti negativi del fungo *Rhizoctonia solani*. L'utilizzo di *B. rapa* e *B. napus* come ammendanti mostra inoltre una moderata fungitossicità *in vitro*, ma una significativa soppressione di *R. solani* nel suolo, facendo supporre che i composti presenti in queste due specie potrebbero contribuire alla regolazione della presenza delle popolazioni microbiche al fine di ottenere un controllo della malattia nel lungo termine.

Applicazioni della lolla di riso

Un'applicazione non tradizionale dei residui colturali è quella dell'estrazione della silice ottenuta dal sottoprodotto derivante dal processo di macinazione del risone. La lolla di riso viene utilizzata in processi di produzione energetica, tra cui la combustione. Attualmente, solo una piccola quantità di lolla di riso viene utilizzata per l'estrazione della silice su scala industriale ma questa quota, ottimizzando il processo di estrazione, potrebbe crescere nel tempo ed essere utilizzata per la produzione di materiali a base di silicio (Figura 3) (Moayedi et al., 2019).

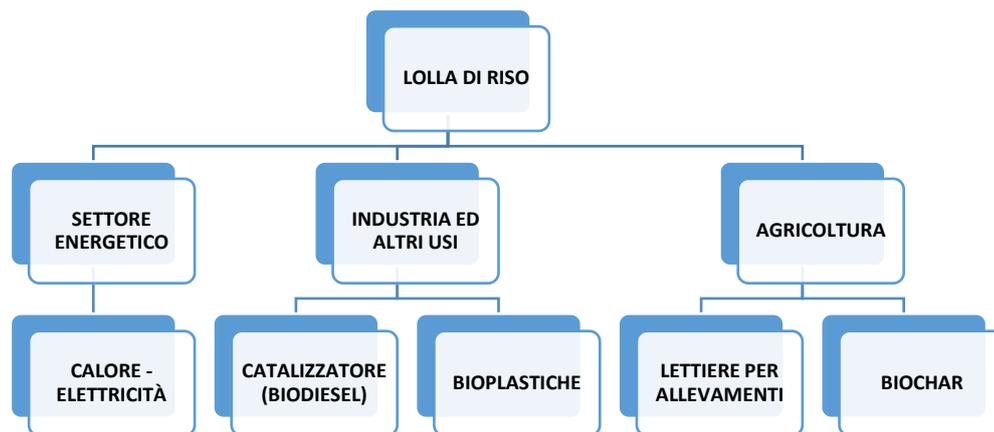


Figura 3. Applicazioni e possibili utilizzi della lolla di riso.

Applicazioni alternative al *Panicum virgatum* L.: Effetto del digestato di biogas e della fertilizzazione minerale sulle proprietà del suolo, sulla resa e sul valore nutrizionale del foraggio

Nell'ultimo decennio diverse specie erbacee sono state utilizzate ai fini energetici, tra cui la produzione di biometano all'interno di digestori anaerobici. Questi processi di produzione energetica a fine processo mettono a disposizione parte della matrice organica che non è stata convertita (digestato) che può essere valorizzato in agricoltura. Uno studio condotto da Głowacka (2020) ha valutato la possibilità di migliorare la qualità del suolo (ossia le sue caratteristiche chimico-fisiche) e la resa in foraggio (*Panicum virgatum* L.) in diverse tipologie di suolo: acido, limoso ed argilloso. Dai risultati è emerso che l'utilizzo del digestato ha contribuito ad incrementare il contenuto di sostanza organica nel suolo e ridurre l'acidità. Inoltre, in relazione ai livelli più elevati di utilizzazione del digestato, effetti positivi sono stati osservati sulla resa e sulle caratteristiche qualitative della biomassa, non modificandone il valore nutrizionale.

Utilizzo di materie lignocellulosiche nei materiali plastici

Le materie prime lignocellulosiche sono ricche di cellulosa, emicellulosa e lignina che, una volta recuperate e separate, possono dare origine a prodotti innovativi a valore aggiunto. La microcellulosa (MCC) e le particelle cristalline nanometriche (CNC) sono esempi idonei di bioprodotto che forniscono applicazioni in molte aree, rientrando in un'ottica di materiali rinnovabili e biodegradabili. L'inserimento di queste particelle come agente di rinforzo nei film di chitosano (Ch), è visto come una possibilità promettente per superare le carenze delle bioplastiche. Un lavoro condotto da Pires et al. (2022) ha testato una combinazione di microcellulosa e particelle cristalline nanometriche ottenute da biomassa di colture erbacee quali canna comune (*Arundo donax* L.), kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) e Miscanthus (*Miscanthus × giganteus* Greef et Deu.) come rinforzo per le bioplastiche. L'incorporazione di microcellulosa e particelle cristalline nanometriche, ed in particolare quella che prevedeva l'utilizzo della biomassa di canna comune, ha permesso di incrementare la qualità della bioplastica ottenuta. Tra le caratteristiche qualitative migliorate troviamo l'incremento della resistenza e la rigidità e la riduzione della permeabilità all'ossigeno e al vapore acqueo, caratteristiche essenziali nell'uso di film a base biologica nell'industria dell'imballaggio alimentare.

Gli innumerevoli residui di colture lignocellulosiche e residui agroindustriali sono una fonte di cellulosa che può essere estratta da questi residui e depolimerizzata, dando origine alla

nanocellulosa (NC), un materiale biologico multiuso su scala nanometrica. L'abbondanza, la biodegradabilità, la rinnovabilità e il basso costo, abbinati a eccellenti proprietà meccaniche, rendono la nanocellulosa uno dei biomateriali nanometrici più promettenti. Per estrarre la cellulosa dalla biomassa lignocellulosica è essenziale applicare alle fibre una combinazione di pretrattamenti e fasi di sbiancamento. Il pretrattamento alcalino per rimuovere i costituenti di lignina ed emicellulosa e altri materiali estraibili dalla biomassa genera un sottoprodotto, detto "liquor nero" utilizzato per la produzione di calore ed energia. L'estrazione della lignina da questi sottoprodotti può essere considerata una questione chiave per il successo dello sviluppo delle bioraffinerie (Pires et al., 2022). La composizione della fibra delle diverse colture (in questo studio canapa, ricino e canna comune) influisce sulla composizione dei liquor residui che potenzialmente potrebbero essere utilizzati come fertilizzanti anche se ulteriori ottimizzazioni del processo di estrazione si rendono necessarie al fine di ridurre la conducibilità ed i composti fenolici presenti.

Co-digestione anaerobica della biomassa con rifiuti alimentari sintetici per produzione di biogas

Dal frazionamento della biomassa a seguito di pretrattamento alcalino e successiva precipitazione della lignina si genera un "liquor residuo", ricco di zuccheri e composti azotati. Questo prodotto, trattato in maniera sostenibile, utilizzandolo come substrato per la produzione di biometano. In uno studio recente Ventura (2022) ha valutato la possibilità di utilizzare il liquor residuo derivante dal trattamento della biomassa di *Cannabis sativa* L. insieme alla frazione organica dei rifiuti solidi urbani in un processo di co-digestione per la generazione di biogas (Figura 4). I risultati hanno evidenziato che l'aggiunta di liquor residuo è direttamente correlata alla produzione e alla qualità del biogas, raggiungendo le condizioni ottimali alla concentrazione del 15%. Dopo questa percentuale di concentrazione, la resa e la qualità del biogas diminuiscono con l'aggiunta di liquor residuo, presumibilmente a causa dell'elevata concentrazione di composti fenolici che inibiscono il processo. L'aggiunta di piccole percentuali di liquor residuale di canapa (inferiori al 15% del volume totale del substrato) ha un effetto benefico sulla produzione di biogas, promuovendo volumi più elevati di biogas con una maggiore composizione in metano.

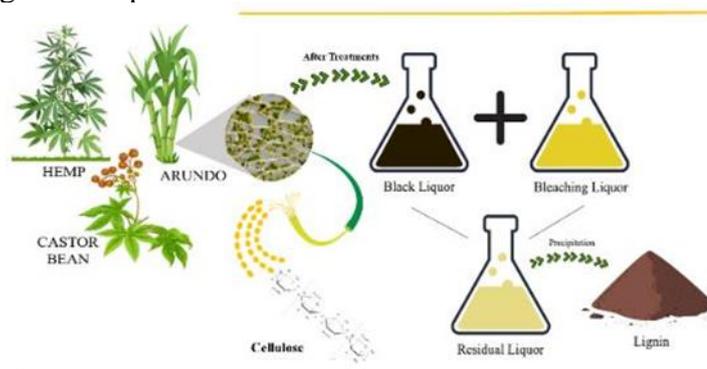


Figura 4. Caratterizzazione del liquor residuo da biomassa lignocellulosica: canapa, ricino e arundo.

Applicazioni nelle colture arboree

Impiego in agricoltura di fanghi derivanti dalla lavorazione degli agrumi

Un ulteriore studio condotto a Catania sull'effetto dell'utilizzo di sottoprodotti su colture agrarie ha valutato l'effetto dell'utilizzo di uno scarto della lavorazione degli agrumi, il

‘pastazzo’, dal quale erano state preventivamente rimosse le pectine. Lo studio ha valutato l’effetto del fango residuo sulla produzione di frumento duro. Il composto particolarmente ricco in sostanza organica può essere utilizzato come ammendante per migliorare le caratteristiche fisiche del terreno oltre che fornire azoto alla coltura erbacea.

La produzione di granella nelle tesi fertilizzate con fango, mediamente, risulta inferiore del 15-20% rispetto alla resa ottenuta nelle parcelle concimate con azoto minerale (Figura 5). Questo dato è in linea con quanto indicato dalla letteratura a proposito della fertilizzazione organica. Questo si spiega col fatto che l’azoto organico è disponibile per la pianta in tempi più lunghi rispetto all’azoto minerale, nella forma nitrica in particolare, prontamente assorbibile da parte delle radici delle piante. Inoltre, le dosi di fango utilizzate sono comunque notevolmente al di sotto di quelle consentite dalla legge ed è quindi possibile ipotizzare che dosi più elevate di fanghi possano consentire il superamento del gap produttivo rispetto alla concimazione minerale.

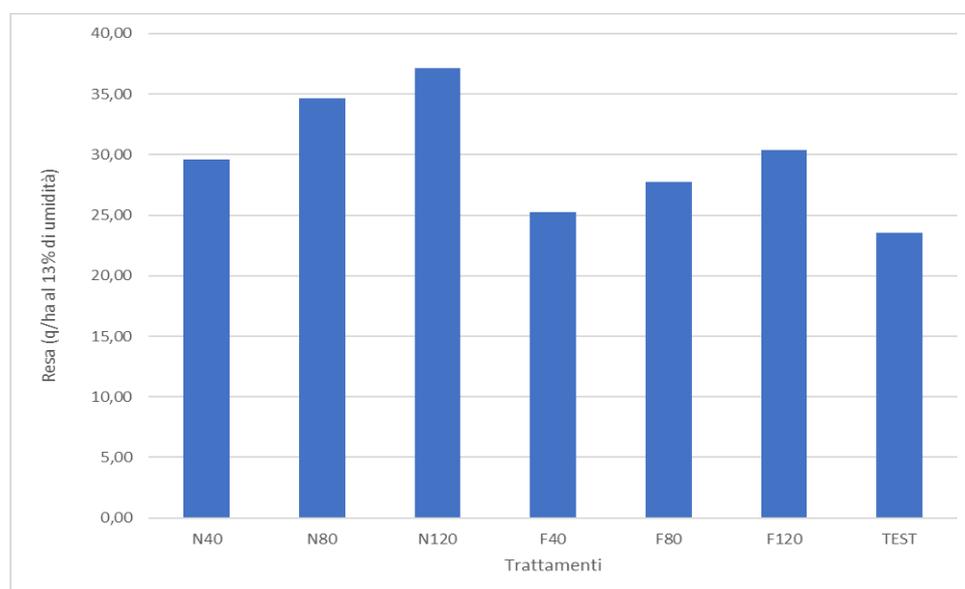


Figura 5. Resa in granella (t/ha al 13% di umidità) in relazione ai trattamenti allo studio.

Riutilizzo di sottoprodotti dell’industria agricola e zootecnica in orticoltura

Alcuni sottoprodotti dell’industria agricola e zootecnica possono essere utilizzati per creare fertilizzanti organici il cui utilizzo comporta un miglioramento della fertilità del suolo. Cardarelli et al. (2023) hanno confrontato un fertilizzante ottenuto da letame di pollame ed un fertilizzante a base di vinaccia con un nuovo fertilizzante a base di deiezioni di insetto su una coltivazione di lattuga in ambiente controllato. I fertilizzanti sono stati applicati fornendo una quantità di azoto pari a 90 kg ha^{-1} . È stata analizzata la dinamica del rilascio di N minerale nel suolo ed è stato valutato l’effetto dei tre fertilizzanti organici sui caratteri morfo-fisiologici e agronomici della lattuga da serra e sull’attività enzimatica del suolo in condizioni di scarsa qualità del terreno. Dai risultati è emerso che il fertilizzante a base di vinaccia è il più adatto per supportare la nutrizione delle piante, grazie alla rapida mineralizzazione e al rilascio di N minerale, molto richiesto durante il primo periodo di crescita del breve ciclo di coltivazione della lattuga. Tutti i fertilizzanti hanno aumentato il peso fresco e secco dei germogli rispetto

al controllo non concimato, con un effetto più pronunciato (+75%) con il concime a base di vinaccia e deiezioni di insetti. Le deiezioni di insetti hanno inoltre ridotto del 27% la concentrazione di nitrati nelle foglie rispetto agli altri trattamenti aumentando quindi la qualità del prodotto finale. Considerando invece la qualità del suolo, il letame di pollame e le deiezioni di insetti sono risultati i più efficaci nel ripristinare la fertilità biologica del suolo, come dimostrato dall'aumento del carbonio attivo e dell'attività degli enzimi coinvolti nel ciclo dei nutrienti (Cardarelli et al., 2023).

Una nuova tecnologia di grande interesse per l'agricoltura moderna riguarda invece l'uso di biostimolanti di origine vegetale o animale che sono in grado di promuovere la crescita delle piante e la resa, di migliorare la qualità dei prodotti e l'efficienza nell'uso delle risorse (Colla et al., 2014). Questi composti svolgono molteplici ruoli come la regolazione del metabolismo primario e secondario delle piante e l'aumento della tolleranza agli stress abiotici sulle colture (Colla et al., 2015). È stata anche riscontrata una maggiore efficienza d'uso dei nutrienti associata ad un migliore sviluppo dell'apparato radicale (Ceccarelli et al., 2021). Su pomodoro sono stati applicati per via fogliare i seguenti biostimolanti di origine vegetale: estratti da piante tropicale, idrolizzati proteici da leguminose ed estratti di alghe (Colla et al. 2017). Tutte le applicazioni fogliari hanno migliorato la produttività del pomodoro rispetto al controllo non trattato, con valori più elevati nel caso dell'applicazione di estratti di piante tropicali (+11,7% rispetto a 6,6% e 7,0% di idrolizzati proteici e estratti di alghe, rispettivamente). L'idrolizzato proteico ha inoltre determinato una maggior concentrazione di licopene e solidi solubili totali (°Brix), oltre che di K e Mg, aumentando così il valore nutrizionale dei frutti.

Valorizzazione delle sanse in una logica di economia circolare e sostenibile

L'industria di estrazione dell'olio di oliva genera una grande quantità di sottoprodotti (sansa e acque di vegetazione) il cui accumulo e/o il non corretto smaltimento possono avere effetti dannosi sull'ambiente. Negli ultimi 20 anni, la composizione e il volume dei sottoprodotti sono notevolmente cambiati come conseguenza dell'introduzione di tecnologie di estrazione innovative finalizzate soprattutto alla riduzione dei quantitativi di acqua aggiunta durante le varie fasi di estrazione. Negli ultimi anni, infatti, il sistema di estrazione a tre fasi, che produce olio e i sottoprodotti sansa e acque di vegetazione è stato parzialmente sostituito dal sistema di estrazione a due fasi in cui l'unico sottoprodotto è rappresentato da una sansa semi-solido avente un alto contenuto di acqua. Conseguentemente, è diminuito progressivamente l'interesse della sansa per l'estrazione dell'olio residuo nei sansifici a causa dell'alto contenuto in acqua. Inoltre, molti sansifici hanno cessato l'attività a causa della progressiva regressione del mercato dell'olio di sansa e per problemi ambientali (emanazione di fumi, cattivi odori, ecc.). Pertanto, onde evitare lo smaltimento delle sanse come rifiuti che comunque comporterebbe, oltre alla perdita di ingenti quantità di sostanza organica, costi energetici e ambientali connessi allo smaltimento stesso, sono stati proposti diversi metodi per la sua valorizzazione.

Tra i metodi di valorizzazione proposti, l'utilizzazione agronomica delle sanse (tal quali o compostate) come ammendante o come materiale per la realizzazione di substrati vivaistici costituisce l'impiego più semplice/economico, che produce effetti positivi sulle caratteristiche del terreno e sulle colture, anche con riduzione di input chimici e di risorse non rinnovabili, in una logica di economia circolare.

Applicazione delle sanse come ammendante in pieno campo

Lo spandimento delle sanse sui terreni aventi destinazione agricola, in superficie in quelli inerbiti o con interrimento a una profondità di 10-25 cm in quelli gestiti mediante lavorazioni, oltre a rispettare le modalità previste dalla legge 574/1996 e successive modifiche, deve tener conto delle implicazioni colturali e degli effetti sul terreno onde ottimizzarne l'uso ed escludere rischi ambientali.

In particolare, considerando che le sanse hanno un pH acido (intorno a 5,2), un elevato contenuto in sostanze fenoliche (1-3% della sostanza secca) e in sostanze grasse (8-14% della sostanza secca), per escludere effetti negativi su suolo e acque profonde e superficiali, il loro razionale impiego non può prescindere da: studio del terreno e dell'eventuale falda idrica (suoli con pH basico e ricchi in carbonati sono i migliori; la pendenza deve essere modesta; non deve esserci una falda superficiale), scelta dell'epoca di distribuzione (periodo migliore autunno-inverno, e comunque prima della ripresa vegetativa, evitando lo spandimento con terreno gelato o saturo), rispetto delle dosi e uniforme distribuzione (quest'ultima più difficile con sanse 2 fasi poiché tendono a formare grumi) e definizione di uno specifico piano di fertilizzazione che nella definizione delle dosi tenga conto della quantità di elementi nutritivi apportati con l'ammendamento (quindi riduzione dell'apporto di concimi).

In generale, dai risultati di varie sperimentazioni, molte delle quali condotte in oliveti presso il Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali (DSA3) dell'Università degli Studi di Perugia, emerge che l'apporto al terreno delle sanse, o dei compost da esse derivati, favorisce nel tempo un incremento della fertilità del suolo poiché:

- aumenta il contenuto di sostanza organica e quindi il contenuto di carbonio nel suolo, contribuendo così, anche grazie alla riduzione delle dosi di concimi chimici, a ridurre l'anidride carbonica nell'atmosfera (contrasto al cambiamento climatico);
- migliora la struttura e la stabilità del suolo (fenomeno di particolare interesse in quanto i terreni coltivati, impoverendosi progressivamente di sostanza organica, sono sempre più destrutturati);
- incrementa la capacità idrica con positive ripercussioni sull'acqua disponibile nel terreno per gli olivi;
- aumenta il contenuto di azoto totale, fosforo assimilabile, potassio scambiabile e magnesio;
- non modifica significativamente il pH e la salinità del terreno;
- non provoca significativi fenomeni di tossicità biologica in quanto la microflora totale inizialmente diminuisce, ma successivamente cresce raggiungendo e superando dopo una/due settimane i valori iniziali, con un arricchimento in batteri azotofissatori che sono molto importanti per la fertilità del terreno; in ogni caso le modificazioni sono transitorie.

Non si hanno effetti fitotossici sugli olivi mentre in genere si osserva un incremento dell'attività vegetativa (+20%) e produttiva (+10%). Il contenuto percentuale di olio nei frutti non varia. Sulla base dei risultati ottenuti, emerge che nell'olio aumenta leggermente il contenuto in fenoli mentre non variano le altre caratteristiche qualitative.

Compostaggio delle sanse per potenziare i benefici agronomici

I risultati di alcune sperimentazioni nel DSA3 hanno dimostrato la buona attitudine al compostaggio delle sanse dei frantoi oleari miscelati con i residui di potatura dell'olivo e/o con i raspi di uva e/o con la paglia, matrici che hanno la funzione di aumentare la porosità della massa e renderla così idonea al compostaggio (Figura 6).



Figura 6. Compost derivante da sanse e potature dell'olivo.

Il compostaggio delle sanse potenzia i benefici agronomici e ambientali ottenibili; utilizzando il compost rispetto alle sanse tal quali aumenta infatti lo stoccaggio di carbonio nel suolo per effetto della minore degradabilità microbica di questo materiale, con maggior positivo impatto sul contrasto al cambiamento climatico.

Il compostaggio si può effettuare in cumuli. I parametri ottimali per l'attività microbiologica, che occorre ottenere nella miscela da sottoporre a compostaggio per una buona evoluzione del processo, sono: una quantità di ossigeno >10%, un'umidità del 40-65% e un rapporto carbonio/azoto di 20-30.

Il compostaggio determina un innalzamento del pH e una forte riduzione delle sostanze fenoliche (80%). I compost ottenuti nella sperimentazione rispettano i limiti del d.lgs 75/2010 per gli ammendanti compostati misti e l'ammendante verde, sono ottimi per contenuto in sostanza organica stabile e in acidi umici e fulvici, rapporto carbonio/azoto e concentrazioni degli elementi nutritivi. La quasi totalità dell'azoto dei compost è in forma organica (lenta cessione e non suscettibile alla lisciviazione), l'indice di germinazione è addirittura superiore al 100% (cosa che indica assenza fitotossicità), nonostante le sanse siano ricche in fenoli, acidi grassi a basso peso molecolare e altre molecole ad azione fitotossica (ciò attesta che il compostaggio determina la riduzione del contenuto in composti fitotossici) e il contenuto in metalli pesanti è molto limitato e, comunque, inferiore ai limiti imposti dalla legge.

Riguardo alle emissioni di gas inquinanti durante il processo di compostaggio, quali anidride carbonica, ossidi di azoto, aldeidi e composti organici volatili, l'unico che ha superato i limiti previsti per i biofiltri nei processi industriali di compostaggio è stato il SOV nella fase

di bioossidazione accelerata, mentre in relazione alla qualità dell'aria intorno al cumulo non sono emersi problemi (Figura 7).



Figura 7. Sistema di campionamento delle emissioni di gas inquinanti durante il processo di compostaggio in prove condotte dal DSA3 in collaborazione con ARPA.

Tenendo conto della difficoltà nel realizzare la miscela delle diverse matrici in relazione sia ai parametri ottimali di compostaggio per ottimizzare il processo di compostaggio sia alle caratteristiche del compost ottenuto, nel DSA3 è stato elaborato il software “Compost-recipe” di facile uso aziendale per migliorare il processo e le caratteristiche del compost ottenuto conoscendo quelle delle materie prime (carbonio/azoto, umidità, pH, densità apparente); il modello di calcolo tiene conto anche del costo di approvvigionamento delle materie prime e dei vincoli operativi. Il software è scaricabile al sito <http://dsa3.unipg.it/it/ricerca/31-ricerca/culture-arboree/219-culture-arboree-download-materiale-e-documenti> (Figura 8).

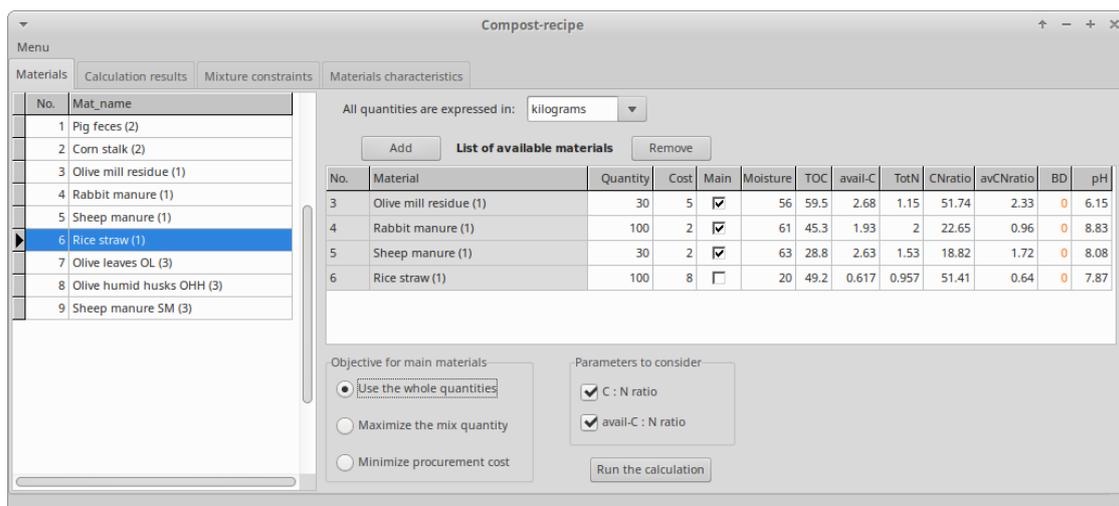


Figura 8. Schermata del software “Compost-recipe” creato nel DSA3.

Dalle sperimentazioni è emerso anche che il compostaggio in *biocontainer* chiuso con aereazione forzata (sistema che può essere realizzato anche artigianalmente in azienda) risulta

la migliore metodologia per applicare il compostaggio aziendale, poiché riesce a garantire un ottimale svolgimento del processo anche impiegando matrici problematiche per il compostaggio, come le sanse ad elevato contenuto di acqua. Per il compostaggio in cumulo all'aperto sarebbe opportuno prevedere un'adeguata copertura, oltre all'obbligatoria impermeabilizzazione della platea e alla realizzazione di un pozzetto per la raccolta delle acque di scolo.

Applicazione del compost ottenuto dalle sanse come materiale per substrati vivaistici

Oltre ad essere un ammendante da utilizzare in pieno campo, il compost derivato da sansa può rappresentare un materiale di buona qualità, di facile reperibilità, economico e rinnovabile da impiegare in alternativa, parziale o totale, alla torba nella realizzazione di substrati vivaistici.

La torba, che attualmente è di gran lunga il materiale più impiegato nei vivai, è una risorsa non rinnovabile, estratta da giacimenti naturali (torbiere) che hanno importanti valenze ambientali, paesaggistiche, naturalistiche a volte anche archeologiche.

I costi connessi al processo produttivo della torba sono cresciuti a causa dell'incremento dei costi energetici, che incidono sia su tutto il processo produttivo sia sul trasporto dai Paesi produttori (soprattutto Nord ed Est Europa e Canada). Oltre all'aumento dei costi, altri fattori destano preoccupazioni crescenti in relazione all'impiego della torba: infatti molti Paesi iniziano a richiedere piante allevate in substrati *peat free* (cioè privi di torba), al fine di salvaguardare le torbiere e di contenere le emissioni inquinanti nell'atmosfera. L'Unione Europea ha inoltre escluso il rilascio della certificazione volontaria ambientale *Ecolabel* per i substrati di coltivazione che contengono torba o prodotti derivati.

In alcune sperimentazioni presso il DSA3, barbatelle di olivo sono state rinvasate in contenitori di plastica per la fase di allevamento utilizzando substrati contenenti diverse combinazioni di compost ottenuto dal co-compostaggio della sansa con trinciati della potatura dell'oliveto, di torba, di pomice e di terreno agrario. Sulla base dei risultati, con quantità di compost pari al 30% nel substrato da invasatura (torba, pomice, compost e terreno agrario) si ottengono piante simili al controllo o addirittura più sviluppate, mentre con quantità di compost superiori (60%-100%) nei primi due mesi si hanno effetti fitotossici connessi a eccessi di salinità nei substrati.

Un notevole interesse assume anche il possibile impatto che il compost ha sulla popolazione microbica dei substrati e quindi sulla possibilità che si possano sviluppare positivi effetti soppressivi nei confronti dei parassiti che spesso si rinvencono nei substrati vivaistici. Dati sperimentali mostrano che la sostituzione del 50% della torba con compost ottenuto da sanse determina una riduzione significativa del numero di piante morte in presenza di 1% di inoculo di un patogeno polifago altamente virulento come *Phytophthora cinnamomi*.

Conclusioni

La valorizzazione dei residui delle colture agrarie è parte integrante della bioeconomia, essendo finalizzata a garantire la sostenibilità dei processi produttivi, la sicurezza alimentare e la riduzione d'uso di risorse esauribili. Ciò si inquadra negli obiettivi dalla Comunità Europea per affrontare le future sfide ambientali legate al cambiamento climatico e all'incremento demografico.

In quest'ottica, le filiere agroalimentari dovranno sempre più orientarsi verso la creazione di catene produttive a elevata circolarità, competitive sul mercato e in grado di soddisfare le crescenti di esigenze di sostenibilità.

Bibliografia

- Anderson, R., Bayer, P. E., & Edwards, D. (2020). Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, 56, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006>
- Ascencion, L. C., Liang, W. J., & Yen, T. B. (2015). Control of *Rhizoctonia solani* damping-off disease after soil amendment with dry tissues of Brassica results from increase in Actinomycetes population. *Biological Control*, 82, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.11.010>
- Beluhova-Uzunova, R., Shishkova, M., & Ivanova, B. (2019). Concepts and Key Sectors of the Bioeconomy. *Trakia Journal of Sciences*, 17(Suppl.1), 227–233. <https://doi.org/10.15547/tjs.2019.s.01.038>
- Bharathiraja, S., Suriya, J., Krishnan, M., Manivasagan, Kim S.-K. (2017). Production of Enzymes From Agricultural Wastes and Their Potential Industrial Applications. In *Advances in Food and Nutrition Research* (pp. 125–148). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.11.003>
- Calisti, R., Regni, L., Proietti, P. (2020). Compost-recipe: A new calculation model and a novel software tool to make the composting mixture. *Journal of Cleaner Production*, 270, art. no. 122427.
- Cardarelli, M., El Chami, A., Iovierno, P., Roupael, Y., Bonini, P., Colla G. (2023). Organic fertilizer sources distinctively modulate productivity, quality, mineral composition, and soil enzyme activity of greenhouse lettuce grown in degraded soil. *Agronomy* 2023, 13, 194. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010194>
- Carrino, L., Visconti, D., Fiorentino, N., & Fagnano, M. (2020). Biofuel production with castor bean: A win-win strategy for marginal land. In *Agronomy* (Vol. 10, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111690>
- Carus, M., & Dammer, L. (2018). The Circular Bioeconomy—Concepts, Opportunities, and Limitations. *Industrial Biotechnology*, 10.1089/ind.2018.29121.mca
- Ceccarelli, A.V., Miras-Moreno, B., Buffagni, V., Senizza, B., Pii, Y., Cardarelli, M., Roupael, Y., Colla, G., Lucini L. (2021). Foliar application of different vegetal-derived protein hydrolysates distinctively modulates tomato root development and metabolism. *Plants* 2021, 10, 326. <https://doi.org/10.3390/plants10020326>
- Colla, G., Cardarelli, M., Bonini, P., Roupael, Y. (2017). Foliar applications of protein hydrolysate, plant and seaweed extracts increase yield but differentially modulate fruit quality of greenhouse tomato. *Hortscience* 52(9):1214–1220. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12200-17>
- Colla, G., Roupael, Y., Canaguier, R., Svecova, E., Cardarelli, M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Front. Plant Sci.* 5:448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00448>
- Colla, G., Roupael, Y. (2015). Biostimulants in horticulture. *Sci. Hort.* 196:1–2. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.044>
- Dawson, W. R. (1929). *Studies in Medical History: (a) The Origin of the Herbal. (b) Castor-oil in Antiquity.* *Aegyptus*, 10(1), 47–72.
- European Commission. (2012). *Innovating for Sustainable Growth. A Bioeconomy for Europe*, Publicatio.
- European Commission. (2022). *Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the committee of the regions. EU Bioeconomy Strategy Progress Report European Bioeconomy policy: stocktaking and future developments.* https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_21_3701
- FAO. (2019). *FAOSTAT/Productionstat/Crops* [Online]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Federici, E., Massaccesi, L., Pezzolla, D., Fidati, L., Montalbani, E., Proietti, P., Nasini, L., Regni, L., Scargetta, S., Gigliotti, G. (2017). Short-term modifications of soil microbial community structure and soluble organic matter chemical composition following amendment with different solid olive mill waste and their derived composts. *Applied Soil Ecology*, 119, pp. 234-241.
- Gaur, V. K., Sharma, P., Sirohi, R., Awasthi, M. K., Dussap, C. G., & Pandey, A. (2020). Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 398(May), 123019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123019>
- Gaur, V. K., Sharma, P., Sirohid, R., Awasthi, M. K., Dussapf, C.-G., & Pandey, A. (2020). Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123019>
- Ghorbanzadeh, N., Mahsefat, M., Farhangi, M.B., Khalili Rad, M., Proietti, P. (2020). Short-term impacts of pomace application and *Pseudomonas* bacteria on soil available phosphorus. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 28, art. no. 101742.
- Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 57, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>
- Gigliotti, G., Proietti, P., Said-Pullicino, D., Nasini, L., Pezzolla, D., Rosati, L., Porceddu, P.R. (2012). Co-composting of olive husks with high moisture contents: Organic matter dynamics and compost quality. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 67, pp. 8–14.
- Glowacka A., Szostak B., Klebaniuk R. (2020). Effect of Biogas Digestate and Mineral Fertilisation on the Soil Properties and Yield and Nutritional Value of Switchgrass Forage. *gronomy* 2020, 10(4), 490; <https://doi.org/10.3390/agronomy10040490>
- Innangi, M., Niro, E., D'Ascoli, R., Danise, T., Proietti, P., Nasini, L., Regni, L., Castaldi, S., Fioretto, A. (2017). Effects of olive pomace amendment on soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology*, 119, pp. 242-249.
- Keen, M. (2018). *FinanzArchiv /Public Finance Analysis* vol. 74 no. 1. 74(1). <https://doi.org/10.1628/fa-2018-0006>
- Matyka, M., & Radzikowski, P. (2020). Productivity and Biometric Characteristics of 11 Varieties of Willow Cultivated on Marginal Soil. *Agriculture*, 616(10).
- Moayedi, H., Aghel, B., Abdullahi, M. M., Nguyen, H., & Safuan A Rashid, A. (2019). Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117851. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117851>
- Nasini, L., De Luca, G., Ricci, A., Ortolani, F., Caselli, A., Massaccesi, L., Regni, L., Gigliotti, G., Proietti, P. (2016). Gas emissions during olive mill waste composting under static pile conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 107, pp. 70-76.
- Nasini, L., Gigliotti, G., Balduccini, M.A., Federici, E., Cenci, G., Proietti, P. (2013). Effect of solid olive-mill waste amendment on soil fertility and olive (*Olea europaea* L.) tree activity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, pp. 292-297.
- Nowak, A., Kobińska, A., & Krukowski, A. (2021). Significance of agriculture for bioeconomy in the member states of the European Union. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13168709>
- Patel, V. R., Dumancas, G. G., Viswanath, L. C. K., Maples, R., & Subong, B. J. J. (2016). Castor oil: Properties, uses, and optimization of processing parameters in commercial production. *Lipid Insights*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.4137/LPI.S40233>

- Peri, C., Proietti, P. (2014). Olive mill waste and by-products. In: *The Extra-Virgin Olive Oil Handbook*, chapter 22: 283-302; John Wiley & Sons, Ltd., pp. 283-302.
- Pezzolla, D., Cucina, M., Proietti, P., Calisti, R., Regni, L., Gigliotti, G. (2021). The use of new parameters to optimize the composting process of different organic wastes. *Agronomy*, 11 (10), art. no. 2090.
- Pires, J. R. A., Souza, V. G. L., Gomes, L. A., Coelho, I. M., Godinho, M. H., & Fernando, A. L. (2022). Micro and nanocellulose extracted from energy crops as reinforcement agents in chitosan films. *Industrial Crops and Products*, 186(June). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115247>
- Pires, J.R.A., Gomes, L., Pinheiro, J., Ventura, M., Ciaramella, B.R., Costa, J., Testa, G., Cosentino, S.L., Lapa, N., Fernando, A.L. (2022). Characterization Of Residual Liquors From Lignocellulosic Biomass Fractionation And Its Exploitation For Biomass Production – Closing The Loop And Contributing To The Circular Economy. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2022*, pp. 406–410
- Pires, J.R.A., Gomes, L., Souza, V.G.L., Godinho, M.H., Fernando, A.L. (2022). Evaluation and comparison of micro/nanocellulose extracted from Arundo, Kenaf and Miscanthus. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2022*, pp. 1094-1098.
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: Measuring innovation in the product chain. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2544, 42.
- Proietti, P., Calisti, R., Gigliotti, G., Nasini, L., Regni, L., Marchini, A. (2016). Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. *Journal of Cleaner Production*, 137, pp. 1086-1099.
- Proietti, P., Federici, E., Fidati, L., Scargetta, S., Massaccesi, L., Nasini, L., Regni, L., Ricci, A., Cenci, G., Gigliotti, G. (2015). Effects of amendment with oil mill waste and its derived-compost on soil chemical and microbiological characteristics and olive (*Olea europaea* L.) productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 207, pp. 51-60.
- Ravindran, R. , Hassan, S. S. , Williams, G. A. , & Jaiswal, A. K. (2018). Review on Bioconversion of Agro-Industrial Wastes to Industrially Important Enzyme. *Bioengineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>
- Reddy, G. J. (2023). Growth and Instability of Castor Oil Exports from India. 4(1), 51–53.
- Regni, L., Gigliotti, G., Nasini, L., Agrafioti, E., Galanakis, C.M., Proietti, P. (2017). Reuse of olive mill waste as soil amendment. In: *Olive Mill Waste: Recent Advances for Sustainable Management*, Chapter: 5, Publisher: Elsevier-Academic Press, Editor: Charis M. Galanakis, pp. 97-116.
- Regni, L., Nasini, L., Ilarioni, L., Brunori, A., Massaccesi, L., Agnelli, A., Proietti, P. (2017). Long term amendment with fresh and composted solid olive mill waste on olive grove affects carbon sequestration by prunings, fruits, and soil. *Frontiers in Plant Science*, 7, art. no. 2042.
- Regni, L., Pezzolla, D., Gigliotti, G., Proietti, P. (2020). The sustainable reuse of compost from a new type of olive mill pomace in replacing peat for potted olive tree. *Agronomy Research*, 18 (Special Issue 2), pp. 1444-1454.
- Salihu, B. Z., Gana, A. K., & Apuyor, B. O. (2014). Castor Oil Plant (*Ricinus communis* L.): Botany, Ecology and Uses. *International Journal of Science and Research*, 3(5), 1333–1341.
- Testa, G., Corinzia, S.A., Cosentino, S. L., Piccitto, A., Agricoltura, D., Calcagno, S. (2023). A biorefinery model for the production of oil and biomethane using castor plants. *GCB Bioenergy*, 15, 11. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13096>
- Ventura, M., Gomes, L., Pires, J.R.A., Pinheiro, J., Ciaramella, B.R., Costa, J., Testa, G., Cosentino, S.L., Fernando, A.L., Lapa, N. (2022). Anaerobic Co-Digestion of Residual Liquors from Lignocelulosic Biomass Fractionation with a Synthetic Food Waste for Biogas Production. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2022*, pp. 773–777
- Xu, W., Wu, D., Yang, T., Sun, C., Wang, Z., Han, B., Wu, S., Yu, A., Chapman, M. A., Muraguri, S., Tan, Q., Wang, W., Bao, Z., Liu, A., & Li, D.-Z. (2021). Genomic insights into the origin, domestication and genetic basis of agronomic traits of castor bean. <https://doi.org/10.1186/s13059-021-02333-y>
- Yadav, P., & Anjani, K. (2017). Assessment of Variation in Castor Genetic Resources for Oil Characteristics. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(4), 611–617. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-2961-7>

Foreste e bioeconomia

Magnani F.^{1,3}, Matteucci G.^{2,3}

¹ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

² Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia. Sesto Fiorentino (FI)

³ Società Italiana di Selvicoltura ed Ecologia Forestale - SISEF

Riassunto

Il legno e le biomasse forestali costituiscono a tutt'oggi una risorsa importante per l'Italia. La filiera del legno (per edilizia, arredo, prodotti derivati, prodotti compositi...) è in veloce trasformazione e caratterizzata da importanti innovazioni, con potenzialità per il settore, ma circa l'80% del legno utilizzato dall'industria nazionale è importato (con problemi di certificazione). Al contempo, le biomasse forestali (vergini, di scarto e riciclate) sono ancora la principale fonte di energia rinnovabile in Italia (e in Europa nel suo complesso); risulta quindi necessario promuovere l'uso a cascata delle biomasse legnose, valorizzando la materia prima legnosa per usi ad elevato valore aggiunto e destinando solo i residui alla combustione. La gestione delle foreste italiane è da considerarsi sostenibile, con un prelievo stimato nel 40% degli incrementi lordi, pur con una distribuzione diseguale sul territorio in funzione della tipologia e accessibilità dei boschi; esiste quindi un margine di sviluppo, con la possibilità di aumentare con cautela il tasso di prelievo, ma ricordando che le foreste svolgono molteplici funzioni (idrogeologica, ambientale, biodiversità, turismo...) oltre a quella produttiva; risulta quindi preferibile aumentare l'efficienza di trasformazione più dell'intensità di utilizzazione. Il presente contributo analizza potenzialità e criticità del settore e analizza i più recenti documenti di indirizzo a livello europeo e nazionale.

Abstract

Timber and wood biomass still represent an important renewable resource for Italy. The wood industry (for construction, furniture, derived and composite products ...) is rapidly transforming thanks to a range of important innovations and has great potential, but Italy still imports approximately 80% of the raw material used in the national industry (with important problems of certification). On the other hand, forest biomass (both virgin, waste and recycled) is still the main source of renewable energy in Italy (and in Europe as a whole); it is therefore necessary to promote the cascade use of wood as a raw material, promoting its use for high added value products and allocating only the residues for combustion. The management of Italian forests can be considered sustainable, with an estimated removal of 40% of gross annual increments, but with an unequal distribution across the country based on forest type and accessibility; there is therefore a margin for ecological intensification, with the possibility of cautiously increasing the harvest rate, but remembering that forests perform multiple functions (hydrogeological, environmental, biodiversity, tourism...) in addition to the productive one; it is therefore preferable to increase the transformation efficiency more than the intensity of use. The paper presents the opportunities and threats of forest bioeconomy, in view of European and national policy.

Keywords: forest, wood, sustainability, forest management, biomass

Introduzione

Le foreste costituiscono il principale bioma globale, coprendo il 28% di tutte le terre emerse, e sono essenziali per la salute e il benessere dell'uomo. Non solo dipendiamo da loro per la protezione dei suoli e la regolazione del ciclo dell'acqua; gli ecosistemi forestali sono anche un serbatoio fondamentale di biodiversità, ospitando la maggior parte delle specie terrestri presenti; con la loro bellezza, sono inoltre fonte di ricreazione e occasione per

riconnettersi con la natura. Infine, le foreste sono un alleato naturale e fondamentale nella lotta ai cambiamenti climatici, grazie alla loro capacità di sottrarre carbonio (C) dall'atmosfera e immagazzinarlo a lungo nelle piante e nei suoli. Le foreste ricoprono da tempo anche un ruolo estremamente importante nella nostra economia e nella nostra società, come fonte di materiali, energia, cibo e medicinali. In particolare, il legno costituisce una delle principali risorse rinnovabili disponibili per l'uomo, e, già oggi, è una fonte primaria per la bioeconomia, con prospettive di sviluppo nel futuro. Fino a pochi decenni fa la biomassa legnosa è stata per l'uomo la fonte principale di energia, oltre che di materiale di costruzione fondamentale per molti settori, dall'edilizia, alle costruzioni navali, all'agricoltura. Anche se l'importanza delle altre funzioni del bosco è stata ampiamente riconosciuta nell'ultimo secolo, portando a forme di gestione multifunzionale sempre più rispettose dell'ambiente (*close-to-nature silviculture*, selvicoltura naturalistica, selvicoltura sistemica...; Ciancio 2017), la funzione produttiva del bosco riveste ancora un ruolo importante per l'economia non solo delle aree montane ma dell'intero Paese, legato soprattutto alle industrie di prima e seconda trasformazione ad essa associate, e i recenti sviluppi nella bioeconomia e nella bioenergia che hanno riportato questo ruolo al centro della pubblica attenzione.

Al tempo stesso questo rinnovato interesse ha stimolato un'importante riflessione sui potenziali conflitti fra le necessità di materia prima per la bioeconomia e le altre funzioni del bosco (Winkel 2017), ed in particolare la necessità di conservare la biodiversità associata agli ecosistemi forestali e garantire la fissazione e l'immagazzinamento di C nelle piante e nei suoli forestali, per un miglior contrasto del cambiamento climatico. La discussione ha inoltre affrontato l'importante tema della sicurezza e sostenibilità dell'approvvigionamento di materia prima legnosa, con la difficile alternativa fra produzioni locali – con un innegabile impatto ecologico e paesaggistico, cui l'opinione pubblica risulta particolarmente sensibile – e delocalizzazione in foreste tropicali o in altri paesi emergenti – in cui la deforestazione e la scarsa sostenibilità della gestione forestale costituiscono spesso un problema grave per quanto remoto. Questo ha stimolato nuove iniziative a livello tanto europeo quanto nazionale.

La prospettiva europea

Le foreste coprono il 35% della superficie terrestre dell'UE, estendendosi per 160 milioni di ettari. Diversamente da quanto osservato in numerose regioni del mondo in cui la deforestazione continua a costituire un grave problema, nell'Unione Europea la superficie delle foreste è in crescita, con un aumento tra il 1990 e il 2010 di circa 11 milioni di ettari, grazie soprattutto alla sua espansione naturale su terreni agricoli abbandonati, oltre che a interventi di rimboschimento.

Il volume legnoso delle foreste europee è aumentato in maniera ancora più sensibile (+50% dal 1990, anche se questa tendenza sta rallentando), ed ammonta oggi a 34.1 miliardi di m³, di cui circa l'85% si trova in foreste classificate come disponibili per la produzione legnosa. Il volume medio ad ettaro è pari a 169 m³, ovvero 40 m³ in più rispetto a trent'anni fa. La crescita delle foreste è pure aumentata nell'ultimo trentennio (+25%), a causa dell'evoluzione verso forme di gestione sempre più sostenibile (ma anche di varie componenti del cambiamento globale); le attività selvicolturali prelevano oggi in Europa mediamente circa il 75% degli incrementi legnosi, a riprova della sostenibilità della gestione forestale nei Paesi europei; la quota restante si accumula progressivamente in bosco, determinando un aumento di volume e di C immagazzinato nell'ecosistema.

La maggior parte delle foreste europee è attualmente gestita e spesso è stata plasmata da secoli di attività antropiche; si stima che soltanto il 2% non sia mai stato modificato dall'uomo, tuttavia circa il 24% ricade in aree variamente protette per la conservazione della biodiversità o del paesaggio, e un 32% ricade in aree sensibili per la protezione del suolo, delle acque o di altri servizi ecosistemici; solo l'8 % è costituito da piantagioni, che pure costituiscono un'importante fonte di materia prima per l'industria del legno (FOREST EUROPE 2020).

La produzione di tondame in Europa è in crescita, avendo raggiunto un massimo di quasi 550 milioni di m³ all'anno; anche il valore totale dichiarato del legname tondo commercializzato è in continuo aumento e ha raggiunto circa 21 miliardi di Euro all'anno (dati del 2015).

Il legno è però ancora oggi anche un'importante fonte di bioenergia e nel 2015 ha coperto il 6,4% dell'approvvigionamento totale di energia primaria in Europa, ma rappresenta circa il 60% della produzione di energia da fonti rinnovabili. Buona parte della biomassa legnosa utilizzata a tal fine proviene dai co-prodotti e dai residui delle industrie di lavorazione del legno e dal legno recuperato post-consumo, ma si stima che ancora oggi circa la metà della bioenergia ricavata dal bosco venga direttamente da legno vergine (soprattutto in presenza di boschi di latifoglie, tradizionalmente governati a ceduo; Camia et al. 2020).

L'industria forestale e quella della lavorazione del legno danno lavoro a più di 2,6 milioni di persone in Europa, nonostante il calo costante dell'occupazione nel settore (di circa il 33% dal 2000 al 2015). Questo settore di produzione primaria e prima trasformazione (che comprende non solo la produzione di legname tondo e legno da energia, ma anche la trasformazione in segati e pannelli, pasta di legno, carta e cartone) generava nel 2018 un valore aggiunto lordo di circa 110 miliardi di euro (Robert et al. 2020); per l'intera EU, il settore vedeva nel 2015 un surplus commerciale di circa 30 milioni di m³ equivalenti di legname tondo, equivalenti a 5,5 miliardi di euro. Non bisogna infine trascurare il valore delle produzioni non legnose del bosco, che rappresentano una fonte di reddito aggiuntivo per le comunità locali e hanno raggiunto nel 2015 un valore dichiarato commercializzato di circa 4 miliardi di euro a livello europeo.

Al di là del valore della produzione primaria e dei prodotti di prima lavorazione, il legno costituisce la materia prima indispensabile per un fiorente indotto. A scala europea, altri 1,2 milioni di persone lavorano nella produzione di mobili in legno e nella stampa su carta (libri e giornali), generando rispettivamente 25 e 31 miliardi di euro di valore aggiunto lordo. Nel 2018, 397000 imprese erano attive nelle industrie del legno, rappresentando il 20% delle imprese manifatturiere in tutta l'UE. Se a queste attività si aggiungono i settori della bioenergia dal legno e dell'edilizia basata sul legno, le catene di valore estese basate sulle foreste sostengono 4 milioni di posti di lavoro nell'economia verde (Robert et al. 2020).

Oltre al valore commerciale, i prodotti legnosi generati nell'UE rappresentano un sink netto di carbonio di circa 40 MtCO₂e/anno, generando inoltre anche benefici climatici attraverso un effetto di sostituzione di materiali non rinnovabili, con valori che vanno da 18 a 43 MtCO₂e/anno.

Le foreste e la bioeconomia forestale hanno assunto negli ultimi anni un peso sempre maggiore nelle politiche dell'Unione Europea. Dal momento che i Trattati comunitari non menzionano espressamente le foreste, l'Unione non dispone di una politica forestale comune e il settore resta principalmente di competenza nazionale; ciononostante, numerose misure dell'UE hanno un impatto sulle foreste dell'Unione e dei paesi terzi.

In particolare, nel 2021 la Commissione ha adottato una nuova strategia dell'UE per le foreste per il 2030 (European Commission 2021), che rappresenta una delle iniziative faro del

Green Deal europeo, unitamente alla strategia UE sulla biodiversità per il 2030. La strategia per le foreste intende contribuire al conseguimento degli obiettivi dell'Unione in materia di biodiversità, alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55 % entro il 2030 e al raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. La strategia riconosce il ruolo centrale e multifunzionale delle foreste come pure il contributo degli attori della filiera e dell'intera catena del valore del settore forestale per realizzare un'economia sostenibile e climaticamente neutra entro il 2050 e garantire la prosperità delle comunità rurali.

A tal fine le innovazioni nel settore della bioeconomia devono giocare un ruolo importante. Le innovazioni di processo in questo campo possono infatti fornire materiali e prodotti di origine biologica con un impatto ambientale inferiore rispetto a quelli di origine fossile. Anche se l'obiettivo è privilegiare i prodotti a lungo ciclo di vita (mobili, edilizia...), anche i prodotti a base di legno di breve durata (carta, imballaggi...) hanno un ruolo da svolgere, soprattutto nel sostituire le loro controparti a base fossile. La creazione di prodotti di breve durata e la produzione di energia dovrebbe però fare affidamento su legno non adatto per le sue caratteristiche tecnologiche o dimensionali a materiali e prodotti di lunga durata, o su biomassa legnosa secondaria come sottoprodotti di segheria, residui e materiali riciclati.

In questo modo si vuole provvedere il più possibile alla sostituzione dei combustibili fossili con materiali e prodotti circolari di lunga durata che abbiano il massimo valore in termini di stoccaggio del carbonio e per l'economia circolare. Considerate le crescenti e talvolta contrastanti richieste nei confronti delle foreste, si vuole al contempo garantire che la quantità di legno utilizzata rimanga entro i limiti della sostenibilità e sia utilizzata in modo ottimale in linea con il principio a cascata e gli approcci dell'economia circolare.

Una riflessione particolare viene dedicata dalla Strategia Forestale europea all'uso delle biomasse legnose per la produzione di bioenergia. La bioenergia basata sul legno è attualmente la principale fonte di energia rinnovabile in Europa, fornendo il 60% dell'energia rinnovabile dell'UE (Camia et al. 2020). La quantità di biomassa legnosa utilizzata per la produzione di calore ed elettricità ammonta a circa 457 milioni di m³, pari a circa il 47.5% di tutta la materia prima legnosa (da fonte primaria e secondaria) utilizzata in Europa (Cazzaniga et al. 2021). Per raggiungere il predetto obiettivo di riduzione delle emissioni di CO₂ di almeno il 55% entro il 2030, l'Europa dovrà chiaramente aumentare in modo significativo il contributo da fonti rinnovabili e la bioenergia continuerà a svolgere un ruolo importante in questo mix, che potrà portare ad un aumento della domanda di materia prima legnosa; negli ultimi due decenni si è già osservato un aumento complessivo del 20% dell'uso della biomassa legnosa nell'UE a fini energetici. È cruciale che la biomassa legnosa utilizzata derivi da una gestione forestale sostenibile (GFS), nel rispetto dei limiti di sostenibilità oltre che degli obiettivi di stoccaggio del C e di conservazione della biodiversità dell'Unione, e sia utilizzata in modo efficiente, in linea con il principio a cascata. In particolare, si prevede di non destinare alcun aiuto comunitario alla produzione di bioenergia da tronchi interi (utilizzabili invece per prodotti a lungo ciclo di vita), ceppaie e radici (per ragioni ambientali); si intende inoltre favorire la co-generazione, limitando il supporto per gli impianti di produzione di sola energia elettrica.

La prospettiva italiana

Le foreste italiane coprono circa 9,17 milioni di ettari, equamente ripartiti fra arco alpino, Appennino centrale e Appennino meridionale e isole (Gasparini et al. 2022); unitamente ad altri 2,0 milioni di ettari di 'altre terre boscate' (boschi radi, macchia, arbusteti...), concentrate

prevalentemente nelle Regioni meridionali e sulle isole, le foreste occupavano nel 2015 circa il 36% del territorio nazionale. Manca spesso la percezione della loro importanza in Italia, principalmente a causa della loro collocazione: con l'eccezione di Toscana, Puglia e Sardegna il bosco è concentrato infatti in zone collinari e montane (circa il 70% si trova a quote > 500 m). Come a livello europeo, anche in Italia la superficie forestale è aumentata marcatamente negli ultimi decenni a causa dell'abbandono di agricoltura montana ed alpicoltura oltre che a politiche di attiva afforestazione, quasi raddoppiando nel corso dell'ultimo secolo (Amadei et al. 2023); l'espansione è stata più rapida nel periodo 1985-2005 ma appare ancora in corso.

Passando a considerare le caratteristiche dei boschi italiani, prevale il governo a ceduo (53%, senza considerare le altre terre boscate), tradizionalmente utilizzato per la produzione di legna da ardere o di piccoli assortimenti per usi agricoli, pur con una forte variabilità fra regioni.

A livello nazionale l'81.3% della superficie forestale totale risulta disponibile al prelievo legnoso, cioè non soggetta a limitazioni significative delle attività selvicolturali dovute a norme o vincoli (ad es. riserve integrali) o perché del tutto inaccessibile. La reale utilizzabilità del bosco dipende però dalla presenza di altri vincoli stagionali, in particolare la distanza da strade e la pendenza, che determinano la possibilità di meccanizzazione e il rischio di erosione del suolo; a livello nazionale solo il 55% dei boschi si trova a meno di 500 m da strade (ordinarie o forestali), e il 46% su pendenze inferiori al 40%. Prevale la proprietà privata, pur con una grande variabilità fra le Regioni per cause storiche; si riscontrano – ingigantiti – i problemi che affliggono in generale l'agricoltura italiana, legati alla frammentazione e polverizzazione della proprietà terriera, rendendo difficile l'organizzazione dell'offerta e la gestione razionale di lungo termine (un problema particolarmente rilevante alla luce dei lunghi cicli di sviluppo del bosco).

La provvigione media dei boschi italiani è di circa 150 m³ ad ettaro, con una forte variabilità fra le Regioni legata in primo luogo alla diffusa presenza di fustaie sull'arco alpino e in Calabria e al predominio del bosco ceduo nelle restanti regioni. L'incremento annuo lordo dei boschi italiani è di circa 4 m³ ad ettaro. I tassi di utilizzazione risultano mediamente inferiori alla media europea, aggirandosi oggi intorno al 40% degli incrementi netti (Tabacchi et al. 2010), con un andamento altalenante negli ultimi decenni a causa delle oscillazioni di richiesta di legna da ardere e al generale abbandono della montagna. Possiamo quindi affermare che, sia considerando l'aumento della superficie a bosco, sia per quanto riguarda l'entità dei prelievi, la gestione dei boschi italiani è nel complesso ampiamente sostenibile, con un margine di possibile intensificazione ecologica della gestione (MIPAAF 2023).

Occorre al contempo ricordare quanto già detto circa la reale utilizzabilità dei boschi, a causa della loro accessibilità e giacitura; le utilizzazioni sono quindi spesso concentrate su una superficie più limitata, in cui occorre vigilare sulla effettiva sostenibilità locale dei prelievi, mentre parte dei boschi nazionali sono a tutti gli effetti lasciati a un'evoluzione naturale, anche in assenza di provvedimenti attivi di protezione naturalistica. In generale si è osservato comunque un "invecchiamento del bosco", con un conseguente aumento di volume legnoso, a causa della citata riduzione nei tassi di utilizzazione; questo offre in molti casi l'opportunità di una conversione (naturale o guidata) del bosco ceduo verso l'alto fusto, con possibilità in molti casi di produrre assortimenti di pregio più interessanti per l'industria e più remunerativi, invece che di legna da ardere per la bioenergia (peraltro disincentivata a livello europeo, utilizzando fusti interi). Considerata la struttura delle età dei boschi italiani, in molti casi questo "invecchiamento" determina anche un aumento degli incrementi medi, con effetti positivi sulla disponibilità di materia prima legnosa.

Un discorso a parte deve essere dedicato agli impianti di arboricoltura da legno, che coprono 96750 ettari di superficie, ed in particolare i 46125 ettari di pioppicoltura intensiva su terreni agricoli (ubicati per il 95% nell'area padana) che forniscono circa la metà dei prelievi annuali di legname a uso industriale nel nostro Paese (Levarato et al. 2018).

Passando a considerare la filiera del legno italiana nel suo complesso (dalla produzione, alla trasformazione industriale in prodotti semilavorati e finiti, fino alla commercializzazione di mobili, impieghi strutturali, carta, cartone, pasta di cellulosa e legno per fini energetici), questa coinvolge circa 80000 imprese, per oltre 350000 unità lavorative (MIPAAFT 2019).

Nonostante la progressiva espansione del bosco, la rilevanza produttiva delle utilizzazioni dei boschi italiani è calata dalla metà del secolo scorso, a causa delle limitazioni già citate (viabilità, acclività, caratteristiche della proprietà fondiaria) che ostacolano la razionalizzazione del settore e alle trasformazioni dei mercati, con una ridotta richiesta di legna da ardere; a ciò si aggiunga la scarsa organizzazione della filiera (pur con eccellenti eccezioni di “borse del legname” e situazioni locali di filiere corte) che porta l'industria a preferire il materiale legnoso di importazione, con la garanzia di un approvvigionamento annuo costante di materiale di caratteristiche idonee. Le importazioni di materia prima per usi industriali superano in media i 12 milioni di m³ annui, contro una produzione interna di poco più di 2 milioni di m³ di legname, facendo dell'Italia uno dei principali importatori mondiali di legname. La pianificazione forestale, che potrebbe aiutare a ridurre il problema, è imposta per legge alle sole proprietà pubbliche, che spesso non vedono la finalità produttiva fra le loro priorità. Come risultato si osserva in Italia un forte scollamento fra la gestione forestale e la fiorente filiera del legno: si stima che la produzione di materie prime legnose rappresenti mediamente poco più del 1% della produzione totale del settore primario e l'1,5% del valore aggiunto; al contrario la filiera del legno-arredo coinvolge il 15% delle imprese dell'industria manifatturiera italiana, con un fatturato complessivo di oltre 42 miliardi di Euro (4.5% del fatturato delle imprese manifatturiere), garantendo un saldo commerciale positivo (Centro Studi Federlegno Arredo 2020). Non bisogna infine dimenticare il settore delle bioenergie; nonostante non rivesta più il ruolo fondamentale svolto in passato dalla legna da ardere, infatti, la produzione di energia da biomasse legnose ha ancora un ruolo importante, non solo nel riscaldamento domestico (Caserini et al. 2008) ma anche nella generazione di elettricità in impianti a biomasse anche di grandi dimensioni, sui quali è aperta la discussione in termini di sostenibilità.

Quale futuro per il settore foresta-legno italiano

Da un lato l'emergere della bioeconomia e di nuovi prodotti tanto nell'industria quanto nell'edilizia in legno apre promettenti prospettive (si veda anche il Nuovo Bauhaus europeo); dall'altro si prospettano crescenti difficoltà nell'acquisto di legno tondo sui mercati internazionali, inducendo le imprese nazionali a cercare fonti di approvvigionamento alternative e a rivalutare le risorse interne (Marchetti et al. 2018). Nel complesso, una prospettiva di crescente richiesta, a cui il settore forestale deve rispondere; per tutte queste ragioni lo sviluppo della filiera in un'ottica di bioeconomia ha attratto grande attenzione sia nella Strategia Forestale Nazionale sia nella Strategia Italiana per la Bioeconomia.

La Strategia Forestale Nazionale (SFN) per il settore forestale e le sue filiere, pubblicata nel 2022 e con un orizzonte temporale fino al 2042 (MIPAAF 2023), individua fra le più importanti opportunità del settore forestale proprio l'incremento e lo sviluppo della bioeconomia e dell'economia circolare, con la possibilità di creare nuove filiere ad alto valore

aggiunto e quindi nuova occupazione non solo nell'indotto industriale ma anche in ambito locale. Per questo la SFN dedica una specifica sotto-azione (B.1.2) proprio alla valorizzazione del contributo della gestione forestale sostenibile (GFS) allo sviluppo di una nuova bioeconomia delle foreste. Si riconosce infatti come la bioeconomia rappresenti un cambio di paradigma strutturale per affrontare le sfide del terzo millennio e ottenere impatti tangibili nella riduzione degli effetti del cambiamento climatico, della perdita di biodiversità, del consumo delle risorse naturali e nella produzione di alimenti ed energia. A tal fine il settore forestale svolge un ruolo chiave, poiché le foreste forniscono la maggior parte delle nostre risorse rinnovabili e offrono una grande opportunità per lo sviluppo di bio-prodotti per sostituire i materiali non rinnovabili e per fornire energia rinnovabile, garantendo al contempo gli altri servizi ecosistemici garantiti dalle foreste. Lo sviluppo della bioeconomia non deve cioè avvenire a scapito del territorio o portare al suo degrado, poiché questo sarebbe in contraddizione con il principio stesso di GFS, ma attraverso un uso multifunzionale del bosco consentire il mantenimento della biodiversità, la protezione del territorio e lo sviluppo socioeconomico delle popolazioni locali.

Per questo, uno degli obiettivi generali del settore viene individuato proprio nel miglioramento dell'efficienza nell'impiego delle risorse, ottimizzando il contributo delle foreste allo sviluppo della bioeconomia oltre che delle tradizionali economie forestali, con un uso "a cascata" dei prodotti legnosi (come indicato anche dall'Unione Europea). L'obiettivo principale deve essere pertanto la valorizzazione qualitativa della materia prima legnosa, più che un aumento dei prelievi dal bosco, promuovendo filiere produttive sostenibili e ad alto valore aggiunto, sia per impieghi tradizionali nei settori dell'edilizia, del mobile, della carta, degli imballaggi, sia per impieghi in settori innovativi (bio-plastiche, bio-tessili, bio-medicinali, prodotti compositi...), tenendo in considerazione che i nuovi investimenti industriali devono essere dimensionati sulla reale disponibilità delle risorse forestali del territorio e sulla necessità di garantire gli altri servizi ecosistemici forestali.

Il ruolo fondamentale delle foreste è riconosciuto anche nella Strategia Italiana per la Bioeconomia (Presidenza del Consiglio dei Ministri 2017), che dedica un'ampia trattazione al settore e alle potenzialità e criticità sopra discusse. Fra i maggiori ostacoli allo sviluppo della bioeconomia forestale viene indicata in particolare la scarsa attenzione alla gestione attiva del bosco e la conseguente dipendenza dell'industria nazionale del legno dalle importazioni di legno e semilavorati, insieme alla mancanza di adeguate strategie per la valorizzazione della produzione forestale nazionale e alla scarsa percezione delle nuove opportunità della bioeconomia da parte dei gestori forestali. Al tempo stesso si sottolineano le opportunità di espansione offerte dalle nuove filiere produttive, soprattutto se combinate con una certificazione di sostenibilità che si estenda dalla gestione forestale all'intera catena di custodia (utilizzando strumenti di *Life Cycle Analysis*) e supporti le produzioni legnose nazionali, preferibilmente da filiere locali; si sottolineano inoltre le opportunità offerte dalle produzioni non legnose del bosco.

Anche in questo caso si sottolinea la necessità di combinare i fabbisogni delle nuove industrie con il mantenimento degli altri servizi ecosistemici del bosco, migliorando l'efficienza dei prelievi e della trasformazione piuttosto che aumentare l'intensità dei prelievi stessi, ad esempio attraverso la valorizzazione di ramaglie e soprattutto di scarti di lavorazione (sciaveri, cortecce, segatura...) che comprendono una frazione non irrilevante della produttività forestale e vengono attualmente spesso trascurati dall'industria del legno. Per lo sviluppo della bioeconomia forestale nazionale è infatti essenziale evitare per quanto possibile

sovrapposizioni con la già fiorente industria del legno, già minacciata dalla sicurezza dell'approvvigionamento, e stimolare le produzioni nazionali, assicurando condizioni competitive nei processi di produzione di materia prima per tutti i partecipanti alla filiera.

Entrambi i documenti delineano una prospettiva di rinnovata attenzione per il bosco e per le sue risorse, in un'ottica di uso a cascata e di gestione sostenibile, che potrebbe fornire uno stimolo per risolvere alcuni degli antichi problemi del settore forestale italiano e garantire un'importante risorsa per la bioeconomia.

Conclusioni e prospettive

La foresta è da sempre una fonte di materie prime (legno e prodotti non legnosi) alla base della bioeconomia; oggi ai settori tradizionali di trasformazione (bioenergia, mobili, costruzioni, carta) si vanno affiancando nuovi mercati legati a prodotti innovativi (imballaggi, edilizia...) ma anche a nuove filiere, soprattutto nel settore della chimica. L'aumento di domanda, insieme al problema dell'approvvigionamento da fonti esterne (rilevante soprattutto per l'Italia) suggerisce di aumentare i prelievi di legno dal bosco, entro i limiti della sostenibilità e nel rispetto delle altre funzioni del bosco, ma soprattutto di aumentare l'efficienza di prelievo e di trasformazione della materia prima. Ad oggi la gestione delle foreste italiane è nel complesso ampiamente sostenibile, ma i prelievi tendono a concentrarsi nelle aree più facilmente accessibili, creando un rischio di sovra-sfruttamento localizzato che dovrà essere attentamente monitorato. Tanto a livello comunitario quanto a livello nazionale si raccomanda un approccio a cascata, riservando la materia prima ad usi a più alto valore aggiunto e potenziale di sostituzione (edilizia, mobili) e riservando solo le frazioni residuali o gli scarti di lavorazione ai prodotti con tempi di vita più brevi quali carta e bioenergia; questo costituisce un problema particolare per l'Italia, dove molti boschi sono stati tradizionalmente governati a ceduo per la produzione esclusiva di bioenergia (legna da ardere). Per riuscire a cogliere le opportunità offerte dalla bioeconomia è essenziale estendere la pianificazione forestale, al fine di garantire un'offerta annua costante, e migliorare l'incrocio di domanda e offerta, collaborando direttamente con il mondo industriale per valutarne le esigenze di approvvigionamento. L'ulteriore diffusione di strumenti di certificazione forestale (di gestione e di filiera) potrà permettere di ridurre le obiezioni alla gestione forestale attiva necessaria per lo sviluppo della bioeconomia. Non va infine dimenticato il potenziale della pioppicoltura e delle piantagioni, anche con specie esotiche, in un'ottica di sostenibilità basata sul principio del *land-sparing*.

Bibliografia

- Amadei G, Magnani F, Palmieri N, Vianello G (2023) *Foreste, Territorio, Disesto*. il Mulino, Bologna.
- Camia A, Giuntoli J, Jonsson K, Robert N, Cazzaniga N, Jasinevičius G, Avitabile V, Grassi G, Barredo CJI, Mubareka S (2020) *The use of woody biomass for energy production in the EU*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Caserini S, Fraccaroli A, Monguzzi A, Moretti M, Angelino E (2008) *Stima dei Consumi di Legna da Ardere per Riscaldamento ed Uso Domestico in Italia*. APAT-ARPA Lombardia.
- Cazzaniga NE, Jasinevičius G, Jonsson R, Mubareka S (2021) *Wood Resources Balances of European Union and Member States - Year 2017*. European Commission Joint Research Centre, Luxembourg.
- Ciancio O (2017) *Passato, presente e futuro della gestione forestale. L'Italia Forestale e Montana* 72:135-167.
- European Commission (2021) *New EU Forest Strategy for 2030*. European Commission, Brussels.
- FOREST EUROPE (2020) *State of Europe's Forests 2020*. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.
- Gasparini P, Di Cosmo L, Floris A, De Laurentis D (eds) (2022) *Italian National Forest Inventory. Methods and Results of the Third Survey*. Springer International Publishing, Cham.
- Levarato G, Pra A, Pettenella D (2018) *Quale futuro per la pioppicoltura? Indagine sul quadro attuale e le prospettive d'impiego industriale del legname di pioppo*. ETIFOR Srl – Spin-off dell'Università di Padova, Padova.
- Marchetti M, Motta R, Pettenella D, Sallustio L, Vacchiano G (2018) *Le foreste e il sistema foresta-legno in Italia: verso una nuova strategia per rispondere alle sfide interne e globali*. *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology* 15:41.

- MIPAAF (2023) Strategia Forestale Nazionale 2022-2042. Rete Rurale Nazionale, Roma.
- MIPAAFT (2019) RaFItalia 2017-2018 Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia. Compagnia delle Foreste.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri (2017) Strategia Italiana per la Bioeconomia.
- Robert N, Jonsson R, Chudy R, Camia A (2020) The EU Bioeconomy: Supporting an Employment Shift Downstream in the Wood-Based Value Chains? Sustainability 12:758.
- Tabacchi G, Natale FD, Gasparini P (2010) Coerenza ed entità delle statistiche forestali. Stime degli assorbimenti netti di carbonio nelle foreste italiane. *Sherwood* 165:11–19.
- Winkel G (ed) (2017) *Towards a Sustainable European Forest-Based Bioeconomy*. European Forest Institute.

Produzioni animali e bioeconomia

Fontanesi L.¹, Nanni Costa L.¹, Petracchi M.¹, Trevisi P.¹

¹Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-alimentari, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Riassunto

Le produzioni animali sono un pilastro fondamentale della bioeconomia. La sostenibilità e la circolarità del sistema agro-alimentare mondiale, europeo e nazionale non possono fare a meno della trasformazione di una parte delle produzioni vegetali in produzioni animali. Le proiezioni a breve, medio e lungo termine indicano una crescente richiesta di proteine di origine animale nell'alimentazione mondiale. Le produzioni animali si stanno evolvendo, trovando soluzioni per ridurre l'impatto ambientale e aumentando l'efficienza dei sistemi produttivi.

Abstract

Animal productions constitute a fundamental pillar of the bioeconomy. The sustainability and circularity of the agricultural and food production systems at the global, European and national levels is based on the transformation of part of the plant-derived productions into animal products. Medium- and long-term estimations agree on the increasing trend of the global request of animal derived proteins. Animal production systems are evolving to find novel solutions to reduce their environmental footprint and to increase their production efficiency.

Keywords: animal production, animal protein, circularity, sustainability

Produzioni animali: scenari globali e inquadramento generale

Le produzioni animali, rappresentate principalmente dalla produzione di carne e derivati, latticini, uova e prodotti ittici, sono parte fondante e sostanziale dei sistemi agro-alimentari mondiali, europei e nazionali. Gli alimenti di origine animale forniscono importanti nutrienti, fondamentali per promuovere una sana ed equilibrata alimentazione. L'allevamento degli animali è una componente essenziale della circolarità in agricoltura, consentendo il riciclo e l'utilizzo di biomasse altrimenti non utilizzabili, trasformandole in alimenti di alto valore nutritivo e qualità (Thompson et al., 2023).

Alcuni elementi relativi agli attuali scenari globali e le proiezioni nel medio e lungo periodo dei diversi settori permettono di dare un quadro sull'importanza delle produzioni animali nel contesto agro-alimentare mondiale, anche in riferimento alle diverse aree geografiche. Nella Figura 1 è riportata la proiezione a 10 anni (considerando due punti temporali: 2019-21 e 2031) dei diversi settori delle produzioni animali, declinati in termini quantitativi sulla comune base "proteine", per facilitare la comparazione (FAO/OECD, 2022). Le produzioni totali, in tutte le aree, sono attese in crescita. Diverse regioni dell'Asia (comprendendo Cina, India e le aree dell'Asia sull'Oceano Pacifico) avranno la maggior crescita sia in termini relativi che assoluti sulla produzione di proteine animali. L'aumento della produzione di carne sarà tendenzialmente limitato in molte aree, tranne che in Cina. La produzione di latte e derivati aumenterà in modo particolare in India.

La disponibilità *pro-capite* di proteine di diversa origine, riferita allo stesso arco temporale, e distinta per aree economiche in base al reddito medio, è riportata in Figura 2. La percentuale relativa delle proteine di origine animale sul totale di proteine disponibili giornalmente *pro-capite* è stimata essere leggermente in crescita o tendenzialmente stabile in tutte le aree (FAO/OECD, 2022). L'aumento complessivo della domanda di proteine di origine

animale deriva essenzialmente dalla crescita della popolazione e in parte dall'aumento del reddito medio. La stima globale, riferita al 2021, indica una proporzione di proteine di origine animale sulla disponibilità totale di proteine *pro-capite* che è di circa il 41%. La proiezione per il 2050 di questa stima indica un aumento di almeno 5 punti percentuali. La tendenza, quindi, è quella di avvicinarsi, in media, a circa il 50% di proteine di origine animale e il 50% di proteine di origine vegetale nella dieta giornaliera pro-capite.

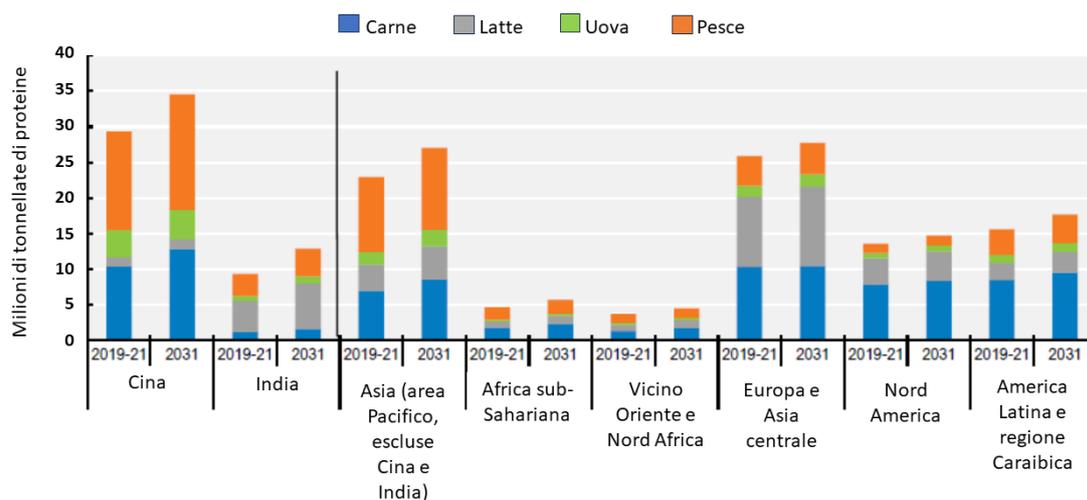


Figura 1. Le produzioni animali (riferite alla base “proteine”, per tipologia e gruppo di paesi (fonte: FAO/OECD, 2022).

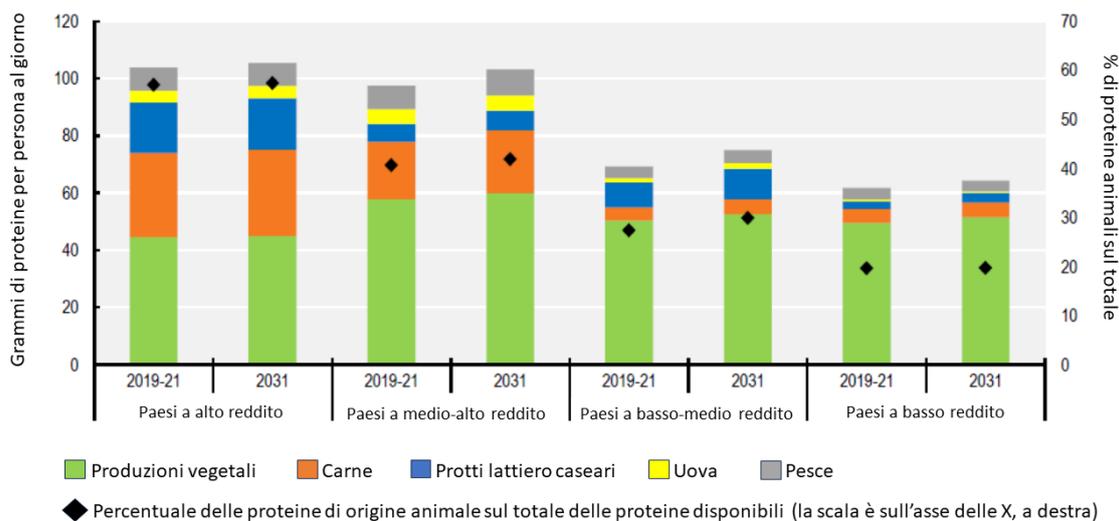


Figura 2. Disponibilità pro-capite di proteine per origine e gruppi di paesi (fonte: FAO/OECD, 2022).

Dall'analisi degli scenari che si riferiscono a diversi obiettivi globali da raggiungere entro il 2030 (secondo gli obiettivi ONU e FAO e in base agli accordi internazionali per ridurre

l'impatto antropico sul cambiamento climatico) è particolarmente interessante riferirsi ai target che combinano la necessità di eliminare le carenze alimentari (combattere la fame: con l'aumento di calorie *pro-capite* al giorno nei Paesi a basso reddito) con la diminuzione dell'impatto ambientale delle attività produttive (con la riduzione dell'emissione di gas climalteranti; FAO/OECD, 2022). Per contribuire a raggiungere questi obiettivi, il settore delle produzioni animali dovrebbe, in tutti i principali comparti, tendere ad una riduzione del numero di animali allevati, ma al contempo aumentare la produzione in modo sostanziale. Questo equivarrebbe ad auspicare un aumento della produttività dell'intero comparto zootecnico del 31% entro i prossimi 7-8 anni, a fronte di un aumento della produttività del settore nel periodo 2000-2020 che è stato di circa il 5%. È chiaro che in questo scenario sarà molto importante puntare a tutte le possibili strategie che possano portare ad un aumento dell'efficienza produttiva del settore, massimizzando al contempo la sostenibilità economica, ambientale e sociale, e prospettando ancora di più una integrazione delle produzioni animali nella circolarità del settore agro-alimentare nella sua complessità. Le strategie riferibili al settore delle produzioni animali non sono sostanzialmente diverse o disgiunte dalle strategie che dovrebbero essere introdotte dall'intero comparto agro-alimentare.

A livello europeo il valore delle produzioni animali rappresenta circa il 40% della produzione totale del comparto agricolo (European Commission, 2023). In Italia, secondo l'ISTAT (2022), il valore alla produzione della macrovoce "Allevamenti zootecnici" (circa 16,9 miliardi di euro) rappresenta circa 1/3 del valore totale alla produzione dell'agricoltura. Nell'ambito nazionale, particolarmente significativo è anche lo sguardo alla classifica dei prodotti alimentari italiani DOP, IGP e STG, il cui valore totale alla produzione si aggira intorno agli 8 miliardi di euro: i formaggi e i prodotti a base di carne rappresentano in valore l'84,4% di questo importante comparto, i cui prodotti iconici sono rappresentativi del *Made in Italy* e della cucina italiana (Ismea-Qualivita, 2022).

Produzioni animali: sfide, azioni e prospettive nella bioeconomia

Lo sviluppo e la moderna evoluzione dei sistemi produttivi animali si inseriscono nei cinque principali obiettivi della Strategia della Bioeconomia (*Bioeconomy Strategy*; European Commission, 2018) che sono declinati come segue: i) garantire la sicurezza alimentare e nutrizionale; ii) gestire la sostenibilità delle risorse naturali; iii) ridurre la dipendenza da risorse non rinnovabili e non sostenibili; iv) mitigare e adattarsi ai cambiamenti climatici; v) rafforzare la competitività dell'Europa e creare nuovi posti di lavoro. Questi cinque obiettivi descrivono nel complesso anche le principali sfide che il settore delle produzioni animali deve affrontare per assicurarne la sostenibilità.

- Il primo obiettivo della *Bioeconomy Strategy*, declinato per le produzioni animali, è quasi scontato, in quanto si innesta nelle ragioni prime che hanno fatto nascere la zootecnia e permesso, anche grazie ad essa, l'evoluzione della civiltà umana nel corso dei secoli. Le produzioni animali utilizzano e/o riciclano le biomasse e le proteine di origine vegetale che non sono direttamente utilizzabili per l'alimentazione umana per produrre alimenti di elevato valore nutrizionale, importanti per costruire diete equilibrate. Gli alimenti di origine animale sono una fonte unica e/o sono, in molti casi, la fonte principale di numerosi micronutrienti (vitamine B12, A, B3, B6 e D, zinco, selenio, calcio, fosforo e ferro eme) e vari altri componenti bioattivi, con importanti benefici nutrizionali, tra cui lo sviluppo delle funzioni cognitive di fondamentale

importanza nell'accrescimento (Mottet et al., 2017; Leroy e Cofnans, 2019; Leroy et al., 2023).

- Diversi sistemi di allevamento contribuiscono alla sostenibilità delle risorse naturali, fornendo anche un ampio spettro di servizi ecosistemici (Leroy et al., 2018). Ad esempio, la pratica del pascolamento, prevalentemente dei ruminanti, ha un ruolo evidente di conservazione, utilizzo e gestione di aree marginali. Numerose sono le soluzioni che derivano dall'allevamento animale che contribuiscono al miglioramento della salute del suolo e al mantenimento della fertilità attraverso la materia organica che è una componente essenziale degli ecosistemi che regolano e controllano molti processi ecologici, al controllo dell'erosione dei suoli, alla conservazione della biodiversità e al mantenimento degli habitat naturali (Thompson et al., 2023).
- Il riciclo e l'utilizzo di risorse non direttamente utilizzabili dall'uomo, la possibilità di sfruttare le deiezioni come fertilizzante e per la produzione di biogas, e quindi di energia, inserisce gli allevamenti animali nel terzo obiettivo della *Bioeconomy Strategy*. Le sfide in questo contesto partono dalla necessità di migliorare l'efficienza dei sistemi produttivi, riducendo le perdite in tutte le fasi dell'allevamento e delle filiere produttive, diversificando le strategie di alimentazione degli animali e di approvvigionamento delle materie prime per l'utilizzo come mangimi (Kim et al., 2019).
- Per quanto riguarda l'impatto degli allevamenti sull'ambiente e sulle conseguenze relative al cambiamento climatico è importante inquadrare la questione nel contesto sopra delineato. Inoltre, alcuni numeri sono necessari per dare una dimensione del reale contributo che le produzioni animali hanno su questi aspetti e per rappresentare le azioni che il settore ha già iniziato a mettere in pratica da diversi anni per rispondere a queste sfide. L'agricoltura europea genera circa il 10% delle emissioni di gas climalteranti prodotti sul suo territorio. L'allevamento degli animali è responsabile di circa l'80-85% di queste emissioni, tra cui la quota più rilevante è attribuita all'emissione di metano da parte dei ruminanti. Circa l'80% dell'azoto di origine agricola presente negli ambienti acquatici europei è legato alle attività di allevamento, e il settore zootecnico rappresenta il 90% delle emissioni di ammoniaca del settore agricolo se si considerano le emissioni legate ai fertilizzanti utilizzati per produrre mangimi (European Environment Agency, 2019). La stima per l'Italia delle emissioni di gas climalteranti che derivano dagli allevamenti animali è inferiore alla media europea, ed è intorno al 5% delle emissioni globali di origine antropica. Negli ultimi 30 anni, il livello di queste emissioni si è ridotto del 14% grazie, in particolare, al miglioramento dell'efficienza dei sistemi produttivi (ISPRA, 2022). Alle azioni di mitigazione si associano anche azioni di adattamento del comparto zootecnico per ridurre l'impatto negativo dei cambiamenti climatici a questo settore produttivo (Rojas-Downing et al., 2017).
- Gli allevamenti sono una componente fondamentale del tessuto produttivo e sociale di molti territori europei. Sono presenti in quasi tutte le regioni d'Europa in un'ampia varietà di sistemi produttivi, contesti socio-economici e geografici, che si riflettono nelle diverse condizioni locali e nelle risorse disponibili nel territorio, nel patrimonio, nelle competenze degli agricoltori e dei tecnici. La diversità dei sistemi di produzione conferisce resilienza all'intero comparto a livello europeo per soddisfare un'ampia gamma di richieste dei consumatori, e può rappresentare un importante sbocco occupazionale.

Produzioni animali: gli ambiti della bioeconomia più frequentemente affrontati

Molte pubblicazioni scientifiche affrontano i diversi aspetti della bioeconomia nel contesto delle produzioni animali. In una recente analisi della letteratura scientifica, è stata valutata la co-presenza di parole o concetti che riportano alle produzioni animali, oltre a parole chiave o descrittori di alcuni elementi della bioeconomia (Paltaki et al., 2021). Questa analisi ha evidenziato uno stretto legame tra diversi termini generali, visti come classici descrittori della disciplina e del settore produttivo, tra cui “gestione dei rifiuti”, “deiezioni”, “economia circolare”, “biomassa”, “fermentazione”, “bioenergia” e diverse altre parole, che ne descrivono l’essenza e ne dilatano il campo di interesse (Figura 3).

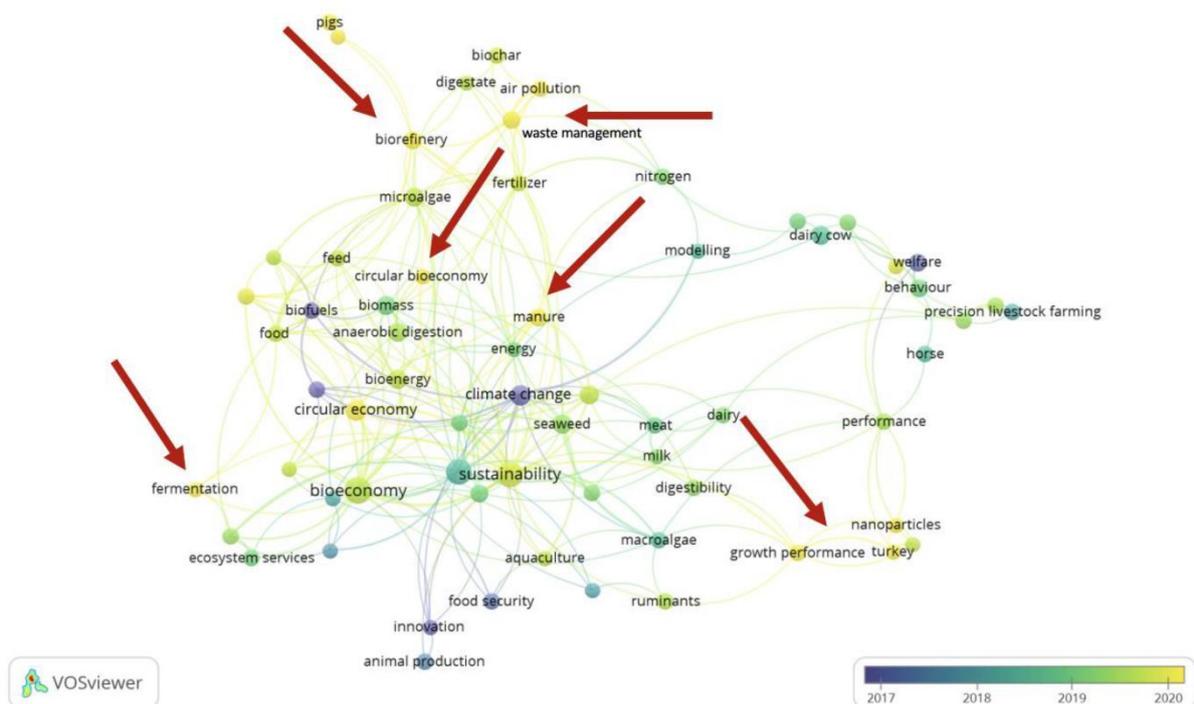


Figura 3. Mapa dei termini che co-esistono con alta frequenza nelle pubblicazioni scientifiche che trattano aspetti di bioeconomia nel contesto delle produzioni animali (fonte: Paltaki et al., 2021).

Produzioni animali: innovazioni e bioeconomia

Le innovazioni nei tre principali pilastri della zootecnia permettono al settore di evolversi e di allinearsi ai principali obiettivi della Bioeconomy Strategy.

Per quanto riguarda il miglioramento genetico e la conservazione delle risorse genetiche animali, la ridefinizione degli obiettivi di selezione permette di cogliere tutti i principali aspetti della sostenibilità collegati alla bioeconomia, con un focus sul benessere animale, sulla resistenza alle malattie, sulla qualità dei prodotti e sulla riduzione dell’impatto ambientale attraverso una maggiore efficienza degli animali. Ad esempio, nei bovini da latte, genomica e fenomica accoppiate per le applicazioni nel miglioramento genetico permettono una riduzione della produzione di metano per animale.

Nell'ambito dell'alimentazione e nutrizione animale si è evoluto il concetto di Precision Feeding per ridurre gli sprechi e i costi di produzione. Ad esempio, la riduzione della proteina grezza e l'ottimizzazione bilanciata degli amino acidi nell'alimentazione dei suini, permette di ridurre l'impatto dell'allevamento in termini di riduzione delle emissioni di azoto. L'impiego di additivi nell'alimentazione di monogastrici permette di ottenere una serie di potenziali effetti positivi sulla crescita dei broiler.

Per quanto riguarda le tecnologie e le pratiche di allevamento, tutte le innovazioni che migliorano l'efficienza degli animali portano ad una riduzione dell'impatto ambientale per unità di prodotto. Ad esempio, le tecnologie di *Precision Livestock Farming* permettono di monitorare gli animali in tempo reale e valutarne lo stato di salute o altri elementi utili per la gestione degli animali.

Conclusioni

Questa breve analisi relativa alla centralità delle produzioni animali nella bioeconomia evidenzia come un sistema più efficiente permette di ridurre l'impatto ambientale per unità di prodotto, in tutti gli ambiti della zootecnia e in tutte le specie allevate. Questi aspetti, riferibili ai concetti di intensificazione sostenibile, si inseriscono in una visione moderna della zootecnia, per far fronte alle sfide che il comparto deve affrontare per raggiungere gli obiettivi strategici di garantire la sicurezza alimentare a livello globale e al contempo ridurre l'impatto ambientale.

Bibliografia

- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2018. A sustainable bioeconomy for Europe – Strengthening the connection between economy, society and the environment – Updated bioeconomy strategy, Publications Office, 2018. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/792130>
- European Commission, 2023. Eurostat: Agriculture, forestry and fishery statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agriculture,_forestry_and_fishery_statistics
- European Environment Agency, 2019. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2017 and inventory report 2019. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, 27 May 2019, EEA/PUBL/2019/051, 962 p. <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2019>
- Kim, S. W., Less, J.F., Wang, L., Yan, T., Kiron, V., Kaushik, S.J., Lei, X.G., 2019. Meeting global feed protein demand: challenge, opportunity, and strategy. *Annual Review of Animal Biosciences* 7, 221-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014838>
- Ismea-Qualivita, 2022. Rapporto Ismea – Qualivita, 2022 sulle produzioni agroalimentari e vitivinicole italiane DOP IGP STG. <https://www.qualivita.it/attivita/rapporto-ismea-qualivita-2022/>
- ISPRA, 2022. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2020. National Inventory Report 2022. ISPRA, Rapporti 360/22, ISBN 978-88-448-1104-4. https://www.isprambiente.gov.it/files/2022/pubblicazioni/rapporti/nir2022_italy_r360.pdf
- ISTAT, 2022. Agricoltura. <https://www.istat.it/it/agricoltura>
- Leroy, F., Cofmans, N. 2020. Should dietary guidelines recommend low red meat intake? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 60, 2763-2772. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1657063>
- Leroy, F., Smith, N.W., Adesogan, A.T., Beal, T., Iannotti, L., Moughan, P.J., Mann, N., 2023. The role of meat in the human diet: evolutionary aspects and nutritional value. *Animal Frontiers* 13, 11-18. <https://doi.org/10.1093/af/vfac093>
- Leroy, G., Hoffmann, I., From, T., Hiemstra, S.J., Gandini, G., 2018. Perception of livestock ecosystem services in grazing areas. *Animal* 12, 2627-2638. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001027>
- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., Gerber P. 2017. Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security* 14, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>
- OECD/FAO, 2022. OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en>
- Paltaki, A., Michailidis, A., Chatzitheodoridis, F., Zaralis, K., Loizou, E., 2021. Bioeconomy and livestock production nexus: a bibliometric network analysis. *Sustainability* 13, 12350. <https://doi.org/10.3390/su132212350>
- Rojas-Downing, M.M., Nejadhashemi, A.P., Harrigan, T., Woznicki, S.A., 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145-163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Thompson, L., Rowntree, J., Windsch, W., Waters, S.M., Shalloo, L., Manzano, P., 2023. Ecosystem management using livestock: embracing diversity and respecting ecological principles. *Animal Frontiers* 13, 28-34. <https://doi.org/10.1093/af/vfac094>

Nuove frontiere della genetica agraria per la bioeconomia – il ruolo della genomica e dell'editing genico

Barchi L.¹, Moglia A.¹, Lanteri S.¹, Salvi S.²

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA), Università degli Studi di Torino

²Dipartimento di Scienze Agro-alimentari (DISTAL), Università degli Studi di Bologna

Riassunto

I moderni sistemi agricoli produttivi devono affrontare la sfida della sostenibilità, che affianca alla rinnovata necessità di salvaguardare produzione e reddito, anche la richiesta di riduzione dei fattori di produzione come l'irrigazione o l'uso di fitofarmaci, e l'adattamento al cambiamento climatico. Un contributo al miglioramento della sostenibilità dei sistemi agrari deriverà dall'adozione, nei programmi di miglioramento genetico, delle nuove tecnologie genomiche basate sull'utilizzo dei metodi di sequenziamento di nuova generazione per una migliore descrizione della variabilità genetica, delle tecniche di fenomica per migliorare la raccolta dei dati fenotipici e delle relazioni pianta-ambiente, e delle tecniche di modifica mirata del genoma tramite gene editing.

Abstract

Modern agricultural production systems must face the challenge of sustainability, a challenge that combines the renewed need to safeguard production and income, with the request for reduction of production factors such as irrigation or the use of pesticides, and the adaptation to climate change. A contribution to improving the sustainability of agricultural systems is coming from the adoption, in plant breeding programmes, of genomic technologies based on the use of next-generation sequencing methods for a better description of genetic variability, of phenomics techniques to improve the collection of phenotypic data and plant-environment relationships, and techniques for targeted modification of the genome through gene editing.

Keywords: *crop wild relatives, gene editing, genomics, phenomics, next-generation sequencing, sustainability*

Introduzione

La bioeconomia è un ambito dell'economia che utilizza risorse biologiche rinnovabili, derivate dalle produzioni agricole vegetali e animali, da quelle forestali e marine, da microrganismi, scarti e sottoprodotti industriali nonché dal trattamento della frazione organica dei rifiuti, per produrre beni in modo sostenibile dal punto di vista economico, ambientale e sociale. La bioeconomia coinvolge una vasta gamma di settori produttivi e i benefici si estendono a diversi settori industriali (es. bioplastiche, cosmetici, farmaceutici e bioenergetici). Inoltre, la bioeconomia si inserisce nel contesto più ampio dell'economia circolare, che riguarda processi e sistemi per trasformare materiali di origine biologica, anche di scarto, in prodotti di maggior valore, promuovendo il loro riutilizzo in settori diversi da quelli di origine. L'espressione "bioeconomia circolare" sottolinea l'interconnessione tra bioeconomia ed economia circolare, ed include la ricerca di soluzioni per le attuali sfide della società, come la sicurezza alimentare, la gestione sostenibile delle risorse naturali, la riduzione della dipendenza dalle risorse fossili, la lotta ai cambiamenti climatici e la gestione dei rifiuti.

L'approccio di economia circolare è stato suggerito come complementare all'intensificazione sostenibile della produzione, e co-partecipa alla risposta al cambiamento climatico (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Infatti, la circolarità nell'agricoltura e nei

sistemi alimentari in generale mira a ridurre gli input e i rifiuti tossici, riutilizzare materiali e macchinari, riciclare nutrienti non essenziali per la nutrizione umana e rigenerare sistemi naturali e produttivi migliorando al contempo la sostenibilità economica dei sistemi alimentari e agricoli (Basso et al., 2021; Ellen MacArthur Foundation, 2015; Jones et al., 2020). In quest'ottica, il miglioramento genetico basato sulle metodologie innovative rappresenta una proposta in grado di sviluppare nuove colture e varietà in linea sia con l'intensificazione sostenibile sia con i requisiti dell'economia circolare a livello locale, nazionale ed internazionale.

L'essere umano ha utilizzato la selezione artificiale delle piante per gli ultimi 10.000 anni, per scegliere le piante coltivate con caratteristiche desiderate, assieme ad un lento miglioramento dei metodi di coltivazione. A partire dalla metà del secolo scorso, e per diversi decenni, la rivoluzione verde, ovvero la combinazione di nuove pratiche agronomiche con le aumentate conoscenze genetiche (Pingali, 2012), ha consentito un vertiginoso aumento delle rese in numerose specie coltivate, come frumento, riso (Pingali, 2012) e mais (Cooper et al., 2014; Duvick et al., 2003). Si stima che almeno il 50% dell'aumento delle produzioni osservato durante la rivoluzione verde sia ascrivibile a fattori genetici (Pingali, 2012). Solo come esempio, in frumento la rivoluzione verde ha portato allo sviluppo di varietà caratterizzate da altezza ridotta ma altamente produttive, con un incremento dell'HI (harvest index) e una maggiore resistenza a patogeni (Mondal et al., 2020); in mais, i miglioramenti hanno riguardato modifiche nell'ideotipo della pianta che hanno consentito una maggiore tolleranza all'alta densità di semina ed efficienza nell'utilizzo della luce, in presenza di irrigazione e concimazione azotata ottimali (Cooper et al., 2014; Messina et al., 2021).

Tuttavia, specialmente nel secolo scorso, il miglioramento genetico è stato indirizzato quasi esclusivamente verso lo sviluppo di nuove cultivar caratterizzate da alta produttività in condizioni di aumentata disponibilità di nutrienti e di acqua, e di protezione dai patogeni con uso di fitofarmaci. Questa direzione di sviluppo ha causato un aumento della richiesta di risorse idriche, di degrado del suolo e di utilizzo di composti chimici, con impatti ambientali negativi, in una prospettiva di non sostenibilità (Paustian et al., 2016; Robertson and Vitousek, 2009; Rodell et al., 2018). Nell'ottica di un sistema circolare, diventa quindi necessario ripensare e ridefinire gli obiettivi che includono non solo una maggiore produttività e stabilità, ma anche una minore impronta ambientale, un miglior utilizzo dell'acqua, una migliore nutrizione e una maggiore resistenza a stress di natura biotica ed abiotica. In questa ottica, le metodologie di miglioramento genetico avanzate offrono una vasta gamma di opzioni e innovazioni.

Il ruolo delle nuove tecnologie genomiche nel miglioramento genetico per la sostenibilità

Negli ultimi anni, la dissezione genetico-molecolare dei caratteri di interesse agronomico grazie ad interventi biotecnologici, incluso l'ingegneria genetica, hanno giocato un ruolo importante nello sviluppo di cultivar con caratteristiche desiderabili. L'arrivo delle tecniche di editing genomico (discusse nel seguito) promette di accelerare ulteriormente sia lo studio della funzione dei geni sia l'introduzione di modifiche nelle varietà coltivate, contribuendo al miglioramento genetico nella direzione di una maggiore sostenibilità. Altre tecniche innovative come la fenomica e la selezione genomica (un approccio che combina osservazioni fenotipiche con analisi genomiche) si stanno dimostrando altrettanto utili nell'accelerare il processo di selezione delle piante. Queste innovazioni sono state possibili grazie allo sviluppo di tecniche come il sequenziamento rapido dei genomi, la messa a punto delle tecnologie dei marcatori

molecolari, il clonaggio e lo studio di espressione dei geni e molte altre, tutte legate ai progressi in discipline scientifiche di base quali la biologia molecolare, la chimica, e l'informatica.

Oggi, qualunque programma di miglioramento genetico degno di questo nome utilizza metodi di selezione assistita da marcatori genetico-molecolari del DNA, che permettono da un lato di conoscere con precisione le relazioni genetiche tra i materiali e dall'altro di aumentare l'efficienza e la velocità della selezione. Esempi di applicazioni di successo risalgono agli anni '90 (Dreher et al., 2002; Gupta et al., 2010). Marcatori molecolari sono stati utilizzati per identificare loci per la resistenza alla ruggine in frumento (per es. Farrakh et al., 2016; Liu et al., 2017), e marcatori RAPD e CAPS sono stati utilizzati in melanzana per identificare la presenza del gene *Rfo-sa1*, che fornisce resistenza a *Fusarium oxysporum f. sp. melongena* (Toppino et al., 2008). Diversi marcatori tra cui RFLP, AFLP, SSR e SNP sono stati utilizzati per identificare alleli favorevoli di QTL in riso e in altre colture (Oladosu et al., 2019). L'uso dei marcatori è oggi integrato in diversi disegni sperimentali. Recentemente, i marcatori sono stati associati al metodo "speed breeding", che consente di aumentare l'efficienza globale dei programmi di miglioramento genetico. In questa metodologia, le piante sono allevate in condizioni ambientali controllate, incluso la durata ed il tipo di radiazione luminosa, in modo da aumentarne la velocità di sviluppo e consentire di svolgere fino a quattro o sei generazioni di coltivazioni (per es. in grano, colza, orzo, ecc.) in un anno (Voss-Fels et al., 2019; Watson et al., 2018).

Con il rapido progresso delle piattaforme di sequenziamento di nuova generazione (NGS), sono stati sequenziati ed annotati i genomi di quasi tutte le più importanti specie coltivate come il pomodoro (The Tomato Genome Consortium, 2012), il frumento tenero e duro (Consortium (IWGSC) et al., 2018; Maccaferri et al., 2019), l'orzo (Mascher et al., 2017), la patata (The Potato Genome Sequencing Consortium et al., 2011) e la melanzana (Barchi, Pietrella, et al., 2019), e altre, facilitando il mappaggio dei geni, lo sviluppo di marcatori.

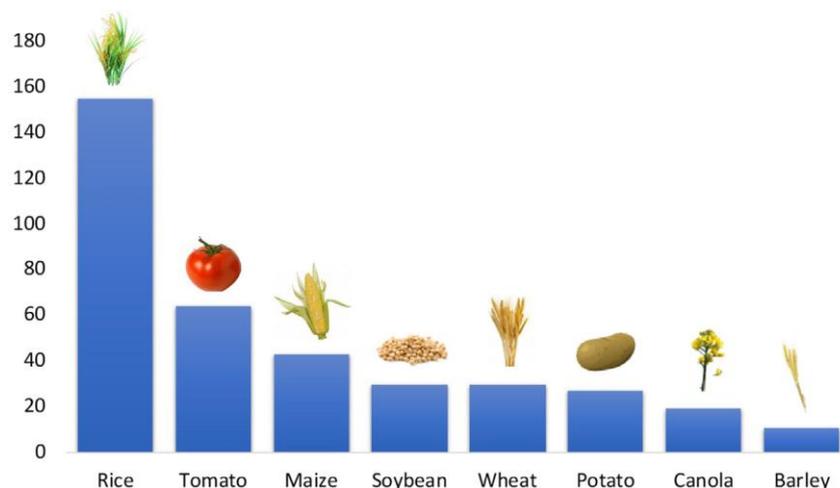
Altrettanto rapidi sono stati gli sviluppi avvenuti nel settore della fenomica, ovvero quell'insieme di tecniche ingegneristiche ad alta efficienza e precisione che consentono di raccogliere dati su crescita, sviluppo e fisiologia della pianta in maniera automatizzata (Hickey et al., 2019; Araus et al., 2018). Le innovazioni sono molteplici, inclusa la robotica per acquisire immagini delle piante (utilizzando nastri trasportatori, veicoli mobili terrestri, droni) e con sensori sensibili in un ampio range dello spettro della radiazione. Ciò consente il monitoraggio non distruttivo della crescita e della fisiologia della pianta. Le interpretazioni delle immagini e l'estrazione dei dati per i caratteri di interesse sono spesso svolte utilizzando la visione artificiale e l'apprendimento automatico e l'analisi dei dati raccolti è spesso integrata da dati di monitoraggio ambientale basato su sensori.

Natura e potenzialità delle tecniche di editing genomico

Una delle innovazioni più recenti nel campo della genetica molecolare a servizio del miglioramento genetico delle piante è senz'altro l'introduzione delle tecniche di editing genico o genomico. Tali tecniche, sviluppate a partire dal 2010, consentono di indurre modifiche mirate (ovvero precise), piccole e simili a quelle che avvengono spontaneamente nel DNA di un organismo. Tra queste tecniche, quella più flessibile, rapida ed utilizzata oggi è quella basata sul metodo CRISPR-CAS (Chen et al., 2019). Il metodo utilizza processi biochimici propri di un meccanismo immunitario dei batteri che causa la distruzione selettiva del DNA di virus che invadono la cellula batterica. La selettività o specificità è fornita da molecole di RNA, chiamate gRNA o RNA guida che, sulla base della loro sequenza (in particolare, una regione di 20

nucleotidi) dirigono l'enzima chiamato CAS su una regione corrispondente del DNA. Solo in quella posizione l'enzima CAS svolge la sua azione di taglio della doppia elica del DNA (e degradazione del DNA virale, nel caso dell'infezione nei batteri). Quando utilizzato nelle cellule eucariotiche, in corrispondenza del taglio della doppia elica si attivano sistemi di riparazione del DNA che possono introdurre, in quelle posizioni, modifiche puntiformi della sequenza del DNA. Le ricercatrici Emmanuelle Charpentier e Jennifer Doudna per prime hanno capito, nel 2012, che modificando la sequenza del gRNA, il sistema poteva essere utilizzato per introdurre modifiche della sequenza del DNA in posizioni target decise dall'operatore, per esempio in geni specifici che si vogliono modificare (Jinek et al., 2012). Per questa intuizione, poi dimostrata sperimentalmente, Charpentier e Doudna hanno ricevuto il premio Nobel per la chimica nel 2020. Il metodo CRISPR/CAS è ancora in via di evoluzione e miglioramento, per esempio si stanno introducendo protocolli che consentono la sostituzione mirata di tratti relativamente lunghi di DNA (per esempio una porzione di un gene), la modifica target della metilazione (con effetti sulla espressione genica) o la possibilità di sostituire una base nucleotidica con un'altra base specifica (approccio noto come 'base editing').

L'editing genomico è già stato applicato a molte specie vegetali e animali. Una recente rassegna ha identificato più di 500 pubblicazioni scientifiche che riportano esperimenti di successo su 63 specie di piante (Dima et al., 2022). Quelle con il maggior numero di esperimenti sono riso, pomodoro, mais, soia, frumento e patata. La maggior parte di queste ricerche sono state svolte in Cina e negli Stati Uniti, seguiti ad una certa distanza dall'Unione Europea, dove prevalgono Germania e Francia. Dal punto di vista dei caratteri, il 25% degli interventi ha riguardato la modifica di caratteristiche qualitative per l'alimentazione umana o per animali (es. contenuto di vitamine, acidi grassi, fibre, sostanze tossiche, ecc), il 22% caratteristiche legate alla produttività ed alla resa (es. numero di semi o frutti, efficienza fotosintetica, ecc.), il 18% la resistenza a parassiti.



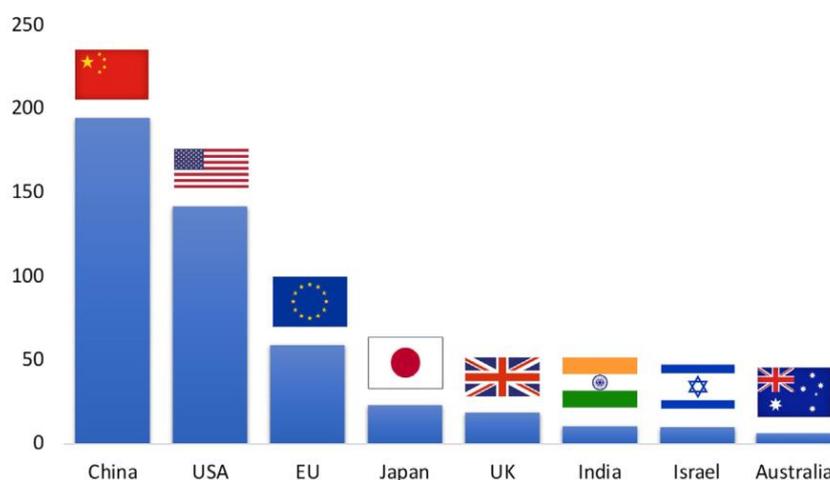


Figura 1. Numero di esperimenti che hanno utilizzato tecniche di editing genomico, classificati per specie target (sopra) o per nazione dove la ricerca è stata svolta (sotto), a primavera 2022. Fonte: (Dima *et al.*, 2022).

I casi in cui varietà migliorate con editing genomico abbiano effettivamente raggiunto la coltivazione in pieno campo o la produzione a livello commerciale sono ancora relativamente pochi. Tra questi troviamo varietà di colza e camelina migliorate per resistenza ad erbicidi o ad alto contenuto di olio, soia ad alto contenuto di acido oleico, mais con amido modificato di tipo waxy per uso industriale, riso tollerante alla siccità, pomodoro migliorato per contenuto di GABA con finalità nutraceutiche, brassica da insalata a ridotto contenuto di tiocianati nella foglia per migliorarne la palatabilità.

Le tecniche di editing genomico offrono un chiaro vantaggio rispetto ad altre tecniche genetiche in quanto consentono di operare modifiche con una precisione quasi assoluta. Inoltre, nella maggior parte dei casi non richiedono l'introduzione di materiale genetico da un'altra specie e quindi le varietà che ne derivano non sono oggettivamente considerabili transgeniche (vedi dopo). Un ulteriore vantaggio dell'editing genomico è la possibilità di modificare geni e quindi caratteri di interesse agronomico direttamente nelle cultivar élite e/o di prestigio, senza modificarne la natura e la riconoscibilità. Tale peculiarità ha una ricaduta immediata nell'agricoltura italiana che si basa anche sulla coltivazione di varietà storiche riconosciute dal consumatore e connesse ad una filiera di trasformazione e di commercializzazione di grande valore aggiunto. È possibile, per esempio, introdurre resistenze genetiche a parassiti fungini e batterici nelle cultivar più blasonate di vite associando CRISPR-CAS con cisgenico. Le viti così prodotte non perderebbero la loro identità varietale, e la loro coltivazione richiederebbe quantità ridotte di trattamenti chimici di difesa. L'adozione di queste soluzioni avrebbe un inequivocabile impatto positivo sulla sostenibilità della viticoltura, considerando che in Europa la vite è attualmente una delle colture più trattate con fitofarmaci (Fouillet *et al.*, 2022).

La normativa sull'editing genomico

La normativa che regola la coltivazione di varietà ottenute o migliorate tramite editing genomico è diversa tra gli Stati, e in via di evoluzione, specialmente in Europa. Nei principali stati Nord e Sudamericani vige il principio della valutazione della sostanziale equivalenza del prodotto (in questo caso della varietà migliorata con editing). Ne consegue che le cultivar modificate per uno o pochi nucleotidi tramite editing non sono regolamentate in quanto tali modifiche di sequenza sono considerate analoghe a quelle spontanee presenti nella specie, o a

quelle introdotte dalla mutagenesi artificiale in uso da quasi un secolo. Al contrario, in Europa la normativa in essere è ancora la Direttiva 2001/18/EC, introdotta per regolamentare gli organismi transgenici. Come conseguenza, a causa dell'enfasi sui metodi utilizzati, qualunque cultivar editata anche solo di un nucleotide è allo stato attuale considerata OGM. Tuttavia, la Commissione Europea, dopo essere rimasta per qualche anno su posizioni altalenanti ha di recente (luglio 2023) proposto una bozza di normativa che se approvata consentirà la coltivazione di varietà modificate tramite editing, anche se il numero di modifiche genetiche sarà probabilmente limitato in termini di numero e di tipologia (Vanderschuren et al., 2023).

La genomica al servizio della valorizzazione della biodiversità: il caso studio della melanzana

I cosiddetti “crop wild relatives” (CWRs), vale a dire le specie selvatiche affini a quelle coltivate, rappresentano un pool di diversità genetica che può essere utilizzato per creare nuove combinazioni alleliche sfruttabili in programmi di miglioramento genetico. Geni utili messi a disposizione dai CWR sono stati estremamente preziosi per lo sviluppo di nuove cultivar maggiormente adattate alle mutevoli pratiche agricole, alle pressioni delle malattie, alle richieste del mercato e alle condizioni climatiche. Ad esempio, i geni di *Solanum pennellii* hanno permesso di aumentare il contenuto di solidi solubili (Baxter et al., 2005) in pomodoro. Numerosi sono invece gli esempi di utilizzo di CWR per introdurre resistenza/tolleranza agli stress biotici e abiotici nelle specie coltivate, come l'inserimento della resistenza alla peronospora (malattia fungina causata da *Phytophthora infestans*) della patata selvatica *Solanum demissum* (Vossen et al., 2016) nella patata coltivata e della resistenza alla ruggine dello stelo (malattia fungina causata da *Puccinia graminis* ssp. *graminis*) da *Aegilops tauschii* (Kilian et al., 2010) in frumento. Tuttavia, permangono ancora alcune problematiche legate all'utilizzo dei CWRs nel miglioramento genetico, tra cui le barriere alla compatibilità degli incroci, la sterilità della generazione F₁ e da reincrocio (BC₁), e la ridotta ricombinazione tra i genomi delle specie coltivate e quelli delle CWR (Zamir, 2001). Infine è da sottolineare come i CWR siano spesso caratterizzate da uno scarso adattamento al di fuori del loro areale di distribuzione naturale; in particolare la sensibilità al fotoperiodo, le differenze fenologiche e la fioritura asincrona possono contribuire al loro scarso adattamento agli ambienti agricoli ed ostacolano anche i programmi di breeding (Cowling, 2013; Wang et al., 2017).

L'applicazione delle tecniche di genomica (es. sequenziamento NGS, ecc.) stanno contribuendo in maniera sostanziale agli studi finalizzati alla descrizione ed all'utilizzo della variabilità genetica di numerose specie vegetali e dei loro CWR e delle risorse genetiche in generale. Tra questi, il progetto europeo G2P-SOL ha avuto come obiettivo quello di studiare decine di migliaia di accessioni genetiche delle quattro principali solanacee coltivate (patata, pomodoro, peperone e melanzana) che sono conservate in “banche genetiche” in tutto il mondo. La possibilità di comprendere ed utilizzare questa diversità genetica è fondamentale per la sostenibilità dell'agricoltura di fronte a un ambiente in evoluzione e alla comparsa di nuovi parassiti.

In melanzana, nei suoi CWR e nelle specie ad essa affini sono state studiate 3499 accessioni presenti in sette banche del germoplasma internazionali e i loro metadati (i.e. informazioni relative ad ogni accessione) sono stati raccolti e curati manualmente. Sulla base di queste informazioni, le accessioni studiate provenivano da 105 paesi, con la maggior parte originarie del subcontinente indiano (24,8%), seguite da quelle del sud-est asiatico (21,5%) e Africa. Un totale di 3335 accessioni apparteneva a specie coltivate di melanzana (*S. melongena*,

2896 accessioni; *S. aethiopicum*, 313; e *S. macrocarpon*, 123 accessioni), mentre i restanti 164 appartenevano a 25 specie selvatiche. Le accessioni sono state sottoposte a genotipizzazione mediante metodologia SPET utilizzando un pannello di sonde 5K precedentemente sviluppato (Barchi, Acquadro, *et al.*, 2019). Dopo analisi bioinformatiche e dopo aver applicato filtri di qualità sono stati identificati un totale di 119 695 siti polimorfici tra le accessioni in studio, di cui 4306 erano SNP target utilizzati per la costruzione del pannello iniziale, mentre i restanti 115 389 erano SNP non target trovati nelle regioni fiancheggianti. Questi polimorfismi hanno permesso, assieme alle informazioni relative all'origine geografica, di avere informazioni utili in merito ai flussi di lavoro nella gestione delle banche del germoplasma, nell'ottica di un loro utilizzo in futuri programmi di miglioramento genetico della specie. In particolare, l'eterozigosi media stimata utilizzando gli SNP totali è risultata molto bassa per *S. melongena* (0,30%), il suo progenitore diretto *S. insanum* (0,13%) e nella specie sorella *S. incanum* (0,26%), così come per le altre due specie coltivate, cioè *S. aethiopicum* (0,66%) e *S. macrocarpon* (0,41%), indicando una riproduzione essenzialmente autogama. Il livello medio più elevato di eterozigosi rilevato invece nelle altre specie (range 0.31-3.84), attribuibile a un tasso più elevato di allogamia (Daunay *et al.*, 2001).

Una delle problematiche principali che si osserva a livello di conservazione *ex situ* di accessioni è una classificazione imprecisa e/o una duplicazione involontaria delle accessioni tra ed entro banche del germoplasma. A tal proposito, basandosi sui valori di Identity-By-State (IBS), sono state identificate le possibili accessioni classificate in maniera erronea dal punto di vista tassonomico e i potenziali duplicati. In totale, l'analisi ha portato a stimare che circa l'83% delle accessioni risultavano uniche a livello delle sette banche del germoplasma. Inoltre, 88 accessioni sono state identificate come presumibilmente errori di classificazione tassonomica e per 31 di loro è stato possibile eseguire la corretta assegnazione a una specie diversa dopo l'analisi dei metadata e dei dati fenotipici.

L'albero di massima verosimiglianza (ML, Figura 2) basato sull'intero pannello di SNP ha identificato due rami principali, di cui uno comprendente la specie *S. prinophyllum* e un rappresentante di *S. aethiopicum*. Nel secondo ramo sono riconoscibili due cluster: (i) le accessioni delle specie del Nuovo Mondo *S. sisymbriifolium* e *S. torvum* nonché quelle appartenenti al clade "Lasiocarpa"; (ii) specie originarie del Vecchio Mondo. Quest'ultimo gruppo comprende quattro sottogruppi: (i) rappresentanti delle specie del Madagascar *S. myoxotrichum* Baker, *S. pyracanthos* Lam., *S. tettense* Klotzsch e *S. schimperianum* Hochst dell'Africa orientale. ex A. Ricco.; (ii) due specie del grado "Anguivi" (*S. macrocarpon* e il suo progenitore selvatico *S. dasyphyllum*); (iii) altri rappresentanti del grado "Anguivi" (*S. aethiopicum* e il suo progenitore selvatico *S. anguivi*), *S. humile* Lam. e *S. tomentosum* L.; (iv) specie appartenenti al clade "Melanzana" (*S. melongena*, *S. insanum*, *S. incanum*, *S. lichtensteinii*, *S. campylacanthum* Hochst. ex A. Rich., *S. cerasiferum* Dunal e *S. linnaeanum*). Queste informazioni permettono di chiarire ulteriormente i rapporti filogenetici esistenti tra più di 3400 accessioni di melanzana e specie CWR, utili per facilitare approcci moderni di breeding.

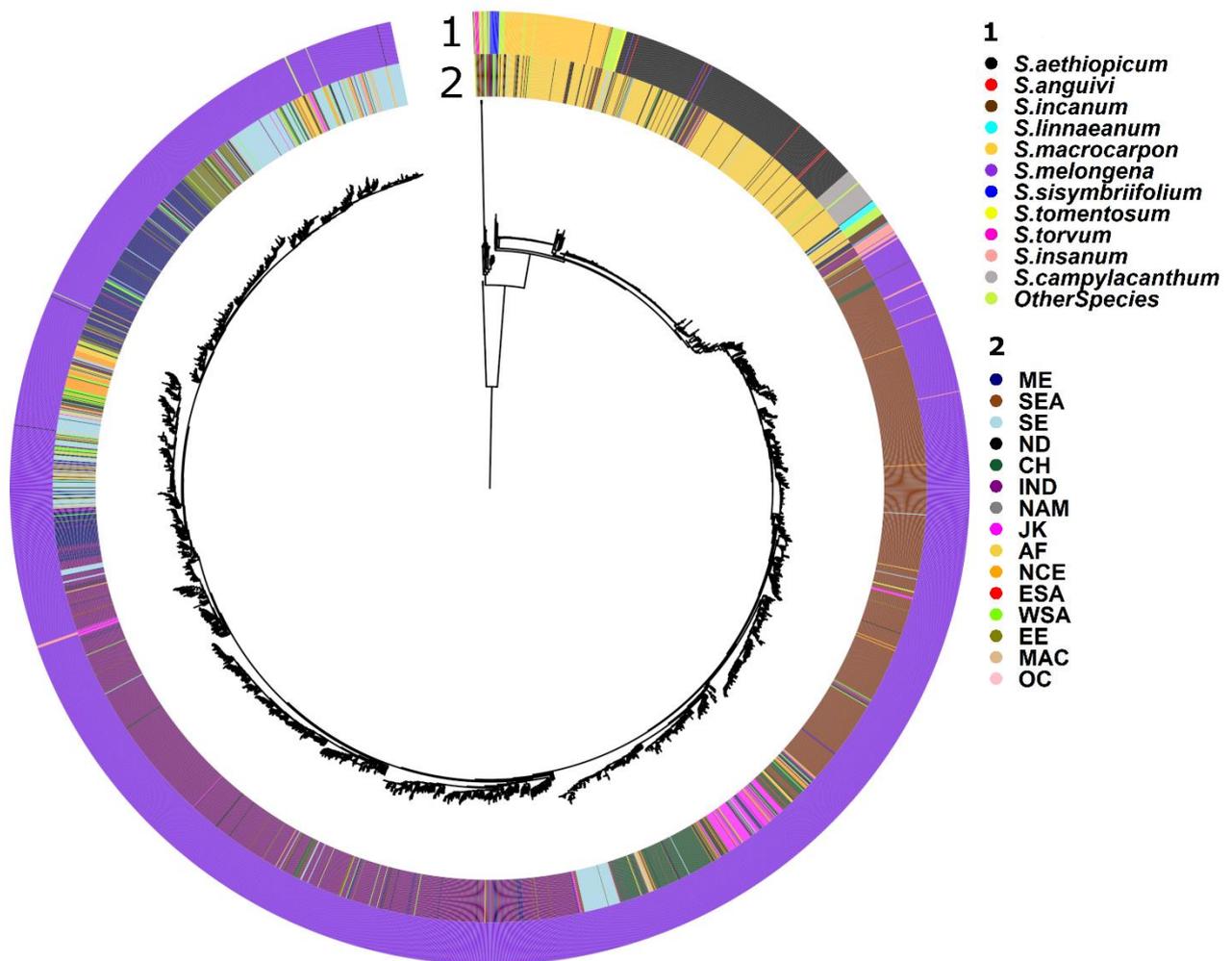


Figura 2: Albero di massima verosimiglianza (“maximum likelihood”) che riassume le relazioni filogenetiche in melanzana (*Solanum melongena*) e specie affini. I colori del cerchio ‘1’ corrispondono alla specie, mentre i colori del cerchio ‘2’ all’origine geografica (ME: Medio Oriente, SEA: Sudest asiatico, SE: Europe dal sud, ND: non disponibile, CH: Cina, IND: India, NAM: nord America, JK: Giappone e Korea, AF: Africa, NCE: Europa centro-settentrionale, ESA: America sud-orientale, WSA: America sud-occidentale, EE: Europa dell’est, MAC: America centrale, OC: Oceania). Rielaborato da (Barchi *et al.*, 2023).

Conclusioni

La bioeconomia, promuovendo l'uso sostenibile delle risorse biologiche per produrre beni economicamente, ambientalmente e socialmente sostenibili, contribuisce in maniera importante al concetto di economia circolare. L'adozione dei moderni metodi agronomici e di miglioramento genetico ha consentito, partire dalla seconda metà del secolo scorso, un aumento rapido delle rese produttive contribuendo al sostentamento alimentare della popolazione mondiale, ma ha al tempo stesso contribuito alla degradazione dell'ambiente, del suolo e delle risorse idriche. Oggi le nuove metodologie di miglioramento genetico basate sia su modifiche mirate, gene-specifiche, come l'editing, sia sulla descrizione della variabilità tramite tecniche di sequenziamento NGS del DNA, consentono di rendere più efficaci e rapidi i programmi di miglioramento genetico. L'obiettivo è lo sviluppo di nuove cultivar che siano caratterizzate, oltre che da elevata produttività, anche da stabilità della resa in condizioni di ridotto utilizzo di

mezzi tecnici agronomici e chimici, per far fronte in maniera sostenibile alle nuove sfide create dall'arrivo di nuovi parassiti e dal cambiamento climatico.

Bibliografia

- Araus, J.L., Kefauver, S.C., Zaman-Allah, M., Olsen, M.S. and Cairns, J.E. (2018) Translating High-Throughput Phenotyping into Genetic Gain. *Trends in Plant Science*, 23, 451–466.
- Barchi, L., Acquadro, A., Alonso, D., et al. (2019) Single Primer Enrichment Technology (SPET) for High-Throughput Genotyping in Tomato and Eggplant Germplasm. *Front. Plant Sci.*, 10. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01005/full> [Accessed December 12, 2020].
- Barchi, L., Aprea, G., Rabanus-Wallace, M.T., et al. Analysis of >3400 worldwide eggplant accessions reveals two independent domestication events and multiple migration-diversification routes. *The Plant Journal*, n/a. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/tpj.16455> [Accessed October 23, 2023].
- Barchi, L., Pietrella, M., Venturini, L., et al. (2019) A chromosome-anchored eggplant genome sequence reveals key events in Solanaceae evolution. *Scientific Reports*, 9, 11769.
- Basso, B., Jones, J.W., Antle, J., Martinez-Feria, R.A. and Verma, B. (2021) Enabling circularity in grain production systems with novel technologies and policy. *Agricultural Systems*, 193, 103244.
- Baxter, C.J., Carrari, F., Bauke, A., Overy, S., Hill, S.A., Quick, P.W., Fernie, A.R. and Sweetlove, L.J. (2005) Fruit Carbohydrate Metabolism in an Introgression Line of Tomato with Increased Fruit Soluble Solids. *Plant and Cell Physiology*, 46, 425–437.
- Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H. and Gao, C. (2019) CRISPR/Cas Genome Editing and Precision Plant Breeding in Agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 667–697.
- Consortium (IWGSC), T.I.W.G.S., Appels, R., Eversole, K., et al. (2018) Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*, 361, eaar7191.
- Cooper, M., Ghore, C., Leafgren, R., Tang, T. and Messina, C. (2014) Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product. *J Exp Bot*, 65, 6191–6204.
- Cowling, W.A. (2013) Sustainable plant breeding. *Plant Breeding*, 132, 1–9.
- Daunay, M.C., Lester, R.N. and Ano, G. (2001) Cultivated eggplants. *Tropical Plant Breeding*, 200–225.
- Dima, O., Heyvaert, Y. and Inzé, D. (2022) Interactive database of genome editing applications in crops and future policy making in the European Union. *Trends in Plant Science*, 27, 746–748.
- Dreher, K., Morris, M., Khairallah, M., Ribaut, J.M., Shivaji Pandey, S.P. and Ganesan Srinivasan, G.S. (2002) Is marker-assisted selection cost-effective compared with conventional plant breeding methods? The case of quality protein Maize. *Economic and social issues in agricultural biotechnology*, 203–236.
- Duvick, D.N., Smith, J.S.C. and Cooper, M. (2003) Long-Term Selection in a Commercial Hybrid Maize Breeding Program. In *Plant Breeding Reviews*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 109–151. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470650288.ch4> [Accessed October 3, 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2019) Completing the Picture: How the Circular Economy Tackle (s Climate Change.
- Ellen MacArthur Foundation (2015) Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe.
- Farrakh, S., Khalid, S., Rafique, A., Riaz, N. and Mujeeb-Kazi, A. (2016) Identification of stripe rust resistant genes in resistant synthetic hexaploid wheat accessions using linked markers. *Plant Genetic Resources*, 14, 219–225.
- Fouillet, E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B. and Merot, A. (2022) Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network. *European Journal of Agronomy*, 136, 126503.
- Gupta, P.K., Kumar, J., Mir, R.R. and Kumar, A. (2010) 4 Marker-assisted selection as a component of conventional plant breeding. *Plant breeding reviews*, 33, 145.
- Hickey, L.T., N. Hafeez, A., Robinson, H., et al. (2019) Breeding crops to feed 10 billion. *Nat Biotechnol*, 37, 744–754.
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2012) A Programmable Dual-RNA-Guided DNA Endonuclease in Adaptive Bacterial Immunity. *Science*, 337, 816–821.
- Jones, J.W., Verma, B.P., Nokes, S., Verma, L., Zazueta, F. and Rider, A. (2020) Toward Circular Food and Agricultural Systems. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 27, 15–17.
- Kilian, B., Martin, W. and Salamini, F. (2010) Genetic Diversity, Evolution and Domestication of Wheat and Barley in the Fertile Crescent. In M. Glaubrecht, ed. *Evolution in Action: Case studies in Adaptive Radiation, Speciation and the Origin of Biodiversity*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 137–166. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12425-9_8 [Accessed October 4, 2023].
- Liu, W., Maccaferri, M., Rynearson, S., Letta, T., Zegeye, H., Tuberosa, R., Chen, X. and Pumphrey, M. (2017) Novel Sources of Stripe Rust Resistance Identified by Genome-Wide Association Mapping in Ethiopian Durum Wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum). *Frontiers in Plant Science*, 8. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00774> [Accessed October 23, 2023].
- Maccaferri, M., Harris, N.S., Twardziok, S.O., et al. (2019) Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nat Genet*, 51, 885–895.
- Mascher, M., Gundlach, H., Himmelbach, A., et al. (2017) A chromosome conformation capture ordered sequence of the barley genome. *Nature*, 544, 427–433.
- Messina, C., McDonald, D., Poffenbarger, H., et al. (2021) Reproductive resilience but not root architecture underpins yield improvement under drought in maize. *Journal of Experimental Botany*, 72, 5235–5245.
- Mondal, S., Dutta, S., Crespo-Herrera, L., Huerta-Espino, J., Braun, H.J. and Singh, R.P. (2020) Fifty years of semi-dwarf spring wheat breeding at CIMMYT: Grain yield progress in optimum, drought and heat stress environments. *Field Crops Research*, 250, 107757.
- Oladosu, Y., Rafii, M.Y., Samuel, C., Fatai, A., Magaji, U., Kareem, I., Kamarudin, Z.S., Muhammad, I. and Kolapo, K. (2019) Drought Resistance in Rice from Conventional to Molecular Breeding: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 20.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P. and Smith, P. (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57.
- Pingali, P.L. (2012) Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 12302–12308.
- Robertson, G.P. and Vitousek, P.M. (2009) Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 97–125.

- Rodell, M., Famiglietti, J.S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Beadoing, H.K., Landerer, F.W. and Lo, M.-H. (2018) Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557, 651–659.
- The Potato Genome Sequencing Consortium, Xu, X., Pan, S., et al. (2011) Genome sequence and analysis of the tuber crop potato. *Nature*, 475, 189–195.
- The Tomato Genome Consortium (2012) The tomato genome sequence provides insights into fleshy fruit evolution. *Nature*, 485, 635–41.
- Toppino, L., Vale, G. and Rotino, G.L. (2008) Inheritance of Fusarium wilt resistance introgressed from *Solanum aethiopicum* Gilo and *Aculeatum* groups into cultivated eggplant (*S-melongena*) and development of associated PCR-based markers. *Molecular Breeding*, 22, 237–250.
- Vanderschuren, H., Chatukuta, P., Weigel, D. and Mehta, D. (2023) A new chance for genome editing in Europe. *Nat Biotechnol*, 41, 1378–1380.
- Vossen, J.H., Arkel, G. van, Bergervoet, M., Jo, K.-R., Jacobsen, E. and Visser, R.G.F. (2016) The *Solanum demissum* R8 late blight resistance gene is an Sw-5 homologue that has been deployed worldwide in late blight resistant varieties. *Theor Appl Genet*, 129, 1785–1796.
- Voss-Fels, K.P., Stahl, A. and Hickey, L.T. (2019) Q&A: modern crop breeding for future food security. *BMC Biology*, 17, 18.
- Wang, C., Hu, S., Gardner, C. and Lübberstedt, T. (2017) Emerging Avenues for Utilization of Exotic Germplasm. *Trends in Plant Science*, 22, 624–637.
- Watson, A., Ghosh, S., Williams, M.J., et al. (2018) Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nature Plants*, 4, 23–29.
- Zamir, D. (2001) Improving plant breeding with exotic genetic libraries. *Nat Rev Genet*, 2, 983–989.

Innovazioni, sfide e opportunità nella protezione delle piante in un'ottica di bioeconomia

Romanazzi G.¹, Battilani P.², Burgio G.³, Manachini B.R.I.⁴

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari ed Ambientali, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche 10, 60131 Ancona

² Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali Sostenibili, Università Cattolica del Sacro Cuore, Via Emilia Parmense, 84, 29122 Piacenza

³ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, *Alma Mater Studiorum* Università di Bologna, Viale Fanin 40, 40127, Bologna

⁴ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali, Università di Palermo, Viale delle Scienze 13, 90128 Palermo

Riassunto

La protezione delle piante da avversità biotiche ed abiotiche assume una importanza crescente a fronte della crescita della popolazione globale e della sensibilità del consumatore alla presenza di residui di agrofarmaci. I consumatori sono sempre più esigenti sulla qualità dei prodotti ortofrutticoli, che devono essere liberi anche da piccole imperfezioni, e nel contempo la grande distribuzione impone agli agricoltori limiti massimi di residui dei diversi agrofarmaci ben più bassi rispetto al limite di legge. Prioritari sono anche la tutela della biodiversità ed il mantenimento degli equilibri naturali. Pertanto, occorre mettere a punto strategie di protezione da patogeni e fitofagi ad impatto ambientale sempre più limitato, ricorrendo ove possibile all'uso di mezzi biologici, a sostanze naturali e ad altri approcci sostenibili, in grado di preservare la biodiversità e allo stesso tempo la qualità delle produzioni, senza lasciare residui di agrofarmaci sulle colture trattate. La relazione tratterà quattro casi studio con importanti riflessi sulla bioeconomia, relativi a *Xylella fastidiosa*, contaminazione da micotossine, insetti e nematodi fitofagi e utili, evidenziandone le criticità, i danni alle colture e gli effetti su equilibri biologici e biodiversità.

Abstract

The protection of plants from biotic and abiotic stress is becoming increasingly important in view of global population growth and consumer sensitivity to the presence of pesticide residues. Consumers are becoming increasingly demanding on the quality of fruit and vegetables, which must be free of even minor imperfections, and at the same time, retailers impose on farmers maximum residue limits for the different pesticides that are much lower than the legal threshold. The protection of biodiversity and the maintenance of natural balances are also priorities. Therefore, it is necessary to set up strategies for protection from pathogens and pests with increasingly limited environmental impact, using biological means, natural substances and possibly other sustainable approaches, able of preserving both biodiversity and the quality of production, without leaving pesticide residues on treated crops. The report will deal with four case studies with relevant effects on bioeconomy, relating to *Xylella fastidiosa*, mycotoxin contamination, harmful and beneficial insects and nematodes, highlighting their critical points, damages on the crop and effects on biological equilibria and biodiversity.

Keywords: biodiversità, fitofagi, micotossine, nematodi, sostenibilità, *Xylella fastidiosa*

Introduzione

La protezione delle piante da avversità biotiche ed abiotiche assume una importanza crescente a fronte della crescita della popolazione globale e dell'esigenza di preservare le risorse naturali, come pianificato dagli obiettivi di sviluppo sostenibile (*sustainable development goals*, SDGs) delle Nazioni Unite, condivisi dall'Unione Europea con la strategia *Farm to Fork* (https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) del nuovo Patto Europeo. Tale strategia prevede, tra le diverse misure, a) l'incremento delle superfici ad agricoltura biologica ad un quarto della superficie agricola europea media, b) il dimezzamento dell'uso e del rischio legato ai prodotti chimici di sintesi, e c) il dimezzamento degli sprechi alimentari. Il secondo degli obiettivi dovrà essere declinato in pratica con il Regolamento sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari, la cui bozza è stata discussa il 22 novembre 2023 presso il Parlamento Europeo, che ne ha rigettato la versione proposta dalla Commissione Ambiente. Se ne riparerà con il nuovo Parlamento, quindi dopo metà del 2024, ma è fuori dubbio che occorrerà comunque una protezione delle piante dalla avversità con un numero sempre più limitato di prodotti chimici di sintesi. Difatti, si assiste ad una sempre più limitata disponibilità di nuovi prodotti fitosanitari ed il continuo mancato rinnovo dell'approvazione (o la forte limitazione all'uso) di composti ampiamente utilizzati nella protezione delle colture (ad es. dimetoato, mancozeb, etc.), mentre la registrazione delle alternative a più basso impatto ambientale (detti complessivamente *biologicals*) al momento, in attesa di revisione, deve sostenere gli stessi costi (circa 300 milioni di euro) (Beckerman et al., 2023) e tempi (fino a 13 anni) dei prodotti chimici di sintesi. A questo si aggiunge la richiesta da parte della grande distribuzione organizzata (GDO) di limiti di residui di agrofarmaci ben più bassi del limite di legge (*maximum residue level*, MLR), nonché di una forte limitazione, in alcuni casi anche a 3-5, del numero di residui presenti (Tabella 1). La tendenza di ostilità dei consumatori ai prodotti chimici di sintesi, talvolta utilizzati come facile bersaglio per spaventare il fruitore, nella maggior parte dei casi poco competente, ed indurlo ad acquistare prodotti più costosi, ha limitato anche gli investimenti delle aziende agrochimiche del settore, facendo crollare la ricerca di principi attivi con nuovi meccanismi d'azione. Nei fungicidi, ad esempio, si è passati da 43 nuovi prodotti appartenenti a 20 classi chimiche messi in commercio negli anni '90 ai 26 prodotti e 10 classi chimiche messi a disposizione dal 2010 ad oggi (Beckerman et al., 2023).

Anche le strategie di protezione sono in continua evoluzione, e diventa sempre più popolare, anche a livello scientifico, l'induzione di resistenza, nella quale si gestiscono le avversità delle piante non agendo direttamente sull'organismo target, ma incrementando le difese della pianta (Prusky e Romanazzi, 2023). Con questo approccio indiretto si attivano i meccanismi di resistenza della pianta, che reagisce alla presenza di patogeni e talvolta anche di fitofagi, limitando anche i rischi di comparsa di resistenze ad agrofarmaci con meccanismo d'azione specifico, talvolta su un singolo enzima o passaggio metabolico. Le alternative ai prodotti chimici di sintesi consentono anche la tutela della biodiversità ed il mantenimento degli equilibri naturali. Pertanto, occorre mettere a punto strategie di protezione da patogeni e fitofagi ad impatto ambientale sempre più limitato, ricorrendo ove possibile all'uso di mezzi biologici, a sostanze naturali e ad altri approcci sostenibili, in grado di preservare la biodiversità, gli equilibri biologici e allo stesso tempo garantire la qualità delle produzioni, senza lasciare residui di prodotti chimici sulle colture trattate. La relazione tratterà aspetti di patologia vegetale utilizzando due casi studio, relativi a *Xylella fastidiosa*, contaminazione da micotossine, e con approccio più generale insetti e nematodi fitofagi e utili, riportandone gli effetti sulla

bioeconomia, evidenziandone quindi le criticità, i danni alle colture e gli effetti su equilibri biologici e biodiversità.

RETAILER		Max. %MRL/ active substance	Max. sum% MRL/ sample	Max.% ARfD/ active substance	Max. sum % ARfD/ sample	Maximum number of active substances /samples
ALDI/ HOFER		70%	80%	70%	80%	3-5
BILLA		100%		100%		
DOHLA			70%		70%	3-5
EDEKA		70%		100%		5
EDEKA OWN BRANDS		50%		70%		5
GLOBUS		70%		70%	100%	5
LIDL		33.3%	80%	100%		5
KAUFLAND		33.3%	80%	50%	50%	5
NORMA			70%		70%	5
METRO		50%	80%	70%	100%	5
NETTO		70%		100%		5
REWE		50%	100%	70%	100%	5
REWE OWN BRANDS		50%	100%	50%		5
TEGUT		70%		70%		Max. 4 (>0.01 mg/kg)
TENGMANN		70%	150%	70%	100%	

Tabella 1. Esempi di richieste da parte della grande distribuzione organizzata di residui di agrofarmaci in relazione al massimo residuo di legge (*Maximum Residue Level*, MRL) e della dose acuta di riferimento (*Acute reference doses*, ARfD) (da Romanazzi et al., 2022).

Xylella fastidiosa e bioeconomia

Una delle avversità che sta avendo un importante impatto sulla bioeconomia dei territori interessati, soprattutto in Puglia ma anche, per fortuna al momento con effetti più limitati, in altre regioni italiane (Lazio, Toscana) è *Xylella fastidiosa*. Tale avversità aveva colpito in maniera importante l'economia vitivinicola californiana già alla fine dell'800. Difatti, nel 1880, Newton B. Pierce, il primo fitopatologo californiano, descrisse una malattia della vite, diffusa nella California meridionale, che si stima abbia portato alla morte circa 18000 piante. La malattia ha poi preso il suo nome (Pierce's Disease), e l'agente patogeno, *Xylella fastidiosa*, è stato isolato in coltura pura da Robert Davis nel 1978 un secolo dopo il rinvenimento della malattia. *Xylella fastidiosa* è un batterio Gram-negativo a localizzazione xilematica con

un'ampia gamma di piante ospiti (Purcell e Hopkins, 1996), interessate da una o più delle sottospecie del patogeno (*fastidiosa*, *multiplex*, *pauca*, *sandyi*, *tashke* e *morus*). Nel 2013, il batterio è stato associato alla sindrome del disseccamento rapido dell'olivo (CoDiRO, in inglese conosciuta come *olive quick decline syndrome*, OQDS) rilevato in ulivi nella zona di Gallipoli, in Salento, nell'Italia centro-meridionale (Saponari et al., 2013). Le piante infette mostrano una iniziale bruscatura fogliare (*leaf scorch*), con disseccamento della porzione apicale delle foglie. I sintomi poi procedono con il disseccamento di rametti, branche e, dopo qualche anno, dell'intera pianta (Figura 1).



Figura 1. Ulivi secolari salentini infetti da *Xylella fastidiosa*, disseccati e capitozzati (a sinistra). Gli ulivi disseccati sono soggetti ad incendi (al centro) oppure vengono estirpati da aziende specializzate, frammentati in trucioli ed utilizzati come biocarburante (a destra).

In Salento si contano almeno 36 ospiti di *X. fastidiosa*, fra piante arboree (oltre all'olivo, anche mandorlo, ciliegio, pistacchio e numerose piante ornamentali), arbustive (fra cui oleandro, rosmarino, alloro, mirto, rosmarino, ginestra, poligala) ed erbacee (lavanda, amaranto, geranio, chenopodio, pervinca, etc.), diverse delle quali asintomatiche. Il batterio viene trasmesso soprattutto da un insetto detto "sputacchina" (*Phylaenus spumarium*) (Avosani et al., 2023), oggetto di molte delle strategie di contenimento, basate soprattutto sull'eliminazione precoce delle piante erbacee sulle quali compie gli stadi giovanili. A questo si aggiunge il controllo del materiale di propagazione ed un accurato monitoraggio per limitare l'ulteriore progressione in aree indenni. Ad oggi, nelle zone infette, la principale modalità di contenimento consiste nell'utilizzazione di varietà resistenti, fra le quali troviamo Leccino ed FS17 (conosciuta anche come Favolosa) (Surano et al., 2022). La complessità della gestione di *X. fastidiosa* consiste nella necessità di una serie di interventi integrati, volti da una parte alla limitazione della presenza del vettore, con un controllo anche in aree incolte e di pertinenza di enti pubblici, limitando la diffusione di vettori infettivi in aree indenni, nonché del pronto estirpo delle piante sintomatiche nei nuovi focolai, associato all'innesto con varietà resistenti sia ove il batterio è già presente, sia dove potrebbe giungere nel prossimo futuro. A partire dal Salento e, con il tempo, risalendo la regione Puglia fino a circa la metà, le infezioni di *X. fastidiosa* stanno impattando in maniera devastante sulla bioeconomia delle aree interessate, con perdita di milioni di alberi, forte riduzione della produzione di olio d'oliva e alla perdita di posti di lavoro. Si è inoltre verificata una evoluzione del tipico paesaggio pugliese, coperto da ulivi secolari, al contempo compromettendo una economia basata sulla valorizzazione dei processi agricoli, in grado di offrire opportunità lavorative a livello professionale, familiare o hobbistico, e allo stesso tempo di utilizzare il legno prodotto con le operazioni di potatura a livello domestico e/o aziendale (ad es. nella cottura di cibi, con le tipiche bruschette o la pizza cotta in forni a legna). In termini economici, la malattia ha causato danni per oltre 10 miliardi di euro. Ha anche avuto un impatto negativo sull'immagine del *Made in Italy* e sulla promozione

del turismo. D'altro canto, le misure fitosanitarie adottate ha generato una serie di opportunità lavorative per gli ispettori coinvolti nel monitoraggio e per i laboratori di analisi fitosanitarie, chiamati ad analizzare milioni di campioni, al fine di indentificare i nuovi focolai, eradicandoli prontamente e rallentando l'evoluzione dell'epidemia. Tutte queste misure, inizialmente adottate in maniera non sempre coordinata, e di seguito perfezionate, ha portato nel 2019 all'adozione di una procedura di infrazione verso l'Italia da parte della Corte di Giustizia dell'Unione Europea, e a fine del 2023, constatata la messa a punto di un sistema di prevenzione ed azione efficiente, supportato da nuove conoscenze scientifiche, al blocco di tale procedura di infrazione verso l'Italia. Negli ultimi tempi si sta sviluppando un ulteriore aspetto di bioeconomia, purtroppo a scapito dei già provati olivicoltori, ove gli olivi disseccati vengono raccolti, senza compenso per l'agricoltore, da cantieri specializzati ed utilizzati come biocarburanti per centrali a biomasse.

Micotossine ed impatto sulla bioeconomia

Una sfida importante nella protezione delle colture, con notevole impatto sulla bioeconomia, riguarda la gestione dei danni, generalmente non visibili, dovuti alla contaminazione da micotossine. Questi metaboliti secondari sono prodotti da funghi appartenenti principalmente a tre generi, *Aspergillus*, *Penicillium* e *Fusarium*. In particolare, *Aspergillus* e *Penicillium* comprendono specie con debole attività parassitaria; pertanto, la loro presenza spesso non è accompagnata da sintomi visibili sugli organi della pianta infetti.

Le micotossine hanno in comune il fatto di essere molecole molto piccole, ma con importanti effetti acuti e cronici sulla salute dell'uomo e degli animali superiori in seguito ad ingestione, ma anche ad inalazione o contatto. Aflatossine, ocratossine e patulina, così come tricoteceni e zearalenoni sono i gruppi di molecole più tossici, regolamentati in vari paesi del mondo, e in Europa (Reg 2023/915). Gli effetti noti variano da cancerogenicità, immunosoppressione o alterazione dell'equilibrio ormonale, con diversi organi target, talvolta differenti a seconda della specie animale esposta, sempre con maggiore suscettibilità nei monogastrici. Di fatto, le micotossine rendono i prodotti contaminati non utilizzabili a scopo alimentare, con evidente effetto bioeconomico negativo.

Le colture ospite principali sono i cereali, inclusi sia quelli a paglia che il mais, la frutta secca, quella fresca, in particolare mele e uva (Tabella 2); si tratta quindi di colture che contribuiscono in modo sostanziale all'alimentazione umana ed animale. Inoltre, è da sottolineare l'importante effetto *carry over* di aflatossine e ocratossine, ovvero il passaggio dall'animale alimentato con prodotti contaminati al latte. Ciò implica un impatto che non si limita ai prodotti, ma si estende alle filiere produttive, con diverse fonti di esposizione per i consumatori.

Prodotti agricoli	Aflatossine	Fumonisine	Tricoteceni	Ocratossine	Patulina
Cereali a paglia			DON, ZEN	OTA	
Mais	AFB1	FB	DON, ZEN	OTA	
Frutta secca	AFB1, AFG1			OTA	
Frutta (mele)				OTA	PAT
Uva				OTA	PAT
Latte	AFM1			OTA	

Tabella 2. Prodotti contaminati da micotossine normate.

L'ambiente, in particolare l'andamento meteorologico durante la stagione colturale, influenza lo sviluppo dei funghi e la conseguente produzione di micotossine che avviene in condizioni ottimali differenti rispetto a quelle che massimizzano la crescita. Condizioni di stress, sia per il fungo che per la pianta, determinano la massima produzione di micotossine. È importante sottolineare anche l'interazione con altre avversità delle piante quali erbe infestanti e attacchi di insetti. Le prime, per il loro effetto competitivo nei confronti dei nutrienti, o per l'effetto sul microclima all'interno della vegetazione, contribuiscono allo stress sia della pianta che del fungo. Allo stesso modo gli insetti, causando danni diretti sulla pianta ne provocano stress, favorendo al contempo i funghi nella disseminazione e nella penetrazione negli organi della pianta. Un esempio ben noto è rappresentato da *Ostrinia nubilalis* (piralide del mais) in mais (Figura 2). Le larve danneggiano la pianta, in particolare la spiga, causando rosure e quindi perdita di produzione, ma al tempo stesso favoriscono la penetrazione di *Fusarium verticillioides* e *Aspergillus flavus* e la produzione, rispettivamente, di fumonisine e aflatossine nella granella (Palumbo et al., 2020).



Figura 2. Attacchi di piralide su mais e conseguente ingresso di funghi micotossigeni.

Intervenire per controllare funghi che causano danni limitati o nulli alla produzione, non accompagnati da chiari sintomi è certamente una sfida. La consapevolezza dei produttori è stata raggiunta solo grazie alla legislazione, che imponendo limiti massimi di presenza per diverse

micotossine in differenti prodotti agroalimentari ha determinato la costituzione di una rete di controlli analitici, svolti sia da enti pubblici che privati, che hanno confermato la necessità di occuparsi di questo tema. Importante sottolineare come a livello globale il 25% della produzione è contaminata da micotossine, percentuale che sale anche al 60-80% per tricoteceni e zearalenoni (Eskola et al., 2020), a conferma del significativo impatto delle micotossine sulla bioeconomia.

Il controllo dei funghi produttori di micotossine è un tema complesso. Innanzitutto, il controllo del fungo non comporta necessariamente il controllo della micotossina, anzi talvolta alcuni principi attivi possono anche aumentare le contaminazioni. Questo si spiega essenzialmente per due ragioni, la prima dovuta a scarsa efficacia del prodotto, e quindi causa di stress del fungo. Inoltre, i funghi micotossigeni sono spesso co-presenti, ovvero più di un genere o più di una specie è presente su di un organo della pianta ospite. Se il fungicida non agisce allo stesso modo su tutti i funghi, di fatto favorisce quelli meno sensibili generando un aumento della loro produzione di metaboliti.

In questo contesto, e in accordo con le sfide europee in merito alla riduzione dell'applicazione di fitofarmaci di sintesi, diversi sono gli studi che riguardano l'applicazione di agenti di biocontrollo. L'esempio di maggior successo è indubbiamente l'applicazione di ceppi non-aflatossigeni di *A. flavus* per ridurre la contaminazione da aflatossine, in particolare aflatossina B1, la sostanza naturale più tossica che si conosca. L'idea venne negli anni '80 al Prof. Peter Cotty dell'Università dell'Arizona, che per primo ha pensato che controllare un fungo che ha comunemente bassa incidenza è complesso, ma si può pensare di combatterlo con le sue stesse armi (Cotty, 1994). Il principio è quello della esclusione per competizione, ovvero selezionare ceppi atossigeni, molto competitivi, che distribuiti in campo possano escludere, o comunque minimizzare, la presenza dei ceppi tossigeni. Il principio attivo di questi biofungicidi deve quindi essere nativo della zona di interesse, per garantirne un ottimo adattamento all'ambiente, molto competitivo, oltre ad essere dimostrato atossigeno, privo dei geni necessari per la produzione di aflatossine, o con mutazioni efficaci in tal senso. La popolazione di *A. flavus* ha alta variabilità genetica, pur essendo a riproduzione sostanzialmente asessuata. Vi sono quindi ceppi tossigeni e atossigeni, che appartengono a vari gruppi genetici, ma sostanzialmente i ceppi atossigeni non sono in grado di scambiare materiale genetico con quelli tossigeni. Quindi, la loro distribuzione non comporta rischi di recupero dei geni responsabili della produzione di aflatossine se questi non sono presenti o sono inattivi.

Questo approccio ha dimostrato la sua efficacia negli USA, dove viene applicato su mais, cotone, arachidi, ma anche mandorlo e pistacchio, in Africa, e si sta diffondendo anche in Asia. In Italia ne abbiamo un importante esempio, con un prodotto in fase di registrazione che potrà essere impiegato nel sud-Europa (Mauro et al., 2018).

Fino al 2003 l'aflatossina era considerata un problema relativo alle zone tropicali e subtropicali, con climi caldi e piogge scarse o assenti. Dopo il primo evento di contaminazione del mais in nord Italia, appunto nel 2003 (Piva et al., 2006), scoperto grazie alla rete di controlli sul latte, è emerso chiaramente che il fungo è endemico e le contaminazioni oltre i limiti di legge si presentano sempre, in modo assolutamente sporadico, o piuttosto diffuso nelle aree maidicole, a seconda dell'andamento meteorologico durante la stagione colturale. Annate particolarmente problematiche sono state ad esempio 2012, 2015 e 2020.

D'altra parte, con il cambiamento climatico è stato previsto che il rischio di contaminazione da aflatossine aumenti, come emerge da uno studio voluto da EFSA e che ha portato ad interessanti applicazioni dei modelli previsionali e disegno di mappe di rischio

apprezzate ed utilizzate per mostrare gli scenari futuri da attori della filiera, ma soprattutto da ricercatori e *policy makers* (Figura 3).

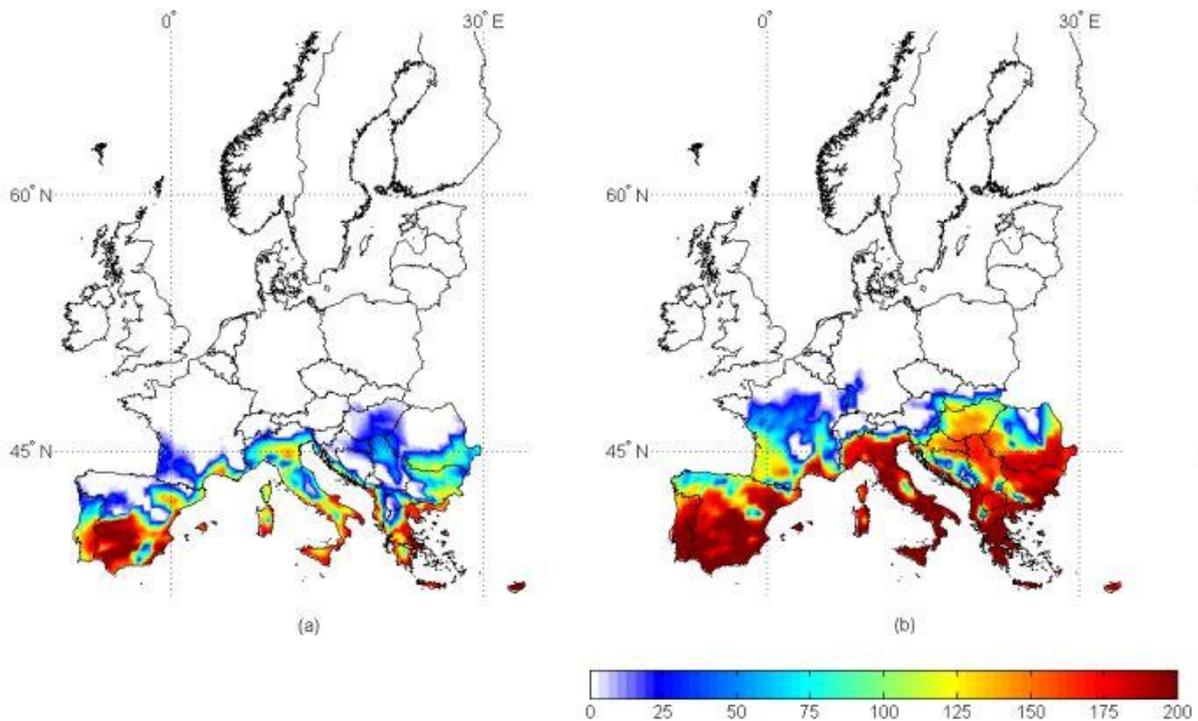


Figura 3. Mappe di rischio di contaminazione da aflatossine, che aumenta significativamente con il cambiamento climatico (a destra lo scenario con un incremento di 2°C) (Battilani et al., 2016).

Di fatto l'impiego di agenti di biocontrollo e di modelli previsionali costituiscono due importanti innovazioni nella gestione delle problematiche relative alle micotossine, e la collaborazione tra attori della difesa delle colture da diverse avversità un'importante opportunità per l'individuazione di soluzioni condivise a supporto della bioeconomia.

Il ruolo dell'entomologia nella bioeconomia

Due aspetti, apparentemente contrapposti, permeano il ruolo dell'entomologia, circoscrivendo al contempo tematiche chiave della bioeconomia. Da una parte, la consolidata e sempre più attuale necessità di controllare *pest* dannosi economicamente, tematica resa più difficoltosa, soprattutto in tempi recenti, dalla incessante invasione di specie esotiche (alloctone); i ritmi di invasione di insetti dannosi nel nostro paese sono infatti quadruplicati negli ultimi 40 anni, circostanza che influenza enormemente la ricerca in questo settore scientifico. Dall'altra parte, come elemento opposto, troviamo l'importante esigenza di salvaguardare e conservare l'entomofauna e i servizi sistemici associati, *in primis* impollinazione e controllo biologico, per arginare la crisi della biodiversità (Johnson et al., 2017), problematica che sta coinvolgendo molti specialisti di questo settore scientifico ma che suscita sempre più un interesse pubblico. Il declino della biodiversità è una problematica complessa e multifattoriale, in cui l'utilizzo degli agrofarmaci svolge un ruolo di primo piano, ma che coinvolge anche altri aspetti come i cambiamenti climatici, l'invasione di specie

esotiche, la semplificazione e la frammentazione degli ambienti naturali e coltivati (Abell, 2002; Biesmeijer et al., 2006; Rhodes, 2019).

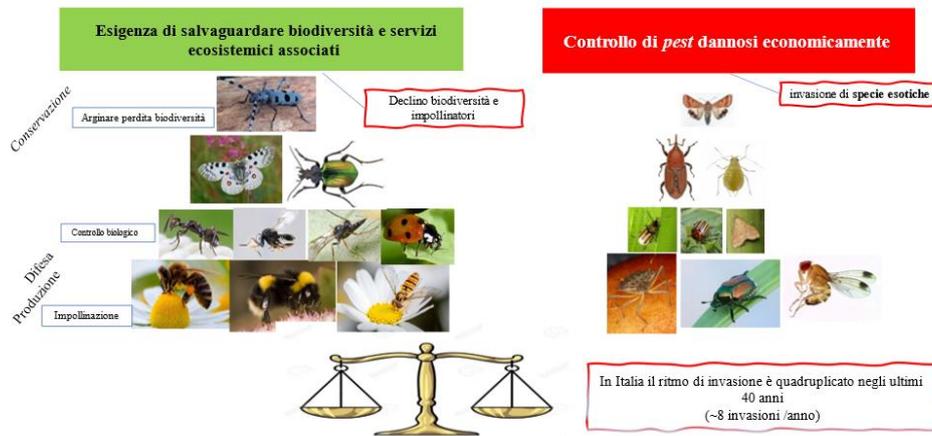


Figura 4. Aree di interesse dell'entomologia agraria.

Nel tema prettamente legato alla protezione delle piante, prevale sempre di più la necessità di una filosofia multi-tattica, e con essa l'esigenza di un reale approccio olistico di sistema (evocato comunque già agli albori della nascita dell'IPM). Le richieste (per alcuni un'esigenza) di riduzione degli agrofarmaci legate alle strategie «Farm to Fork», aspetto attualmente molto dibattuto, determina l'esigenza di potenziare metodi agroecologici su diverse scale operative. In questi ambiti, gli studi sulla selettività degli agrofarmaci verso l'entomofauna utile stanno ricevendo grande interesse e impulso, e in particolare gli approcci di tipo ecotossicologico, che prevedono gli effetti di tipo cronico e quelli legati all'esposizione multipla di insetticidi e fungicidi (Di Prisco et al., 2013; Sgolastra et al., 2018; Tosi et al., 2017; 2022). Attualmente la caratterizzazione dei prodotti insetticidi "naturali" nella difesa, compresi quelli di origine vegetale, riveste un grande interesse per poter rispondere all'aumento delle superfici in biologico, allo scopo di fornire sempre più caratterizzazioni tecniche per la loro efficacia di campo e per delineare potenziali effetti non-target mediante studi di selettività (Duso et al., 2022; Catania et al., 2023). Inoltre, si sta definendo sempre più un processo decisionale plurimo nella difesa che combini la gestione degli insetti dannosi (IPM) con l'esigenza di arginare le potenziali perdite di produzione dovute a deficit di impollinazione (IPPM, *Integrated Pest and Pollinator Management*) causate da un uso non razionale dei mezzi di difesa, primi fra tutti gli agrofarmaci (Egan et al., 2020). Misure pro-impollinatori sono promosse dalla Commissione europea e da sostegni PAC (es Ecoschema 5), che stanno promuovendo un "sistema di bio-monitoraggio globale" a livello UE per questi taxa. E' interessante notare come queste azioni abbiano rivalutato le ricerche sulla tassonomia e sulla sistematica, compresi i metodi morfologici tradizionali, basilari anche nelle *integrative taxonomy*.

Gli studi sulla comunicazione chimica degli insetti, e le relative tecniche di manipolazione per la difesa, sono un altro aspetto portante della ricerca entomologica. Da sottolineare come, fra i mezzi biotecnici, l'uso applicato dei feromoni sia trasversale fra i disciplinari di produzione integrata e biologica, e come abbia tradizionalmente permeato la ricerca nella comunità entomologica. Attualmente sono circa 500 i diversi feromoni disponibili in commercio per un uso agrario e forestale. La tecnica del *mating disruption*, che comprende confusione e disorientamento sessuale, è ormai applicata su circa 150.000 ettari in Italia, per un

valore di mercato nel 2020 di circa 35 milioni di euro. Da notare come questo ambito di ricerca in entomologia abbia da sempre creato un binomio tra ricercatori del settore e industria, nella realizzazione di un approccio della difesa che mostra vantaggi dovuti alla specificità e all'ottimo impatto ambientale.

Entrando negli approcci più spiccatamente biotecnologici, molto interesse è rivolto a tecniche specifiche come RNAi (che necessita anche di sviluppare metodi di *risk assessment*, nel contesto legislativo che riguarda i prodotti di protezione per le piante) (Mezzetti et al., 2020) e Controllo Simbiotico (Gonella et al., 2019) (che si basa sulla eliminazione o manipolazione di simbionti di insetti), che potrebbero ampliare lo scenario della difesa per la gestione di *pest* particolarmente dannosi.

È fondamentale sottolineare la grande attualità di quella disciplina che rappresenta l'“eterno ritorno” per l'entomologia, e cioè il controllo biologico delle specie dannose, che ha permeato dal 1890 fino a oggi la ricerca scientifica, conseguendo importanti risultati. In particolare, recenti grandi progetti nazionali di controllo biologico mediante il “metodo classico” (*classical biological control*, CBC, basato sull'utilizzo di specie entomofaghe coevolute con *pest* di origine esotica) hanno riportato un grande impulso a questa importante tecnica strettamente legata alla difesa. Precisando che il CBC è attualmente regolamentato da norme precise, in tempi recenti alcuni progetti di grande *governance* partecipativa hanno caratterizzato l'attività della comunità scientifica. Questi progetti nazionali, finalizzati al controllo di importanti *pest* esotici di recente introduzione (*Dryocosmus kuriphilus* del castagno, *Hyalomorpha halys* o cimice asiatica, *Drosophila suzuki* o moscerino dei piccoli frutti), sono stati infatti caratterizzati da una partecipazione corale veramente imponente da parte di tutta la comunità entomologica, comprese università, altri centri di ricerca ed enti pubblici, servizi fitosanitari ed organizzazioni ministeriali (Quacchia et al., 2007; Loro et al., 2021; Rossi Stacconi et al., 2021; Masetti et al., 2023). Il controllo biologico, nelle sue diverse tattiche (c.b. classico, aumentativo, conservativo), opera su importanti scenari, toccando la sfera produttiva (es. disciplinari di difesa e produzione), le tecnologie di allevamento delle specie entomofaghe (es. biofabbriche), l'applicazione degli schemi agroambientali e l'*habitat management* nell'azienda agraria.

Come nota conclusiva, si ricorda che è proprio un insetto, *Hermetia illucens*, a rivestire grande importanza in numerose ricerche sull'economia circolare; questo dittero, chiamato mosca soldato, è un decompositore che vanta un'efficacia sorprendente nei processi di bioconversione delle sostanze di scarto di origine organica, fornendo al contempo proteine e grassi per gli allevamenti animali. Numerosi studi e progetti nazionali e internazionali, che coinvolgono anche l'entomologia, sono in corso per progettare e validare modelli sostenibili che uniscano l'annoso problema della gestione dei rifiuti con quello delle produzioni animali sostenibili (Leonardi et al., 2016; Barragan-Fonseca et al., 2017).

Ruolo della nematologia nella bioeconomia

Il ruolo dei nematodi nella bioeconomia è rilevante per diversi e contrastanti motivi: a) i nematodi sono gli animali più abbondanti nel suolo di tutto il mondo con un numero di individui stimato di oltre 4×10^{20} ; b) il loro ruolo ecologico ed il contributo alla biodiversità è sempre più considerato un pilastro per molti servizi ecosistemici; c) i nematodi parassiti costituiscono un grave problema per la salute umana, animale e delle piante. Le perdite nell'ambito agrario dovute ai nematodi fitoparassiti sono di oltre 215,77 miliardi €/anno con una perdita mondiale di circa il 12% nelle 20 maggiori colture mondiali (Sikora et al., 2021; Žibra et al., 2023).

Per renderci conto della loro importanza basta pensare alla famosa frase dello zoologo Edward Wilson "It's a Nematode World!" ovvero circa 57 miliardi di nematodi per ogni umano sulla Terra. Stante la loro rilevante abbondanza e biodiversità, i nematodi forniscono moltissimi servizi ecosistemi occupando diversi livelli della catena trofica. La biodiversità costituita dalle comunità dei nematodi è da conservare, così come esplicitamente evidenziato anche dall'Autorità Europea per la Sicurezza Alimentare (EFSA), che mette in evidenza la necessità di conservare la nematofauna indicandola tra gli *specific protection goals* (SPGs), ed elenca anche i più importanti servizi ecosistemi forniti dai nematodi (EFSA, 2015) tra i quali spicca sicuramente la regolazione dei diversi patogeni e parassiti delle piante. I nematodi, infatti, possono essere considerati agenti di contenimento per: batteri e funghi patogeni delle piante, malerbe, predatori di nematodi fitofagi, parassiti o entomopatogeni di insetti fitofagi, di molluschi fitofagi, di vertebrati dannosi. I nematodi hanno dunque una importante funzione di regolazione delle popolazioni di altri organismi a seconda del loro regime alimentare (Figura 5).

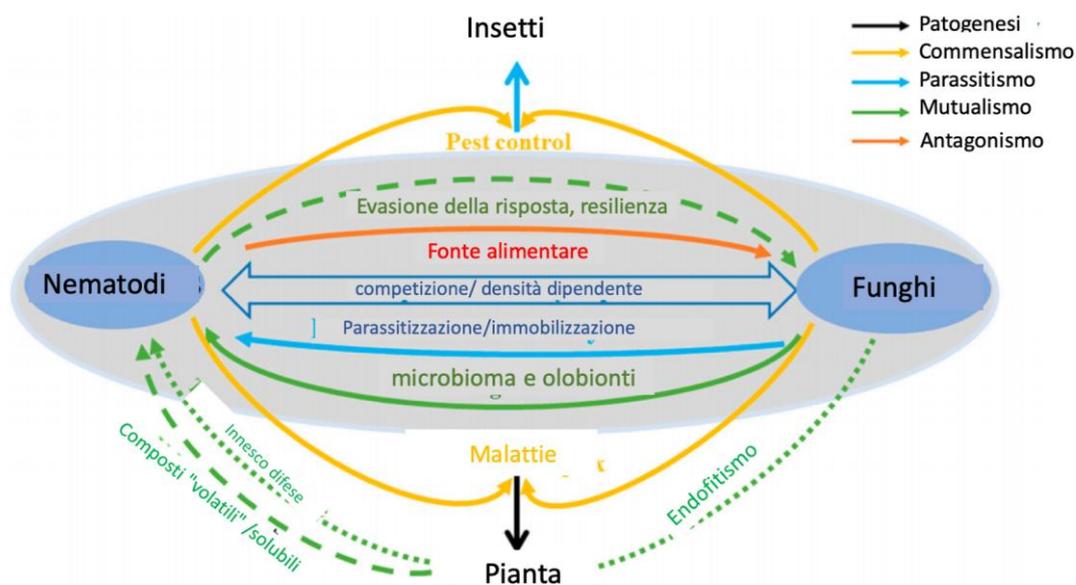


Figura 5. Schema semplificato delle relazioni tra nematodi, piante, insetti e funghi e loro regolazione.

Alcuni nematodi entomopatogeni, in particolare specie dei generi *Steinernema* e *Heterorhabditis* sono disponibili sul mercato per contrastare insetti dannosi all'agricoltura, incluse specie aliene invasive (Manachini et al., 2013). Recentemente, inoltre, vi sono studi per impiegare la mosca soldato *Hermetia illucens*, utilizzata nella valorizzazione degli scarti organici, come ospite per la produzione di nematodi entomopatogeni.

Oltre alla regolazione delle popolazioni di parassiti e patogeni delle piante, i nematodi svolgono altri ruoli fondamentale nella bioeconomia, influenzando la produttività agricola, la salute del suolo e la sostenibilità ambientale. Il loro impatto positivo può essere sfruttato attraverso l'uso di strategie di controllo biologico, la promozione di pratiche di gestione agricola sostenibili e il monitoraggio della qualità del suolo (Figura 6).



Figura 6. Aumento della riduzione della biodiversità dei nematodi e dei servizi ecosistemi forniti dai nematodi all'aumentare dell'intensificazione delle pratiche agricole (modificato da Rueda-Ramírez et al., 2022).

Il continuo studio e la comprensione dei nematodi e del loro ruolo nella bioeconomia possono essere di grande beneficio per l'agricoltura e la conservazione dell'ambiente. I nematodi proprio per il loro importantissimo ruolo nell'ecosistema suolo sono considerati ottimi bioindicatori, e basandosi su di essi sono stati costruiti degli appositi biosaggi (Garbo et al., 2019) ed indici di biodiversità e di valutazione dello stato del suolo. Questi indici sono stati formulati non solo tenendo conto della specie e della sua abbondanza ma anche della loro biologia ed ecologia, così come si evidenzia dall'indice di maturità di diversi indici ecologici (EFSA, 2017). Preservare la diversità e l'abbondanza dei nematodi nei suoli agricoli è essenziale per una produzione sostenibile di cibo e per la salute dell'ecosistema agricolo. Monitorare le comunità di nematodi può aiutare a valutare l'efficacia delle pratiche di gestione ambientale e identificare eventuali problemi precocemente nonché fornire informazioni preziose sulla biodiversità generale di un ecosistema (Figura 6).

Tra i nematodi ci sono però anche nematodi fitofagi e tra questi più di 4000 specie arrecano gravi danni alle principali colture agrarie e forestali. La gestione dei nematodi infestanti le colture agricole è un aspetto cruciale della bioeconomia. Il loro controllo è stato spesso affidato ad agrofarmaci ad azione fumigante: in passato è stato molto utilizzato il bromuro di metile, molecola da tempo vietata a causa degli effetti negativi sull'ambiente e sull'uomo. A causa della ridotta disponibilità di prodotti efficaci registrati per la lotta ai nematodi, in particolar modo cisticoli (es. *Heterodera* spp.) e galligeni (es. *Meloidogyne* spp.), viene ancora concesso l'uso di emergenza dell'1,3-dicloropropene (1,3 D) su determinate colture e zone geografiche, anche se il suo utilizzo è vietato da diversi anni. Diverse strategie sono state messe appunto per controllare i nematodi in modo più sostenibile, come ad esempio la rotazione delle colture, l'utilizzo di piante resistenti ai nematodi o l'applicazione di prodotti biologici contenenti antagonisti dei nematodi (Figura 7).

Esempi di strategie alternative all'utilizzo dei nematocidi per il controllo dei nematodi fitofagi

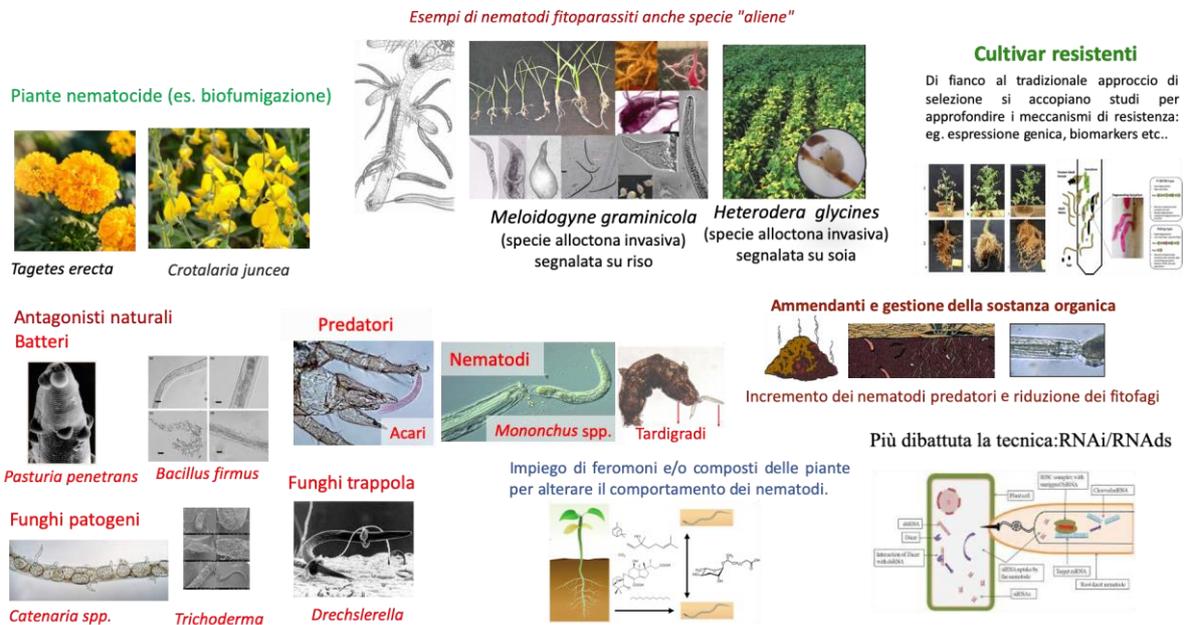


Figura 7. Alcuni esempi di pratiche per il controllo dei nematodi fitofagi in agricoltura alternative all'impiego dei nematocidi.

Una particolare menzione va fatta sull'impiego dei diversi ammendanti nel controllo dei nematodi fitoparassiti e/o nella promozione della biodiversità edafica. Ad esempio, si è visto che l'impiego di letame maturo aumenta la biodiversità dei nematodi e conseguentemente incrementa anche la biodiversità degli acari del suolo e può avere effetti positivi sulla produttività della coltura. Ammendanti organici e compost hanno esplicato una azione positiva anche nei confronti dei nematodi entomopatogeni riducendo l'attacco di insetti fitoparassiti, come evidenziato in alcuni studi sulla vite (Landi et al., 2022). Tra i possibili metodi di contrasto ai nematodi, la biofumigazione, ovvero l'impiego (sovescio) di piante con azione nematocidica o nematostatica, sta dando buoni risultati (Mocali et al., 2015). Le principali famiglie di piante impiegate per il controllo dei nematodi appartengono specie e cultivar selezionate per un elevato contenuto di sostanze bioattive sono quelle delle Brassicacee, Fabacee e Poacee. Il meccanismo di azione è diverso a seconda delle specie vegetali e della famiglia di appartenenza. Le Brassicacee hanno nei tessuti vegetali alcuni glucosinolati che in presenza di acqua e di lesioni nella pianta reagiscono con un enzima interno, mirosinasi, producendo isotiocianato, la stessa molecola dei fumiganti chimici. Le piante si distinguono poi in piante trappola (*catch crop*) e piante ad azione biofumigante, che hanno elevate concentrazioni di glucosinolati biologicamente attivi soprattutto nella parte aerea della pianta (steli e foglie) e sono impiegate come colture intercalari da sovescio. In commercio inoltre esistono diversi antagonisti come i batteri Gram positivi del genere *Pasteuria*, antagonisti specifici caratterizzati da endospore infettive e durevoli, dal tipico aspetto a ventosa, oppure il batterio aerobio gran positivo *Bacillus firmus* ed i funghi *Paecilomyces lilacinus* e *Trichoderma* spp. (principalmente *T. harzianum* e *T. viride*) che sta sempre più rivelandosi una valida alternativa nel controllo dei nematodi. A causa degli alti costi di produzione molti funghi potenzialmente in grado di controllare le popolazioni dei nematodi fitoparassiti non hanno riscosso successo a livello commerciale. Rientrano in questa categoria i funghi nematoparassiti quali *Catenaria* spp. e *Lagenidium* spp., che penetrano l'ospite attraverso la cavità boccale

mediante zoospore, e i funghi predatori che possono costituire reti ifali o trasformarsi in veri e propri lacci come in *Arthrobotrys* spp. e *Dactylella* spp.

Particolarmente interessante, in un'ottica di bioeconomia, è il potenziamento dell'efficacia degli agenti biologici di controllo dei nematodi fitofagi mediante l'utilizzo di additivi naturali che possono migliorare il contatto del batterio o del fungo ai tessuti vegetali e contemporaneamente svolgere anche un ruolo di protezione dai nematodi. Fino ad oggi l'applicazione di questa tipologia di biopolimeri è stata utilizzata principalmente nel settore farmaceutico, ma è noto che può migliorare notevolmente la distribuzione e l'efficacia dei prodotti a base di spore. L'uso di polimeri derivati dalle piante offre l'opportunità di avere sostanze biocompatibili, biodegradabili e rinnovabili. I primi risultati ottenuti combinando i trattamenti di *Trichoderma* spp. con il polisaccaride galattomannano ottenuto dagli scarti della leguminosa *Ceratonia siliqua* hanno dato ottimi risultati. Resti e scarti vegetali usati come nematocidi stanno sempre più prendendo piede. Buoni risultati contro *Meloidogyne incognita* si sono ottenuti anche con l'impiego diretto di glicoalcaloidi da bucce di patata e da *Eruca sativa*, la comune rucola. Molti altri estratti da resti di piante come da aglio, ortica hanno dato buoni risultati contro i nematodi galligeni e cisticoli. Le interazioni tra la pianta ed i nematodi, nonché all'interno delle popolazioni dei nematodi sono sempre più studiati anche dal punto di vista della "chemical ecology" e ad oggi ci sono chiare evidenze di quali essudati radicali inducano la schiusa delle uova dei nematodi, attirino o respingano l'attacco degli stessi, quali siano i feromoni che regolano le comunicazioni intraspecifiche come ad esempio attraverso feromoni sessuali, di aggregazione o di allarme (Machado et al., 2022). Attualmente un grande impulso sta venendo anche dalle tecnologie basate sul silenziamento dell'RNAi anche se il loro ruolo in agricoltura è ancora fortemente dibattuto in molti paesi.

Tutte queste strategie contribuiscono a ridurre l'utilizzo di fitofarmaci chimici e a promuovere l'agricoltura sostenibile (Figura 7). Il controllo dei nematodi con metodi alternativi ai mezzi chimici di sintesi è oltremodo auspicabile. Per questo motivo è necessario procedere con l'approfondimento della ricerca ai diversi livelli. Lo studio dei nematodi si spinge anche negli ambiti della mangimistica in piscicoltura, e nell'allevamento degli anfibi. I nematodi peraltro sono impiegati anche per valutare gli effetti sulla embriogenesi, fisiologia, proteomica e genomica di numerose sostanze, con risultanze applicabili su altri organismi. È possibile concludere che questo *phylum* promette nel futuro novità sorprendenti in diversi ambiti della bioeconomia e pertanto merita particolare attenzione.

Conclusioni

La protezione delle piante dalle avversità richiederà sempre maggiori energie, risorse e ricerca, in quanto si dovranno affrontare le crescenti problematiche fitosanitarie, spesso aggravate dall'introduzione di nuovi organismi, con sempre meno strumenti classici a disposizione, quali i prodotti chimici di sintesi. Pertanto, è necessario intensificare la ricerca e la sperimentazione di alternative a più basso impatto ambientale (agenti di biocontrollo, sostanze naturali, sostanze di base) ed integrare le diverse strategie di protezione. Un'attenzione particolare dovrà essere volta alla preservazione degli equilibri naturali, valorizzando ove possibile gli agenti di biocontrollo ed i meccanismi di regolazione naturali. Tutto ciò può contribuire ad una bioeconomia che promuove un'attività agricola sempre più sostenibile.

Bibliografia

Abell R., 2002. Conservation biology for the biodiversity crisis: a freshwater follow-up. *Conservation Biology*, 16(5), 1435-1437.

- Avosani S., Nieri R., Mazzoni V., Anfora G., Hamouche Z., Zippari C., Vitale M.L., Verrastro V., Tarasco E., D'Isita I., Germinara S., Döring T., Belusic G., Fereres A., Thompson V., Comara D., 2023. Intruding into a conversation: how behavioral manipulation could support management of *Xylella fastidiosa* and its insect vectors. *Journal of Pest Science*, <https://doi.org/10.1007/s10340-023-01631-7>
- Barragan-Fonseca K.B., Dicke M., van Loon J.J.A., 2017. Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed – a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105-120.
- Battilani P., Toscano P., Van der Fels-Klerx H.J., Moretti A., Camardo Leggieri M., Brera C., Rortais A., Goumperis T., Robinson T., 2016. Aflatoxin B₁ contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6, 24328. <https://www.nature.com/articles/srep24328>
- Beckerman J., Palmer C., Tedford E., Ypemaet H., 2023. Fifty years of fungicide development, deployment, and future use. *Phytopathology*, 113, 694-706. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PHYTO-10-22-0399-1A>
- Biesmeijer J. C., Roberts S. P. M., Reemer M., Ohlemüller R., Edwards M., Peeters T., Schaffers A. P., Potts S. G., Kleukers R., Thomas C. D., Settele J., Kunin I. W. E., 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science*, 313, 351-354.
- Catania R., Pereira Lima M.A., Potrich M., Sgolastra F., Zappalà L., Mazzeo G., 2023. Are botanical biopesticides safe for bees (Hymenoptera, Apoidea)? *Insects*, 14, 247. <https://doi.org/10.3390/insects14030247> <https://doi.org/10.3390/insects14030247>
- Cotty P.J., 1994. Influence of field application of an atoxigenic strain of *Aspergillus flavus* on the population of *A.flavus* infecting cotton bolls and on the aflatoxin content of cottonseed. *Biological Control*, 84(11), 1270-1277.
- Di Prisco G., Cavaliere V., Annoscia D., Varricchio P., Caprio E., Nazzi F., Gargiulo F., Pennacchio F., 2013. Neonicotinoid clothianidin adversely affects insect immunity and promotes replication of a viral pathogen in honey bees. *PNAS*, 110(12), 18466-18471.
- Duso C., Pozzebon A., Lorenzon M., Fornasiero D., Tirello P., Simoni S., Bagnoli B., 2022. The impact of microbial and botanical insecticides on grape berry moths and their effects on secondary pests and beneficials. *Agronomy*, 12, 217. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010217>.
- EFSA Panel on Plant Protection Products and their Residues (PPR), Ockleford, C., Adriaanse, P., Berny, P., Brock, T., Duquesne, S., Manachini, B.,..... & Rob, S., 2017. Scientific opinion addressing the state of the science on risk assessment of plant protection products for in-soil organisms. *EFSA Journal*, 15(2), e04690.
- Egan P. A., Dicks L. V., Hokkanen H. M.T., Stenberg J. A., 2020. Delivering Integrated Pest and Pollinator Management (IPPM). *Trends in Plant Science*, 25(6), 577-589.
- Eskola M., Gregor K., Elliott C., Hajšlová J., Mayar S., Krška R., 2020. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25%. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60 (16), 2773-2789 <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>
- Garbo F., Pivato A., Manachini B., Moretto C.G., Lavagnolo M.C., 2019. Assessment of the ecotoxicity of phytotreatment substrate soil as landfill cover material for in-situ leachate management. *Journal of Environmental Management* 231, 289-296.
- Gonella E., Orrù B., Alma A., 2019. Egg masses treatment with micronutrient fertilizers has a suppressive effect on newly-emerged nymphs of the brown marmorated stink bug *Halyomorpha halys*. *Entomologia Generalis*, 39, 231-238.
- Johnson C. N., Balmford A., Brook B. W., Buettel J. C., Galetti M., Guanchun L., Wilmshurst J. M., 2017. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene. *Science*, 356, 270-275.
- Landi S., Valboa G., Vignozzi N., d'Errico G., Pellegrini S., Simoncini S., Torrini G., Roversi P.F., Priori S., 2023. Response of nematode community structure to different restoration practices in two vineyard soils in Tuscany (Italy). *Biological Agriculture and Horticulture*, 1-21.
- Leonardi M.G., Jucker C., Savoldelli S., Palamara Mesiano M., Lupi D., Casartelli M., Bonelli M., Cappellozza S., Bruno D., Romanelli D., Tettamanti D. Utilizzo di *Hermetia illucens* per la produzione di proteine da substrati vegetali. XXV CNIE Padova, 20-24 giugno 2016: 286.
- Loru L., Mannu R., Guerrieri E., Pantaleoni R.A., 2021. Disentangling the effects of the invasive pest, *Dryocosmus kuriphilus*, and the introduction of the biocontrol agent, *Torymus sinensis*, on native parasitoids in an isolated insular chestnut-growing area. *Biological Control*, 162, 104724.
- Machado R.A.R., von Reuss S.H., 2022. Chemical Ecology of Nematodes. *CHIMIA* 76(11), 945-953.
- Manachini B., Schillaci, D., Arizza, V., 2013. Biological responses of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) to *Steinernema carpocapsae* (Nematoda: Steinernematidae). *Journal of economic entomology*, 106(4), 1582-1589.
- Masetti A., Costi E., Lami F., Zaniboni A., Torreggiani D., Vaccari G., Caruso S., Preti M., Fagioli L., Manucci F., Ferrari R., Bariselli M., Tommasini M.G., Burgio G., Maistrello L., 2023. Effects of *Trissolcus japonicus* releases on the distribution and the parasitism rate of *Halyomorpha halys* egg parasitoids in Emilia-Romagna region, Northern Italy. XII European Congress of Entomology, Crete, Greece, Book of Abstracts: 288-289
- Mauro A., Garcia-Cela E., Pietri, A., Cotty P.J., Battilani P., 2018. Biological control products for aflatoxin prevention in Italy: commercial field evaluation of atoxigenic *Aspergillus flavus* active ingredients. *Toxins*, 10(1), 30. <https://doi.org/10.3390/toxins10010030>
- Mezzetti B., Smaghe G., Arpaia S., Christiaens O., Dietz-Pfeilstetter A., Jones H., Kostov K., Sabbadini S., Opsahl-Sorteberg H.-G., Ventura V., Taning C.N.T., Sweet J., 2020. RNAi: what is its position in agriculture? *Journal of Pest Science*, 93, 1125-1130.
- Mocali S., Landi S., Curto G., Dallavalle E., Infantino A., Colzi C., d'Errico G., Roversi P.F., D'Avino L., Lazzeri L., 2015. Resilience of soil microbial and nematode communities after biofumigant treatment with defatted seed meals. *Industrial Crops and Products*, 75, 79-90.
- Palumbo R., Gonçalves A., Gkrillas A., Logrieco A., Dorne J.-L., Dall'Asta C., Venâncio A., Battilani P., 2020. Mycotoxins in maize: mitigation actions, with a chain management approach. *Phytopathologia Mediterranea* 59(1). 5-28. <https://doi.org/10.14601/Phyto-11142>
- Piva G., Battilani P., Pietri A., 2006. Emerging issues in southern Europe: aflatoxins in Italy. In A. Barug, D., Bhatnagar, D., Van Egmond, H.P., Van der Kamp, J.W., Van Ossenbruggen, W.A. and Visconti (Ed.), *Emerging issues in southern Europe: aflatoxins in Italy* (pp. 139-135). Wageningen Academic Publishers.
- Prusky D., Romanazzi G., 2023. Induced resistance in fruit and vegetables: a host physiological response limiting postharvest disease development. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 279-300. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021722-035135>
- Purcell A.H., Hopkins D.L., 1996. Fastidious xylem-limited bacterial plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 34, 131-151. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.34.1.131>
- Quacchia A., Moriya S., Bosio G., Scapin I., Alma A., 2008. Rearing, release and settlement prospect in Italy of *Torymus sinensis*, the biological control agent of the chestnut gall wasp *Dryocosmus kuriphilus*. *BioControl*, 53, 829-839.

- Rhodes C.J., 2019. Are insect species imperilled? Critical factors and prevailing evidence for a potential global loss of the entomofauna: A current commentary. *Science Progress*, 102(2) 181–196.
- Romanazzi G., Orçonneau Y., Moumni M., Davillerd Y. Marchand P.A., 2022. Basic substances, a sustainable tool to complement and eventually replace synthetic pesticides in the management of pre and postharvest diseases: reviewed instructions for users. *Molecules*, 27(11), 3484. . <https://doi.org/10.3390/molecules27113484>
- Rossi Stacconi M.V., Anfora G., Grassi A., Ioriatti C., 2021. Progetto di lotta biologica per il rilascio del parassitoide *Ganaspis brasiliensis*. Atti 7ª giornata tecnica Piccoli frutti. Fondazione Edmund Mach, Centro Trasferimento Tecnologico.
- Rueda-Ramírez, D., Palevsky, E., Ruess, L., 2022. Soil Nematodes as a Means of Conservation of Soil Predatory Mites for Biocontrol. *Agronomy*, 13(1), 32.
- Saponari M., Boscia D., Nigro F., Martelli G.P., 2013. Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 95, 668. <https://doi.org/10.4454/JPP.V95I3.035>
- Sgolastra F., Arnan X., Cabbri R., Isani G., Medrzycki P., Teper D., Bosch J., 2018. Combined exposure of sublethal concentration of an insecticide and a fungicide affect feeding, ovary development and longevity in a solitary bee. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285, 20180887.
- Sikora R., Coyne D., Hallman J., Timper P. Plant Parasitic Nematodes, 2021. The World's Most Important Crop pathogen? CABI Blog. Available online: <https://blog.cabi.org/2018/07/24/plant-parasitic-nematodes/> /accesso 2 settembre 2023)
- Surano A., Abou K.R., Nigro F., Altamura G., Losciale P., Saponari M., Saldarelli P., 2022. Susceptible and resistant olive cultivars show differential physiological response to *Xylella fastidiosa* infections. *Frontiers in Plant Science*, 1320, 968934. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.968934>
- Tosi S., Sfeir C., Carnesecchi E., van Engelsdorp D., Chauzat M.P., 2022. Lethal, sublethal, and combined effects of pesticides on bees: A meta-analysis and new risk assessment tools. *Science of the Total Environment* 844: 156857.
- Tosi S., Burgio G., Nieh J.C., 2017 - A common neonicotinoid pesticide, thiamethoxam, impairs honey bee flight ability. *Scientific Reports*, 7, 1201.
- Žibrat, U., Viaene, N., Širca, S., van Beek, J., Susič, N., & Stare, B. G. 202). NemDetect: Early detection of quarantine nematodes in potatoes using remote sensing. *EFSA Supporting Publications*, 20(12), 8143E.

Il ruolo dei suoli nella bioeconomia

Bonifacio E.¹, Celi L.¹, Dazzi C.², Vittori Antisari L.³, Zaccone C.⁴

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università degli Studi di Torino

²Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali, Università degli Studi di Palermo

³Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università degli Studi di Bologna

⁴Dipartimento di Biotecnologie, Università degli Studi di Verona

Riassunto

Il piano d'azione predisposto per il raggiungimento degli obiettivi della strategia europea per la bioeconomia prevede una migliore conoscenza dei limiti ecologici delle risorse, tra cui il suolo. La scienza del suolo ha raccolto la sfida e indirizzato le ricerche verso la comprensione dei meccanismi alla base della sostenibilità, valutando i fattori che influiscono sui servizi ecosistemici che il suolo fornisce. Questo testo porta alcuni esempi relativi al ruolo del suolo e all'importanza del considerarne la variabilità nella produzione primaria, agraria e forestale, e nella mitigazione del cambiamento climatico. Sovente, usi teoricamente ottimali per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile non sono adeguati poiché introdotti su suoli non adatti allo scopo, in cui i *trade-offs* tra servizi ecosistemici superano le sinergie. Come conseguenza, le perdite di carbonio dal suolo possono superare le quantità stoccate nelle biomasse coltivate a scopo energetico e il rimodellamento delle superfici per ottenere una maggiore produzione può portare a perdita di fertilità e ad erosione genetica della risorsa suolo. Un approccio olistico e una maggiore considerazione della variabilità del suolo sembrano quindi essenziali nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità tipici della bioeconomia.

Abstract

The working plan for reaching the objectives of the European Strategy for Bioeconomy involves an improved understanding of the ecological limits of the soil and the other natural resources. Soil Science has moved towards this aim, and many researches have been performed on the mechanisms on which sustainability stems, and on the delivery of ecosystem services by the soil. This article provides some examples on the role of the soil in sustaining primary production, in agriculture and forestry, as well as in the mitigation of climate change. Sometimes, land uses that seem to have a high potential in reaching the sustainable development goals proved to be less than optimal because of an incorrect soil selection. In these cases, trade-offs overcome synergies among ecosystem services, leading to losses of soil organic matter that overcome the amounts of carbon stored in living biomass, or to losses of soil fertility upon land reshaping for the improvement of agricultural production. Considering soil variability and a more holistic approach in aiming at sustainability and bioeconomy seem therefore essential.

Keywords: *Produzione primaria, cambiamento climatico, variabilità del suolo, servizi ecosistemici*

Introduzione

La strategia europea per la bioeconomia comprende cinque macro-obiettivi che, in linea con gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite (Agenda 2030), mirano a cambiare il futuro dell'umanità rendendo il mondo più giusto e vivibile, garantendo a tutti la sicurezza alimentare, riducendo la dipendenza da fonti di energia non rinnovabile, mitigando il cambiamento climatico e rafforzando la competitività economia dell'Unione Europea (UE). Per il raggiungimento di questi ambiziosi obiettivi, è stato predisposto un piano d'azione in cui una delle linee di intervento prevede un miglioramento della conoscenza dei limiti ecologici della bioeconomia tramite una maggiore conoscenza della biodiversità e del funzionamento degli

ecosistemi, lo sviluppo di pratiche che mantengano la bioeconomia entro limiti ecologici sostenibili, e la valorizzazione dei benefici legati alla biodiversità nella produzione primaria. L'implementazione di tutte queste linee di intervento non può prescindere da un'appropriate conoscenza della risorsa suolo. La scienza del suolo ha raccolto questa sfida e la produzione scientifica su questo tema è aumentata vertiginosamente nel corso degli anni (Figura 1). L'unione delle parole "soil" e "bioeconomy" compare nella banca dati *Scopus* per la prima volta nel 2007, con un totale a Febbraio 2023 di 302 articoli pubblicati. La crescita di interesse sembra però inferiore a quanto avvenuto in altri campi del sapere. Infatti, nel 2014, 102 lavori riportavano nel riassunto o nel titolo il termine "bioeconomy" (Bugge et al., 2019), ma solamente 4 contenevano anche la parola "soil". Ciò non è però da intendersi come una scarsa attenzione verso i temi di ricerca legati alla bioeconomia, ma piuttosto come una diversità di linguaggio che caratterizza chi si occupa di suolo. Infatti, osservando la frequenza con cui le parole compaiono nei titoli dei 302 articoli (Figura 2), si nota come, oltre a biomasse, sottoprodotti e residui, tutti termini in linea con i temi più noti dell'economia circolare, la parola più frequentemente usata sia connessa alla sostenibilità. Quest'ultimo è un termine sempre più frequentemente utilizzato nella scienza del suolo, che sembra quindi adottare la definizione di bioeconomia fornita dalla FAO: "the production, use and conservation of biological resources, including related knowledge, science, technology, and innovation to provide information, products, processes and services to all economic sectors with the aim of moving towards a sustainable economy". Se si considerano quindi gli approcci alla bioeconomia descritti da Bugge e collaboratori (2019), i.e. approccio biotecnologico, approccio orientato alle biorisorse e approccio bioecologico, è evidente come la scienza del suolo si allinei sia con la seconda linea di ricerca, quella sulle biorisorse, ma anche con la terza, enfatizzando i processi ecologici che ottimizzano l'uso di energia e nutrienti, promuovono la biodiversità ed evitano la degradazione del suolo. Di seguito sono forniti alcuni esempi di ricerche recenti, a livello nazionale ed internazionale, in linea con le linee strategiche dell'UE per la bioeconomia, in cui viene seguito questo approccio bioecologico.

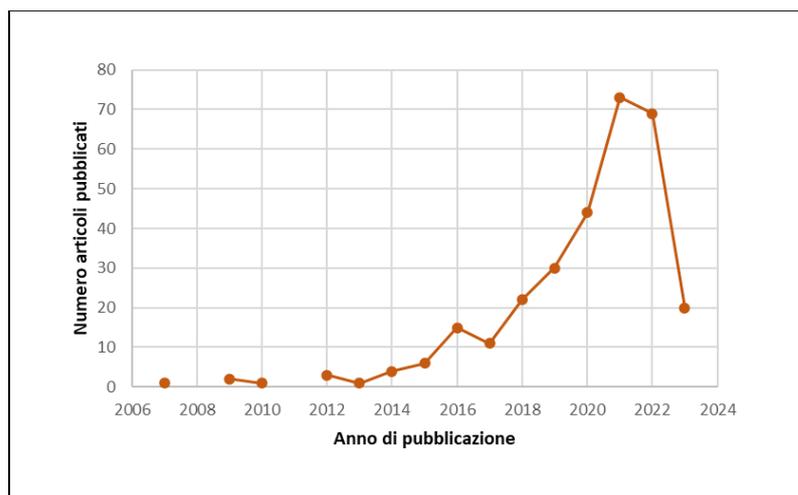


Figura 1: Andamento temporale del numero di pubblicazioni scientifiche rispondenti alla query "soil AND bioeconomy" (fonte: data base Scopus).



Figura 2: Frequenza relativa delle parole nei titoli degli articoli pubblicati tra il 2007 e il 2023 ottenuti dalla banca dati Scopus tramite la query “soil AND bioeconomy”.

Sicurezza alimentare e gestione sostenibile delle risorse

La capacità che i suoli hanno nel sostenere la produzione agraria, a parità di input di fertilizzanti, acqua ed energia, è molto variabile ed esplicitata nelle carte di capacità d’uso. La meccanizzazione agraria e l’utilizzo di pedotecniche hanno reso però possibile un intenso rimodellamento delle superfici al fine di rendere i suoli maggiormente adatti alle moderne tecniche produttive. In Sicilia, questo fenomeno ha portato ad una drastica diminuzione degli Alfisuoli, dei Mollisuoli e degli Inceptisuoli, trasformati in Antrosuoli, assumendo le forme di una vera e propria “erosione genetica” a carico dei suoli più fertili, intaccando minimamente le superfici interessate dai meno sviluppati Entisuoli (Dazzi e Lo Papa, 2019). Gli Antrosuoli, che occupano il 5% della SAU siciliana, sono caratterizzati da indici di qualità notevolmente più bassi rispetto ai suoli originari, con un minor potenziale nel fornire servizi ecosistemici (Dazzi et al., 2019). In relazione a quest’ultimo aspetto, è da notare come il valore economico dei servizi che i suoli forniscono non sia sempre declinato ad un dettaglio sufficiente per l’uso sostenibile. Esistono, infatti, stime di larga massima sul valore economico dei servizi ecosistemici offerti dai suoli che risulterebbe pari, complessivamente, a 12000 miliardi di dollari (Costanza et al., 2014, 2017), mancano tuttavia stime di dettaglio sul valore economico offerto da ciascun tipo di suolo in relazione ad ogni singolo servizio ecosistemico.

La diffusione degli Antrosuoli implica la necessità di maggiori fertilizzazioni per la pochezza edafica del suolo neocreato. L’efficienza d’uso dei fertilizzanti è però sovente molto bassa. Si calcola ad esempio che solo 1/6 del fosforo estratto dalle rocce fosfatiche sia trasferito negli alimenti (Celi et al., 2022), mentre la restante quota si accumula nel suolo o è in parte trasferita verso altri comparti ambientali, compromettendone la qualità. I processi di accumulo hanno ricadute socio-economiche a livello globale, considerando che vengono arricchiti in fosfato i suoli dei paesi a più alta produzione agraria, già naturalmente ricchi in fosforo e tipici degli ambienti temperati e continentali, a scapito delle zone tropicali dove il fosforo è carente (Celi et al., 2022).

La sicurezza nella produzione primaria e la gestione sostenibile delle risorse naturali si intrecciano con gli obiettivi di diminuzione della concentrazione di CO₂ atmosferica quando si esaminano i suoli forestali. Se il ruolo delle foreste nell’immagazzinare carbonio è noto, più

difficile è valutare il potenziale che ha il suolo nel mitigare il cambiamento climatico. Le proprietà del suolo permettono la stabilizzazione dei composti organici e il loro stoccaggio a lungo termine; è noto infatti che la sostanza organica del suolo (SOM) può avere età di oltre 4000 anni (Shi et al., 2020), rendendo il suolo un sistema molto efficiente nel sequestro della CO₂ atmosferica. D'altra parte, se a causa di cattiva gestione o di disturbi naturali, la SOM viene mineralizzata, si libera carbonio immagazzinato in epoche passate, con un effetto simile a quello delle emissioni da combustibili fossili. Tra il 2012 e il 2020 in Italia è stata stimata una perdita di circa 2,9 milioni di tonnellate di carbonio immagazzinato a causa della variazione di uso e copertura del suolo; in termini economici, questo significa una perdita patrimoniale del servizio ecosistemico di sequestro di carbonio stimata di circa 210 milioni di euro tra il 2012 e il 2020, che si è tradotta in una perdita di produzione agricola di circa 155 milioni € anno⁻¹ (Munafò, 2022).

I cambiamenti di uso del suolo a favore di una gestione forestale delle superfici (LULUCF) sono incentivati al fine di mitigare il cambiamento climatico. Il contenuto di carbonio nei suoli forestali italiani è però più strettamente correlato alle caratteristiche del suolo che non alla copertura. Esaminando 215 siti su tutto il territorio nazionale, Andretta et al. (2023) hanno infatti evidenziato come oltre il 25% della variabilità negli stock di SOM (fino a 80 cm) sia imputabile al tipo di suolo e meno del 15% alla copertura forestale. Ciò è spiegabile grazie ai meccanismi di stabilizzazione sopra citati, ma implica anche che cambiamenti d'uso in un'ottica LULUCF potrebbero portare ad un accumulo nella parte aerea, ma non sortire alcun effetto su aumenti di carbonio nel suolo. Questo effetto è da tener presente anche nel caso di impianti di specie da biomassa, il cui scopo ultimo è quello di ridurre la dipendenza da energie non rinnovabili. Valutando gli stock di carbonio del suolo, della lettiera e della biomassa in impianti di pioppi, salici e altre specie a rapido accrescimento coltivate in suoli svedesi, Rytter e Rytter (2020) mostrano come il carbonio accumulato nella biomassa a nove anni dall'impianto non sia quasi mai in grado di compensare le perdite che avvengono dal comparto suolo, particolarmente evidenti nei siti a maggiore dotazione di SOM. Anche in questo caso la specie forestale non ha alcun effetto sugli stock di C nel suolo. Trattandosi di studi svolti in un ambiente molto diverso da quello italiano, dove ci si attende un maggiore tasso di crescita, non è detto che questo risultato negativo sia generalizzabile, ma è sicuramente un monito all'utilizzo "informato" della risorsa suolo, anche in un'ottica di sostenibilità globale.

Il tema dell'aumento del carbonio nel suolo è di attualità anche per quanto riguarda i suoli agrari, con iniziative quali il 4 per mille o simili (Minasny et al., 2017). Nel caso dei suoli agrari, si punta prevalentemente sulla gestione per ottenere un incremento di SOM, tramite l'uso di cover crops nei frutteti, tecniche di minima lavorazione, gestione dei residui colturali (e.g. Moretti et al., 2020; Fontana et al., 2023), utilizzo di biomasse (e.g. compost, digestato, biochar) (Zaccone et al., 2022). L'apporto di sostanza organica facilmente decomponibile, come quella da residui erbacei può inoltre indurre un effetto "priming" a causa del quale, tramite numerosi meccanismi, si può avere un'importante mineralizzazione del carbonio e il rilascio dell'azoto contenuto nella sostanza organica (Kuzyakov et al., 2000). Diventa quindi importante valutare in quale momento viene aggiunta la matrice organica, oltre ad altri fattori quali il tempo e l'intensità di lavorazione, come messo in risalto in un progetto LIFE, Helpsoil, che ha visto coinvolte tutte le regioni del Nord Italia. Non bisogna inoltre dimenticare che, al fine di ottenere un incremento di SOM stabile, rendendo i composti organici meno disponibili alle comunità microbiche, essi devono essere stabilizzati ad opera delle fasi minerali del suolo, sia fisicamente (occlusione) che chimicamente (e.g., adsorbimento sulle superfici di argille, ossidi/idrossidi)

(Six et al., 2002; Said-Pullicino et al., 2022). Recentemente, Georgiou et al. (2023), utilizzando un dataset molto ampio e rappresentativo di tutte le regioni biogeografiche, hanno calcolato la quantità di carbonio stabilizzabile in funzione della mineralogia del suolo e hanno evidenziato come suoli con argille ad elevata Capacità di Scambio Cationico possano stoccare circa 90 mg C g⁻¹, mentre nei suoli a prevalenza di caolinite tale valore si dimezzi. Gli stessi autori indicano che, in media, i suoli agrari sono saturati solamente al 40% delle loro capacità di stoccaggio di carbonio, con ampio spazio quindi per ulteriori incrementi. Il livello di saturazione delle superfici può però mostrare una variabilità verticale molto pronunciata all'interno del profilo, con orizzonti superficiali prossimi alla saturazione e orizzonti profondi con ampie potenzialità, anche grazie alla tipica maggiore abbondanza delle classi granulometriche più piccole negli orizzonti B. Sono state proposte svariate tecniche gestionali che puntano ad aumentare la SOM negli orizzonti profondi, con risultati però contrastanti, come evidenziato da Button et al. (2022) che, in una recente metanalisi, hanno preso in considerazione l'effetto dell'impiego di specie ad elevato approfondimento radicale, dell'immissione diretta di residui organici in profondità, dell'interramento di argilla in suoli altrimenti sabbiosi e delle lavorazioni profonde. I risultati mostrano sovente effetti modesti (apparato radicale profondo) o non sempre durevoli (interramento profondo dei residui) sugli stock di carbonio e, in funzione del lasso di tempo preso in considerazione, le lavorazioni profonde possono anche indurre l' indesiderato effetto priming con mineralizzazione del carbonio precedentemente stoccato in profondità. Gli Autori raccomandano quindi di valutare attentamente le caratteristiche del suolo e adottare gestioni "sartoriali" per ottenere i risultati desiderati.

Sinergie e conflitti tra servizi ecosistemici

I conflitti tra l'approccio biotecnologico s.l. e quello bioecologico sono evidenti in alcuni degli esempi precedentemente citati. Le tecniche messe in atto per migliorare lo stoccaggio di carbonio negli orizzonti profondi corrispondono ad una visione effettivamente bioecologica, oppure si avvicinano all'esempio relativo ai suoli antropogenici siciliani, con perdita globale della qualità del suolo e della sua capacità di fornire molteplici servizi ecosistemici? La letteratura è ricca di riflessioni su sinergie e *trade-offs* tra servizi ecosistemici e il conflitto è ben esplicitato nel lavoro di Farkas et al. (2023) sugli scenari d'uso in grado di mitigare maggiormente l'erosione del suolo in un bacino idrografico norvegese. Lo scenario più adatto al raggiungimento dell'obiettivo è quello definito "sostenibile", con l'eliminazione dell'aratura autunnale in tutte le zone coltivate senza attuare alcun cambiamento d'uso rispetto a quello attuale (i.e. 61% agricoltura, 31% foreste, 2% urbano). In base alle simulazioni effettuate però, il secondo migliore scenario nel contrastare l'erosione è quello che prevede la crescita delle aree urbane e l'esportazione di petrolio che compensa economicamente l'importazione di derrate alimentari. Un altro esempio di conflitti tra uso del suolo e bioeconomia, intesa come maggiore impiego di energie rinnovabili a scapito dei combustibili fossili, è quello riportato nella meta-analisi condotta da Vera e collaboratori nel 2022. Gli Autori hanno esaminato studi su coltivazioni a scopo energetico e gli effetti che tale pratica ha sulla fornitura di servizi ecosistemici, individuando un'ampia variabilità in funzione dell'uso precedente, della specie coltivata e del tipo di suolo. Se la dominanza di sinergie tra servizi nel caso di coltivazioni in zone precedentemente agricole o marginali era, in parte, prevedibile, Vera et al. (2022) evidenziano come l'effetto del tipo di suolo sul bilancio tra sinergie e *trade-offs* sia difficile da comprendere in quanto i risultati delle ricerche dipendono molto dalla scala di indagine; in

generale, il bilancio è nettamente positivo solo nei suoli con argille ad elevata attività, quali e.g. smectiti e vermiculiti, o nei suoli spodici. In questi casi, si ottiene un miglioramento della qualità del suolo e delle acque che compensa la diminuzione di efficienza nell'uso delle risorse idriche. È da notare però che, tra i servizi ecosistemici presi in considerazione, non vi è la sicurezza alimentare connessa con la produzione primaria. Coltivazioni a scopo energetico sui suoli più fertili, quelli dotati di argille ad elevata capacità di scambio cationico, va a competere con l'uso agrario di tali suoli, sovente inseriti nelle classi di capacità d'uso migliori.

Le coltivazioni di specie *no-food* per la produzione di energia possono quindi dare benefici sicuri solo quando coltivate su suoli marginali e, poiché in alcuni casi le specie sono dotate di una notevole capacità estrattiva nei confronti dei metalli pesanti, il loro impiego in siti contaminati potrebbe spostare il bilancio maggiormente a favore delle sinergie tra servizi ecosistemici. Pioppo, salice e robinia si sono dimostrati in grado di diminuire in modo significativo la concentrazione di Zn bioassimilabile (Danelli et al., 2021), mentre per altri metalli (Cd, Cr, Co, Cu, Ni e Pb) nessuna delle specie valutate ha mostrato un effetto significativo. Nel trattamento di siti inquinati, sembrano avere buone potenzialità anche specie erbacee perenni, quali *Arundo donax*, in grado di accumulare quantità notevoli di metalli e metalloidi dopo 3 anni dall'impianto. Danelli e collaboratori (2021) suggeriscono quindi come anche questa o altre specie non arboree possano risultare interessanti in una strategia *win-win*.

Conclusioni

Esistono ampi spazi di ricerca innovazione per la scienza del suolo nell'ambito della bioeconomia, anche se non sempre il lavoro fino ad ora svolto è pienamente noto per differenze nel vocabolario utilizzato. L'effetto sul suolo che le azioni messe in atto per il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile non sono sempre chiari e la variabilità del suolo, anche in funzione delle diverse scale di indagine, non è sempre considerata. Ne consegue che, per evitare duplicazione di studi e sfruttare appieno quanto è già stato fatto, risulta essenziale indirizzare le ricerche verso aspetti più meccanicistici che, concettualizzando i fenomeni, garantiscano una maggiore trasferibilità dei risultati. Tale approccio meccanicistico deve però andare di pari passo con un ampliamento della scala di indagine, a livello nazionale e sovranazionale, che permetta di evidenziare le sinergie e i *trade-offs* in funzione del tipo di suolo, della regione biogeografica e dell'uso precedente in caso di cambio di destinazione o di profonde modificazioni delle superfici coltivabili, anche in interazione con chi si occupa di produzione primaria, agraria e forestale. Il quadro complesso che emerge quando si esamina il rapporto tra suolo e bioeconomia non può pertanto essere affrontato che in un'ottica transdisciplinare.

Bibliografia

- Andretta, A., Chelli, S., Bonifacio, E., Canullo, R., Cecchini, G., Carnicelli, S. 2023. Environmental and pedological factors influencing organic carbon storage in Italian forest soils. *Geoderma Regional*, 32, art. no. e00605, 10.1016/j.geodrs.2023.e00605
- Bugge, M.M., Hansen T., Klitkou A. 2019. What is bioeconomy? In: *From Waste to Value* (Klitkou et al., Eds.). Rutledge Publishing, London, UK. 10.4324/9780429460289
- Button, E.S., Pett-Ridge, J., Murphy, D.V., Kuzyakov, Y., Chadwick, D.R., Jones, D.L. 2022. Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, art. no. 108697, 10.1016/j.soilbio.2022.108697
- Celi L., Martin M., Barberis E. 2022. Phosphorus in soil. In: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Second Edition <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00137-3>
- Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S.J., Kubiszewski I., Farber S., Turner K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26 (2014) 152–158
- Costanza R., de Groot R., Braat L., Kubiszewski I., Fioramonti L., Sutton P., Farber S., Grasso M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services* 28 (2017) 1–16

- Danelli, T., Sepulcri, A., Masetti, G., Colombo, F., Sangiorgio, S., Cassani, E., Anelli, S., Adani, F., Pilu, R. 2021. Arundo donax l. Biomass production in a polluted area: Effects of two harvest timings on heavy metals uptake. 2021. Applied Sciences (Switzerland), 11 (3), art. no. 1147, pp. 1-16., 10.3390/app11031147
- Dazzi C., Lo Papa G. 2019. Soil genetic erosion: New conceptual developments in soil security. International Soil and Water Conservation Research, 7, 317-324. 10.1016/j.iswcr.2019.08.001
- Dazzi C., Galati A., Crescimanno M., Lo Papa G. 2019. Pedotechnique applications in large-scale farming: Economic value, soil ecosystems services and soil security Catena, 181, art. no. 104072. 10.1016/j.catena.2019.104072
- Farkas, C., Shore, M., Engebretsen, A., Skarbøvik, E. 2023. Suspended sediment response to Nordic bioeconomy and climate change scenarios in a first-order agricultural catchment. Catena, 222, art. no. 106794
- Fontana, M., Johannes, A., Zaccone, C., Weisskopf, P., Guillaume, T., Bragazza, L., Elfouki, S., Charles, R., Sinaj, S., 2023. Improving crop nutrition, soil carbon storage and soil physical fertility using ramial wood chips. Environmental Technology & Innovation, 31, 103143.
- Georgiou, K., Jackson, R.B., Vindušková, O., Abramoff, R.Z., Ahlström, A., Feng, W., Harden, J.W., Pellegrini, A.F.A., Polley, H.W., Soong, J.L., Riley, W.J., Torn, M.S. 2022. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. Nature Communications, 13 (1), art. no. 3797, 10.1038/s41467-022-31540-9
- Kuzyakov, Y. J.K Friedel, K Stahr, 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects, Soil Biology and Biochemistry, 32, 1485-1498, [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5).
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L. 2017. Soil carbon 4 per mille. Geoderma, 292, pp. 59-86. 10.1016/j.geoderma.2017.01.002
- Moretti, B., Bertora, C., Grignani, C., Lerda, C., Celi, L., Sacco, D. 2020. Conversion from mineral fertilisation to MSW compost use: Nitrogen fertiliser value in continuous maize and test on crop rotation. Science of the Total Environment, 705, art. no. 135308, .
- Munafò, M., 2022. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2022. Report SNPA 32/22.
- Rytter, R.-M., Rytter, L. 2020. Carbon sequestration at land use conversion – Early changes in total carbon stocks for six tree species grown on former agricultural land. Forest Ecology and Management, 466, art. no. 118129, 10.1016/j.foreco.2020.118129
- Said-Pullicino, D., Spaccini, R., Zaccone, C. (2022) Capitolo 16. Aspetti di C sequestration. In: Ciavatta, C., Gigliotti, G., Miano, T., Tambone, F., Zaccone, C. (a cura di). Biomasse in agricoltura. Caratterizzazione ed utilizzo sostenibile. Pàtron editore, pp. 321-332.
- Shi, Z., Allison, S. D., He, Y., Levine, P. A., Hoyt, A. M., Beem-Miller, J., et al. 2020. The age distribution of global soil carbon inferred from radiocarbon measurements. Nature Geoscience, 13(8), 555–559. 10.1038/s41561-020-0596-z
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. Plant Soil 241, 155–176.
- Vera, I., Wicke, B., Lamers, P., Cowie, A., Repo, A., Heukels, B., Zumpf, C., Styles, D., Parish, E., Cherubini, F., Berndes, G., Jager, H., Schiesari, L., Junginger, M., Brandão, M., Bentsen, N.S., Daioglou, V., Harris, Z., van der Hilst, F. 2022. Land use for bioenergy: Synergies and trade-offs between sustainable development goals. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, art. no. 112409, 10.1016/j.rser.2022.112409
- Zaccone, C., Ciavatta, C., Gigliotti, G., Miano, T., Tambone, F. (2022) Riciclo delle biomasse, Green Deal e sviluppo sostenibile. In: Ciavatta, C., Gigliotti, G., Miano, T., Tambone, F., Zaccone, C. (a cura di). Biomasse in agricoltura. Caratterizzazione ed utilizzo sostenibile. Pàtron editore, pp. 13-21 (ISBN: 9788855535649)

Uso di biomasse come input nei processi produttivi agricoli

Gigliotti G.¹, Ciavatta C.², Agnelli A.³, Miano T.M.⁴, Tambone F.⁵, Capra G.F.⁶

¹Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia

²Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-alimentari, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

³Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli Studi di Perugia

⁴Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti, Università degli Studi di Bari “Aldo Moro”

⁵Dipartimento Scienze Agrarie e Ambientali, - Produzione, Territorio, Agroenergia, Università degli Studi di Milano

⁶Dipartimento Architettura, Design e Urbanistica, Università degli Studi di Sassari

Riassunto

Il riciclo delle biomasse in agricoltura coniuga due differenti esigenze, quella di sottrarre le stesse al ciclo dello smaltimento dei rifiuti e la necessità di incrementare il contenuto di sostanza organica nei suoli, secondo i dettami della bioeconomia circolare. Nel corso degli anni, la ricerca scientifica è stata incentrata tanto sul problema dell’impatto sul sistema suolo, valutando gli effetti sulle sue proprietà fisiche, chimiche e biologiche, quanto sull’apporto al suolo di eventuali xenobiotici contenuti nelle stesse biomasse. In quest’ambito, inizialmente ci si è concentrati sul contenuto di metalli pesanti, per poi passare a xenobiotici organici bioaccumulabili, fino agli studi più recenti che si concentrano sull’apporto al suolo con le biomasse di microplastiche, nanoplastiche e bioplastiche.

Abstract

The use of biomasses as fertilizer combines two different needs: removing them from the waste disposal cycle and the need to increase the organic matter content in the soil, in according with the circular bioeconomy. Over the years, scientific research has focused both on evaluating the effects on soil physical, chemical and biological properties, and on the contribution to the soil of xenobiotics contained in the biomasses. In this field of research, initially the focus was on the content of heavy metals, then moving on to organic xenobiotics, up to the most recent studies focused on the addition to the soil with biomass of microplastics, nanoplastics and bioplastics.

Keywords: *compost, digestate, sewage sludge, microplastic, bioplastic*

Introduzione

La qualità del suolo, secondo la definizione della Soil Science Society of America (Karlen et al., 1997), si basa sul concetto di funzionalità, intesa come “*capacità di un suolo di sostenere, nel contesto di uno specifico ecosistema naturale o antropico, la produzione vegetale o animale, di contribuire a migliorare la qualità dell’aria e dell’acqua, e di supportare la salute dell’uomo e l’abitabilità ambientale*”. Quando si parla di qualità del suolo non si può prescindere dal mantenimento della sua fertilità e attività biologica, a loro volta strettamente connesse alla sostanza organica in esso contenuta. In questo ambito, un ruolo fondamentale può avere il riuso nel suolo di biomasse, ossia di tutti quei materiali organici di origine vegetale e animale, i residui e/o i sottoprodotti organici derivanti dalla loro trasformazione e utilizzazione, nonché i residui (solidi, semisolidi e liquidi) sia urbani che derivanti da attività agroalimentari, agroindustriali e industriali (Ciavatta et al., 2022). Questo approccio trova le sue basi nell’Agenda 2030, quando all’obiettivo 2 (SDG #2 – Sustainable Development Goal 2 - Porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare, migliorare la nutrizione e promuovere un’agricoltura sostenibile), si fa riferimento alla centralità della “risorsa suolo” al fine di *garantire sistemi di produzione alimentare sostenibili e implementare pratiche agricole*

resilienti che aumentino la produttività e la produzione, che aiutino a proteggere gli ecosistemi, che rafforzino la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, a condizioni meteorologiche estreme, siccità, inondazioni e altri disastri e che migliorino progressivamente la qualità del suolo (Montanarella & Panagos, 2021).

Il riciclo delle biomasse in agricoltura coniuga due differenti esigenze, quella di sottrarre le stesse al ciclo dello smaltimento dei rifiuti e la necessità, come visto, di incrementare il contenuto di sostanza organica nei suoli. Le biomasse di scarto, se non utilizzabili vantaggiosamente, rappresentano a tutti gli effetti un rifiuto, spesso di difficile gestione a causa di alcune proprietà intrinseche quali la putrescibilità, l'elevatissima umidità, l'elevato costo sia per lo smaltimento in discarica che per la termovalorizzazione, in considerazione dei pretrattamenti costosi (bioessiccazione, trattamento meccanico biologico) alle quali devono essere necessariamente sottoposte. Al contrario, quando riutilizzate a scopi agricoli, costituiscono una risorsa e consentono lo sviluppo di una catena di valore residuo, apportando al suolo non solo elementi della nutrizione vegetale, ma anche quella sostanza organica, come visto, indispensabile al mantenimento della fertilità e al contrasto della desertificazione (Ciavatta et al., 2022) o, addirittura, al loro recupero (Guerrini et al., 2021).

L'uso agricolo delle biomasse da rifiuti e sottoprodotti coniuga, inoltre, due importanti concetti: "bio-economia circolare" ed "End of Waste". In base alla definizione data dalla Commissione Europea, la Bioeconomia tratta dell'economia nella quale vengono utilizzate risorse biologiche rinnovabili come materiali per la produzione energetica, industriale, alimentare e mangimistica. Per Bioeconomia circolare si intende, invece, un contesto economico in cui tutto è risorsa, inclusi gli scarti di origine biologica. Essa è riconosciuta come un'opportunità per rispondere ad alcune sfide ambientali, come la scarsità delle risorse, il cambiamento climatico, la desertificazione e la degradazione dei suoli, consentendo allo stesso tempo lo sviluppo di una nuova filiera economica. L'End of Waste (EoW) consiste in una procedura che porta un rifiuto, dopo un processo di recupero, a perdere la qualifica di rifiuto per acquisire quella di prodotto. Il raggiungimento dello status di EoW per i materiali di scarto recuperati può favorire il riciclaggio dei rifiuti e il loro uso preservando la salute e l'ambiente. Questo, inoltre, sottrae i rifiuti allo smaltimento finale, con notevoli risvolti positivi economici e ambientali. Il concetto di EoW è stabilito nella European Waste Framework Directive (WFD) e adottato nella legislazione nazionale con Art. 184-ter D.Lgs. 152, 2006. Rientrano perfettamente nel concetto di EoW i compost da rifiuti, la cui commercializzazione è regolamentata dal D.Lgs. n. 75 del 2010, dove all'allegato 2 si trovano classificati gli Ammendanti compostati. Questo è il classico esempio di un processo all'interno del quale entrano rifiuti quali la Frazione organica dei Rifiuti solidi urbani (FORSU) o fanghi di depurazione, per uscirne gli ammendanti compostati, un nuovo prodotto (EoW) che interpreta alla perfezione il paradigma della bioeconomia circolare, con la chiusura, tra l'altro, del ciclo del carbonio nel suo alveo naturale, il suolo.

La comunità scientifica internazionale pone all'1% il contenuto di C organico del suolo al di sotto del quale iniziano a manifestarsi i fenomeni di degrado, tra cui la desertificazione. In figura 1 è schematizzato il ruolo fondamentale che la sostanza organica svolge nel sistema suolo.

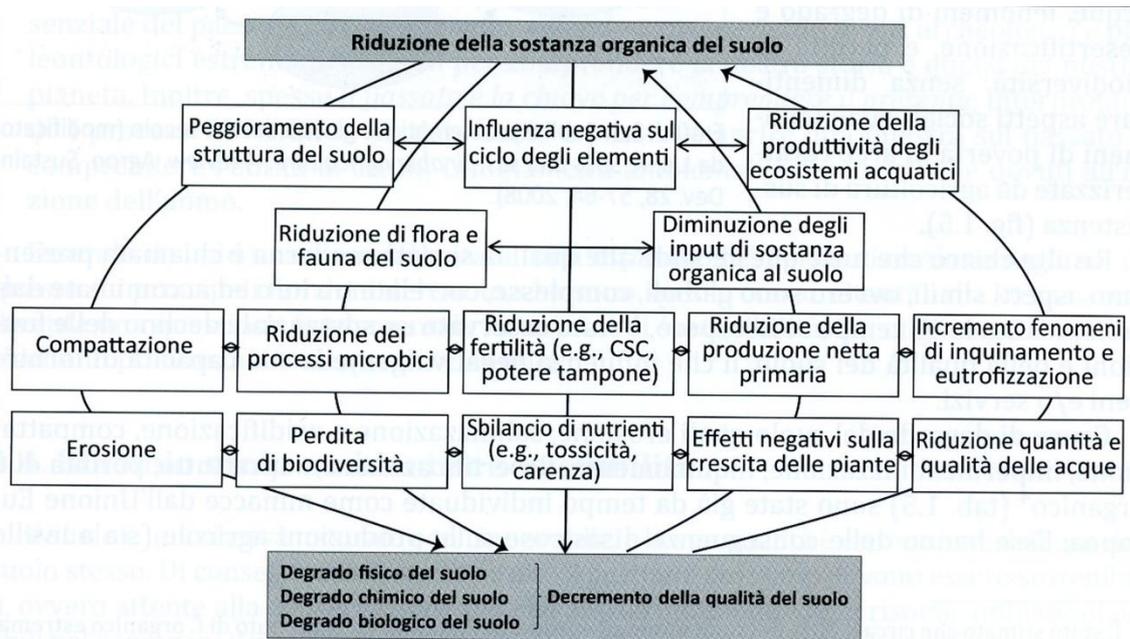


Figura 1. Influenza della sostanza organica sulla qualità del suolo (modificato da: Lal, 2010).

Lo schema mostra che la riduzione della quantità di sostanza organica del suolo è legata alla diminuzione degli input di sostanza organica, portando ad un suo degrado che si può identificare come decremento della qualità del suolo stesso. Quindi, fattore fondamentale per contrastare tale fenomeno è l'incremento di input di sostanza organica al suolo; input che possiamo favorevolmente ottenere con l'uso di fertilizzanti, biomasse da rifiuti e sottoprodotti secondo la mappa concettuale riportata in figura 2.

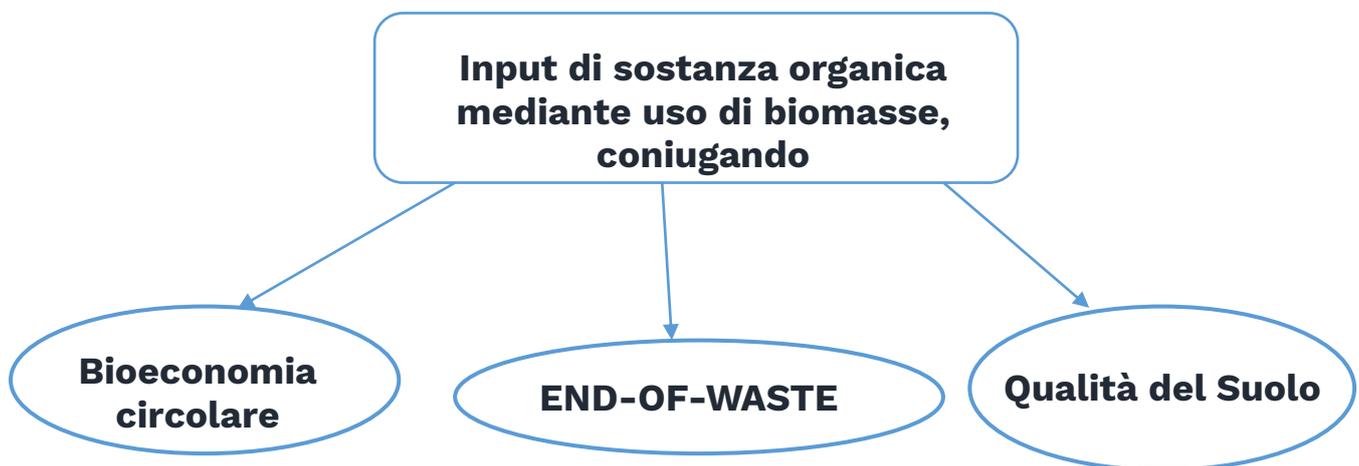


Figura 2. Mappa concettuale dell'uso agricolo delle biomasse da rifiuti e sottoprodotti.

Tipologie di biomasse e possibili trattamenti

La figura 3 riporta le diverse tipologie di biomasse, i possibili trattamenti, prodotti e loro utilizzi.

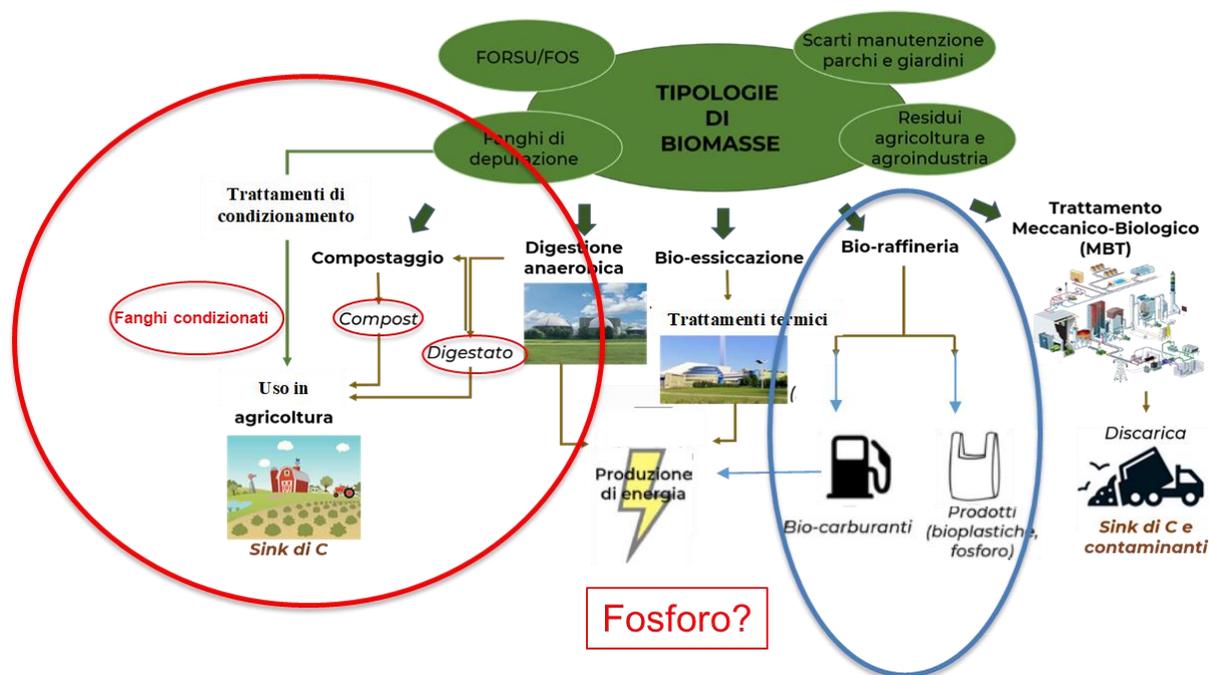


Figura 3. Tipologie di biomasse, possibili trattamenti, prodotti e loro utilizzi.

Tal quali, ma molto più spesso a seguito di trattamenti, come il compostaggio, (Guerrini et al., 2015), le biomasse riportate nella parte superiore della figura possono trovare uso in agricoltura in una perfetta ottica di bioeconomia circolare. Di seguito una breve descrizione delle diverse tipologie di biomasse qui trattate.

I fanghi di depurazione derivano dal trattamento delle acque reflue sia urbane che industriali e costituiscono quindi il sottoprodotto dell'operazione di rigenerazione delle acque, anche se, allo stato attuale, nel nostro paese, sono classificati come rifiuti. L'uso agronomico dei fanghi si effettua solo se gli stessi sono di origine urbana o agroindustriale o se ad essi assimilabili. Qualità dei fanghi e modalità di utilizzo agronomico sono dettati da una legge di settore, il D.Lgs. n. 99/92 e ss.mm.ii. I fanghi, se conformi, possono essere anche compostati in miscela con altri rifiuti organici.

FORSU è l'acronimo di frazione organica dei rifiuti solidi urbani ottenuta per separazione alla fonte (raccolta differenziata). Questa matrice è ammessa al compostaggio e ai trattamenti integrati anaerobico/aerobico; nel primo caso si ottiene recupero di materia, il compost o ammendante compostato, nel secondo caso si ottiene, oltre al recupero di materia, anche il biogas, o dopo opportuno upgrading, il biometano, fonte energetica rinnovabile.

Le biomasse lignocellulosiche, nella figura indicate come scarti della manutenzione di parchi e giardini e residui agricoli, rappresentano un gruppo eterogeneo di biomasse costituite da materiale vegetale che, seppure in proporzioni variabili, contengono lignina, cellulosa, emicellulosa e saccaridi più semplici. In genere non trovano impiego diretto in agricoltura, ma trovano utilizzo nella filiera energetica, nel compostaggio o in altre filiere come quella della bioedilizia. Altre biomasse comprese negli scarti agricoli, possono essere considerati gli scarti della zootecnia, utilizzabili direttamente in agricoltura o dopo opportuni trattamenti anaerobici o aerobici. Infine, le biomasse dell'agroindustria riguardano fundamentalmente quelle derivanti dall'industria del vino, dell'olio, del latte, dei cereali, dei legumi, dell'ortofrutta, dello zucchero, delle conserve e della birra (Ciavatta et al., 2022).

In un contesto di bioeconomia circolare naturalmente rientrano tutti i materiali sopraccitati e il loro uso agricolo deve assicurare un beneficio per l'agricoltura. Inoltre, non devono provocare danno all'ambiente, alla salute dell'uomo e degli animali.

Nella Relazione della Commissione al Parlamento Europeo del 17 marzo 2016 viene ricordato come sia stato *proposto un regolamento per la creazione di un mercato unico dei fertilizzanti ottenuti da materie prime secondarie finora smaltite come rifiuti*. In particolare, il Regolamento, nel campo dei fertilizzanti, è finalizzato ad *agevolare in maniera significativa l'accesso al mercato unico dell'UE per i concimi organici e ricavati da rifiuti, instaurando pari condizioni di concorrenza con i tradizionali concimi inorganici, creando così nuove opportunità di mercato per le imprese innovative, riducendo nel contempo la quantità di rifiuti da portare a smaltimento, il consumo energetico e danni ambientali*. In questo campo il legislatore pone attenzione anche alla questione dei fosfati, considerati *concimi dalle importazioni di materie prime di importanza critica, recuperabili invece*, in un'ottica di economia circolare, *dai rifiuti organici domestici*, e non solo.

Quello che si auspica l'UE è che i rifiuti vengano recuperati come materia prima secondaria, in accordo con il concetto di EoW.

Ritornando alla figura 3, ritroviamo cerchiati in rosso i processi ai quali sono sottoposte le biomasse destinate all'uso in agricoltura e i prodotti che attraverso questi si ottengono, alcuni dei quali sono EoW.

Nel campo dei fertilizzanti, il rifiuto perde questa sua qualifica per acquisire quella di prodotto, cioè di fertilizzante. In Italia la produzione e la commercializzazione dei fertilizzanti sono regolate dal Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n. 75 (D.Lgs. 75/2010) e ss.mm.ii.. Ricordato che un fertilizzante è un materiale che migliora la fertilità fisica e/o chimica e/o biologica del suolo e non produce effetti nocivi sulla salute delle persone, degli animali e delle piante ovvero sull'ambiente in condizioni normali d'impiego.

I fertilizzanti ottenuti dal trattamento di rifiuti a base organica sono fundamentalmente classificati tra gli ammendanti e quindi sono elencati nell'allegato 2 del D.Lgs. 75/2010. Essi sono riconducibili ai compost, più propriamente classificati nel citato Decreto come Ammendanti compostati, e il Gesso di defecazione da fanghi.

È bene specificare che i digestati ottenuti dal trattamento anaerobico di rifiuti sono ammessi come matrici per la formulazione dell'ammendante compostato misto e, quindi, i digestati non sottoposti a compostaggio conservano la qualifica di rifiuto. Se invece sono sottoposti a compostaggio, da soli o in miscela con altri rifiuti, raggiungono lo status di EoW nella categoria degli ammendanti compostati misti. I digestati da rifiuti, se non compostati ex D.Lgs. 75/2010, non perdono quindi la qualifica di rifiuto e il loro utilizzo agronomico è consentito solo con autorizzazione specifica (pratica R10: spandimento sul suolo di rifiuti a beneficio dell'agricoltura). Al di fuori della normativa sui fertilizzanti hanno accesso all'uso diretto in agricoltura secondo il Decreto Interministeriale n. 5046 del 25 febbraio 2016 le due tipologie di digestati da impianti rurali: i Digestati Agro-zootecnici e i Digestati Agro-industriali. Gli impianti anaerobici nei quali vengono prodotti sono alimentati da sottoprodotti e quindi questi digestati sono a tutti gli effetti sottoprodotti secondo l'art. 184 ter del D.Lgs. 152/2006, rispondendo in pieno ai dettami della bioeconomia circolare. In ogni modo, non assumendo mai la qualifica di prodotto, non si può parlare di EoW. I digestati agro-zootecnici sono prodotti in impianti alimentati con:

- paglia, sfalci e potature;
- materiale agricolo derivante da colture agrarie;
- effluenti di allevamento;

- materiale agricolo e forestale non destinato al consumo alimentare.

I digestati agroindustriali, invece, derivano dal trattamento delle medesime matrici dell'agro-zootecnico, con in più la possibilità di trattare anche:

- acque reflue;
- residui dell'attività agroalimentare;
- acque di vegetazione dei frantoi oleari e sanse umide anche denocciolate;
- sottoprodotti di origine animale.

Per i fanghi di depurazione delle acque reflue e agroindustriali la situazione, se vogliamo, è ancora più complessa. Il loro utilizzo agricolo è consentito dopo un trattamento di stabilizzazione, come ad esempio il semplice stoccaggio o l'ispessimento, e nel rispetto del D.Lgs. 99/92, più recentemente integrato dal cosiddetto Decreto Genova (Legge 16.11.2018 n. 130). In questo caso, quindi, i fanghi di depurazione non perdono la loro qualifica di rifiuto e il loro utilizzo agricolo si configura come operazione di recupero di rifiuti a beneficio dell'agricoltura. Come i digestati da rifiuti, anche i fanghi sono compresi tra le matrici ammesse a compostaggio, a patto che risultino rispettati tutti i limiti imposti dal D.Lgs. 99/92 e dalla L. 130/2018 e che non siano addizionati alle altre matrici in proporzione maggiore al 35% p/p di sostanza secca. In questo caso si ottiene l'Ammendante compostato con fanghi, anch'esso riportato all'allegato 2 del D.Lgs. 75/2010. Le altre matrici ammesse nella formulazione dell'Ammendante compostato con fanghi sono le medesime riportate per l'Ammendante compostato misto, unica differenza applicativa è che quello con fanghi non può essere autorizzato in agricoltura biologica, visto che in biologico non è consentito l'uso dei fanghi di depurazione. Infine, i fanghi di depurazione perdono la qualifica di rifiuto per acquisire quella di fertilizzante quando, trattati chimicamente, portano alla produzione del cosiddetto Gesso di defecazione da fanghi, un Correttivo calcio/magnesiaco riportato nell'allegato 3 del D.Lgs. 75/2010. In definitiva, i fanghi di depurazione acquisiscono la qualifica di EoW nel caso in cui rappresentino una matrice per la formulazione dell'Ammendante compostato con fanghi o quando vengano trattati chimicamente per la produzione di Gesso di defecazione da fanghi.

Seppure nei documenti dell'UE si parli anche di recupero del fosforo come uno degli obiettivi della bioeconomia circolare, tuttavia, non si possono sottacere le problematiche tecniche relative alle operazioni di recupero di questo elemento fondamentale della nutrizione vegetale. Attualmente, i concimi fosfatici derivano dal trattamento delle rocce fosfatiche, fonte inevitabilmente non rinnovabile, mentre la biomassa più utilizzata come fonte di fosforo è rappresentata dalle deiezioni zootecniche. Le proposte di riciclo riguardano il recupero di fosforo da acque reflue tramite il processo di precipitazione della struvite, un fosfato ammonico magnesiaco, o dalle ceneri degli impianti di termovalorizzazione. Mentre il primo processo è tecnicamente maturo, ma trova scarsa applicabilità per gli elevati costi e le difficoltà legate all'utilizzo della struvite, fertilizzante non registrato in Italia e ancora in corso di registrazione in Europa, il recupero dalle ceneri appare ancora come un processo che necessita di approfondimenti tecnologici e comunque esula dalle finalità del presente contributo.

Per quanto riguarda i processi di trattamento dei rifiuti, oggi nel nostro Paese si sta sempre più affermando il processo integrato anaerobico-aerobico di trattamento della FORSU attraverso il quale si ottiene il recupero di energia (biogas/biometano) e di materia, un ammendante compostato di elevata qualità agronomica e ambientale. Nella figura 4 si riporta in estrema semplificazione il processo integrato, mettendo in evidenza i prodotti ottenuti. Come si può vedere, il metodo di digestione anaerobica maggiormente utilizzato è in questo caso

quello allo stato solido, dove la FORSU viene subito miscelata con residui lignocellulosici, evitando in tal modo la separazione solido/liquido del digestato, che quindi è avviato a compostaggio per la produzione di ammendante compostato misto. Il biogas prodotto sempre più spesso è sottoposto ad un processo spinto di *upgrading* con produzione di biometano e un *off-gas* ricco in anidride carbonica. Quest'ultima, una volta liquefatta, potrà essere impiegata, in genere nell'industria alimentare.

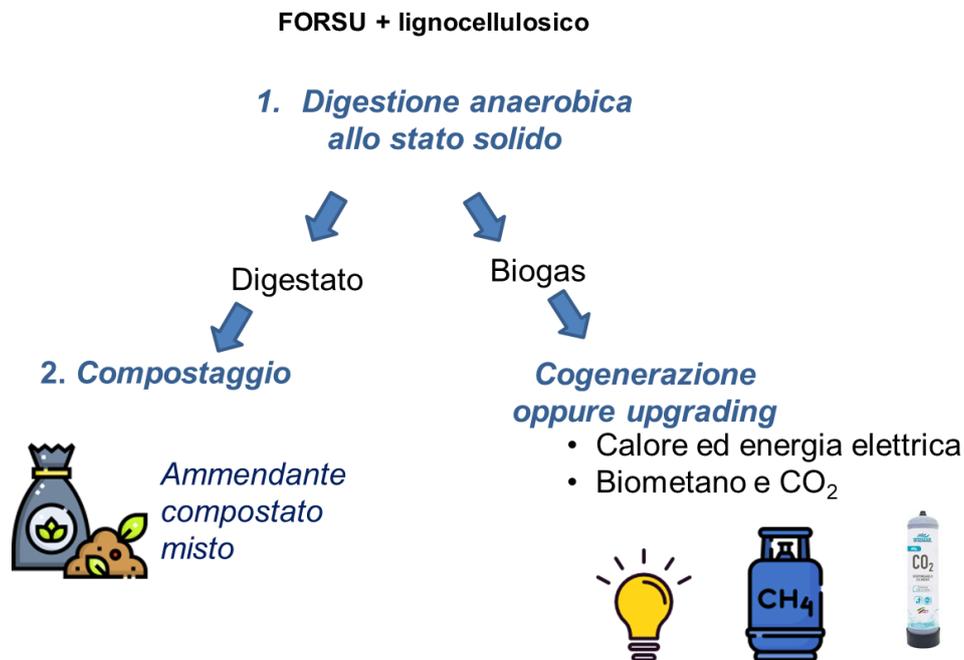
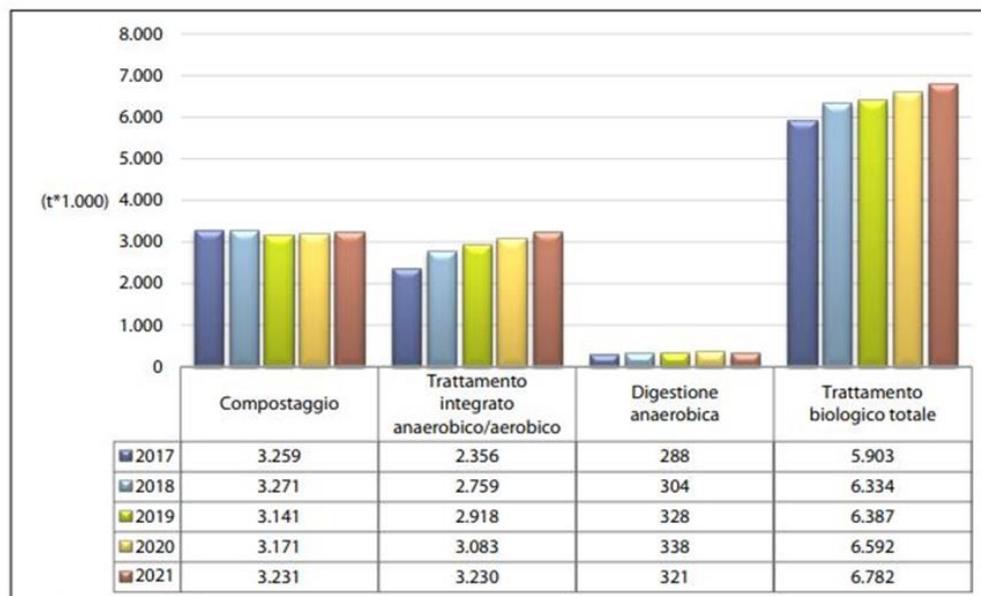


Figura 4. Diagramma del processo integrato di trattamento di rifiuti organici.

Al fine di comprendere il rapido sviluppo della tecnologia del trattamento integrato, si riportano i dati pubblicati da ISPRA (ISPRA, 2022) sulla distribuzione sul territorio nazionale di tali tipologie impiantistiche e l'evoluzione negli anni che ha portato a trattare ormai circa la metà della FORSU inviata a trattamento biologico con il metodo integrato e metà mediante compostaggio.



Fonte: ISPRA

Figura 5. Quantitativo di rifiuti trattati negli impianti biologici in Italia, anni 2017 – 2021, e distribuzione degli impianti integrati sul territorio nazionale.

Altro dato di rilievo è la disomogenea distribuzione sul territorio nazionale degli impianti integrati, in pratica presenti quasi esclusivamente al Nord e parzialmente in Centro Italia, con soli sporadici esempi al Sud del nostro Paese.

Uso delle biomasse e loro impatto sul sistema suolo

Da quando, negli anni 80 del secolo scorso, l'uso delle biomasse da rifiuto in agricoltura si è iniziato ad imporre come pratica in grado di sopperire alla carenza di sostanza organica nei suoli, gli studiosi hanno affrontato scientificamente il problema dell'impatto sul sistema suolo, valutando gli effetti sulle sue proprietà fisiche, chimiche e biologiche. Particolare attenzione è stata poi posta alla problematica legata al contenuto di metalli pesanti e di xenobiotici in biomasse che derivavano da rifiuti, andando progressivamente ad approfondire questa tipologia di ricerche man mano che insorgevano problemi con ulteriori contaminanti emergenti. Le più importanti ricerche in ambito di impatto sulla fertilità svolte in Italia si riferiscono ad alcuni lavori che hanno fatto la storia dell'uso delle biomasse, con un notevole riscontro nella letteratura internazionale. Ci si riferisce ai lavori di Francioso et al. (2000), Giusquiani et al. (1995), Pagliai e Vittori Antisari (1992), Sciubba et al. (2013), Grigatti et al. (2020), Zilio et al. (2023). Numerose in quest'ambito anche le collaborazioni con importanti gruppi di ricerca internazionali, anche con ricerche di pieno campo effettuate all'estero e che hanno visti coinvolti ricercatori italiani (a titolo esemplificativo, non esaustivo, si ricordano Guerrini et al., 2015 e 2021; Florentino et al., 2016; Manca et al., 2020). Anche per quanto concerne l'immissione di xenobiotici nell'ambiente suolo la ricerca italiana è sempre stata estremamente attiva (vedi ad esempio Senesi et al., 1994; Said-Pullicino et al., 2004; Puglisi et al., 2007; Ciavatta et al., 2022) e oggi si sta sempre più concentrando su bioplastiche, microplastiche e nanoplastiche, visto che uno dei vettori per l'immissione nel suolo è rappresentato dalla loro presenza nelle biomasse di origine urbana (FORSU e fanghi di depurazione) trasformate in biofertilizzanti (Mazzon et al., 2022; Barili et al., 2023; Papa et al., 2023).

In questo ambito si riportano i risultati salienti di due ricerche condotte da alcuni autori del presente contributo.

In un lavoro pubblicato da Mazzon et al. (2022) si è investigato l'effetto di bioplastiche provenienti da teli pacciamanti sulla qualità del suolo. L'uso in agricoltura di teli per pacciamatura biodegradabili rappresenta già un'alternativa ecologica ai tradizionali teli di plastica. Tuttavia, i film di pacciamatura biodegradabili, una volta incorporati nel terreno attraverso la lavorazione, rappresentano un input non solo fisico ma anche biogeochimico, influenzando così sia la qualità che la funzionalità del suolo. Lo studio è stato condotto prendendo in considerazione due differenti suoli (uno limoso e uno sabbioso con diverso contenuto di carbonio organico e azoto totale) ai quali sono state aggiunte quantità crescenti di bioplastica biodegradabile e sui quali sono stati valutati nel tempo l'andamento di biomassa microbica, il ciclo dell'azoto e le principali attività enzimatiche coinvolte nei processi biochimici di carbonio e fosforo. I risultati ottenuti hanno evidenziato che il carbonio aggiunto attraverso le bioplastiche biodegradabili ha influenzato i processi legati ai cicli del carbonio e dell'azoto (Fig. 6). Effetti significativi sono stati osservati solamente con la dose più alta di bioplastica biodegradabile aggiunta (1% che corrisponde a 100 volte l'apporto annuale in un campo coltivato) che ha determinato una maggiore attività della biomassa microbica (attività deidrogenasica), maggiore mineralizzazione del carbonio e maggiore immobilizzazione dell'azoto disponibile (Fig. 6). Significativa è risultata essere anche la diversa tipologia di suolo, soprattutto per quanto concerne il ciclo del carbonio e le attività enzimatiche misurate; la presenza di bioplastica non ha invece impattato significativamente sulle dinamiche di rilascio/immobilizzazione dell'azoto.

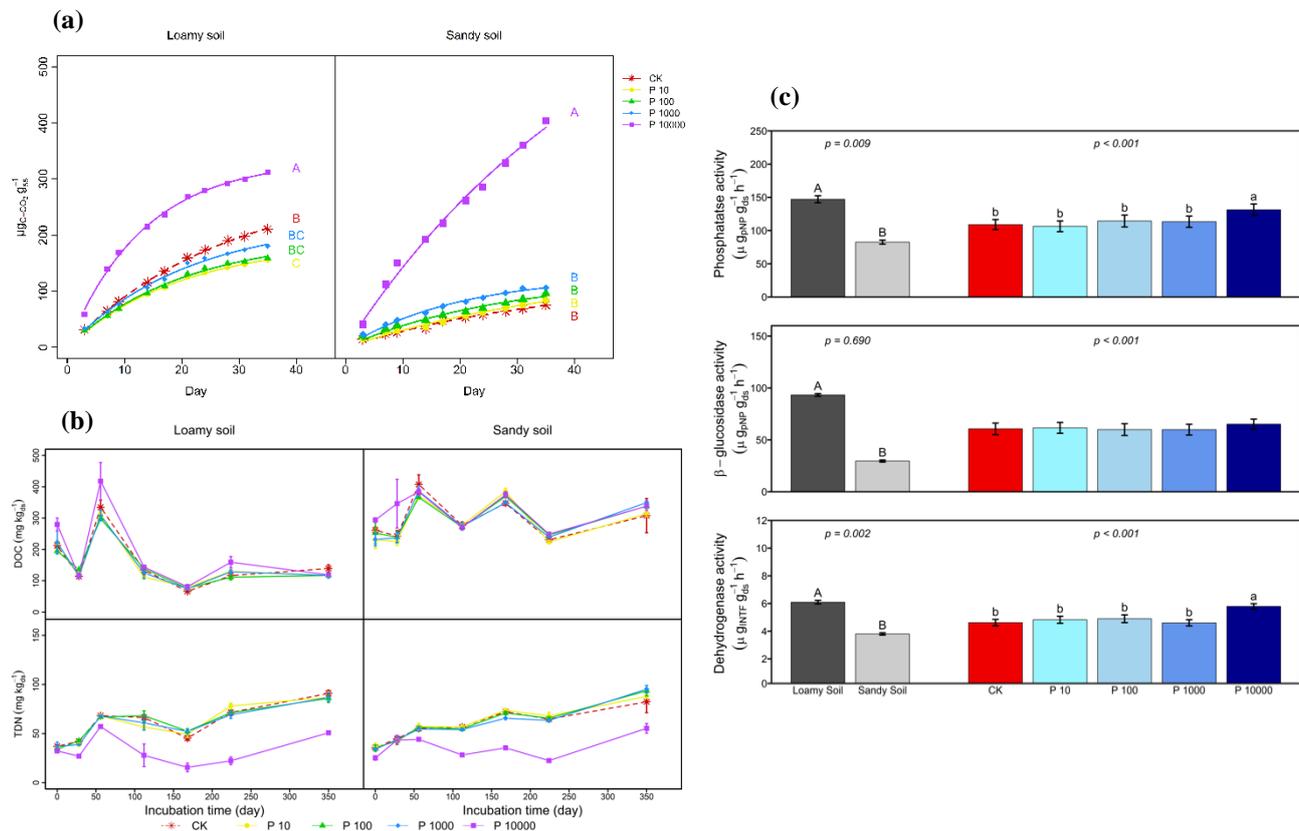


Figura 6. Principali risultati ottenuti: (a) Respirazione del suolo; (b) Andamento del carbonio organico e dell'azoto solubile, (c) Attività enzimatiche (Mod. da Mazzon et al., 2022).

In un altro esperimento condotto sempre in condizioni controllate di laboratorio, Barili et al. (2023) hanno testato l'effetto del PVC (0,021% p/p) su alcuni parametri chimici e microbiologici di un suolo a diversi tempi d'incubazione (da 3 a 360 giorni). Variazioni significative ($p < 0,05$) sono state riscontrate per l'attività respiratoria del suolo, per l'attività idrolitica valutata a mezzo del test con fluoresceina diacetato, per il C e l'N organici solubili in acqua. Anche la struttura delle comunità microbiche del suolo è risultata influenzata dalla presenza di PVC, come dimostrato dall'abbondanza di specifici taxa batterici e fungini. Dopo un anno di sperimentazione, è stata anche rilevata una riduzione del numero e delle dimensioni delle particelle di PVC ipotizzando un possibile ruolo dei microrganismi sulla degradazione del polimero. Nella figura 7 si riportano le immagini raccolte al microscopio ottico dei campioni relativi al controllo e al suolo trattato con PVC al tempo zero e dopo 360 giorni di sperimentazione.

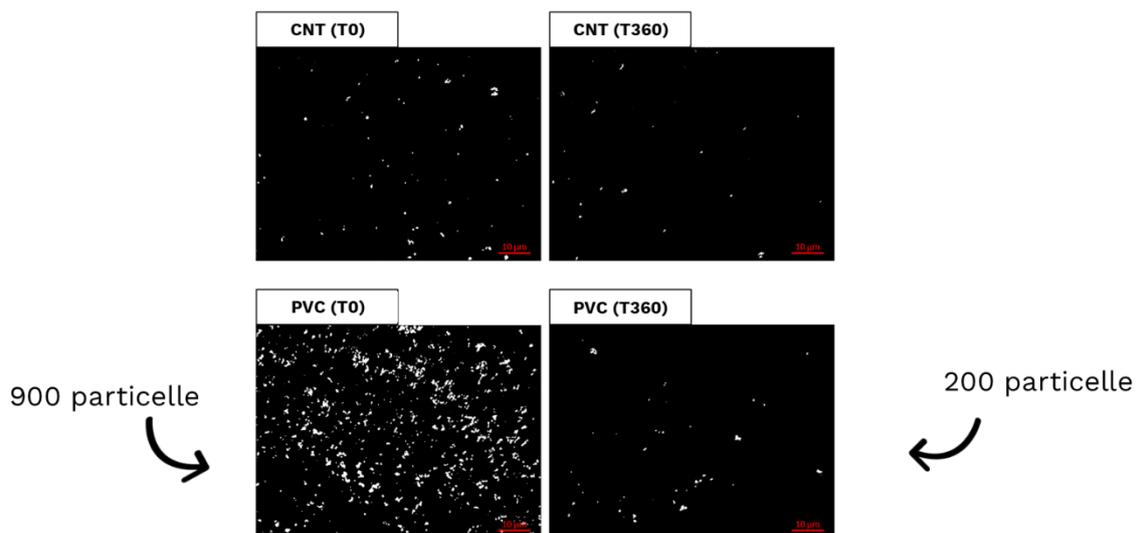


Figura 7. Immagini al microscopio ottico.

Conclusioni

Il recupero in agricoltura delle biomasse da rifiuti e da sottoprodotti costituisce una grande risorsa per motivazioni di carattere tecnico ed economico. Da un punto di vista tecnico esse consentono la chiusura nel suolo del ciclo del C organico, andando in questo modo ad incrementare il contenuto di sostanza organica, indispensabile per il mantenimento della fertilità e della salute del suolo. Elevatissima è la valenza economica, in quanto l'uso di biomasse come fertilizzanti sottrae un enorme quantitativo di rifiuti organici al ciclo dello smaltimento e favorisce lo sviluppo di nuove e interessanti catene produttive, restituendo valore a materiali altrimenti inutilizzabili e di difficile gestione.

Tuttavia, occorre che la qualità delle biomasse sia conforme a precisi standard al fine di favorire il miglioramento della fertilità dei suoli e al contempo evitare rischi di impatto negativo sugli altri comparti ambientali e sulla salute umana. Come precedentemente già sottolineato, gli standard di qualità delle biomasse recuperate a fini agronomici sono comunque garantiti dalle leggi di settore e, come sottolineato da Kirchmann et al. (2017), le resistenze da parte del settore agroalimentare e dei consumatori nei confronti dei prodotti coltivati su suoli trattati con biomasse non è basato su conoscenze scientifiche ma, spesso, mero pregiudizio.

La ricerca italiana sul tema della qualità agronomica e ambientale delle biomasse è estremamente attiva ed è sempre stata in grado di dare risposte esaurienti, spesso utilizzate anche in campo autorizzativo, in tema di impatto sul sistema suolo-pianta e controllo degli xenobiotici eventualmente presenti nelle matrici trattate.

Bibliografia

- Barili S., Bernetti A., Sannino C., Montegiove N., Calzoni E., Cesaretti A., Pinchuk I., Pezzolla D., Turchetti B., Buzzini P., Emiliani C., Gigliotti G., 2023. Impact of PVC microplastics on soil chemical and microbiological parameters. *Environmental Research* 229: 115891.
- Ciavatta C., Gigliotti G., Miano T.M., Tambone F., Zaccone C., 2022. Biomasse in Agricoltura: Caratterizzazione e uso sostenibile. Pàtron Editore, Bologna, pp. 365.
- Ciavatta C., Centemero M., Toselli M., Zaccone C., Senesi N., 2022. Compost Production, Analysis and Applications in Agriculture. Chapter 13. In: *Multi-scale Biogeochemical Processes in Soil Ecosystems: Critical Reactions and Resilience to Climate Changes*. (Yang Y., Keiluweit M., Senesi N., Xing B.). Part IV - Mitigation of Greenhouse Gas Emission and Improvement of Ecosystem Resilience. Wiley - IUPAC Series on Biophysico-Chemical Processes in Environmental Systems, 5: 297-321.

- Decreto Interministeriale n. 5046 del 25 febbraio 2016 recante Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue di cui all'art. 112 del Decreto legislativo 3 aprile 2006 n. 152, nonché per la produzione e l'utilizzazione agronomica del digestato di cui all'art. 52, comma 2-bis del decreto legge 22 giugno 2012, n. 83, convertito in legge 7 agosto 2012 n. 134.
- Decreto Legislativo 27 gennaio 1992, n. 99. Attuazione della direttiva n. 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura. della G.U. della Repubblica italiana n. 38 del 15 febbraio 1992, Suppl. Ordinario n. 28.
- Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n.75. Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88. G.U. della Repubblica italiana n. 126 del 26 maggio 2010.
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale. G.U. della Repubblica italiana n. 88 del 14 aprile 2006.
- Florentino A.L., de Vicente Ferraz A., de Moraes Goncalves J.L., Asensio V., Muraoka T., dos Santos Dias C.T., Nogueira T.A.R., Capra G.F., Abreu-Junior C.H., 2019. Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. *Journal of Cleaner Production*, 220, 177-187, 10.1016.
- Francioso O., Ciavatta C., Sánchez-Cortés S., Sitti L., Gessa C., 2000. Spectroscopic characterization of soil organic matter in long-term amendment trials. *Soil Science*, 165(6), pp. 495-504.
- Giusquiani P.L.; Pagliai M.; Gigliotti G.; Businelli D.; Benetti A., 1995. Urban waste compost: Effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *Journal of Environmental Quality*, Volume 24, Issue 1, Pages 175 - 182.
- Grigatti M., Barbanti L., Hassan M.U., Ciavatta C., 2020. Fertilizing potential and CO2 emissions following the utilization of fresh and composted food-waste anaerobic digestates. *Science of the Total Environment*, 698, 134198.
- Guerrini I.A., Croce C.G.G., Bueno O. de C., Jacon C.P.R.P., Nogueira T.A.R., Fernandes D.M., Ganga A., Capra G.F., 2017. Composted sewage sludge and steel mill slag as potential amendments for urban soils involved in afforestation programs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 93-104.
- Guerrini I.A., Sampaio T.F., Bogiani J.C., Backes C., Harrison R.B., Oliveira F.C., Gava J.L., Traballi R.C., Garuba De Menezes Mota R., Roder L.R., Ganga A., Capra, G.F., 2021. Sewage sludge as a pedotechnomaterial for the recovery of soils compacted by heavy machinery on Eucalyptus commercial plantation. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129320.
- ISPRA, 2022. Rapporto Rifiuti Urbani, Rapporti 380/2022, ISBN 978-88-448-1145-7.
- Lal R., 2010. Depletion and restoration of carbon in pedosphere. *Pedologist*, 19-32.
- Legge 16 novembre 2018, n. 130. Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 28 settembre 2018, n. 109, recante disposizioni urgenti per la città di Genova, la sicurezza della rete nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, gli eventi sismici del 2016 e 2017, il lavoro e le altre emergenze. G.U. Serie Generale n. 269 del 19.11.2018 - Suppl. Ordinario n. 55.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, and G.E. Schuman, 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Kirchmann H., Börjesson G., Kätterer T. et al., 2017. From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, 46, 143-154.
- Manca A., Silva M.R., Guerrini I.A., Fernandes D.M., Villas Bôas R.L., Silva L.C., Fonseca A.C., Ruggiu M.C., Cruz C.V., Sivilsaca D.C.L., Mateus C.M.D., Murgia I., Grilli E., Ganga A., Capra G.F., 2020. Composted sewage sludge with sugarcane bagasse as a commercial substrate for Eucalyptus urograndis seedling production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122145.
- Mazzon M., Gioacchini P., Montecchio D. Rapisarda S., Ciavatta C., Marzadori C. 2022. Biodegradable plastics: Effects on functionality and fertility of two different soils. *Applied Soil Ecology* 169 January 2022 Article number 104216.
- Montanarella L., Panagos P., 2021. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal, *Land Use Policy*, 100, 104950.
- Pagliai M.; Vittori Antisari L., 1993. Influence of waste organic matter on soil micro- and macrostructure. *Bioresource Technology*, Volume 43, Issue 3, Pages 205 - 213.
- Papa G., Cucina M., Echchouki K., De Nisi P., Adani F., 2023. Anaerobic digestion of organic waste allows recovering energy and enhancing the subsequent bioplastic degradation in soil. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 188, 106694.
- Puglisi E., Cappa F., Fragoulis G., Trevisan M., Del Re A.M., 2007. Bioavailability and degradation of phenanthrene in compost amended soils. *Chemosphere*, Volume 67, Issue 3, Pages 548 - 556.
- Said-Pullicino D., Gigliotti G., Vella A., (2004). Environmental fate of triasulfuron in soils amended with municipal waste compost. *J. Environ. Qual.* 33:1743-1751.
- Sciubba L., Cavani L., Marzadori C., Ciavatta C., 2013. Effect of biosolids from municipal sewage sludge composted with rice husk on soil functionality. *Biol. Fert. Soils* 49: 597-608. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0748-4>
- Senesi N., Brunetti G., La Cava P.L., Miano T.M., 1994. Adsorption of alachlor by humic acids from sewage sludge and amended and non-amended soils. *Soil Science* 157(3), pp. 176-184.
- Zilio M., Pigoli A., Rizzi B., Goglio A., Tambone F., Giordano A., Maretto L., Squartini A., Stevanato P., Meers E., 2023. Nitrogen dynamics in soils fertilized with digestate and mineral fertilizers: A full field approach. *Science of the Total Environment*, Volume 86810, Article number 161500

Le scienze e tecnologie alimentari nella bioeconomia

Dalla Rosa M.

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari (DISTAL), CIRI Agroalimentare, Campus di Scienze degli Alimenti, Cesena, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Riassunto

La crescente attenzione nei confronti delle tematiche che ruotano attorno alla bioeconomia coinvolge necessariamente anche le tecnologie che entrano in gioco nella conservazione, trasformazione, stoccaggio e trasporto dei prodotti agricoli e zootecnici sottoposti a trattamenti di trasformazione più o meno intensi. Inoltre, nell'ottica della lotta allo spreco e del riutilizzo di sottoprodotti e scarti - evitando per quanto possibile che diventino rifiuti - le tecnologie alimentari rivestono un ruolo chiave per il raggiungimento di quel circolo virtuoso su cui si base il concetto di economia circolare. In tale contesto si considera qui l'implementazione di alcune tecnologie in grado di migliorare l'efficiamento produttivo nel mantenimento della qualità dei prodotti alimentari.

Abstract

The growing attention around the bioeconomy necessarily also involves technologies that come into play in the preservation, processing, storage and transportation of agricultural and livestock products subjected to more or less intensive processing treatments. Moreover, with a view to combating waste and reusing by-products and waste - avoiding as far as possible their becoming waste - food technologies play a key role in achieving the virtuous circle on which the concept of circular economy is based. In this context, we consider here the implementation of some technologies that can improve the production efficiency in maintaining the quality of food products.

Keywords: food, preservation, processing, storage, waste, quality

Premessa: Ruolo della Società Italiana di Scienze e Tecnologie Alimentari

La SISTAL- Società Italiana di Scienze e Tecnologie Alimentari - è organo di espressione dei Docenti Universitari impegnati nell'insegnamento e nella ricerca nel settore specifico - AGR/15.

La Società si propone di contribuire al progresso della scienza e delle sue applicazioni nel campo della conservazione, della trasformazione, della commercializzazione, della gestione e controllo della qualità e sicurezza degli alimenti, anche nei riguardi della percezione di questi temi da parte dei mezzi di informazione e dei cittadini e dell'insegnamento ai vari livelli. A partire dalla sua fondazione, tra le finalità della Società è stata posta attenzione alla lotta alle perdite e agli sprechi alimentari con un approccio di economia circolare per differenti filiere alimentari. A tal fine sono state spesso promosse attività di ricerca e approfondimenti sui temi del riutilizzo e valorizzazione di sottoprodotti e scarti di processo, nonché la promozione dello studio e ricerca di tecnologie a ridotto impatto energetico per la stabilizzazione e trasformazione degli alimenti.

L'industria alimentare in Italia

L'industria alimentare con oltre nove unità di personale impiega quasi 400 mila addetti era nel 2022 il secondo comparto manifatturiero nazionale dopo la meccanica, con un fatturato

complessivo di oltre 180 miliardi e circa 7000 mila imprese. La bilancia commerciale con l'estero è significativamente a favore delle esportazioni con quasi 50 miliardi a fronte di circa 32 miliardi di alimenti importati. Del personale impiegato il 43% è riferibile alla produzione, mentre il 22% nel controllo e nelle procedure per la garanzia della sicurezza e nella gestione della qualità. Il 19% del personale è impiegato nei settori che fanno riferimento al marketing, il 9% nella logistica e lo stoccaggio e infine il 7% nei settori amministrativi e finanziari.

Nei periodi delle crisi finanziarie e della pandemia COVID il settore è riuscito a mantenere inalterati i livelli occupazionali con una riduzione marginale di poche migliaia di unità di personale negli ultimi 15 anni. (Fonte Federalimentare su dati ISTAT).

Nonostante la maggiore quota di prodotti dell'industria alimentare siano riconducibili alla macro categoria degli alimenti tradizionali, il comparto è fortemente proteso alla innovazione con investimenti di oltre l'8% del fatturato investito in ricerca e innovazione, con circa il 2% in analisi e controllo di sicurezza e qualità e oltre il 4% per nuovi impianti, automazione, ICT e logistica. Circa il 2% è investito in ricerca e sviluppo propriamente detta in prodotti e processi innovativi.

I settori di maggiore interesse e di tendenza risultano essere i prodotti *convenience*, ma tenendo in grande considerazione la necessità di garantire naturalità e per quanto possibile freschezza dei prodotti.

Le ricette e le nuove formulazioni tengono conto delle valenze nutrizionali e salutistiche ma anche di proprietà fisiche e strutturali come la texture dei prodotti, il tutto nell'ottica di una maggiore attenzione all'ambiente e alla sostenibilità. Peraltro, questi obiettivi seguono la logica alla base delle tre aree strategiche del CLUSTER Agrifood nazionale di cui Federalimentare è promotore:

- Sostenibilità e cambiamenti climatici
- Qualità e sicurezza
- Nutrizione e salute

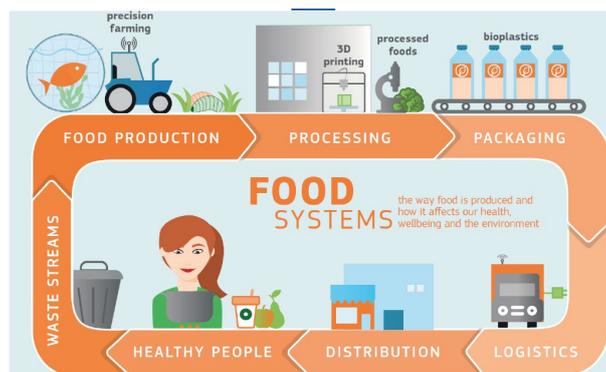


Figura 1. Food 2030, la *Research and Innovation Policy* della UE.

Le sfide del futuro e la bioeconomia

Le sfide della bioeconomia in campo alimentare si possono individuare nel contesto della previsione delle necessità della produzione alimentare globale del 2050, che si stima raggiunga e superi la soglia di 9,5 miliardi, con un'urbanizzazione fino al 66% a livello mondiale, ed un incremento della capacità di spesa della classe media soprattutto nei Paesi orientali in crescita. D'altra parte, i futuri scenari dovranno anche prendere in considerazione le sfide dettate dal

cambiamento del clima, le condizioni di sviluppo delle produzioni primarie, l'incidenza di eventi specifici come le pandemie e le crisi alimentari globali dovute ai crescenti conflitti mondiali da cui scaturiscono estreme condizioni di criticità nell'approvvigionamento alimentare.

In tale contesto è quindi necessario un cambio di paradigma nell'affrontare il tema della trasformazione alimentare, andando oltre i consueti confini in cui si collocano le produzioni e le valutazioni della qualità convenzionali, incrociando invece gli aspetti nutrizionali con quelli sociali, culturali ed ambientali con una ampia visione rivolta alle esigenze planetarie. In altre parole, una visione rivolta all'innovazione, pur salvaguardando le proprietà intrinseche di produzioni alimentari tradizionali di grande interesse socioeconomico in un contesto locale.

Le scienze e tecnologie alimentari si collocano nella filiera dalle fasi di post-raccolta a tutte le fasi formulazione, processo, packaging e distribuzione fino alla gestione e valorizzazione di sottoprodotti e scarti, con le competenze necessarie per affrontare le condizioni tecnologiche in ogni fase. Infatti, secondo le previsioni in ambito UE (Food 2030, EU's research and innovation policy), le principali priorità di ricerca e innovazione del settore agroalimentare sono, oltre all'agricoltura di precisione nella produzione primaria, la gestione dei sottoprodotti per la riduzione di perdite, sprechi e rifiuti, le innovazioni nei processi di trasformazione fino alla stampa 3D, l'introduzione di bioplastiche nel packaging e l'implementazione di sistemi intelligenti nella logistica e nella distribuzione, sempre cercando la massima qualità ed equilibrio nutrizionale di diete che contribuiscano a mantenere in salute la popolazione.

Anche a livello nazionale, considerando il Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027 sui grandi ambiti della ricerca e innovazione su prodotti alimentari, bioeconomia, risorse naturali, agricoltura e ambiente, sono presenti i principi dell'Economia Circolare per favorire la sostenibilità delle produzioni, con la declinazione dei seguenti punti di attenzione:

- Uso efficiente di materie prime come acqua ed energia;
- prevenzione degli sprechi alimentari;
- gestione delle eccedenze alimentari;
- progettazione del packaging;
- riciclo e valorizzazione dei sottoprodotti.

Le sfide e gli obiettivi delle scienze e tecnologie alimentari quindi si delineano in una serie di interventi, quali:

- le innovazioni di prodotto e di processo attuate anche con approcci biotecnologici,
- le tecnologie termiche a prestazioni migliorate;
- le tecnologie non termiche (alte pressioni di omogeneizzazione, alte pressioni idrostatiche HPP, campi elettrici pulsati, plasma freddo atmosferico, impregnazione sottovuoto, ultrasuoni, luce pulsata);
- i sistemi per aumento della efficienza dei flussi nei processi;
- le analisi LCA relative alle applicazioni delle innovazioni introdotte.

Le azioni da porre in atto si dovranno focalizzare sui seguenti temi di ricerca e sviluppo:

- lo studio delle interazioni e degli effetti del processo e della materia prima sulla struttura degli alimenti;
- lo sviluppo di processi di trasformazione innovativi;
- lo studio di packaging innovativi riciclabili / compostabili ed estensione della shelf life;

- la produzione di alimenti innovativi e salutistici;
- l'applicazione di nanotecnologie per la realizzazione di rivestimenti innovativi;
- la riduzione e la valorizzazione dei sottoprodotti.

In particolare, in considerazione della necessità di efficientamento dei processi, valutato come fattore cruciale dei processi alimentari soprattutto nel contesto della crisi climatica ed energetica, vengono introdotti sistemi di monitoraggio dei flussi di energia, acqua di processo e dei prodotti negli impianti di trasformazione, l'ottimizzazione delle filiere e della catena del freddo con piattaforme digitalizzate IoT. In relazione ai processi termici risulta fondamentale evitare i sovra-trattamenti in operazioni come blanching, sterilizzazioni, disidratazioni, anche introducendo processi termici più efficienti (microonde, radiofrequenze, riscaldamento ohmico) ma anche nell'uso delle basse temperature come in refrigerazione e congelamento / surgelazione. Al fine di meglio comprendere le cinetiche di variazione dei parametri chimici, fisici e biologici dei prodotti nel corso delle trasformazioni è necessario implementare sistemi digitali "intelligenti" di rilevazione non distruttiva di tali proprietà e di utilizzare metodi avanzati di analisi dei big-data per la modellazione delle cinetiche in reali condizioni di processo (Dalla Rosa, 2019).

Introduzione di tecnologie non termiche

Negli ultimi anni si è registrato un enorme aumento della domanda da parte dei consumatori di alimenti preparati sani, naturali e di alta qualità, anche nel settore dei prodotti ittici e dei frutti di mare. Le tecnologie di lavorazione tradizionali, come l'essiccazione prolungata o il riscaldamento, possono portare a un deterioramento dei nutrienti e della qualità sensoriale incompatibile con queste esigenze. In questo contesto, lo sviluppo di tecnologie emergenti nella lavorazione dei frutti di mare può contribuire in modo significativo allo sviluppo di alimenti sicuri, sani e minimamente lavorati.

La classificazione di tali tecnologie e la caratterizzazione degli aspetti ingegneristici si può riassumere di seguito (Jambrak, 2022).

Elettrotecnologie e tecnologie elettromagnetiche

- pulsed electric fields (PEF);
- cold plasma technologies (CPT: e.g. atmospheric cold plasma, CAP; PAW);
- magnetic fields (MF);
- electrohydrodynamic processing (EHD);
- ionizing radiation (IOR; e.g. electron beam (EB) processing).

Tecnologie basate sulla variazione della pressione

- vacuum impregnation (VI);
- high hydrostatic pressure (HHP/HPP);
- hydrodynamic pressure processing (high pressure homogenization, HPH);
- supercritical fluid processing.

Altre Tecnologie Fisiche

- ultrasonication (US);
- hydrodynamic cavitation;
- shock waves;

- UV light;
- pulsed light;
- membrane technologies (microfiltration, membrane separation etc.);
- modified atmosphere packaging.

Campi elettrici pulsati (PEF)

La tecnologia si basa sulla applicazione di impulsi ad alto voltaggio e di breve durata (ms- μ s-ns) a tessuti biologici posti tra due elettrodi e, a grandi linee, può essere impiegata in due modalità operative, Elettroporazione reversibile con formazione di nano-pori di durata temporanea nello strato lipidico della membrana e Elettroporazione irreversibile che causa permanenti nano-pori nella membrana che alterano l'omeostasi e roccolano morte della cellule (Figura 2).

Infatti, l'applicazione dei PEF può essere destinata alla decontaminazione o sanificazione a freddo di prodotti alimentari fluidi, sfruttando l'effetto della elettroporazione irreversibile per causare la morte cellulare di microorganismi alteranti o patogeni quando l'applicazione campo elettrico esterno E che provoca un incremento potenziale transmembrana (TMV) molto superiore al valore critico Ec . L'effetto del trattamento dipende dalla differenza di potenziale, dalla geometria della camera e dalle proprietà dielettriche della matrice da trattare.

Nel caso di trattamenti a minore intensità, parlando di elettroporazione reversibile, l'azione è maggiormente rivolta all'efficientamento di processo con incremento degli scambi di materia e di calore. A titolo esemplificativo, nel caso di disidratazione in corrente d'aria di prorotti vegetali in foglia, il trattamento con PEF permette una riduzione del 30% circa nei tempi di essiccazione a basse temperature (40-55°C) e una accelerazione delle cinetiche di rimozione dell'acqua vicina al 50% a temperature più elevate (75°C, D'Elia, 2019). Un altro esempio di applicazione dei trattamenti PEF in fase preliminare a processi di trasformazione convenzionali è quello relativo a tuberi di patate destinati alla frittura in forma di chips. In tal caso, dopo una sperimentazione su impianti pilota in sede accademica, l'applicazione ha avuto una reale ricaduta industriale, raggiungendo interessanti risultati relativi alla riduzione nella formazione di acrilammide di circa il 30% rispetto al controllo non trattato e di circa il 17% anche nei confronti del trattamento preliminare di blanching (Genovese et al., 2019).

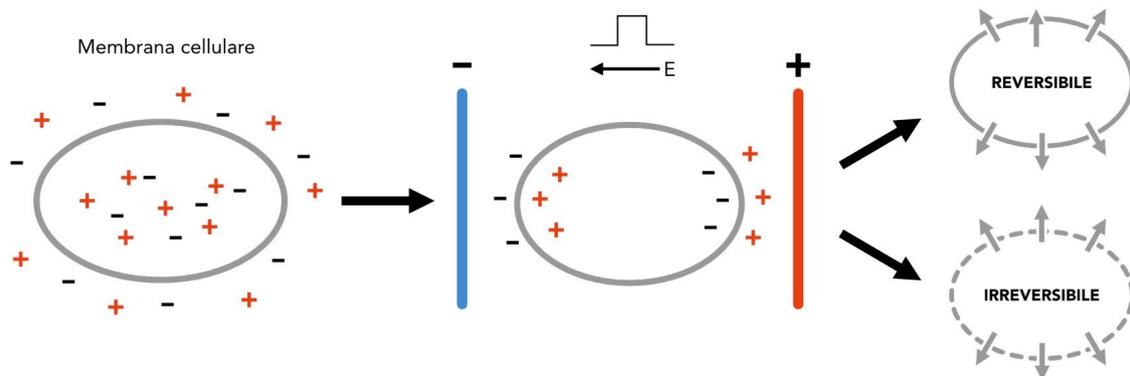


Figura 2. Meccanismi di elettroporazione causati dall'applicazione dei campi elettrici pulsati (mod. da Kotnik e. Miklavčič, 2000).

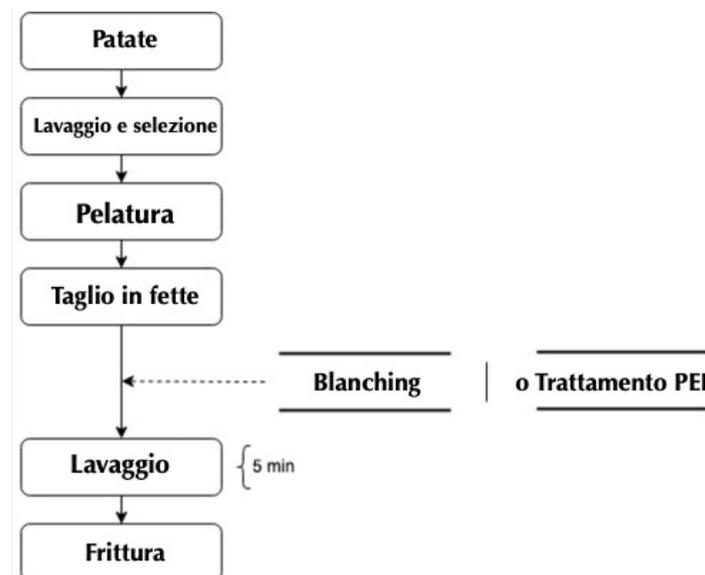


Figura 3. Introduzione di pretrattamento PEF nella lavorazione di patate chips (modificato, da Genovese et al., 2019).

Plasma freddo atmosferico

Un'altra tecnologia emergente non termica atta a ridurre l'impatto ambientale delle trasformazioni è la applicazione del Plasma Freddo atmosferico (CAP). Anche in questo caso il trattamento è stato principalmente studiato per la decontaminazione e sanificazione di prodotti e superfici ma recentemente sono in corso attività di ricerca per l'applicazione del plasma per la modificazione di proprietà funzionali di materiali alimentari e l'incremento dell'efficienza dei processi di scambio termico e di materia. Il gas plasma, considerato come il quarto stato della materia, può essere utilizzato sia in forma gassosa sia in forma liquida - generalmente come acqua attivata al plasma, PAW - ed è stato testato su materiali alimentari di differente natura, così come risulta da una vasta letteratura scientifica. Nonostante l'elevato potenziale dimostrato per la stabilizzazione degli alimenti come trattamento superficiale, ci sono ancora molti aspetti della tecnologia CAP che sono sconosciuti o che necessitano di chiarimenti, in particolare per quanto riguarda la qualità degli alimenti e le caratteristiche

funzionali e la potenziale tossicità dei prodotti trattati. Al fine di contribuire all'incremento delle conoscenze in tal senso, nel contesto di un progetto di ricerca di interesse nazionale a livello di impianti pilota su piccola scala, è stata posta in atto una strategia di ricerca complessa e multidisciplinare basata sulla valutazione dell'effetto dell'esposizione al plasma per prodotti di origine vegetale e animale. Sono stati valutati tutti gli aspetti legati alla qualità e alla sicurezza e al degrado della qualità durante la conservazione, cercando in particolare di colmare le lacune individuate dalla revisione della letteratura (Tappi et al, 2023). Un' interessante evoluzione su impianto pilota di dimensioni industriali è stata realizzata dal centro di ricerca ATB di Potsdam (Germania) in cui il trattamento al plasma è stato combinato con il processo di essiccazione ad aria (Bußler et al., 2017) al fine di ottenere un doppio effetto di riduzione dei tempi di trattamento e del carico microbico (Schluter, 2023).

Trattamenti con Ultrasuoni (US)

L'uso degli ultrasuoni è uno dei metodi di trattamento più promettenti per i processi di produzione alimentare, come dimostrato dalla ricerca scientifica e industriale condotta attualmente su larga scala. Le ricerche condotte indicano che, a seconda del tipo di materia prima, della sua struttura e anatomia, nonché delle proprietà delle onde sonore applicate (lunghezza, frequenza, intensità e coefficiente di attenuazione) e della durata dell'applicazione, si possono ottenere risultati sia di riduzione dei tempi che di estensione dello scambio di massa nei processi di essiccazione (Nowacka et al., 2021). Infatti, il trattamento a ultrasuoni del tessuto vegetale genera diversi effetti, tra cui cavitazione, l'effetto spugna ed effetti di accompagnamento, che portano alla distruzione della struttura. A causa dei suddetti fenomeni, si formano microcanali, soprattutto all'inizio della sonicazione. Il tempo di sonicazione più lungo comportato maggiori danni al tessuto e la formazione di aree vuote. Come conseguenza dei cambiamenti nella struttura cellulare, si intensificano i processi basati sullo scambio di massa, come la disidratazione osmotica e l'essiccamento ad aria.

Inoltre, l'applicazione di ultrasuoni prima della disidratazione osmotica o durante il processo di disidratazione influisce sulle proprietà fisiche e chimiche, incluso il contenuto di componenti bioattivi. Pertanto, l'applicazione degli ultrasuoni offre possibilità di progettare prodotti, ad esempio snack alla frutta o alimenti funzionali, caratterizzati da proprietà diverse, spesso migliori, rispetto a quelle ottenute con la disidratazione convenzionale (Nowacka et al., 2021), oltre che a condurre ad un possibile effetto positivo nei confronti della inattivazione di microrganismi ed enzimi (Benedito et al., 2015).

Incremento della sostenibilità di specifiche filiere produttive: i prodotti da forno come caso-studio

In merito alla problematica della ricerca di un sostituto all'olio di palma nelle formulazioni dei prodotti da forno, sono state prospettate interessanti soluzioni. L'utilizzo di miscele di olio di girasole ad elevato contenuto di acido oleico e olio di cocco, ha permesso di raggiungere buone caratteristiche di stabilità ossidativa in conservazione, presentando quindi una promettente alternativa di formulazione, in grado di prolungare la shelf life di biscotti formulati con materie prime più sostenibili dal punto di vista ambientale (Caboni, 2023).

Efficientamento dei processi e digitalizzazione

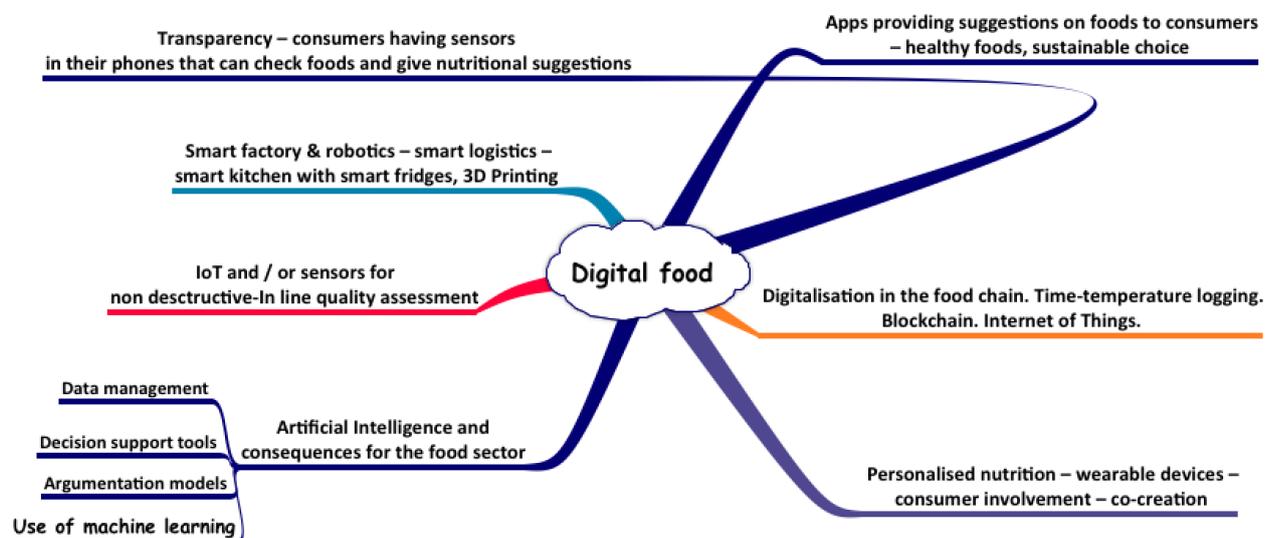


Figura 4. Possibili interventi del digitale nei processi alimentari (Dalla Rosa., 2019).

La combinazione di obiettivi tra incremento della sostenibilità ambientale e riduzione dell'impatto dei crescenti costi energetici nei processi alimentari rende sempre più pressante la necessità di elevare il livello di efficientamento delle industrie alimentari nell'ottica della bioeconomia.

In Figura 4 sono riportati in uno schema sintetico i possibili interventi in cui le tecnologie digitali e del campo informatico convenzionale e avanzato possono incrementare il livello di efficienza dei processi alimentari.

La possibilità di acquisizione di dati relativi ai processi e alle caratteristiche dei prodotti nel corso delle fasi di trasformazione e di conservazione, anche con metodi non distruttivi, risulta basilare per avere un adeguato livello del controllo di processo. A titolo di esempio, nel caso di prodotti surgelati in conservazione, lo studio dello stato dell'acqua nei prodotti ha permesso di creare un modello per la previsione della shelf-life (Iaccheri et al., 2021).

Bioeconomia e packaging sostenibile

In tema di bioeconomia e di sostenibilità, il problema del packaging risulta centrale nell'immaginario collettivo, pur se, secondo gli esperti di LCA, risulterebbe essere sempre piuttosto marginale, in termini di impronta carbonica, rispetto ad altre fasi della filiera alimentare, a partire dall'impatto della produzione primaria. Ciononostante, la consapevolezza della necessità di ridurre gli imballaggi non strettamente necessari alla conservazione e distribuzione dei prodotti e della ricerca di fonti più sostenibili per i materiali utilizzati ha creato filoni di ricerca molto avanzati e interessanti proposte operative.

In particolare, lo sviluppo di processi di trasformazione innovativi relativi al packaging vede alcuni punti specifici, come descritti nel Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027:

- il miglioramento della shelf-life, delle proprietà sensoriali e nutrizionali e la loro stabilità nel tempo, mantenendo un livello di sicurezza;

- la riprogettazione dei sistemi di packaging in un'ottica di fine vita (ad es., packaging monomateriale più facilmente riciclabile) e verifica delle prestazioni per applicazioni specifiche;
- le prestazioni tecnologiche di packaging compostabili (ad es. barriera al vapore acqueo e all'ossigeno);
- l'adozione di sistemi di active packaging come strategia per bilanciare le performance eventualmente inferiori di nuovi packaging più riciclabili e/o compostabili;
- l'impiego di materiali innovativi, fibre e biomateriali biodegradabili ed attivabili, sostanze utilizzabili per rivestire gli alimenti (*edible coating*) dovranno essere testati e validati relativamente ai problemi dei materiali e oggetti a contatto con gli alimenti (MOCA) per giungere alla dichiarazione di conformità MOCA e alla certificazione degli impianti di processo e confezionamento;
- lo sviluppo di software dedicati per il controllo dei processi di trasformazione e di confezionamento, la progettazione meccanica avanzata e il disegno igienico, per la riduzione di tempi, costi e impatto ambientale per le fasi di pulizia e sanitizzazione e confezionamento degli impianti e aumentando delle rese di processo.

Nell'affrontare il tema della sostenibilità del packaging si devono considerare le diverse possibilità offerte dalle scienze dei materiali, incrociando le fonti fossili o da materiale organico (biobased), rinnovabile e non rinnovabile e materiale biodegradabile (o meglio computabile) o non biodegradabile (figura 5).

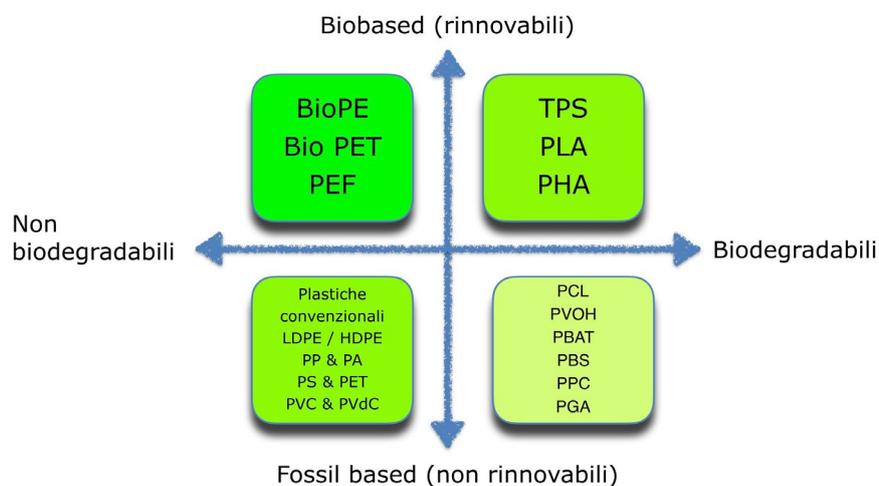


Figura 5. Classificazione delle plastiche in quattro tipi, in base alla loro biodegradabilità o meno e all'origine delle materie prime utilizzate per la loro produzione (modificato, da Robertson, 2014).

Nonostante il grande interesse per i materiali biodegradabili e data l'incertezza su cosa sia realmente l'imballaggio sostenibile, le grandi multinazionali alimentari per ora hanno optato per plastiche *biobased* ma non biodegradabili. Questo dovrebbe essere notato anche dalle aziende minori che stanno pensando di passare a imballaggi biobased e biodegradabili e da quelle che stanno facendo ricerche sui materiali di imballaggio biodegradabili. Infatti, la conversione di un materiale solido in un gas attraverso il compostaggio o la biodegradazione dovrebbe essere solo l'ultima risorsa, mentre sarebbe molto meglio catturare l'energia e i materiali incorporati per riutilizzarli attraverso il riciclo (Robertson, 2014).

Ciononostante, la ricerca si rivolge sempre più allo studio di migliori *performances* di materiali biodegradabili e allo studio di LCA relativi all'introduzione di materiali riciclati. Siracusa et al. (2014) dimostrarono, attraverso l'analisi LCA, che l'uso di un granulo di PA riciclato al 25% e valutato dal punto di vista ambientale risultava vantaggioso consentendo di aumentare il livello di sostenibilità ambientale associato al ciclo di vita del sacco, ma risultava meno efficace rispetto all'assottigliamento del film. Ciò era dovuto principalmente al dispendio di energia elettrica utilizzata per il trattamento dei rifiuti PA (polyamide) e al costo ambientale del trasporto del granulo riciclato alla fabbrica di produzione del film. Questo ultimo fattore di costo era dovuto a sua volta ad un aumento del 10% della distanza rispetto a quella percorsa per la fornitura di granulo di PA vergine.

Valorizzazione e riduzione dei rifiuti e sottoprodotti. Recupero di componenti funzionali

In un approccio di bioeconomia nel campo alimentare risulta fondamentale anche considerare la riduzione delle perdite e degli sprechi delle materie prime, dei prodotti semilavorati e/o finiti ma anche la valorizzazione degli scarti di lavorazione e dei sottoprodotti dei processi di trasformazione. Numerosi progetti sono stati proposti e sono in corso negli ultimi due decenni con l'obiettivo di recuperare componenti diversi con potenziale elevato valore per l'industria alimentare, farmaceutica e cosmetica. Nell'ambito del progetto BBI INGREEN (<https://ingreenproject.eu/>) si sono impiegate biotecnologie industriali innovative ed efficienti per affrontare il tema della valorizzazione di scarti e sottoprodotti di industrie alimentari (caseario e cerealicolo) e della carta. La sfida era quella di generare nuove catene di valore biobased tra settori molto distanti tra loro: da quello alimentare, dei mangimi e della cosmesi a quello farmaceutico, nutraceutico e del packaging. Un altro obiettivo è stato quello di aumentare la conoscenza e la consapevolezza della società sui benefici e le opportunità dell'economia circolare. Tra gli scopi del progetto troviamo:

la selezione dei ceppi/consorzi microbici più appropriati in relazione alle caratteristiche fisico-chimiche, di composizione e di processo di ciascun flusso secondario/sottoprodotto considerato; lo studio delle caratteristiche dei prodotti finali da ottenere; l'esame dei vincoli di scalabilità a livello industriale (resa, tasso di produzione, ecc.); l'integrazione e l'accettazione delle nuove biotecnologie negli impianti industriali esistenti; la comparazione dei fattori economici in concorrenza con composti non biobased.

Un altro esempio di studio di bioeconomia circolare sono stati i progetti di valorizzazione dei sottoprodotti dell'industria vinicola nella produzione di integratori di alta qualità. L'utilizzo di processi di ultrafiltrazione (UF) e di membrane in acetato di cellulosa prodotte in laboratorio per la nanofiltrazione (NF) è stato oggetto di studio in un processo sequenziale e sostenibile per frazionare e raffinare i composti fenolici dai fanghi di cantina e per ottenere frazioni concentrate con elevate attività antiossidanti (Arboleda Mejia et al., 2020). Ancora, l'incapsulamento di composti polifenolici bioattivi recuperati dalla nanofiltrazione di fecce di vino con maltodestrina è stato realizzato per ottenere una micropolvere essiccata spray con un elevato valore nutrizionale. La digestione simulata in vitro eseguita in condizioni fisiologiche ha evidenziato la bioaccessibilità dei polifenoli dai microincapsulati e quindi un potenziale di assorbimento a livello gastrointestinale (Ricci et al., 2022).

Nel campo dei prodotti ittici, sul quale l'interesse è sempre in crescita seguendo un approccio di *bioeconomia blu*, sono stati condotti numerosi sforzi per la valorizzazione di scarti di lavorazione, sottoprodotti della pesca e di specie sottoutilizzate.

In tale contesto, l'estrazione di chitina dal carapace di crostacei e l'ottenimento di chitosano per usi alimentari, è risultato un buon caso studio per la valorizzazione di scarti di lavorazione. Il chitosano così ottenuto è stato utilizzato per la realizzazione di miscela adatte all'impiego alimentare (Sobral et al., 2022), anche utilizzando tecnologie innovative non termiche (ultrasuoni, campi elettrici pulsati, plasma) per modulare il peso molecolare e quindi le caratteristiche del chitosano estratto. Tra le proprietà utili del chitosano possiamo ricordare le seguenti: antiossidante, agente emulsionante, componente chiave di rivestimenti o film commestibili, agente flocculante e chiarificante, conservante alimentare con proprietà antimicrobiche e antifungine, fibra alimentare, agente di immobilizzazione di enzimi, additivo per la stabilizzazione di colore, consistenza e odore (De Aguiar Saldanha Pinheiro et al., 2021.).

Ancora in merito all'utilizzo di sottoprodotti ricordiamo la grande disponibilità di scarti di lavorazione del pomodoro, stimati in circa 6000 t/anno (pari al 3% della produzione) costituiti da bucce e semi (Bacenetti et al., 2015). Nel contesto delle attività del progetto FoodCrossingDistrict, bucce e semi di pomodoro sono stati utilizzati in confrangitura di olive per la realizzazione di olii di oliva aromatizzati con incremento delle proprietà salutistiche e con peculiari caratteristiche sensoriali (Bendini et al., 2015).

In ultimo, la valorizzazione degli scarti di kiwifruit freschi, interi, ma non adatti al mercato del fresco è stata investigata con l'utilizzo di tecnologie a basso impatto. Infatti, i frutti di piccole dimensioni e basso peso sono considerati rifiuti e non sono redditizi sul mercato del fresco, pertanto, la produzione di snack disidratati a base di kiwi, che contengono molti ingredienti benefici per la salute, si considera possa essere una valida alternativa per la produzione di snack a bassa umidità.

Lo studio, finanziato da fondi PSR della Regione Emilia Romagna, ha avuto come scopo quello di sviluppare formulazioni e metodi per la produzione di snack essiccati attraenti e nutrizionalmente validi come snack secchi a base di kiwi giallo. Tre diverse formulazioni di purea (kiwi, finocchio e fragola, limone o spinaci) con o senza l'aggiunta di zucchero sono state sottoposte a due metodi di essiccazione: liofilizzazione, per ottenere barrette di frutta ed essiccazione convenzionale ad aria calda in "fogli" di frutta.



Figura 5. Fettine di kiwi giallo trattate mediante disidratazione osmotica (OD) ed essiccate a bassa temperatura

I prodotti ottenuti sono stati analizzati per il loro contenuto di polifenoli totali (TP), flavonoidi e vitamina C, nonché la loro attività antiossidante. I risultati hanno mostrato che gli snack preparati con liofilizzazione (barrette di frutta) presentavano un contenuto più elevato di TP, vitamina C e flavonoidi rispetto a quelli preparati con l'essiccazione convettiva, mentre l'attività antiossidante non ha sempre seguito questa tendenza. La quantità di composti bioattivi

dipendeva soprattutto dalla formulazione utilizzata per la preparazione degli snack. (Tylewicz et al., 2020).

Verso una dieta più sostenibile: alimenti alternativi / prodotti a base di proteine alternative / riformulazione

Considerando l'urgente necessità di trovare strategie per tentare di promuovere una bioeconomia più sostenibile, nel novero dei possibili interventi per ridurre l'impatto della produzione del cibo si trova una transizione almeno parziale dell'approvvigionamento di fonti animali - in particolare modo di proteine animali - con fonti vegetali (*plant-based*) secondo un approccio "flexitariano". Springmann et al (2018) hanno ben delineato le possibili strategie per la riduzione degli impatti ambientali del sistema alimentare, che potrebbero aumentare notevolmente a causa dei cambiamenti previsti nel consumo e nella produzione di cibo. In assenza di misure mirate essi supererebbero i confini planetari, tanto che i processi ecosistemici chiave potrebbero rischiare di essere destabilizzati. E' quindi necessario combinare sinergicamente i miglioramenti nelle tecnologie e nella gestione agricola, per la riduzione delle perdite e degli sprechi alimentari ma anche promuovere cambiamenti nelle abitudini alimentari verso diete più sane e a base vegetale, con particolare attenzione ai contesti locali e alle pressioni ambientali. Questa sarà una sfida fondamentale per definire percorsi specifici per aree del pianeta per lo sviluppo sostenibile dei sistemi alimentari (Springmann et al., 2018). Pertanto numerose attività di ricerca nell'ottica dello studio delle proteine alternative sia di origine vegetale sia da fonti animali non convenzionali a basso impatto sono in corso nei laboratori di scienze e tecnologie alimentari anche in Italia. A titolo esemplificativo, si riporta lo studio sull'utilizzo di farina di grillo che aveva lo scopo principale quello della valutazione dell'effetto di biotecnologie fermentative di precisione, utilizzando ceppi di *Yarrowia lipolytica* e *Debaryomyces hansenii* per la produzione di farina idrolizzata di insetti da utilizzare come ingrediente alimentare. I principali risultati hanno dimostrato un grade potenziale dei ceppi microbici utilizzati per la produzione di ingredienti basati sulla farina di grillo con elevate proprietà di sicurezza e funzionalità con apprezzabili caratteristiche sensoriali e tecnologiche. Inoltre, tutti i ceppi sono risultati in grado di ridurre il contenuto di chitina e di produrre componenti antimicrobici e salutistiche come acidi grassi a corta catena, chitosano, GABA e acido linolenico, arachidonico, AABA e BABA (Patrignani et al., 2020).

Sempre tra le linee di ricerca relative all'adeguamento della dieta verso prodotti più salutari e sostenibili, si ricordano due progetti finanziati da enti regionali in merito al tentativo di ridurre alcuni aspetti di impatto di prodotti alimentari considerati tipici e anche con certificazione di origine. In particolare, nella filiera del Parmigiano Reggiano si è studiato un formaggio Parmigiano Reggiano iposodico (NaCl -25% rispetto alla media attuale) con le caratteristiche sensoriali tipiche del PR di pari di età. Inoltre è stato sviluppato un nuovo formaggio a breve stagionatura (30-60 gg) prodotto con latte, ingredienti, attrezzature utilizzate nella produzione DOP. Questo deve avere caratteristiche sensoriali proprie e distintive, essere *lactose free*, avere una carica microbica ancora viva e vitale di batteri lattici potenzialmente probiotici derivanti dal latte crudo in numero rilevante. In ultimo, sono stati studiati formulati a base di Parmigiano Reggiano destinati a target particolari di consumatori (bambini, sportivi, anziani), che sfruttano le proprietà biofunzionali del prodotto, ne favoriscono il consumo e l'impiego come ingrediente (Bortolazzo et al., 2018). All'interno del progetto, in funzione della quantità di NaCl utilizzato, sono stati studiati alcuni parametri qualitativi nel corso della fase di maturazione. Lo studio ha fornito informazioni sulla caratterizzazione del Parmigiano Reggiano

DOP a ridotto contenuto di NaCl per quanto riguarda il processo di lipolisi. Secondo i risultati ottenuti, pur se una diminuzione della concentrazione di NaCl potrebbe aver aumentato l'estensione del processo di lipolisi, i profili degli acidi grassi liberi (FFA) e diacilglicerolo DAG erano molto simili. Su questa base, sembra possibile una riduzione del 9% del contenuto di NaCl nel Parmigiano Reggiano. Inoltre, una riduzione del 33% della durata del processo di salatura consentirebbe alle aziende casearie di lavorare in condizioni più flessibili e potrebbe portare a un aumento della loro produttività (Salaberría et al., 2021).

Un altro interessante esempio di proposta di innovazione nella produzione di un prodotto con certificazione di origine a base animale ha visto l'utilizzo di tecnologie e ingredienti vegetali innovativi nella produzione e trasformazione della carne suina, andando incontro a un doppio obiettivo: la riduzione di sale e nitrati introducendo impasti privi di glutine, di grassi saturi per andare incontro alle mutate esigenze anche nei preparati domestici e la produzione di salumi innovativi arricchiti con estratti naturali dalle proprietà antiossidanti e protettive (Pinna et al., 2020).

Conclusioni

I contributi che le scienze e tecnologie alimentari possono fornire allo sviluppo di una bioeconomia sostenibile sono molteplici, in una ottica di innovazione di processo, di riduzione delle perdite e degli scarti con riduzione dell'impatto ambientale fino al miglioramento dei prodotti per contribuire a una transizione verso consumi alimentari maggiormente sostenibili.

In tali complessi contesti, la scienza e tecnologia alimentare può rafforzare le catene del valore locali promuovendo il riutilizzo e il riciclo delle risorse alimentari con l'introduzione di fasi di lavorazione degli alimenti al centro di strategie di valorizzazione *bio-based*, anche in campo packaging. Le tecnologie a basso impatto sulla qualità dei prodotti e sull'ambiente dovranno anche includere biotecnologie, utilizzando microrganismi ed enzimi per migliorare le proprietà nutrizionali e organolettiche dei prodotti alimentari e creando nuovi prodotti con un valore economico aggiunto.

Gli approcci scientifici e gli esempi di applicazione riportati come casi studio delle scienze e tecnologie alimentari dimostrano quanto questo complesso insieme di competenze, spesso trasversali a diversi settori scientifici, le rendano adatte a fornire ingredienti per il processo decisionale e per l'innovazione, sostenendo ulteriormente lo sviluppo di una bioeconomia sostenibile.

Bibliografia

- Arboleda Mejia, J.A. , Ricci, A. , Figueiredo, A. S., Versari, A., Cassano, A., de Pinho, M. N. , Parpinello, G. P. 2020. Recovery of Phenolic Compounds from Red Grape Pomace Extract through Nanofiltration Membranes, *Food*, Nov 12;9(11):1649.
- Bacenetti, J., Negri, M., Duca, D., Fusi, A., Fiala, M. 2015. "Digerire" buccette di pomodoro riduce l'impatto ambientale, *Terra e Vita*, 13, 26-28.
- Bendini, A. Di Lecce, G., Valli, E. Barbieri, S. Tesini, F. and Gallina Toschi, T. 2015. Olive oil enriched in lycopene from tomato by-product through a co-milling process, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 66, 371 - 377.
- Benedito, J., Ortuño, C., Castillo-Zamudio, R.L., Mulet. A. 2015. Microbial inactivation by ultrasound assisted supercritical fluids. *Physics Procedia* 70, 824 – 82.
- Bortolazzo, E., Garavaldi, A., Musi, V., Caboni, M., Marzocchi, S., Buhler, S., Gatti, M., Tedeschi, T. 2018. Dalla filiera del Parmigiano Reggiano, nuovi prodotti per nuovi target di consumo. Documenti CRPA.
- Bufler, S., Ehlbeck, Schlüter, O. 2017. Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: Impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 40, 78–86.
- Caboni, M.F., 2023, comunicazione personale.
- D'Elia F. 2019. Effetto dei campi elettrici pulsati sull'essiccazione di prodotti vegetali, Tesi di Laurea Magistrale, Università di Bologna.
- Dalla Rosa., M. 2019 Industry 4.0: where the research could boost the industrial sustainable development ASKFOOD Workshop on Future Scenarios In The Food Sector: Can Industry and Academia Shape Together the Best Actions for Tomorrow's Competitiveness? , 11th November 2019, Rotterdam (NL).

- De Aguiar Saldanha Pinheiro, A.C., Martí-Quijal, F.J., Barba, F.J., Tappi, S., Rocculi, P. 2021. Innovative non-thermal technologies for recovery and valorization of value-added products from crustacean processing by-products—An opportunity for a circular economy approach, *Foods*, 10, 10.3390.
- Federalimentare su dati ISTAT, comunicazione personale, 2023.
- Genovese, Tappi S., Luo, W., Tylewicz, U., Marzocchi, S., Marziali, Romani S., Ragni, L., Rocculi, P. (2019), Important factors to consider for acrylamide mitigation in potato crisps using pulsed electric fields, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 55 (2019) 18–26.
- Gottardi, D., Siroli, L., Braschi, G., Rossi, S., Bains, N., Vannini, L., Patrignani, F., Lanciotti, R. 2023. Selection of *Yarrowia lipolytica* Strains as Possible Solution to Valorize Untreated Cheese Whey. *Fermentation*, 9,51.
- Iaccheri, E., Cevoli, C., Romani, S., Dalla Rosa, M., Molari, G., Fabbri, A. 2021. Simple and efficient approach for shelf-life test on frozen spinach and parsley, *Journal of Agricultural Engineering*, LII, 1199.
- Jambrak, A.R. (Ed.) 2022. *Nonthermal Processing in Agri-Food-Bio Sciences*, Springer.
- Kotnik, T., Miklavčič, D. 2000. Analytical description of the transmembrane voltage induced by electric fields on spheroidal cells. *Biophys. J.* 79: 670-679.
- Nowacka, M., Dadan, M. and Tylewicz, U. 2021. Current Applications of Ultrasound in Fruit and Vegetables Osmotic Dehydration Processes, *Appl. Sci.* 11, 1269.
- Patrignani F., Parrotta L., Del Duca S., Vannini L., Camprini L., Dalla Rosa M., Schlüter O., Lanciotti R., 2020, Potential of *Yarrowia lipolytica* and *Debaryomyces hansenii* strains to produce high quality food ingredients based on cricket powder, *LWT - Food Science and Technology*, 119, 108866.
- Pinna, A., Saccani, G., Schivazappa, C., Simoncini, N., Virgili, R. 2020. Revision of the cold processing phases to obtain a targeted salt reduction in typical Italian dry-cured ham, *Meat Science*, 161, 107994.
- Ricci, A., Arboleda Mejia, J.A., Versari, A., Chiarello, E., Bordoni, A., Parpinello, G., P. 2022. Microencapsulation of polyphenolic compounds recovered from red wine lees: Process optimization and nutraceutical study, *Food Bioprod Process*, 132, pp. 1 - 12.
- Robertson, G.T. 2014. Biobased but not Biodegradable. *Food Technology*, 06.14, 61-70.
- Salaberría, F., Marzocchi, S., Bortolazzo, E., Carrín, M., Caboni, M. 2021. Study of the Effect of NaCl on Lipolysis in Parmigiano Reggiano Cheese. *ACS Food Science & Technology*, 1 (1), 54-59.
- Schluter, O. 2023. Personal Communication.
- Siracusa, V., Ingraio, C., Lo Giudice, A., Mbohwa, C., Dalla Rosa, M. 2014. Environmental assessment of a multilayer polymer bag for food packaging and preservation: An LCA approach, *Food Research International*, 62, 151-161.
- Sobral do Amaral, P.J., Gebremariam, G.G., Drudi, F. De Aguiar Saldanha Pinheiro, A.C., Romani, S., Rocculi, P. and Dalla Rosa, M. 2022. Rheological and Viscoelastic Properties of Chitosan Solutions Prepared with Different Chitosan or Acetic Acid Concentrations, *Foods*, 11, 2692.
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.L., Lassaletta, J., de Vries, V., Vermeulen, S.J. Herrero, M., Carlson, K.M. Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L.J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., Godfray, H.C.J., Tilman, D., Rockström, J. & Willett, W. 2018. Options for keeping the food system within environmental limits, *NATURE*, 562, 519-525.
- Strazzullo G., Schiano Moriello V., Poli A., Immirzi B., Amazio P., Nicolaus B. (2003). "Solid wastes of tomato-processing industry (*Lycopersicon esculentum* "Hybrid Rome") as renewable sources of polysaccharides" *J. Food Technol.* 1(3), 102-105.
- Tappi, S., Nissen, L., Casciano, F., Antonelli, G., Chiarello, E., Picone, G., Laurita, R., Capelli, F., Gherardi, M., Maccaferri, C., Gianotti, A., Bordoni, A., Espmark, Å.M., Capozzi, F., Rocculi, P. (2023) Effect of cold plasma generated with different gas mixtures on safety, quality and nutritional aspects of fresh sea bream fillets, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 89, 103477.
- Tommonaro G., Segura Rodríguez C. S., Santillana M., Immirzi B., De Prisco R., Nicolaus B. and Poli A. (2007). "Chemical Composition, Biotechnological Properties of a Novel Polysaccharide from Peels and Antioxidative Content from Pulp of *Passiflora ligularis* Fruits". *J. Agric Food. Chem.* 55, 7427-7433.
- Tylewicz, U., Nowacka, M., Rybak, K., Drozdal, K., Dalla Rosa, M. and Mozzon, M. 2020. Design of Healthy Snack Based on Kiwifruit, *Molecules*, 25, 3309.

Processi fermentativi nelle strategie “zero-waste”: dagli alimenti funzionali alle bioplastiche

Rizzello C.G.¹, Verni M.¹, Pontonio E.²

¹Dipartimento di Biologia Ambientale, Università degli Studi di Roma, La Sapienza

²Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti (Di.S.S.P.A.), Università degli Studi di Bari “Aldo Moro”

Riassunto

I processi fermentativi rappresentano attualmente l’insieme più differenziato di opzioni per il riciclo e la valorizzazione di scarti e surplus dell’industria alimentare. Gli scarti possono essere utilizzati come substrato per la coltivazione di microrganismi utili come *starter* per l’industria alimentare, probiotici, microrganismi utili per la biopreservazione o il biocontrollo, o di microrganismi in grado di sintetizzare molecole d’interesse alimentare, agrario, cosmetico e farmaceutico. L’intero scarto alimentare può essere convertito in nuovi ingredienti alimentari permettendone la re-introduzione nella filiera produttiva.

Alternative biotecnologiche per la valorizzazione di scarti non edibili includono invece la possibilità di produrre, mediante processi fermentativi con microrganismi selezionati, bioplastiche o ammendanti per i suoli agrari, consentendo in questo modo di poter ipotizzare strategie a zero scarti (“zero-waste”).

Abstract

Fermentation processes currently represent the most differentiated set of options for the recycling and valorization of waste and surplus from the food industry. Waste can be used as a substrate for the cultivation of microorganisms useful as starters for the food industry, probiotics, microorganisms to be used in bio preservation or biocontrol strategies, or microorganisms capable of synthesizing molecules of food, agricultural, cosmetic, and pharmaceutical interest. Food waste can be sometimes converted by fermentation into new food ingredients, thus re-introducing them into the production chain.

Biotechnological alternatives for the valorization of non-edible waste include the possibility of producing, through fermentation processes with selected microorganisms, bioplastics, or soil improvers, thus hypothesizing zero-waste strategies.

Keywords: *fermentation, wastes, lactic acid bacteria, biotechnologies, bioplastics*

Introduzione

Sottoprodotti e scarti vengono generati in tutte le filiere agro-alimentari, a tutti i livelli (produzione primaria, lavorazione delle materie prime, trasformazione delle materie prime in alimenti e bevande, distribuzione, vendita e conservazione a livello casalingo). Tra le categorie di scarti vanno infatti considerati non solo i sottoprodotti, ma anche eventuali surplus, prodotti difettati o non rispondenti agli standard di produzione, invenduto e prodotti che hanno superato la data di scadenza. Chiaramente, un insieme così complesso include sia prodotti ancora edibili che prodotti non più edibili.

Attualmente, la quasi totalità di scarti, sottoprodotti e surplus è trattata come rifiuto, generando spesso problemi ambientali e di smaltimento incontrollato, o in parte riutilizzata nella produzione di compost, biogas/bioetanolo, e nell’industria mangimistica.

Tuttavia, nell’ottica di valorizzare tali categorie di prodotti, la ricerca è orientata da tempo verso l’individuazione di possibilità innovative per convertirli in risorse, ottenendo nuovi

prodotti (alimentari e non) aventi valore aggiunto, col duplice obiettivo di creare nuovi mercati per il comparto industriale e di incrementare la sostenibilità economica, ambientale e sociale dell'intero comparto agroalimentare.

Tra le opzioni per la valorizzazione di scarti, surplus e sottoprodotti, sempre più spesso definiti "materie prime secondarie", quando considerati come biomasse ancora potenzialmente suscettibili di trasformazione in ulteriori prodotti d'interesse industriale, i processi biotecnologici offrono numerose possibilità operative. Per processi biotecnologici si intendono processi in cui sono coinvolti, in varia misura, microrganismi e/o loro enzimi, assieme alle più disparate opzioni tecnologiche.

I processi biotecnologici (*bioprocessing*) permettono di ottenere numerosi prodotti dal valore aggiunto molto differente. In generale, ipotizzando una potenziale scala crescente di valore aggiunto, è possibile ottenere: energia (elettricità/calore), compost, biofuel, composti chimici di varia natura e mangimi. In cima alla piramide del valore aggiunto (Figura 1), si ritrovano alimenti, ingredienti alimentari e prodotti l'industria cosmetica e farmaceutica.

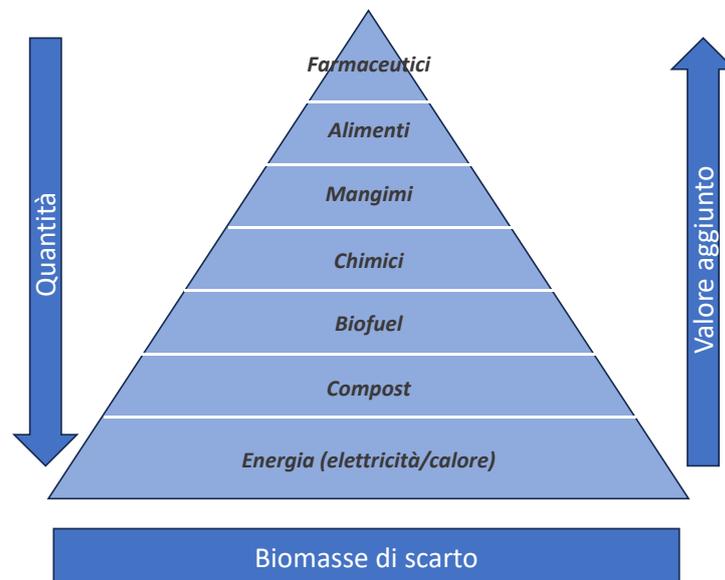


Figura 1. Rappresentazione grafica della scala di valore aggiunto delle diverse categorie di prodotti ottenibili da scarti, sottoprodotti e surplus delle filiere agroalimentari.

Riciclo e valorizzazione attraverso processi biotecnologici

Analizzando le opzioni biotecnologiche convenzionali ed innovative su cui la ricerca accademica ed industriale si è concentrata negli ultimi anni, è possibile individuare tre campi di azione differenti: i) l'impiego delle materie prime secondarie come substrato per la coltivazione di microrganismi d'interesse industriale e commerciale; ii) l'impiego delle materie prime secondarie come substrato per la coltivazione di microrganismi dai quali recuperare metaboliti d'interesse industriale e commerciale (strategie di *biorefinery*); iii) l'ottenimento di ingredienti e alimenti fermentati, cui concorre l'intero substrato di scarto. In dettaglio:

- i più comuni esempi di biomasse microbiche ottenute su substrati derivanti da materie prime secondarie includono la produzione di probiotici (da impiegare come integratori,

farmaci o per la produzione di alimenti funzionali), *starter* microbici da impiegare nell'industria alimentare (es. lievito di birra per la panificazione, lieviti per l'enologia e la birrificazione, batteri lattici per i settori caseario, delle carni e dei vegetali fermentati, muffe, batteri acetici e propionici ecc.), microrganismi da utilizzare nell'ambito delle moderne tecniche di *biopreservation* (prolungamento della conservabilità microbica degli alimenti) e *biocontrol* (controllo di fitopatogeni in campo agrario);

- alcuni esempi di processi di *biorefinery*, che possono essere basati sull'impiego di microrganismi selezionati ma "naturali" o microrganismi ricombinanti, includono la produzione di bioplastiche, biofungicidi, composti funzionali (GABA, peptidi bioattivi, equolo, composti antiossidanti), composti d'interesse farmaceutico e cosmetico.

La produzione di ingredienti e alimenti fermentati (iii) è invece auspicabile per le molte materie prime secondarie caratterizzate da elevate concentrazioni di fibre alimentari, proteine, minerali, polifenoli e altri composti funzionali. Tuttavia, le materie prime secondarie sono quasi sempre caratterizzate da qualità microbiologica non ottimale, e spesso da problematiche di tipo tecnologico e sensoriale, che le rendono difficilmente utilizzabili se non dopo trattamento. Alcune materie prime secondarie sono inoltre caratterizzate da elevata concentrazione di composti anti-nutrizionali (es. raffinose, tannini, acido fitico, saponine ecc.) che diminuiscono la digeribilità o la biodisponibilità di alcuni composti d'importanza nutrizionale. La valorizzazione delle materie prime secondarie in ingredienti richiede pertanto la messa a punto e l'ottimizzazione di strategie biotecnologiche innovative.

Valorizzazione e riciclo delle materie prime secondarie in ingredienti alimentari

La messa a punto di una strategia che permetta di valorizzare scarti, sottoprodotti e *surplus* delle filiere agroalimentari mediante la conversione in ingredienti alimentari, prevede una serie di complesse tappe di ricerca e sviluppo. In linea generale, esse sono rappresentate da:

- messa a punto di un piano di controllo qualitativo (chimico e microbiologico) e di logistica (condizioni di stoccaggio e trasporto) per la gestione delle materie prime secondarie dal momento della generazione sino al *bioprocessing*;
- individuazione di condizioni di pre-trattamento appropriate (trattamenti termici, macinazione, frazionamento);
- selezione di microrganismi ed enzimi *food grade* che rispondano agli obiettivi biotecnologici della trasformazione, al fine dell'ottenimento di specifiche caratteristiche sensoriali, tecnologiche, nutrizionali e funzionali;
- messa a punto del processo biotecnologico di conversione mediante fermentazione (densità d'inoculo, dosaggio enzimatico, tempi e temperature di fermentazione, necessità di supplementazione dei substrati);
- ottimizzazione dei processi biotecnologici, la cui messa a punto avviene prima su scala di laboratorio, poi su scala pilota ed industriale;
- individuazione di opportuni trattamenti di stabilizzazione dell'ingrediente fermentato (liofilizzazione, *spray/drum-drying*, pastorizzazione/sterilizzazione ecc.).

Sottoprodotti delle filiere dei cereali

Crusche

Tra i sottoprodotti delle filiere agroalimentari si ritrovano scarti della lavorazione di frutta e vegetali (bucce e scarti di pomodoro e patata, scarti dell'estrazione dei succhi, pannelli proteici da semi oleaginosi), sottoprodotti del settore lattiero-caseario (es. siero e scotta), sottoprodotti del settore enologico (vinacce e fecce), sottoprodotti dell'industria dei cereali (che includono surplus di pane, sottoprodotti della molitura, trebbie di birra). Numerose sono le ricerche indirizzate alla valorizzazione dei sottoprodotti della molitura, dati i grandi volumi generati a livello mondiale (Verni *et al.*, 2019). I sottoprodotti della molitura includono principalmente i tegumenti esterni della cariosside, ovvero le crusche e la parte embrionale (germe). Le crusche sono separate dalle farine poiché, contenendo elevata concentrazione di fibre, alterano negativamente le performance tecnologiche delle farine, il germe di grano è invece soggetto a un rapido processo ossidativo che conduce rapidamente all'irrancidimento delle farine che lo contengono.

Valorizzare le crusche e riutilizzarle come ingredienti alimentari è di grande importanza, in virtù dell'elevata concentrazione in fibre alimentari che esse presentano, e in relazione alle evidenze scientifiche che mostrano la necessità, al fine di migliorare la salute pubblica, di incrementare il consumo di fibre nella dieta nei Paesi Occidentali.

Nell'ambito delle ricerche effettuate nell'ultimo trentennio sulla lievitazione naturale nel campo dei lievitati da forno, era già stata sottolineata la possibilità di migliorare le proprietà tecnologiche e sensoriali delle farine ricche in fibra (es. integrali) mediante l'impiego del lievito naturale, che dal punto di vista microbiologico è un agente di lievitazione biologico caratterizzato dalla presenza di un consorzio microbico in cui si ritrovano sia lieviti che batteri lattici. Proprio alle attività dei batteri lattici sono legate molte delle modificazioni positive riscontrate (migliore idratazione delle fibre e conseguente migliore struttura e sofficità dei lievitati da forno, incremento delle fibre solubili). Dall'applicazione classica del lievito naturale a farine integrali, la ricerca ha proposto soluzioni alternative, in cui processi fermentativi ispirati alla lievitazione naturale, ma spesso condotti con ceppi di batteri lattici selezionati, sono stati applicati direttamente alla crusca (o al germe) come solo substrato di fermentazione.

La fermentazione con batteri lattici delle crusche permette una modificazione del rapporto fibre insolubili/solubili, un miglioramento sensoriale e in generale dell'attitudine tecnologica della matrice, quando poi utilizzata come ingrediente nella produzione di lievitati da forno. Un considerevole abbattimento dell'acido fitico, composto anti-nutrizionale abbondante nelle crusche, è stato riscontrato durante la fermentazione, come risultato dell'attivazione delle fitasi endogene (conseguenza dell'acidificazione della matrice) o per diretto apporto di fitasi microbiche (Coda *et al.*, 2015). Il miglioramento delle attitudini tecnologiche delle crusche permette l'impiego di quantità relativamente più elevate rispetto alle crusche non fermentate, senza drastico peggioramento delle caratteristiche strutturali (elasticità, volume specifico dei pani) e sensoriali del prodotto lievitato da forno.

Alla fermentazione sono state nel tempo accoppiate tecniche complementari, con l'obiettivo di migliorare ulteriormente i risultati dei processi fermentativi. Tra questi:

- la micronizzazione delle crusche (ottenute per decorticazione del cereale) permette di avere sfarinati di crusche dalla granulometria più fine che, probabilmente grazie ad un facilitato accesso al substrato degli enzimi microbici, portano ad una intensificazione dei vantaggi del processo fermentativo con batteri lattici. La decorticazione della

cariosside che precede la micronizzazione permette peraltro la rimozione dello strato cruscale più esterno della cariosside, spesso caratterizzato da concentrazioni più elevate di micotossine (Coda *et al.*, 2014; Rizzello *et al.*, 2012);

- l'impiego di enzimi degradativi della fibra, come le xilanasi, consente di amplificare l'effetto di idrolisi sulla fibra del processo fermentativo, e di aumentare la biodisponibilità di proteine e composti polifenolici compartmentalizzati nelle cellule del vegetale e poco soggette all'attività dei microrganismi (e degli enzimi digestivi poi) (Arte *et al.*, 2015).

Germe di grano

Analogamente a quanto sperimentato sulle crusche, processi fermentativi basati sull'impiego di batteri lattici selezionati sono stati messi a punto anche su germe di grano con l'obiettivo primario di ridurre o inibire l'attività delle lipasi endogene attraverso un rapido processo di acidificazione biologica. Anche in questo caso risultati molto positivi sono stati ricavati mediante l'impiego di biotipi di batteri lattici selezionati nell'ambito degli isolati autoctoni della matrice. Tali batteri lattici sono stati inoculati singolarmente o in miscela ottenendo germe di grano fermentato caratterizzato dalle seguenti proprietà (Rizzello *et al.*, 2010a):

- attività lipasica inibita dai bassi valori di pH;
- ridotta concentrazione in raffinose, oligosaccaride abbondante nel germe e considerato anti-nutrizionali, poiché non digeribile dall'organismo umano, ma in grado di causare problemi intestinali poiché metabolizzato da una componente del microbiota intestinale con produzione di gas;
- ridotta concentrazione di acido fitico, grazie all'attivazione delle fitasi endogene legata all'acidificazione biologica;
- migliorata digeribilità delle proteine.

Per confermare la stabilità all'ossidazione del germe di grano fermentato, i composti volatili legati all'irrancidimento sono stati monitorati per 40 giorni a temperatura ambiente. Tutti i *marker* dei processi ossidativi a carico dei lipidi risultavano significativamente e marcatamente più bassi rispetto ai controlli non fermentati.

Fermentazioni del germe di grano condotte da microrganismi selezionati possono portare all'arricchimento in composti antifungini, rendendo la matrice un ingrediente utile nelle tecniche di biopreservazione (Rizzello *et al.*, 2011) o all'arricchimento in composti antitumorali (Rizzello *et al.*, 2013).

Una serie di ricerche applicative in collaborazione con l'industria ha portato alla messa a punto di lieviti da forno arricchiti in crusche e germe di grano fermentato caratterizzati da elevato contenuto in fibra, basso indice glicemico e buone caratteristiche tecnologiche e sensoriali (Pontonio *et al.*, 2017; Rizzello *et al.*, 2010b).

Ricerche successive hanno riguardato l'utilizzo di crusche e germe ricavati da altri cereali come ad esempio il mais, l'orzo, il farro, varietà di frumento pigmentate confermando risultati ottimali e proponendo soluzioni applicabili su larga scala anche in filiere differenti (Pontonio *et al.*, 2019, 2020).

Una recente ricerca ha infine dimostrato la possibilità di produrre lievito naturale di tipo II e di tipo III, ovvero ottenuti mediante l'inoculo di batteri lattici selezionati, utilizzando come substrato, il germe di grano disoleato (Perri *et al.*, 2022). Il germe di grano disoleato è ottenuto

dall'estrazione a solvente della frazione grassa. Tale strategia permette di riutilizzare in una duplice modalità il germe di grano ottenendo sia olio alimentare, che un ingrediente fermentato da utilizzare nella preparazione di alimenti.

Trebbe di birra

Le trebbie di birra sono un sottoprodotto dell'industria della birra, vengono separate come scarto dopo l'ottenimento del mosto di malto e corrispondono alla frazione insolubile dell'orzo maltato, caratterizzata da elevata concentrazione di fibre e, in misura minore, proteine (Figura 2). Per la valorizzazione delle trebbie di birra sono state proposte diverse soluzioni biotecnologiche. Tra queste, l'impiego di batteri lattici selezionati è risultato particolarmente interessante anche perché è stato dimostrato che alcuni ceppi hanno una elevata adattabilità al substrato grazie alla presenza di enzimi idrolitici delle fibre e alla possibilità di utilizzare i monomeri (es. arabinosio e xilosio) liberati (Acin-Albiac *et al.*, 2021). L'impiego di batteri lattici, selezionati per la capacità di produrre esopolisaccaridi è risultato particolarmente interessante; tali sostanze sono caratterizzate infatti da elevata viscosità conferendo coerenza all'ingrediente fermentato, e risultando migliorative di alcune proprietà tecnologiche dei lievitati da forno, come ad esempio la capacità di mantenere la sofficità e l'elasticità nel tempo. Anche per le trebbie di birra l'impiego combinato di enzimi, in particolare xilanasi, e fermentazione con ceppi selezionati, è risultata particolarmente positiva, portando contemporaneamente al rilascio di sostanze polifenoliche (legate ai tessuti fibrosi delle trebbie di birra) e alla loro conversione, mediata dagli enzimi microbici (es. β -glucosidasi ed esterasi) in composti polifenolici più semplici ma caratterizzati da una più elevata attività antiossidante (Verni *et al.*, 2020)

Nell'ottica di verificare più possibilità applicative, le trebbie di birra fermentate sono state utilizzate per l'ottenimento di pasta ed estrusi da colazione (Schettino *et al.*, 2021). La pasta, in particolare, risultava caratterizzata da un elevato contenuto in fibre, basso indice glicemico ed elevata attività antiossidante, quest'ultima verificata su colture cellulari umane in test *ex-vivo*.



Figura 2. Trebbie di birra nel momento della separazione dal mosto di malto.

Scarti e surplus di pane

Il pane di scarto rappresenta a livello mondiale uno dei più consistenti sprechi dell'intero settore agroalimentare. Il pane viene scartato sin dalle fasi di produzione (sfrido del pane da tramezzino, pane difettato) e in tutte le successive fasi della catena produttiva e di distribuzione (invenduto, raffermo, alterato dalla contaminazione di microrganismi alteranti). Il pane ancora edibile viene in parte riutilizzato nell'industria mangimistica ma è per la maggior parte trattato come un rifiuto. Anche il pane può però costituire un substrato idoneo alla fermentazione mediante l'impiego di microrganismi *food grade* selezionati. Il pane di scarto deve essere necessariamente trattato enzimaticamente per consentire un rilascio di zuccheri fermentescibili dall'amido e una certa disponibilità di sostanze azotate, come i peptidi, che derivano dall'idrolisi delle proteine native e di cui i batteri lattici hanno bisogno per il loro sviluppo, specialmente se si considera che la cottura inattiva gli enzimi naturalmente presenti nelle farine. L'impiego di batteri lattici in grado di produrre esopolisaccaridi ha consentito di ottenere, come precedentemente descritto per le trebbie, un ingrediente che, aggiunto in percentuali variabili a nuovi impasti di farina ed acqua, consente l'ottenimento di pani dalle proprietà tecnologiche ed organolettiche ottimali (Koirala *et al.*, 2022). L'impiego di batteri lattici selezionati per la produzione di acido γ -aminobutirico (GABA), un composto funzionale che agisce da neurotrasmettitore, antipertensivo e diuretico, ha permesso di ottenere un ingrediente, a base di pane fermentato, che utilizzato per la produzione di lievitati da forno, ha consentito l'ottenimento di pane arricchito di GABA a concentrazioni che rendono il normale consumo compatibile con le dosi associate ad effetti clinici *in-vivo* (Verni *et al.*, 2022). Le possibilità di modulare i processi fermentativi con microrganismi selezionati per i più disparati obiettivi tecnologici permette numerose applicazioni del pane di scarto fermentato, come ad esempio l'impiego come ingrediente ad attività antifungina in grado di prolungare la conservabilità microbiologica dei lievitati da forno (Nionelli *et al.*, 2020).

Altre opzioni di valorizzazione degli scarti non edibili

Sebbene le opzioni di valorizzazione degli scarti ancora edibili rappresentino uno dei principali obiettivi della ricerca scientifica ed industriale, vi è ovviamente un grande interesse nello sviluppo di processi biotecnologici che possano portare alla creazione di valore aggiunto anche per quelle frazioni di scarti agroalimentari che, in seguito a contaminazione microbiologica e/o decadimento delle proprietà sensoriali, risultano non più edibili.

Alcuni scarti, come quelli caratterizzati da elevata presenza di carboidrati, possono essere utilizzati per la produzione di bioplastiche da microrganismi. Le bioplastiche sono polimeri di riserva (come i polidrossialcanoati, PHA) che alcuni microrganismi accumulano a livello citoplasmatico in condizioni di stress, che sono di fatto assimilabili alle plastiche derivate dal petrolio, dal punto di vista tecnologico, ma che si differenziano perché completamente biodegradabili e compostabili. In quest'ambito, alcuni microrganismi alofili, come *Haloferax mediterranei* (Montemurro *et al.*, 2022), si sono mostrati particolarmente promettenti su pane di scarto, e questo per numerosi motivi:

- le elevate concentrazioni saline che richiedono per la loro crescita non consentono la crescita di microrganismi contaminanti, permettendo di lavorare su matrici non trattate termicamente;
- sono ottimi accumulatori di PHBV, copolimero appartenente ai polidrossilcanoati tra i più promettenti per l'impiego in campo industriale;

- permettono un recupero “green” della bioplastica accumulata a livello intracellulare (senza largo impiego di solventi) attraverso l’applicazione di shock iposmotico (le cellule lisano spontaneamente quando trasferite dal mezzo ad elevata concentrazione salina ad acqua pura).

Un altro campo applicativo riguarda lo sviluppo di bio-fertilizzanti e ammendanti di nuova generazione: in questo caso le biomasse di scarto, come il pane e le trebbie di birra, vengono utilizzate come substrato per la crescita di microrganismi in grado di promuovere la crescita/produzione delle colture agrarie (Cacace *et al.*, 2022a, 2022b). Quando miscelate al suolo, apportano quindi, oltre alla sostanza organica, elevate densità di microrganismi in grado di modificare gli equilibri del microbiota del suolo, promuovere la biodisponibilità di alcuni nutrienti, stimolare le difese della pianta verso gli stress biotici ed abiotici, produrre biostimolanti, fungere da soppressori di microrganismi fitopatogeni. Esperienze recenti dimostrano che anche i batteri lattici possono essere considerati microrganismi promotori della crescita/produzione delle piante, sebbene i meccanismi da cui gli effetti riscontrati sulle colture agrarie dipendono, non sono ancora del tutto noti.

Conclusioni

Il riciclo e la valorizzazione degli scarti rappresentano strategie di vitale importanza per affrontare gli ingenti problemi legati alla sostenibilità delle produzioni agroalimentari, la scarsità di risorse rinnovabili, l’inquinamento ambientale e i cambiamenti climatici. I processi biotecnologici, da sempre impiegati consapevolmente e inconsapevolmente in numerosissimi settori industriali, compreso quello alimentare, offrono numerosi strumenti per rendere efficace lo sfruttamento degli scarti attraverso la conversione in ingredienti e prodotti alimentari, molecole d’interesse industriale, cosmetico e farmaceutico, materiali eco-compatibili che possano sostituire le plastiche derivate del petrolio.

Sebbene molte innovazioni biotecnologiche abbiano mostrato risultati convincenti e promettenti a livello di laboratorio, l’ottimizzazione a livello industriale e la riduzione dei costi appaiono oggi passi fondamentali per rendere tali biotecnologie applicabili concretamente e su larga scala.

Bibliografia

- Acin-Albiac M., Filannino P., Coda R., Rizzello C.G., Gobetti M., Di Cagno R. 2021. How water-soluble saccharides drive the metabolism of lactic acid bacteria during fermentation of brewers' spent grain. *Microbial Biotechnology*, 13846
- Arte E., Rizzello C.G., Verni M., Nordlund E., Katina K., Coda R. 2015. Impact of enzymatic and microbial bioprocessing on protein modification and nutritional properties of wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63: 8685-8693.
- Cacace, C., Rizzello, C.G., Brunetti, G., Verni, M., Coccozza, C. (2022a). Reuse of wasted bread as soil amendment: bioprocessing, effects on alkaline soil and escarole (*Cichorium endivia*) production. *Foods*, 11(2), 189.
- Cacace C, Coccozza C, Traversa A, Coda R, Rizzello CG, Pontonio E, De Mastro F, Brunetti G, Verni M (2022b) Potential of native and bioprocessed brewers' spent grains as organic soil amendments. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1010890.
- Coda R., Katina K., Rizzello C.G. 2015. Bran bioprocessing for enhanced functional properties. *Current Opinion in Food Science*, 1: 50-55.
- Coda R., Rizzello C.G., Curiel J.A., Poutanen K., Katina K. 2014. Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 25:19–27.
- Koirala P., Costantini A., Maina H.N., Rizzello C.G., Verni M., De Beni V., Polo A., Katina K., Di Cagno R., Coda R. 2022. Fermented brewers' spent grain containing dextran and oligosaccharides as ingredient for composite wheat bread and its impact on gut metabolome in vitro. *Fermentation* 8(10), 487
- Montemurro M., Salvatori G., Alfano S., Martinelli A., Verni M., Pontonio E., Villano M., Rizzello C.G. 2022. Exploitation of wasted bread as substrate for polyhydroxyalkanoates production through the use of *Haloferax mediterranei* and seawater. *Frontiers in microbiology*, 13, 1000962.
- Nionelli L., Wang Y., Pontonio E., Immonen M., Rizzello C.G., Maina H.N., Katina K., Coda R. 2020. Antifungal effect of bioprocessed surplus bread as ingredient for bread-making: Identification of active compounds and impact on shelf-life. *Food Control*, 118,107437.

- Perri G., Miani M.G., Amendolagine G., Pontonio E., Rizzello C.G. 2022. Defatted durum wheat germ to produce type-II and III sourdoughs: Characterization and use as bread ingredient. *LWT – Food Science and Technology*, 163, 113566
- Pontonio E., Dingo C., Di Cagno R., Blandino M., Gobbetti M., Rizzello C.G. 2020. Brans from hull-less barley, emmer and pigmented wheat varieties: From by-products to bread nutritional improvers using selected lactic acid bacteria and xylanase. *International Journal of Food Microbiology*, 313, 108384.
- Pontonio E., Dingo C., Gobbetti M., Rizzello C.G. 2019. Maize milling by-products: from food wastes to functional ingredients through lactic acid bacteria fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 10, 561, doi: 10.3389/fmicb.2019.00561
- Pontonio E., Lorusso A., Gobbetti M., Rizzello C.G. 2017. Use of fermented milling by-products as functional ingredient to develop a low-glycaemic index bread. *Journal of Cereal Science*, 77, 235-242.
- Rizzello C.G., Nionelli L., Coda R., De Angelis M., Gobbetti M. 2010a. Effect of sourdough fermentation on stabilization, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ. *Food Chemistry*, 119:1079-1089.
- Rizzello C.G., Nionelli L., Coda R., Di Cagno R., Gobbetti M. 2010b. Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread. *European Food Research And Technology*, 230: 645-654.
- Rizzello C.G., Cassone A., Coda R., Gobbetti M. 2011. Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making. *Food Chemistry*, 127: 952-959.
- Rizzello C.G., Coda R., Mazzacane F., Minervini D., Gobbetti M. 2012. Micronized by-products from debranned durum wheat and sourdough fermentation enhanced the nutritional, textural and sensory features of bread. *Food Research International*, 46:304-313.
- Rizzello C.G., Mueller T., Coda R., Reipsch F., Nionelli L., Curiel J.A., Gobbetti M. 2013. Synthesis of 2-methoxy benzoquinone and 2,6-dimethoxybenzoquinone by selected lactic acid bacteria during sourdough fermentation of wheat germ. *Microbial Cell Factories* 12, art. n.105.
- Schettino R., Verni M., Acin-Albiac M., Vincentini O., Krona A., Knaapila A., Di Cagno R., Gobbetti M., Rizzello C.G., Coda R. 2021. Bioprocessed brewers' spent grain improves nutritional and antioxidant properties of pasta. *Antioxidants* 10 (5), 742
- Verni M., Rizzello C.G., Coda R. 2019. Fermentation biotechnology applied to cereal industry by-products: nutritional and functional insights. *Frontiers in Nutrition*, 6, doi: 10.3389/fnut.2019.00042
- Verni, M., Pontonio, E., Krona, A., Jacob, S., Pinto, D., Rinaldi, F., Verardo, V., Díaz-De-Cerio, E., Coda, E., Rizzello, C.G. 2020. Bioprocessing of brewers' spent grain enhances its antioxidant activity: characterization of phenolic compounds and bioactive peptides. *Frontiers in Microbiology*, 11:1831
- Verni, M., Vekka, A., Immonen, M., Katina, K., Rizzello, C.G., Coda, R. 2022. Biosynthesis of γ -aminobutyric acid by lactic acid bacteria in surplus bread and its use in bread making. *Journal of Applied Microbiology*, 00:1–15

La digitalizzazione e le macchine intelligenti in agricoltura e zootecnia: il contributo della ricerca alla bioeconomia

Rondelli V.¹, Sartori L.², Catania P.³

¹ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università di Bologna

² Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova

³ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali, Università di Palermo

Riassunto

Le innovazioni introdotte in agricoltura grazie all'intelligenza artificiale permettono di perseguire gli obiettivi di sostenibilità richiesti oggi in agricoltura ed in zootecnia. In particolare, facendo un parallelo tra i due settori emerge come le innovazioni relative all'inserimento di meccanismi di automazione risultino oggi pratiche ben consolidate negli ambienti zootecnici controllati mentre l'utilizzo dell'automazione nell'agricoltura in pieno campo debba ancora risolvere innumerevoli criticità legate soprattutto alla dinamicità dell'ambiente di lavoro che rende complesso definire e raggiungere prestazioni operative e di sicurezza definite a priori.

Abstract

The innovations introduced in agriculture by the artificial intelligence allowed for promoting the sustainability in agriculture and animal husbandry. In particular, from a comparison between the two sectors, it emerges that the innovation relating to the adoption of automation mechanisms are now well-established practices in controlled livestock environments, while the use of automation in open-field agriculture has yet to solve critical issues related above all to the dynamism of the work environment which makes it complex to define and achieve operational and safety performance defined *a priori*.

Keywords: *innovation, artificial intelligence, remote sensing, precision agriculture, precision farming, GPS, precision livestock*

Introduzione

Il Manuale di OSLO, pubblicato dall'OCSE, definisce l'innovazione come "un prodotto o un processo nuovo o migliorato (o una loro combinazione) che differisce in modo significativo dai precedenti prodotti o processi dell'unità e che è stato reso disponibile ai potenziali utenti (prodotto) o messo in uso dall'unità (processo)." Come sosteneva anche Schumpeter (Schumpeter, 1934), l'innovazione è l'applicazione di una tecnica, di un'idea, che vede riconoscere le potenzialità di un'invenzione e quindi viene sfruttata nella pratica, anche economicamente. Si evince quindi, come l'innovazione per essere tale debba essere resa disponibile e portata in uso. La diffusione di innovazione avviene seguendo 5 fasi: conoscenza, persuasione, decisione, implementazione e conferma. Come spiega Rogers (Rogers, 1962) l'innovazione viene comunicata attraverso determinati canali, nel tempo, fra i membri di un sistema sociale. Si identifica per tanto una velocità con cui i differenti individui, all'interno di un sistema sociale, adottano un'innovazione, ovvero le innovazioni percepite come più vantaggiose, compatibili, possibili ad essere testate, osservabili e con minore complessità verranno adottate più velocemente. Con questa premessa si vuole evidenziare come due comparti, l'agricoltura e la zootecnia di precisione, abbiano adottato in modo diverso sistemi automatizzati.

L'agricoltura rappresenta tra le attività produttiva dell'uomo quella che ha visto l'introduzione di importanti innovazioni come la meccanizzazione e la digitalizzazione, sostenute in particolare dalle esigenze dettate da nuove economie e nuovi ordini sociali. In particolare, si possono schematicamente rappresentare come segue le principali tappe dello sviluppo dei sistemi agricoli: a partire dagli anni 50' con l'attenzione verso la massimizzazione della produzione a cui è seguita la "Green Revolution", attenzione verso l'ambiente e la produzione, definita anche come Agricoltura 2.0. L'agricoltura 3.0 riguarda l'introduzione dell'agricoltura di precisione e l'attuale Agricoltura 4.0 a partire dal 2010 dove la nuova unità produttiva diventa l'azienda digitale (Figura 1) che racchiude gli obiettivi definiti lungo il percorso evolutivo ovvero, si prefigge di ottimizzare l'efficienza produttiva, la qualità delle produzioni e dei processi, minimizzare non solo l'impatto ambientale ma anche i rischi per gli operatori e la collettività.

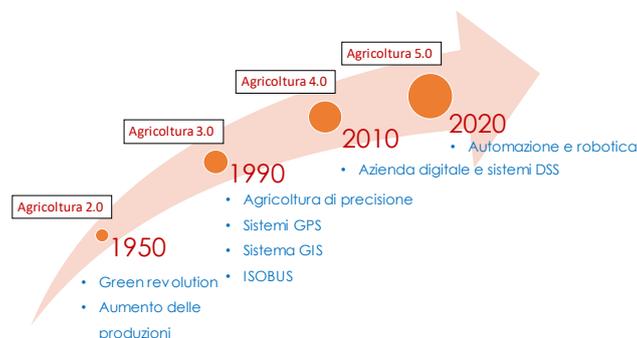


Figura 1. Tappe evolutive del sistema agricolo (elaborazione degli autori).

I tentativi di innovare in agricoltura attraverso l'introduzione di automazioni cioè sistemi per azionare macchine o processi in modo automatico, sostituendo l'intervento dell'uomo, sono innumerevoli. Oggi stiamo di fatto entrando nell'Agricoltura 5.0, che vede nella robotica la principale attuazione. Non si può fare a meno di notare come alcune delle invenzioni che hanno introdotto l'automazione nel settore agricolo abbiano riscosso successo e si siano ben presto consolidate nelle pratiche aziendali, come i sistemi di mungitura, ed altri invece siano ancora immature per essere ampiamente adottate. Per promuovere lo sviluppo dell'automazione in campo agricolo, il sistema di monitoraggio ambientale aiuta a raccogliere le misurazioni rapide, accurate e costanti richieste nell'agricoltura di precisione (Kamelia, 2018).

Agricoltura di precisione

Le definizioni di Agricoltura di Precisione (AP) sono numerose, e tra le più note troviamo "fare la cosa giusta, al momento, al punto giusto" (Gebbers e Adamchuk, 2010). In maniera più articolata possiamo dire che tenendo conto delle variabili temporali e spaziali dei fattori che influiscono sul processo produttivo agricolo, si migliora l'efficienza degli input nella gestione dinamica del processo. Migliorare l'efficienza significa utilizzare meno risorse per ottenere il medesimo risultato, un attento utilizzo delle risorse rivolto alla loro conservazione agendo così in un'ottica di sostenibilità che si allinea con gli obiettivi della bioeconomia. La capacità di ridurre costi di produzione grazie all'introduzione di attrezzature autonome permette alle aziende di essere maggiormente competitive a livello internazionale e non necessita di sussidi

governativi (Lowenberg-DeBoer, 2021). Alla base dell'applicazione dell'AP c'è una comprensione delle variabili temporali e spaziali dei fattori che influiscono sulle produzioni ed il monitoraggio. Infatti, una delle rivoluzioni tecnologiche fondamentali fu quella dei sistemi di posizionamento satellitari (GPS), questa innovazione, nata a fini militari, ha trovato una sua conferma per le applicazioni in campo agricolo, rendendo possibile una miglior conoscenza e monitoraggio continuo di variabili spaziali. L'attività di monitoraggio ha ricevuto un importante impulso anche grazie alla diffusione dei droni.

Diversi autori hanno confermato i benefici economici e ambientali che si ottengono quando si applicano metodologie di agricoltura di precisione. Tuttavia, gli accademici evidenziano come il tasso di adozione di queste tecnologie sia ancora basso (Pierpaoli, 2013). Tra le problematiche evidenziate vi è sicuramente la gestione dell'informazioni all'interno dell'azienda che richiede l'utilizzo di tecnologie appropriate da parte di personale formato. L'agricoltura di precisione si diffuse inizialmente in Italia con l'obiettivo di ottenere una gestione puntuale e dell'attività di campo finalizzata al controllo della variabilità spaziale delle unità coltivate seguendo un approccio sito-specifico (Mangold, 1995). Il concetto di agricoltura di precisione, quindi, coincideva con una capacità di gestire la sub-unità dell'azienda attraverso integrazione di tecnologie informatiche e agronomiche. Il mondo anglo-sassone connota l'AP con altre definizioni legate alla terminologia *farming* con un'accezione che vede focalizzarsi più su una visione d'insieme dell'azienda agraria, "una strategia gestionale che utilizza tecnologie informatiche per raccogliere dati da fonti multiple in vista di un loro successivo utilizzo nell'ambito di decisioni riguardanti le attività produttive di campo" (NRC,1997). Pertanto, la qualità della capacità decisionale nella gestione aziendale dipende dalle informazioni a disposizione. Il fattore informazione diventa quindi un elemento fondamentale per le applicazioni di AP ed è sempre più legato all'acquisizione del dato (Fulton, 2018) e alla sua archiviazione. Le problematiche legate ai costi di archiviazione ed alla sicurezza sono ad oggi ancora oggetto di studio (Kayad, 2022).

L'agricoltura di precisione comprende la gestione delle produzioni vegetali, mentre la zootecnia di precisione la gestione delle produzioni zootecniche attraverso l'applicazione di tecnologie avanzate in allevamento piuttosto che la foraggicoltura. I principi e le metodologie adottate dalla zootecnia di precisione sono abbastanza diversi dalle tecnologie utilizzate in campo delle produzioni vegetali. Nel caso dell'agricoltura di precisione due diversi approcci hanno contraddistinto la risposta degli utilizzatori di fronte all'ampia disponibilità tecnologica presente nel mercato: nel primo, che coincide con il modo classico di intendere l'agricoltura di precisione, le operazioni vengono programmate attraverso lo studio della variabilità e la realizzazione di mappe tematiche e di mappe di prescrizione; il secondo prevede l'uso diretto della sensoristica e del computer di bordo per il controllo delle macchine senza necessariamente coinvolgere il fattore umano (meccanizzazione di precisione). Questo secondo approccio anticipa l'adozione della mecatronica e della robotica in agricoltura.

La precisione basata su mappe

Le tre fasi fondamentali per l'adozione di pratiche agronomiche di precisione basata su mappe sono: raccolta spaziale dei dati per caratterizzare ed individuare aree omogenee all'interno del campo; analisi dei dati per interpretare le cause della variabilità spaziale; implementazione delle decisioni prese sulle pratiche agronomiche differenziate da adottare. Si tratta di un approccio completo, ma anche complesso e articolato perché richiede la creazione di mappe riguardanti il suolo (con sensori di conducibilità o resistività elettrica), la vegetazione

(con sensori prossimi alla coltura oppure remoti utilizzando radiometri posizionati su satelliti, aerei e droni) o le caratteristiche delle produzioni attraverso l'installazione di un sistema di mappatura delle rese per rilevare la quantità e alcune caratteristiche qualitative.

Dopo l'analisi dei dati raccolti e la successiva fase decisionale, la mappa di prescrizione viene trasferita alle operatrici per realizzare l'applicazione variabile dei fattori produttivi (VRA). Per questo le attrezzature devono essere dotate di un sistema di regolazione della dose di tipo elettronico (DPAE), il ricevitore satellitare, un computer di bordo connesso con piattaforme gestionali e dotato di sistema di comunicazione ISOBUS, sensori di flusso e attuatori.

La meccanizzazione di precisione

La cosiddetta meccanizzazione di precisione prevede forme e funzioni di controllo diretto delle operatrici con procedure standardizzate che non fanno uso di mappe di prescrizione, ma che si basano su GNSS, ISObus e sensori. Non occorrono quindi competenze agronomiche esterne per la gestione della variabilità e generalmente fa conseguire vantaggi sicuri e che sono facilmente comprensibili dagli imprenditori. In altre parole, in questo caso, ci dovremo abituare a tecnologie relativamente semplici, dal punto di vista meccanico, ed altamente affidabili, ma dotate di complesse reti di servizio atte a interagire con le componenti che caratterizzano l'agricoltura: il terreno, le piante, gli animali.

Grande impulso deriverà dall'introduzione di nuovi sensori. Questi, infatti, possono consentire di adattare le tecniche agronomiche alla variabilità intrinseca del suolo, dell'ambiente e quindi delle colture. I sistemi di guida con GNSS sono il settore "driver" considerando che i vantaggi della navigazione satellitare presa come sistema a sé stante sono ben noti, ma possono essere amplificati se al GNSS si abbina un sistema Isobus. La tecnologia ISOBUS mette a disposizione agli utenti protocolli per il controllo dei trattori e delle operatrici come il *Sequence Controller*, il *Task Controller* e, ultimamente il TIM (*Tractor Implement Management*). Il primo viene applicato per la creazione in automatico di sequenze di operazioni ripetitive di voltata tra una passata e l'altra.

Il secondo può gestire in modo selettivo l'erogazione dei prodotti su sezioni, ugelli e file su seminatrici, irroratrici e spandiconcime, attuando così il controllo automatico delle sezioni o ASC (*Automatic Section Control*). ASC utilizza un GNSS per localizzare la posizione della macchina e quindi registra le aree trattate. Se la macchina attraversa un'area precedentemente trattata o non trattabile, si disattiva l'erogazione, eliminando la sovra-applicazione. La funzionalità TIM permette alla macchina operatrice di controllare alcune specifiche funzioni del trattore, come la velocità di avanzamento o il regime di rotazione della presa di potenza.

Come riportato, i risparmi di prodotto conseguibili sono degni di nota. I maggiori vantaggi si hanno quando la larghezza di lavoro di una sezione controllabile risulta bassa, ossia è frazionata in un numero elevato di sezioni. Inoltre, i risparmi sono tanto maggiori quanto più piccola è la superficie dell'appezzamento e più irregolare la sua forma.

È chiaro che questa funzionalità incide sul costo della macchina, ma il controllo delle sezioni è il primo passo verso la cosiddetta distribuzione a rateo variabile.

	Larghezza di lavoro (m)	Larghezza minima sezione (m)	Aumento di pezzo (%)	Risparmi (%)
Seminatrice monogerme	3-9	0,45	50-70	2-13
Spandiconcime centrifugo	15-36	8	60-80	4-8
Spandiconcime pneumatico	12-18	2	15-30	5-10
Irroratrice a barra	12-36	1-4	30-40	6-20 (testate)

Tabella 1. Risparmi di prodotto distribuito conseguibili nelle varie operazioni.

A fianco dei ricevitori satellitari, l'evoluzione tecnologica ha fatto sì che siano oggi presenti numerosi sensori, gestiti attraverso il computer di bordo, atti a supportare il monitoraggio e/o l'automazione sia del trattore, sia delle macchine operatrici. Tutto ciò si è tradotto nello sviluppo di sistemi di automazione basati su attuatori tecnologicamente sempre più sofisticati.

Applicazioni in questo senso per le colture estensive riguardano ad esempio il controllo in tempo reale dell'uniformità di deposizione del seme per seminatrici monogerme, la variazione dell'intensità di lavorazione del terreno per operatrici mosse dalla p.d.p, la concimazione a dose variabile con spandiconcime centrifughi dotati di radiometri multispettrali, il diserbo meccanico inter e intra-filare per orticole con sensori ottici, il controllo del flusso e della densità di foraggio nelle imballatrici giganti, ecc. Nelle irroratrici, sensori di posizione, posti a monte degli erogatori, consentono di rilevare la presenza del "bersaglio" e la sua posizione e, conseguentemente, di interrompere o variare il flusso in funzione della presenza e delle caratteristiche della vegetazione (*spot spraying*), con evidenti ulteriori risparmi di prodotto.

Come accennato precedentemente, tutti questi dispositivi elettronici si nutrono di dati e ne producono altrettanti, tanto che in questi ultimi anni il volume di dati prodotti in ambito agricolo sta aumentando esponenzialmente. Il dato deve essere considerato come un vero e proprio mezzo produttivo, perché, come un fertilizzante, va stoccato, conservato e utilizzato per aumentare il reddito e ottimizzare l'efficienza dell'intera gestione agricola. Occorre quindi scoprire meglio il valore dei dati utilizzando tutte quelle tecnologie che permettono una più agevole presa delle decisioni sia da parte dell'imprenditore (sistemi di supporto alle decisioni, Intelligenza artificiale), sia all'interno delle macchine agricole per automatizzare completamente le operazioni di campo (robotica).

Olivicoltura e viticoltura di precisione

L'olivicoltura e la viticoltura di precisione si basano sulla conoscenza della variabilità spaziale e temporale al fine di sviluppare strategie di gestione sito specifiche. La gestione sito specifica aumenta l'efficienza delle operazioni e dell'applicazione degli input agricoli al fine di avere una maggiore sostenibilità economica e ambientale delle aziende olivicole. L'analisi della bibliografica indica che i risparmi di fertilizzanti e prodotti fitosanitari si attestano tra il 20-40% (Casa, 2011) (Roma, 2022). Visti i notevoli risparmi che è possibile ottenere applicando le varie tecnologie disponibili, l'interesse verso l'olivicoltura di precisione è in continuo aumento sia in Europa, dove si concentra circa il 60% della produzione, che negli altri continenti (FAOSTAT,

2022). Anche l'interesse verso la viticoltura di precisione è aumentato rapidamente, ed in misura maggiore rispetto ad altri settori agricoli; questa tendenza è probabilmente dovuta anche all'impatto che un aumento della qualità delle uve può avere sulla qualità finale delle produzioni enologiche. Questo consente d'incrementare i prezzi di mercato e stimola l'interesse delle aziende verso l'applicazione di questi progressi tecnologici.

Le tecniche di agricoltura di precisione sono in grado di rilevare e gestire in modo spazialmente variabile l'appezzamento avvalendosi dei significativi progressi tecnologici che sono stati raggiunti negli ultimi decenni. Tra questi: i sistemi di navigazione satellitare globali (GNSS) sempre più precisi ed accessibili; l'aumento della disponibilità di informazioni geolocalizzate acquisite da piattaforme remote e/o prossimali; lo sviluppo di software per l'analisi e gestione dei dati spaziali; lo sviluppo tecnologico di meccanismi, sensori e attuatori a rateo variabile; il miglioramento dei protocolli di comunicazione wireless e ISOBUS per l'interconnessione e condivisione dei dati. Il processo di georeferenziazione sta alla base dello sviluppo dell'agricoltura di precisione in quanto ha permesso l'individuazione di aree contigue e non sovrapposte spazialmente per diversificare le tecniche colturali. Inoltre, anche partendo da dati puntuali, è possibile ottenere delle mappe continue in grado di descrivere la variabilità, utilizzando i modelli geostatistici (Buttafuoco, 2017).

Gli strumenti più utilizzati per monitorare lo stato fisiologico sono quelli che sfruttano le differenti interazione tra la radiazione elettromagnetica e la vegetazione nelle differenti bande dello spettro elettromagnetico (Liang, 2004). I sensori utilizzati a tal fine si distinguono sulla base della differente risoluzione spettrale, ma al loro interno si differenziano anche per le loro differenti risoluzioni geometriche, radiometriche e temporali (Xue, 2017).

I sensori termici, sfruttando la termografia infrarossa per la valutazione dello stato idrico per rilevare la temperatura fogliare in condizioni di turgore differenti. Purtroppo, il legame tra temperatura fogliare e stress dipende da fattori ambientali, pedologici e colturali. Pertanto, sono stati sviluppati degli indici normalizzati in grado di identificare in modo oggettivo le condizioni di stress idrico. Nell'olivo, il più utilizzato è il CWSI (*crop water stress index*) calcolato tramite metodi analitici, empirici e/o diretti (Idso, 1981)

I sensori spettrali, si basano principalmente sull'energia luminosa riflessa dalla vegetazione o assorbita da alcune molecole, in particolar modo i pigmenti fotosintetici. Sfruttando il diverso comportamento tra le bande è possibile calcolare i cosiddetti indici di vegetazione per una migliore comprensione del reale stato fisiologico delle piante ed una facile interpretazione del dato. Infatti, questi indici sono generalmente correlati alla biomassa fotosinteticamente attiva, alla salute della vegetazione e allo stato nutrizionale. Il più utilizzato è l'NDVI (*Normalised difference vegetation index*) (Ferro, 2023; Rouse, 1974). Nel vigneto per monitorare lo stato fisiologico si utilizzano strumenti che sfruttano la fluorescenza, e quindi si basano sull'energia luminosa assorbita dalle molecole di clorofilla dei tessuti vegetali, per monitorare variazioni nutrizionali e dei pigmenti (Agati, 2013). Altri strumenti sfruttano la riflettanza spettrale che può essere misurata attraverso spettrometri per individuare specifiche molecole organiche e le loro variazioni (Suarez, 2021; Xue, 2017). Altri campi di applicazione dei sensori prossimali riguardano il monitoraggio delle proprietà fisiche e chimiche del suolo. Ad esempio, i sensori geofisici che immettono corrente nel suolo tramite contatto diretto definiti georesistivimetri, oppure producendo un campo elettromagnetico, che a sua volta produrrà una corrente elettrica indotta nel suolo, per misurare la conducibilità elettrica totale del suolo, a sua volta funzione delle quantità relative di argilla, sali, rocce e acqua (Doolittle, 2014).

Tutti questi sensori sono montati su piattaforme fisse e/o mobili più o meno distanti dall'oggetto target. Tra queste, la principale piattaforma utilizzata nell'olivicoltura di precisione

a scala aziendale e territoriale è rappresentata dai Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto (SAPR), meglio noti come droni. Essi, rispetto ad altre piattaforme remote come i satelliti e gli aeromobili, offrono differenti vantaggi (Mogili, 2018), quali l'elevata flessibilità d'utilizzo in differenti condizioni orografiche, la possibilità di ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale e l'ottima risoluzione temporale. I droni sono disponibili in diverse configurazioni che si differenziano per dimensioni, forma, caratteristiche di volo, capacità del carico utile e durata del volo.

In termini generali, molti dei sensori descritti montati sulle diverse piattaforme sono in grado di fornire una grande quantità di dati in formato digitale che dovranno essere elaborate prima di ottenere una mappa di prescrizione. Lo scopo di tali elaborazioni è quello di sviluppare apposite mappe che consentano agli agricoltori di effettuare una gestione sito-specifica. Quindi, una volta ottenuta una mappa di prescrizione, questa è in grado di definire delle zone a dosi differenziate di distribuzione (Roma et al., 2023). Dal punto di vista applicativo la tecnologia a rateo variabile si basa sulle comunicazioni standard ISOBUS, un protocollo di comunicazione tra trattori e macchine operative, che consente di effettuare operazioni precise e automatizzate basate su una mappa di prescrizione espressa in dosi di fertilizzante, acqua o agrofarmaci (Ammoniaci, 2021). Per quanto riguarda la difesa le macchine per la distribuzione degli agrofarmaci i risultati scientifici dimostrano ad esempio un risparmio del 40% dei trattamenti a base di rame, senza influire sul controllo delle malattie della vite (Garcia-Ruiz, 2023), con una sensibile riduzione della deriva. In termini di risparmi economici, una fertilizzazione a rateo variabile può consentire un risparmio fino al 30% di prodotto fertilizzante riducendo l'impatto sull'ambiente (Ammoniaci et al., 2021). Altri sistemi che possono essere impiegati per la distribuzione di prodotti liquidi sulla vegetazione del vigneto e che operano in modo autonomo sono i droni dotati di un carico utile superiore a 10 kg. Tuttavia, l'efficienza di tali sistemi è ancora oggetto d'indagine, in quanto vi sono molti parametri da prendere in considerazione, come ad esempio il rischio di deriva ambientale, che dipende dall'altitudine e dalla velocità di volo (Chen, 2022). In fase di sperimentazione vi sono anche i robot terrestri, che sono impiegati per il controllo della flora infestante dell'interfilare, oppure per svolgere le lavorazioni del suolo, o per compiti più complessi la gestione dell'automazione della potatura (Teng, 2021; Saiz-Rubio, 2021). L'insieme di queste tecnologie applicate ha sicuramente migliorato la gestione; tuttavia, è necessario implementare parallelamente altri sistemi quali l'IoT, l'intelligenza artificiale e l'automazione che in sinergia possono contribuire a risolvere le sfide che i coltivatori affrontano quotidianamente.

In fase di sperimentazione vi sono anche i robot terrestri, impiegati per il controllo delle condizioni di crescita e per svolgere alcune operazioni colturali quali le lavorazioni del suolo, la potatura ed i trattamenti fitosanitari.

Automazione in agricoltura

La ricerca sta sviluppando i sistemi robotizzati e apparecchiature autonome che dovrebbero consentire di aumentare la capacità degli agricoltori di applicare un'agricoltura di precisione in grado di avere maggiore gestione spaziale e temporale delle colture e del bestiame. Macchine e processi agricoli stanno diventando sempre più automatizzati (Kester, 2013). Diversi enti e centri di ricerca hanno già sviluppato prototipi di veicoli autonomi e semi-autonomi. Tra questi, DEDALO è il recente risultato di attività di ricerca all'Alma Mater Studiorum Università di Bologna (UNIBO) e vede un'applicazione robotica per l'agricoltura di precisione, dotato di Lidar e GPS ed organi di attacco per macchine operatrici.

Ripercorrendo le tappe dei contributi di ricerca di UNIBO, si evidenzia come le prime applicazioni di robotica risalgono già agli anni '60 e si siano concretizzate nella realizzazione del trattore autonomo BOPS presentato in attività di aratura nel 1960 nelle Provincie di Bologna e Pesaro (Figura 2).

Mentre l'automazione è ben consolidata soprattutto nella produzione zootecnica industriale lattiero-caseario, l'uso delle macchine autonome per la produzione agricola è ancora oggi nelle sue fasi iniziali (Lowenberg-DeBoer, 2021), così come pure la sua analisi economica (Lowenberg-DeBoer, 2020).



Figura 2. Il contributo della ricerca allo sviluppo dei veicoli autonomi presso *Alma Mater Studiorum* Università di Bologna.

Nonostante i progressi nel campo dell'automazione, nelle produzioni vegetali, è ancora improbabile l'utilizzo di un'automazione integrale, con la tendenza ad orientarsi più verso veicoli semi autonomi con presenza ancora dell'azione ed interazione umana per regolare la macchina e spostarla. Esistono infatti ancora diversi problemi di sicurezza e requisiti legali che limitano l'adozione delle operazioni autonome. Una maggior autonomia, infatti, richiede livelli più elevati di percezione della macchina e dell'ambiente. In particolare, il passaggio dei veicoli autonomi da prototipi a macchine industrializzate richiede che siano semplici nell'utilizzo e nella manutenzione, affidabili e la definizione di procedure standardizzate per prestazioni d'uso e sicurezza.

Zootecnia di precisione

Per "zootecnia di precisione" si intende un insieme di tecniche di controllo basate sull'impiego delle *Information and Communication Technologies* (ICT), a sua volta identificabile anche come "zootecnia digitale", allo scopo di avere un controllo mirato dell'individuo animale anziché della mandria nel complesso così da migliorare la gestione delle risorse in un'ottica di sostenibilità, riducendo i costi di produzione e l'impatto ambientale, incrementando nel complesso l'efficienza aziendale. (Abeni, 2018). L'applicazione in azienda della zootecnia di precisione consente di trarre dei benefici in termini di sostenibilità dell'allevamento, in particolare sui tre pilastri della sostenibilità ambientale, sociale ed economica, anche se la loro quantificazione oggi non è ancora consolidata (Lovarelli, 2020)

In questo settore, le applicazioni di mecatronica e dell'*Internet of Think* (IoT) hanno reso possibile un monitoraggio ed una gestione efficiente dei sistemi di allevamento all'interno di ambienti zootecnici che tendevano sempre più ad intensificarsi, con una moltitudine di dati e informazioni che con difficoltà riuscirebbero ad essere osservati con attenzione dagli allevatori. La mecatronica interviene nell'automazione e l'IoT nell'interconnessione. Attualmente, tutte

le fasi dell'allevamento delle bovine da latte sono interessate dai progressi della meccatronica e dell'IoT: alimentazione, mungitura, salute, riproduzione, ventilazione e pulizia.

Lo scopo della zootecnia di precisione è gestire i singoli animali mediante il monitoraggio continuo in tempo reale della salute, del benessere, della produzione/riproduzione e dell'impatto ambientale. Si può affermare che la chiave di controllo della gestione del processo è prevedere come l'output di processo reagirà in variazione agli input (Berckmans, 2017). Secondo Berckmans, gli animali, come tutti gli organismi viventi, sono complessi, individualmente diversi e variabili nel tempo; infatti, rispondono agli stimoli in maniera e in tempi differenti e pertanto definiti come sistemi CIT (dall'inglese *Complex, Individual and Time-variant*)

L'adozione della zootecnia di precisione consente l'individuazione precoce di patologie e problematiche, e questo permette di ridurre i tempi necessari per la diagnosi e l'intervento, limitando la compromissione della salute e delle prestazioni della bovina. Le applicazioni di sistemi robotizzati in ambienti zootecnici sono ormai consolidate negli ambienti di mungitura, per la pulizia e la manutenzione degli ambienti e nei sistemi di gestione dell'alimentazione (*precision feeding*). Il percorso dell'introduzione della mungitura automatizzata ha origine dal lontano 1830, periodo in cui nacque l'idea di simulare il meccanismo di suzione del vitello attraverso delle apparecchiature che generavano un vuoto continuo ottenuto manualmente. Seguirono dei perfezionamenti con le introduzioni dei tempi di massaggio ai tempi di suzione e vuoto, fino agli attuali sistemi di mungitura automatici, *Automatic Milking Systems* (AMS). Oggi, questi sistemi automatizzati rappresentano una realtà consolidata nell'allevamento e la loro acquisizione ha comportato grandi cambiamenti per l'allevatore e per gli animali, introducendo un nuovo concetto di gestione della mandria (Tangorra et al., 2017).

Conclusioni

I due comparti agricoltura e zootecnia di precisione hanno un percorso di innovazione in ambito di introduzioni di sistemi automatizzati comune in quanto è stato perseguito l'obiettivo di aumentare l'efficienza del lavoro, ridurre i costi di produzione e ridurre la fatica degli addetti. Oggigiorno, tuttavia, l'adozione di sistemi robotici è assai diversa in zootecnia e nelle coltivazioni di pieno campo.

Le produzioni animali, ed in particolare l'allevamento delle bovine da latte, si caratterizzano per applicazioni già pienamente industrializzate e integrate nell'ambiente di allevamento, percepite dagli allevatori come un valore aggiunto nel percorso di allevamento e produzione e vissute dagli animali in allevamento quali normali componenti dell'ambiente stalla.

Nell'agricoltura di precisione invece le applicazioni di robotica sono ancora in una fase di iniziale diffusione, con veicoli autonomi spesso di tipologia prototipale e con problematiche di prestazione e di sicurezza ancora da risolvere. Questo in gran parte deriva dalla diversificazione dell'ambiente agricolo, che si caratterizza per colture di pieno campo, orticole, per vigneti, oliveti e frutteti, ambiti produttivi con specificità colturali che richiedono soluzioni *ad hoc* per caratteristiche costruttive e operative; ma è soprattutto la dinamicità dell'ambiente colturale ad incidere sull'effettiva introduzione dei robot terrestri. Le attività agricole a cielo aperto vedono un'estrema variabilità nelle condizioni dell'ambiente colturale in quanto soggetto alla variabilità delle condizioni climatiche nella stagione vegetativa e questo incide notevolmente nelle prestazioni attese dai veicoli dotati di intelligenza artificiale, caratterizzati spesso da applicazioni di sensoristica e di sistemi di attuazione derivati da altri ambiti applicativi.

È in questo contesto che si rivelano necessari percorsi di ricerca per promuovere la messa a punto delle attuali soluzioni costruttive con alto contenuto di automazione affinché le potenzialità dell'innovazione contenuta possa venire sfruttata nella pratica, anche economicamente. L'innovazione in agricoltura richiede ricerca di base e applicata e la stretta collaborazione fra costruttori, ricercatori ed utilizzatori finali.

Bibliografia

- Abeni F., G. A. (2018). La zootecnia di precisione: una opportunità per una produzione animale etica e sostenibile. *Agriregioneuropa* 14 n°53.
- Agati, G. F. (2013). Fluorescence-based versus reflectance proximal sensing of nitrogen content in *Paspalum vaginatum* and *Zoysia matrella* turfgrasses. *European journal of agronomy* 45, .
- Ammoniaci, M. K.-P. (2021). State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. . *Agriculture* 11, 201.
- Berckmans, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers* Volume 7, Issue 1, 6–11.
- Buttafuoco, G. C. (2017). Geostatistical modelling of within-field soil and yield variability for management zones delineation: a case study in a durum wheat field. . *Precision Agriculture*.
- Casa, R. C. (2011). Nitrogen fertilisation management in precision agriculture: a preliminary application example on maize. *Italian Journal of Agronomy*, 6, e5–e5.
- Catania, P. C. (2020). Positioning accuracy comparison of GNSS receivers used for mapping and guidance of agricultural machines. *Agronomy*, 10, 924.
- Chen, P. D. (2022). Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. . *Frontiers in Plant Science*, 13, 870956.
- D. Lovarelli, J. B. (2020). A review on dairy cattle farming: Is precision livestock farming the compromise for an environmental, economic and social sustainable production? *Journal of Cleaner Production*, Volume 262.
- Doolittle, J. B. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. . *Geoderma*, 223, 33–45.
- El-Mashharawi, H. A. (2020). Classification of Grape Type Using Deep Learning.
- Ferro, M. C. (2023). Technologies and Innovative Methods for Precision Viticulture: A Comprehensive Review. . *Horticulturae*, 9, 399.
- Fulton, J. P. (2018). Precision agriculture data management. *Precision Agric.*, 169–187.
- Garcia-Ruiz, F. C.-C. (2023). Assessment of map based variable rate strategies for copper reduction in hedge vineyards. . *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107753.
- Idso, S. J. (1981.). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. . *Agricultural meteorology* 24,, 45–55.
- Jackson, R. I. (1981.). Canopy temperature as a crop water stress indicator. . *Water resources research* 17, 1133–1138.
- Kayad, A. S. (2022). How many gigabytes per hectare are available in the digital agriculture era? A digitization footprint estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107080.
- Kester, C. (2013). A survey of future farm automation – a descriptive analysis of survey responses.
- L. Kamelia, M. R. (2018). Implementation of Automation System for Humidity Monitoring and Irrigation System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* vol. 288, 012092.
- Liang, S. (s.d.). Quantitative remote sensing of land surfaces, Wiley series in remote sensing. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., 2004.
- Lowenberg-DeBoer, J. F. (2021). Economics of autonomous equipment for arable farms. *Precision Agric* 22, 1992–2006.
- Lowenberg-DeBoer, J. H. (2020). Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21,, 278–299.
- Mangold, G. (1995). Entrapped or empowered by technology? *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 5, 9-13.
- Mogili, U. D. (2018). Review on application of drone systems in precision agriculture. . *Procedia computer science* 133, 502–509.
- NRC, N. R. (1997). *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Pádua, L. M. (2022). Vineyard classification using OBIA on UAV-based RGB and multispectral data: A case study in different wine regions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106905.
- Pierpaoli E, C. G. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technology*, 8:61-69.
- Poblete-Echeverría, C. O. (2017). Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution RGB imagery obtained from unmanned aerial vehicle (UAV): A case study in a commercial vineyard. *Remote Sensing*.
- Rogers, E.M. (1962). *The Diffusion of Innovations*. Glencoe, Illinois.
- Roma, E. C. (2022). Precision Oliviculture: Research Topics, Challenges, and Opportunities—A Review. *Remote Sensing* 14.
- Roma, E. L. (2023). Application of Precision Agriculture for the Sustainable Management of Fertilization in Olive Groves. *Agronomy*, 13, 324.
- Rouse, J. H. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Greenbelt, Md 371.: NASA/GSFC Type III Final Report*.
- Saiz-Rubio, V. R.-M.-C. (2021.). Robotics-based vineyard water potential monitoring at high resolution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106311.
- Shumpeter, A. (1934). *Teoria dello Sviluppo Economico*. Duncker&Humblot, Berlino.
- Suarez, L. Z.-T. (2021). . Assessing wine grape quality parameters using plant traits derived from physical model inversion of hyperspectral imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* 30.
- Teng, T. F. (2021.). Whole-body control on non-holonomic mobile manipulation for grapevine winter pruning automation. Presented at the 2021 6th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), IEEE, pp. 37–42.
- Xue, J. S. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*.
- Zhou, Z. M. (2021). Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 18.

Aspetti economici e di policy della bioeconomia

Bartolini F.¹, Boggia A.², Canavari M.³

¹ Università degli Studi di Ferrara – Dipartimento di Scienze Chimiche, Farmaceutiche ed Agrarie

² Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali

³ Alma Mater Studiorum-Università di Bologna – Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari

Riassunto

La crescente domanda di cibo ed energia e la necessità di conservare il capitale naturale rappresentano le principali sfide globali. La bioeconomia, intesa come un'economia che usa le risorse biologiche rinnovabili di prima e di seconda generazione, provenienti dalla terra e dal mare come materiale per la produzione energetica, industriale, alimentare e mangimistica, può fornire concretamente una risposta a tale sfida. Tuttavia, nonostante crescenti investimenti privati e pubblici nei settori principali della bioeconomia (agrifood, chimica e farmacia), il suo contributo al supporto di una transizione sostenibile risulta, al momento, ancora insoddisfacente.

Abstract

The increasing demand for food and energy, coupled with the imperative to conserve natural capital is one of the main global challenges. The bioeconomy has the potential to effectively address this challenge as can utilize first and second-generation renewable biological resources from both land and sea. Nevertheless, despite the growing private and public investments in agricultural sector of the bioeconomy (including agrifood, chemistry, and pharmacy), its current contribution to fostering a sustainable transition remains unclear.

Keywords: *bioeconomia, aspetti economici, consumatore, servizi ecosistemici*

Introduzione

La transizione verso un modello di sviluppo sostenibile e resiliente ai cambiamenti climatici è una delle principali sfide globali. La bioeconomia può concretamente contribuire a tale sfida, poiché, rappresentando un crocevia tra diversi ambiti disciplinari, possiede un forte potenziale innovativo (OECD, 2009). L'inclusione degli aspetti biologici nelle discipline economiche è un tema consolidato nella letteratura economica ed ha generato un filone di ambiti disciplinari definiti come "S-economics" che comprendono, oltre alla bioeconomia, l'economia verde, circolare, blu, e low-carbon tra le altre (Sotiropoulou e Deutz, 2022). Il termine bioeconomia fu coniato dal biologo russo Baranoff (1920) per descrivere, nel primo dopoguerra, il livello di prelievo ottimale tramite pesca dallo stock di risorsa ittica, calibrato in base alla capacità dell'ecosistema di riprodurre una risorsa usata o consumata. Tre diverse narrazioni possono essere usate per descrivere la bioeconomia dalla letteratura economica (Vivien et al., 2019): a) la bioeconomia come economia delle risorse rinnovabili; b) la bioeconomia come uso delle biotecnologie per promuovere lo sviluppo economico; c) la bioeconomia come sistema economico basato sulle risorse biologiche. Le narrazioni sono in qualche modo una sintesi dei discorsi dominanti dalla letteratura sulla bioeconomia, ma rappresentano anche un modo per osservare posizioni diverse su come il sistema economico e quello ecologico interagiscono e rappresentare il punto di vista, il potere, le distribuzioni e le relazioni degli attori coinvolti (Franceschini e Pansera, 2015). In particolare, le tre diverse narrazioni identificano i driver in termini di innovazione, gli aspetti istituzionali e di governance ed infine gli attori coinvolti nei processi decisionali, nonché i possibili impatti. La prima delle tre narrazioni introduce nel

sistema economico il concetto di bio-capacità (e di *planet boundaries*) al fine di considerare nei modelli economici un bilancio dei materiali e/o energetico o calibrare i processi di produzione e di consumo sulle impronte ecologiche che questi processi generano sugli ecosistemi (Martinez-Alier, 1997). In questa narrazione, le innovazioni dominanti sono quelle che consentono di migliorare l'efficienza dei processi produttivi o innovazioni sociali che determinano cambiamento nei consumi a favore di comportamenti pro-ambientali (Asada et al., 2020; Figge et al., 2014; Grilli e Curtis, 2021). La seconda narrazione descrive la bioeconomia come un processo guidato fortemente dalla ricerca nelle biotecnologie (OECD, 2009). In questa narrazione diventano centrali i processi di R&S ed il ruolo delle policy è quello di creare le condizioni per accelerare la creazione di nuove conoscenze sui processi biologici nonché facilitare il processo di trasferimento dei nuovi regimi tecnologici (D'Amato et al., 2022; Oriama e Pyka, 2021; Vanloqueren e Baret, 2009). Infine, la terza narrazione di bioeconomia prevede la sostituzione delle risorse fossili e non rinnovabili con risorse biologiche e rinnovabili (Oriama e Pyka, 2021; Viaggi et al., 2022). Pertanto, in questa narrazione assumono un ruolo chiave le conoscenze sulle biomasse e sulla massimizzazione del valore aggiunto derivante dal loro utilizzo (European Commission, 2012).

Letteratura sulla bioeconomia

Quattro aspetti hanno alimentato l'interesse per gli studi economici sulla bioeconomia: (i) l'attuazione di politiche indirizzate alla transizione verso una società post-carbon (M'barek et al., 2014); (ii) le conoscenze biologiche avanzate, nuove tecnologie e disponibilità di nuovi processi che stanno alla base di nuovi modelli di business per la bioeconomia (Wessler et al., 2022; Zilberman et al., 2018); (iii) la globalizzazione e commercio internazionale (Bartolini, 2018; Nitescu and Murgu, 2020; Schulz et al., 2022); (iv) le filiere e i mercati (Viaggi et al., 2022).

Politiche e quadro istituzionale

La bioeconomia, per l'innata attività e per le implicazioni circa la crescita e lo sviluppo economico, è stata inclusa nell'agenda di policy di innumerevoli Paesi (von Braun, 2018). Infatti, più di 60 paesi hanno sviluppato una strategia per la bioeconomia, focalizzata allo sviluppo della fornitura e del consumo di risorse biologiche rinnovabili (Asada et al., 2020; Viaggi, 2018). Le strategie per la bioeconomia negli ultimi anni sono state integrate con obiettivi di lungo periodo, legati alla decarbonizzazione, mitigazione dei cambiamenti climatici e miglioramento dell'efficienza delle risorse (Galanakis et al., 2022; Fritsche et al., 2020). Ne consegue una complessa rete di priorità, strumenti, azioni che coinvolge molti ambiti, diverse Direzioni Generali (DG) (Dietz et al., 2018) e si applica su livelli territoriali e su orizzonti temporali multipli (Iriarte et al., 2020). Pertanto, le misure volte a promuovere la bioeconomia sono basate su diverse strategie (European Green Deal; EU Biodiversity), appartengono a programmi diversificati (agricoltura, ambiente, fondi di coesione, commercio, finanzia, energia; risorse, waste, ambiente), nonché prevedono l'integrazione di strumenti disegnati su scala regionale, nazionale, europea e rispondono ad accordi ricadenti nel diritto internazionale (Iriarte et al., 2020). Questa complessità ha generato una crescente domanda di analisi di coerenza interna ed esterna tra le diverse priorità, tra le azioni e tra gli strumenti di policy. Infatti le politiche spesso rimangono implementate settorialmente (Bartolini et al., 2015; Blatter et al., 2022; Kanda et al., 2022; Kelleher et al., 2019; Viaggi et al., 2022) e spesso senza sviluppare spazi riflessivi per la condivisione e lo scambio di conoscenze (Fieldsend et al.,

2021), oppure senza sviluppare nuovi elementi istituzionali deputati a disegnare mix di policy di ampio spettro (Rogge e Reichardt, 2016). La figura 1 presenta l'approccio multilivello e l'intricato insieme di priorità ed istituzioni per la bioeconomia. Tuttavia (Maes e Van Passel, 2019) si osserva una discrasia tra l'orizzonte di lungo periodo degli obiettivi delle politiche e strategie con quello a breve-medio degli attori del sistema economico, evidenziando che, tra gli strumenti e i regolamenti esistenti, le sovvenzioni per lo sviluppo industriale e per la R&S privata rappresentano i principali motori dell'innovazione nei settori emergenti. Inoltre, le politiche che forniscono supporto operativo alle nuove tecnologie tendono ad essere molto efficaci da un lato, ma a creare dipendenza dall'altro.

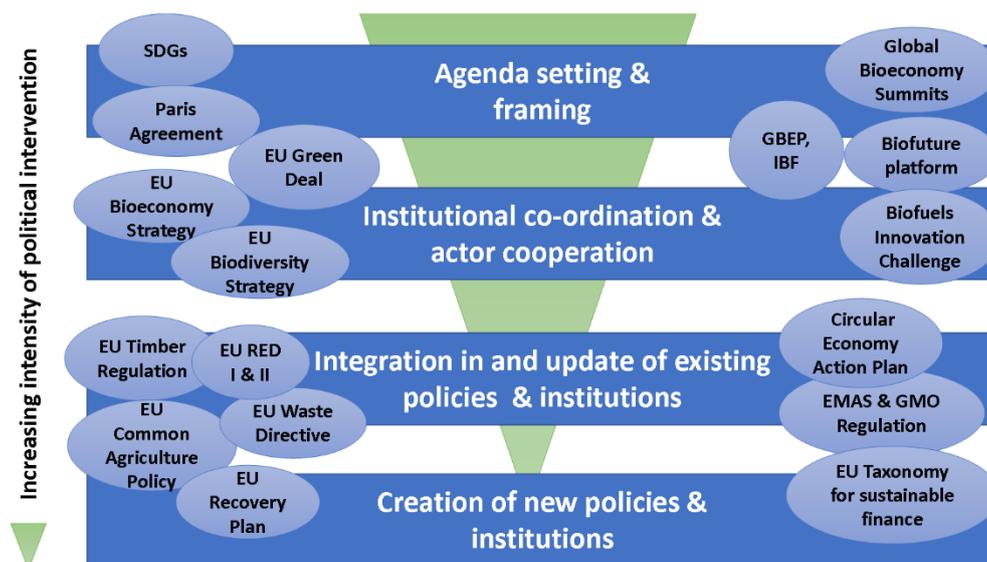


Figura 1. Governance della bioeconomia. Fonte: Iriarte, van Dam e Fritsche (2020).

Modelli di business

Una emergente letteratura, mutuata dagli studi di management ed economia dell'organizzazione, cerca di comprendere il modello di business che può essere attivato, per creare e "catturare" nuove filiere o una più ampia trasformazione industriale. L'aspetto strategico dei modelli di business è come le imprese riescano a catturare un valore economico per loro stesse e per la filiera, fornendo benefici sociali ed ambientali (D'Amato et al., 2022; Medici et al., 2021). Quindi la letteratura pone enfasi sulla nozione di "valori", sugli aspetti finanziari e sulla creazione di network tra le imprese e gli stakeholders (Bocken et al., 2014), ovvero come le imprese catturano valore cogliendo nuove opportunità di business da nuovi mercati e nuovi flussi di ricavi oppure attraverso l'ideazione di nuove idee ed azioni. Queste attività sono particolarmente rilevanti per la bioeconomia, dove nuove opportunità di business emergono dalle conoscenze generate dai processi biologici o dall'applicazione di nuovi approcci riguardanti, ad esempio, alla chiusura di loop di alcune filiere legate all'economia circolare, alla green economy ecc. La proposta di valore riguarda generalmente l'offerta di prodotti e servizi percepiti dai consumatori forieri di valori ecologici e/o sociali, insieme al valore economico del prodotto (Medici et al., 2020). La comprensione dei modelli di business è un requisito fondamentale per la trasformazione industriale legata alla bioeconomia (Geissdoerfer et al., 2017) e diversi studi stanno analizzando archetipi di business model che si possono applicare alla bioeconomia. Ad esempio Bocken et al. (2014) classificano i modelli di business sulla base dell'innovazione dominante, ovvero a) innovazioni orientate alla tecnologia,

b) al sociale e c) all'organizzazione. Il primo comprende modelli di business dove esiste una innovazione tecnologica legata all'utilizzo delle risorse biologiche come, ad esempio, nuovi processi di fabbricazione oppure la riprogettazione del prodotto utilizzando biomasse. Nel secondo esiste una componente dominante di innovazione sociale che può derivare dalla domanda dei consumatori o dal cambiamento del comportamento dei consumatori (si veda ad esempio le preferenze in merito all'agricoltura cellulare e alla carne coltivata) (Pakseresht et al., 2022). Infine, l'ultimo raggruppamento comprende le innovazioni organizzative con una componente dominante di cambiamento nei rapporti o nelle responsabilità tra i soggetti della filiera. Queste classificazioni sono particolarmente rilevanti poiché, stabilendo i settori dominanti dell'innovazione, descrivono come si possa generare valori usando risorse. Questa letteratura è complementare alla letteratura non economica in quanto, oltre a stabilire la disponibilità di biomasse in un determinato contesto, cerca di capire come utilizzarla e creare filiere sostenibili ad alto valore aggiunto (De Keyser e Mathijs, 2023).

Globalizzazione e commercio internazionale

La globalizzazione e i cambiamenti nel commercio dovuti ad una migliore integrazione e coordinamento tra le imprese lungo le filiere globali hanno rappresentato una opportunità di crescita per la bioeconomia, e la letteratura economica ha analizzato le conseguenze dei fenomeni di *outsourcing* (esternalizzazione) e *offshoring* (delocalizzazione) ed il ruolo chiave dei costi di approvvigionamento delle biomasse, i costi di produzione ed i costi di transazione (Bartolini, 2018; Nitescu e Murgu, 2020; Wesseler et al., 2015). L'avanzamento delle conoscenze e il progresso tecnologico nelle scienze biologiche e agrarie e nelle ITC hanno favorito l'innovazione in vari sottosectori della bioeconomia, come i biocarburanti e le bioplastiche (Sotiropoulou e Deutz, 2022) e l'agricoltura cellulare per la produzione di cibo, in particolare la carne coltivata (Broad, 2020). L'espansione delle infrastrutture, la migliore diffusione delle conoscenze e l'aumento del numero della varietà e della disponibilità di biomasse adatte alla lavorazione hanno potenziato le catene del valore globali legate alla bioeconomia (Ijabadeniyi e Vanclay, 2020). Watanabe et al. (2018) considerano la creazione di un nuovo mercato (e-commerce) come uno dei fattori che consentono di dare impulso al processo di industrializzazione di una bioeconomia basata sull'uso delle risorse rinnovabili. Birch e Tyfield (2013) individuano il ruolo preminente del lato immateriale della bioeconomia (finanza e creazione/co-creazione di conoscenza) come uno dei principali motori per stimolarne l'espansione nei mercati internazionali. La letteratura economica ha riportato un ampio consenso sul ruolo positivo della bioeconomia nel migliorare la crescita sia di Paesi sviluppati che di quelli in via di sviluppo. Una crescente letteratura sta evidenziando vantaggi per i Paesi in via di sviluppo nell'entrare nelle catene di valore globali, legati soprattutto al miglioramento della sicurezza alimentare e all'adozione di standard produttivi più elevati rispetto a quelli richiesti dal mercato domestico (Neimark et al., 2020). Tuttavia, Fletcher et al. (2017) sottolineano che la bioeconomia potrebbe essere troppo costosa per i Paesi in via di sviluppo (in particolare in Africa), per via di uno scarso sviluppo tecnologico e di una bassa conoscenza dei processi biotecnologici. Inoltre, la limitata infrastrutturazione e la mancanza di investimenti specifici di natura pubblica sono ulteriori vincoli allo sviluppo dell'economia. Altri autori hanno invece enfatizzato gli effetti di *displacement* (Neimark et al., 2020), evidenziando come si possano generare competizioni tra produzione di biomassa e mantenimento delle aree ad alto valore naturalistico, una perdita di ecosistemi o possibili pressioni sulle comunità rurali locali (Bowditch et al., 2020; Temper, 2016).

Filiere e Mercati

La transizione verso una bioeconomia comporta anche, ma non solo, l'utilizzo di tecnologie disruptive e la letteratura ha evidenziato asimmetrie informative tra gli attori delle filiere (Hassan et al., 2019). La diversa distribuzione delle informazioni tra gli attori può portare a trade-off tra i diversi obiettivi degli attori nell'attuare il processo di trasformazione industriale, nonché concorrenza per le risorse biologiche e naturali soprattutto in assenza di un quadro normativo ed istituzionale non adeguato (diritto internazionale, diritti di proprietà, ecc). Inoltre, esiste una forte eterogeneità tra lo sviluppo dei vari sottosectori della bioeconomia, legati ad una maturità tecnologica fortemente differenziata tra questi. Zuin e Ramin (2018) evidenziano come vi sia un maggiore sviluppo di certi ambiti, tra cui le soluzioni per la separazione sostenibile (riducendo il consumo di energia e utilizzando solventi e una produzione naturale), di composti naturali dai rifiuti alimentari per estrarre composti ad alto valore aggiunto per l'agricoltura, nutraceutici o bio-pesticidi (ad esempio coloranti naturali, aromi, aromi, antiossidanti, antimicotici o precursori per generare altri composti per usi simili). Gli stessi autori hanno evidenziato come anche la ricerca si stia concentrando su particolari biomasse o materie prime (principalmente da scarti agroindustriali o foreste) o sull'estrazione di composti specifici nei settori ortofrutticolo o in altre produzioni abbondanti, come quelle della canna da zucchero, del tè o della paglia di riso e grano. Le aspettative dei nuovi modelli di business legati alla bioeconomia sono molto elevate in quanto le premesse potrebbero garantire aumento di redditi per gli attori della filiera (Maes e Van Passel, 2019), per le economie locali (Bartolini et al., 2017; Vergamini et al., 2015), nonché una opportunità per aumentare la competitività delle imprese penetrando in nuovi mercati e sviluppando e commercializzando nuovi prodotti (Broad, 2020) e servizi (DeBoer et al., 2020). Nonostante esistano diverse narrative per descrivere la bioeconomia (si veda l'introduzione), queste mostrano somiglianze negli ostacoli e nei vincoli allo sviluppo di nuovi prodotti, tecnologie e innovazioni. I vincoli principali riguardano l'elevato costo di consegna (produzione, logistica e trasporto) delle biomasse, il basso livello di maturità in termini di Technology Readiness Level (TRL) per le tecnologie di bioraffineria e i bassi prezzi dei combustibili fossili o dei prodotti a base di petrolio (Guo e Song, 2019). Le politiche implementate stanno lavorando in questa direzione, pur mostrando un fallimento nel tentativo di includere la sostenibilità nella definizione dell'agenda (Borgström e Mauerhofer, 2016; Kugelberg et al., 2021). Sebbene rimanga uno dei pilastri principali della bioeconomia, la circolarità dei processi e la creazione di una catena di approvvigionamento multi-feedstock non sono discusse in modo efficace nella letteratura. Infatti la letteratura economica ha analizzato principalmente i costi di investimento ed i profitti, la logistica e la catena distribuzione, nonché l'approvvigionamento di biomassa e i tipi di accordi contrattuali tra gli attori della catena di approvvigionamento (Vergamini et al., 2015; Viaggi et al., 2022; Zilberman et al., 2018). Carraresi et al. (2018) sottolineano la complessità nella definizione dei meccanismi di coordinamento a causa dell'esitazione nell'effettuare un investimento tempestivo o un sotto investimento in attrezzature e know-how, a causa dei costi sommersi, nonché le difficoltà di integrazione dei settori industriali a causa della mancanza di competenze complementari e di strategie adottate per evitare uno squilibrio di potere contrattuale (Lasarte-López et al., 2023). Arru et al. (2022) evidenziano che il livello di circolarità in Europa è generalmente basso, e che l'agricoltura europea, contribuisce per oltre l'80% allo smaltimento di materiali, mentre immette nel sistema molto poco.

Impatti

Nonostante esistano molti studi sui costi e benefici della bioeconomia, nonché sulla percezione dei rischi, la letteratura economica è tuttora divisa sugli impatti presenti e futuri. Pfau et al. (2014) identificano diverse visioni nei confronti della bioeconomia: a) sostenibilità incondizionata come caratteristica intrinseca della bioeconomia a seguito della sostituzione dei prodotti a base fossile; b) aspettative positive e benefici a determinate condizioni; c) posizioni attendiste legate alle potenziali insidie della bioeconomia; d) impatti negativi sulla sostenibilità.

Nonostante queste divisioni le aspettative rispetto alle ricadute della bioeconomia sono significative e dirimenti. Ad esempio Pfau et al. (2014) stimano che la bioeconomia consentirà di sostituire nei prossimi decenni il 90% dei prodotti a base di petrolio. El-Chichakli et al. (2016) considerano lo sviluppo della bioeconomia necessario per contribuire agli obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), nonché per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici e ridurre il depauperamento delle risorse. Ronzon e Sanjuán (2020) evidenziano che la Strategia del 2018 per la EU bioeconomy è allineata a 53 target di 12 dei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile, con significative sinergie, anziché trade-off, tra questi. Gli argomenti esposti per supportare le posizioni positive della bioeconomia riguardano sia una riduzione a breve termine dei rifiuti, dell'inquinamento e delle emissioni, ed una diminuzione della domanda di risorse non rinnovabili, sia elementi a lungo termine legati ad un miglioramento della resilienza dei sistemi alimentari, ed alla costruzione di una bio-industria competitiva (European Commission, 2012; Smith et al., 2021) Alvarado-Bawab e Villa Marengo, (2023) tentano di analizzare un caso di un distretto industriale in Colombia, rilevando che l'impatto delle azioni intraprese sia generalmente piuttosto basso.

Diversamente, Heimann, (2019) identifica possibili trade-off tra diversi obiettivi di sviluppo sostenibile, con un contributo positivo allo sviluppo di nuove opportunità di lavoro, ma un impatto negativo sull'ambiente e sulla vitalità delle aree rurali. Dietz et al. (2018) identificano diversi percorsi di sviluppo della bioeconomia, e di conseguenza una diversificazione degli impatti, a seguito dell'interazione tra le varie forze trainanti, tra cui la crescita della popolazione, le preferenze dei consumatori, il cambiamento climatico, prossimità ed accesso alle risorse naturali ed i modelli di business dominanti. Näyhä (2019) riconosce anche che tra gli attori dei sistemi socio-ecologici possono esistere diverse visioni sulla transizione verso la bioeconomia e che una transizione non inclusiva della bioeconomia possa generare conflitti e tensioni per via di un disallineamento tra le priorità di policy e le aspettative da parte degli stakeholder. A questo proposito vale la pena ricordare l'acceso dibattito sulla carne coltivata e le divergenze dalle posizioni rispetto alle nuove tecnologie (Bertero et al., 2023). Altri autori identificano potenziali rischi nella bioeconomia, come l'eccessivo sfruttamento delle risorse naturali, la diminuzione della biodiversità e della sicurezza alimentare e l'aumento delle deforestazioni nei paesi terzi, la reindustrializzazione e la centralizzazione delle produzioni agroalimentari (Curry et al., 2021).

Conclusioni

La bioeconomia può avere implicazioni sociali, economiche e ambientali che influenzano il funzionamento dei sistemi socio-ecologici e li modificano profondamente attraverso processi di innovazione tecnologica, sociale ed organizzativa. Nonostante la crescente attenzione da parte delle scienze economiche, la letteratura è piuttosto divisa sui trade-off tra i diversi servizi ecosistemici e sulle reali potenzialità e le premesse di sviluppo economico della bioeconomia.

Questo sembra conseguenza di una difficoltà a generalizzare le aspettative sui costi e benefici, per via di complesse dinamiche nei sistemi socio-ecologici e degli intricati nessi tra filiere, attori e territori. La recente crisi e le instabilità nei mercati internazionali, tuttavia, fanno emergere un ruolo molto più ampio che la bioeconomia può svolgere per diversificare l'approvvigionamento di alimenti e materie prime, contribuire alla circolarità e alla neutralità climatica, creando al contempo occupazione e promuovendo le vitalità delle zone rurali. Questa nuova domanda deve essere tuttavia accompagnata da un attento processo di valutazione multidisciplinare e plurale per cercare di avviare un processo di transizione inclusivo nella bioeconomia.

Bibliografia

- Alvarado-Bawab, M.B., Villa Marengo, S., 2023. Industrial perspective regarding circular economy activities in Atlántico-Colombia. *Economia agro-alimentare* 25, 191–117. <https://doi.org/10.3280/ecag2023oa14669>
- Arru, B., Furesi, R., Pulina, P., Sau, P., Madau, F.A., 2022. The Circular Economy in the Agri-food system: A Performance Measurement of European Countries. *Economia agro-alimentare* 24, 1–35. <https://doi.org/10.3280/ecag2022oa13245>
- Asada, R., Krisztin, T., di Fulvio, F., Kraxner, F., Stern, T., 2020. Bioeconomic transition?: Projecting consumption-based biomass and fossil material flows to 2050. *Journal of Industrial Ecology* 24, 1059–1073. <https://doi.org/10.1111/jiec.12988>
- Bartolini, F., 2018. Food trade and global value chain, in: *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. Elsevier, pp. 82–87. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21967-7>
- Bartolini, F., Angelini, L.G., Brunori, G., Gava, O., 2015. Impacts of the CAP 2014–2020 on the agroenergy sector in Tuscany, Italy. *Energies* 8, 1058–1079. <https://doi.org/10.3390/en8021058>
- Bartolini, F., Gava, O., Brunori, G., 2017. Biogas and EU's 2020 targets: Evidence from a regional case study in Italy. *Energy Policy* 109, 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.039>
- Bertero, A., Biressi, S., Buscemi, F., Conti, L., Cresti, M., Gargioli, C., Lo Sapio, L., Loera, B.L., Poncibò, C., Stano, S., 2023. We need an informed discussion on cultivated meat.
- Birch, K., Tyfield, D., 2013. Theorizing the Bioeconomy: Biovalue, Biocapital, Bioeconomics or . . . What? *Science Technology and Human Values* 38, 299–327. <https://doi.org/10.1177/0162243912442398>
- Blattert, C., Eyvindson, K., Hartikainen, M., Burgas, D., Potterf, M., Lukkarinen, J., Snäll, T., Toraño-Caicoya, A., Mönkkönen, M., 2022. Sectoral policies cause incoherence in forest management and ecosystem service provisioning. *Forest Policy and Economics* 136. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102689>
- Bocken, N.M.P., Short, S.W., Rana, P., Evans, S., 2014. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production* 65, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
- Borgström, S., Mauerhofer, V., 2016. Developing law for the bioeconomy. *Journal of Energy & Natural Resources Law* 34, 373–406. <https://doi.org/10.1080/02646811.2016.1200349>
- Bowditch, E., Santopuoli, G., Binder, F., del Río, M., La Porta, N., Klavankova, T., Lesinski, J., Motta, R., Pach, M., Panzacchi, P., Pretzsch, H., Temperli, C., Tonon, G., Smith, M., Velikova, V., Weatherall, A., Tognetti, R., 2020. What is Climate-Smart Forestry? A definition from a multinational collaborative process focused on mountain regions of Europe. *Ecosystem Services* 43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101113>
- Broad, G.M., 2020. Making Meat, Better: The Metaphors of Plant-Based and Cell-Based Meat Innovation. *Environmental Communication* 14, 919–932. <https://doi.org/10.1080/17524032.2020.1725085>
- Carraresi, L., Berg, S., Bröring, S., 2018. Emerging value chains within the bioeconomy: Structural changes in the case of phosphate recovery. *Journal of Cleaner Production* 183, 87–101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.135>
- Curry, G.N., Nake, S., Koczberski, G., Oswald, M., Raffleageau, S., Lummani, J., Peter, E., Nailina, R., 2021. Disruptive innovation in agriculture: Socio-cultural factors in technology adoption in the developing world. *J. Rural Stud.* 88, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.022>
- D'Amato, D., Korhonen-Kurki, K., Lyytikäinen, V., Matthies, B.D., Horcea-Milcu, A.-I., 2022. Circular bioeconomy: Actors and dynamics of knowledge co-production in Finland. *Forest Policy and Economics* 144. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102820>
- De Keyser, E., Mathijs, E., 2023. A typology of sustainable circular business models with applications in the bioeconomy. *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 1028877. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1028877>
- DeBoer, J., Panwar, R., Kozak, R., Cashore, B., 2020. Squaring the circle: Refining the competitiveness logic for the circular bioeconomy. *Forest Policy and Economics* 110, 101858. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.003>
- Dietz, T., Börner, J., Förster, J., von Braun, J., 2018. Governance of the Bioeconomy: A Global Comparative Study of National Bioeconomy Strategies. *Sustainability* 10, 3190. <https://doi.org/10.3390/su10093190>
- European Commission, 2012. *Innovating for sustainable growth :a bioeconomy for Europe*. Publications Office, LU.
- Fieldsend, A.F., Cronin, E., Varga, E., Biró, S., Rogge, E., 2021. 'Sharing the space' in the agricultural knowledge and innovation system: multi-actor innovation partnerships with farmers and foresters in Europe. *J. Agric. Educ. Ext.* 27, 423–442. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2021.1873156>
- Figge, F., Young, W., Barkemeyer, R., 2014. Sufficiency or efficiency to achieve lower resource consumption and emissions? The role of the rebound effect. *Journal of Cleaner Production* 69, 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.031>
- Fletcher, E., Adeboye, P.T., Duedu, K.O., 2017. Toward a sustainable bioeconomy in West Africa: A focus on biorefining. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 11, 775–783. <https://doi.org/10.1002/bbb.1793>
- Franceschini, S., Pansera, M., 2015. Beyond unsustainable eco-innovation: The role of narratives in the evolution of the lighting sector. *Technological Forecasting and Social Change* 92, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.11.007>
- Galanakis, C.M., Brunori, G., Chiramonti, D., Matthews, R., Panoutsou, C., Fritsche, U.R., 2022. Bioeconomy and green recovery in a post-COVID-19 era. *Science of the Total Environment* 808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152180>

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J., 2017. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Grilli, G., Curtis, J., 2021. Encouraging pro-environmental behaviours: A review of methods and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, 110039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110039>
- Guo, M., Song, W., 2019. The growing U.S. bioeconomy: Drivers, development and constraints. *New Biotechnology* 49, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.08.005>
- Hassan, S.S., Williams, G.A., Jaiswal, A.K., 2019. Lignocellulosic Biorefineries in Europe: Current State and Prospects. *Trends in Biotechnology* 37, 231–234. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.002>
- Heimann, T., 2019. Bioeconomy and SDGs: Does the Bioeconomy Support the Achievement of the SDGs? *Earth's Future* 7, 43–57. <https://doi.org/10.1029/2018EF001014>
- Ijabadeniyi, A., Vanclay, F., 2020. Socially-Tolerated Practices in Environmental and Social Impact Assessment Reporting: Discourses, Displacement, and Impoverishment. *Land* 9, 33. <https://doi.org/10.3390/land9020033>
- Kanda, W., Zanatta, H., Magnusson, T., Hjälm, O., Larsson, M., 2022. Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas systems in Brazil. *Energy Research & Social Science* 87, 102454. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102454>
- Kelleher, L., Henchion, M., O'Neill, E., 2019. Policy coherence and the transition to a bioeconomy: The case of Ireland. *Sustainability (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/SU11247247>
- Kugelberg, S., Bartolini, F., Kanter, D.R., Milford, A.B., Pira, K., Sanz-Cobena, A., Leip, A., 2021. Implications of a food system approach for policy agenda-setting design. *Global Food Secur.* 28. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100451>
- Lasarte-López, J., Grassano, N., M'barek, R., 2023. Bioeconomy and resilience to economic shocks: insights from the COVID-19 pandemic in 2020 4. <https://doi.org/10.36253/bae-14827>
- Maes, D., Van Passel, S., 2019. Effective bioeconomy policies for the uptake of innovative technologies under resource constraints. *Biomass and Bioenergy* 120, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.008>
- Martinez-Alier, J., 1997. Some issues in agrarian and ecological economics, in memory of Georgescu-Roegen. *Ecological Economics* 22, 225–238. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00076-1)
- M'barek, R., Philippidis, G., Suta, C., Vinyes, C., Caivano, A., Ferrari, E., Ronzon, T., Lopez, A.S., Santini, F., 2014. Observing and analysing the bioeconomy in the EU – Adapting data and tools to new questions and challenges. *Bio-based and Applied Economics* 3, 83–91. <https://doi.org/10.13128/BAE-14189>
- Medici, M., Canavari, M., Toselli, M., 2020. Interpreting Environmental Impacts Resulting from Fruit Cultivation in a Business Innovation Perspective. *Sustainability* 12, 9793. <https://doi.org/10.3390/su12239793>
- Medici, M., Carli, G., Tagliaventi, M.R., Canavari, M., 2021. Evolutionary scenarios for agricultural business models, in: Bochtis, D., Achillas, C., Baniyas, G., Lampridi, M. (Eds.), *Bio-Economy and Agri-Production*. Academic Press, pp. 43–63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819774-5.00003-5>
- Näyhä, A., 2019. Transition in the Finnish forest-based sector: Company perspectives on the bioeconomy, circular economy and sustainability. *Journal of Cleaner Production* 209, 1294–1306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.260>
- Neimark, B., Mahanty, S., Dressler, W., Hicks, C., 2020. Not Just Participation: The Rise of the Eco-Precariat in the Green Economy. *Antipode* 52, 496–521. <https://doi.org/10.1111/anti.12593>
- Nitescu, D.C., Murgu, V., 2020. The bioeconomy and foreign trade in food products-A sustainable partnership at the european level? *Sustainability (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/su12062460>
- OECD, 2009. *The Bioeconomy to 2015*, in: *The Bioeconomy to 2030*. OECD, pp. 99–136. <https://doi.org/10.1787/9789264056886-6-en>
- Oriama, R., Pyka, A., 2021. Understanding the transformation to a knowledge-based health bioeconomy: Exploring dynamics linked to preventive medicine in kenya. *Sustainability (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/su132112162>
- Pakseresht, A., Ahmadi Kaliji, S., Canavari, M., 2022. Review of factors affecting consumer acceptance of cultured meat. *Appetite* 170, 105829. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105829>
- Pfau, S., Hagens, J., Dankbaar, B., Smits, A., 2014. Visions of Sustainability in Bioeconomy Research. *Sustainability* 6, 1222–1249. <https://doi.org/10.3390/su6031222>
- Rogge, K.S., Reichardt, K., 2016. Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy* 45, 1620–1635. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.004>
- Ronzon, T., Sanjuán, A.I., 2020. Friends or foes? A compatibility assessment of bioeconomy-related Sustainable Development Goals for European policy coherence. *Journal of Cleaner Production* 254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119832>
- Schulz, T., Lieberherr, E., Zabel, A., 2022. How national bioeconomy strategies address governance challenges arising from forest-related trade-offs. *Journal of Environmental Policy and Planning* 24, 123–136. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1967731>
- Smith, V., Wesseler, J.H.H., Zilberman, D., 2021. New plant breeding technologies: An assessment of the political economy of the regulatory environment and implications for sustainability. *Sustainability (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/su13073687>
- Sotiropoulou, I., Deutz, P., 2022. Understanding the bioeconomy: a new sustainability economy in British and European public discourse. *BAE* 10, 283–304. <https://doi.org/10.36253/bae-9534>
- Temper, L., 2016. Who Gets the Human Appropriation of Net Primary Production? *Journal of Political Ecology*.
- Vanloqueren, G., Baret, P.V., 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Res Policy* 38, 971–983. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.02.008>
- Vergamini, D., Cuming, D., Viaggi, D., 2015. The Integrated Management of Food Processing Waste: The Use of the Full Cost Method for Planning and Pricing Mediterranean Citrus By-Products 18.
- Viaggi, D., 2018. Bioeconomy and the common agricultural policy: Will a strategy in search of policies meet a policy in search of strategies? *Bio-based and Applied Economics* 7, 179–190. <https://doi.org/10.13128/bae-7674>
- Viaggi, D., Bartolini, F., Raggi, M., 2022. The Bioeconomy in economic literature: looking back, looking ahead. *BAE* 10, 169–184. <https://doi.org/10.36253/bae-10881>
- Vivien, F.-D., Nieddu, M., Befort, N., Debref, R., Giampietro, M., 2019. The Hijacking of the Bioeconomy. *Ecological Economics* 159, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.027>
- von Braun, J., 2018. Bioeconomy – The global trend and its implications for sustainability and food security. *Global Food Security* 19, 81–83. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.10.003>
- Watanabe, C., Naveed, N., Neittaanmäki, P., 2018. Digital solutions transform the forest-based bioeconomy into a digital platform industry - A suggestion for a disruptive business model in the digital economy. *Technology in Society* 54, 168–188. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.05.002>

- Wesseler, J., Banse, M., Zilberman, D., 2015. Introduction Special Issue “The Political Economy of the Bioeconomy” 4.
- Wesseler, J., Kleter, G., Meulenbroek, M., Purnhagen, K.P., 2022. EU regulation of genetically modified microorganisms in light of new policy developments: Possible implications for EU bioeconomy investments. *Applied Economic Perspectives and Policy*. <https://doi.org/10.1002/aep.13259>
- Zilberman, D., Gordon, B., Hochman, G., Wesseler, J., 2018. Economics of Sustainable Development and the Bioeconomy. *Applied Economic Perspectives and Policy* 40, 22–37. <https://doi.org/10.1093/aep/ppx051>
- Zuin, V.G., Ramin, L.Z., 2018. Green and Sustainable Separation of Natural Products from Agro-Industrial Waste: Challenges, Potentialities, and Perspectives on Emerging Approaches. *Top Curr Chem (Z)* 376, 3. <https://doi.org/10.1007/s41061-017-0182-z>