

Biomolecole del mondo vegetale: valorizzazione, mercato e legislazione

*A cura di
Daniela Pacifico e Carlotta Balconi*



Biomolecole del mondo vegetale: valorizzazione, mercato e legislazione

A cura di Daniela Pacifico e Carlotta Balconi



Edizioni Avenue media®



Edizioni Avenue media®

Viale Aldini, 222/4 – 40136 Bologna
Tel. +39 051 6564311 – Fax +39 051 6564332
dir@avenue-media.eu
www.avenuemedia.eu

Finanziato da Fondazione Cariplo, nell'ambito del progetto SUSinCER (bioactive compounds from Brassicaceae and Solanaceae waste for cereal crop protection, codice progetto: 2019-2538).

Grafica e impaginazione
Avenue media – a cura di Morena Morini

I Edizione: dicembre 2025

Copyright © 2025, CREA - Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere fotocopiata, riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo – elettronico, meccanico, reprografico, digitale – se non in termini previsti dalla legge che tutela il diritto d'autore.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form, including photocopy, microfilm information storage and retrieval system, computer database or software, or by any means, including electronic or mechanical, without written permission from the publisher.

Ringraziamenti

Bai Paolo

Bossi Andrea

Carrara Mirko

Casadei Nerio

D'Aniello Giuseppe

De Gregorio Vito

De Simone Vanessa

Galli Andrea

Lazzeri Luca

Mascheroni Stefania

Matteo Roberto

Mezzetti Mirco

Montanari Massimo

Morcone Leonardo

Nicoletti Federica

Pellegrino Maria

Righetti Laura

Russo Maria Anna

e O.P. CAMPANIA PATATE sca, Angri, SA (Giuseppe D'Aniello);

PIZZOLI spa, Budrio, BO (Mirco Mezzetti, Andrea Galli);

DELSO ITALIA;

ROMAGNOLI F.LLI spa, Bologna, BO (Paolo Bai)

AMI (Cesare Soldi)

Indice

PREFAZIONE (a cura del Cluster Spring)	p. 7
Cap 1 – Bioeconomia e inquadramento normativo <i>Lasorella M.V.</i>	p. 9
Cap 2 – Molecole bioattive e valorizzazione dei sottoprodotti vegetali <i>Ficco D.B.M., Balconi C., Marone D., Mastrangelo A.M., Cariello M., Pacifico D.</i>	p. 19
Cap 3 – Recupero e riutilizzo di molecole bioattive: cosa ne pensano i consumatori <i>Cariello M.</i>	p. 37
Cap 4 – Caso studio: valorizzazione dei composti bioattivi presenti nella buccia di patata <i>Pacifico D., Parisi B., Lanzaova C., Palmieri A., Prata C., Zalambani C.</i>	p. 53
Cap 5 – Caso studio: valorizzazione dei composti bioattivi presenti nelle Brassicaceae <i>Pagnotta E., Ugolini L., Carloni M., Massafra A., Bassolino L.</i>	p. 73
Cap 6 – Tecnologie convenzionali e tecnologie green per la produzione di bioestratti <i>Lo Scalzo R., Bianchi G., Calzone A.</i>	p. 89
Cap 7 – Applicazioni in scenari di filiera: mais e frumento <i>Lanzaova C., Mastrangelo A.M., Locatelli S., Cassol H., Balconi C.</i>	p. 107
Cap 8 – Applicazioni per la protezione sostenibile delle colture: mezzi tecnici e legislazione dei prodotti biobased <i>Battaglia V., Lahoz E.</i>	p. 125

Il libro *Biomolecole del mondo vegetale: valorizzazione, mercato e legislazione* offre un importante contributo per comprendere e promuovere l'economia circolare, un modello sempre più centrale per affrontare le sfide ambientali, la gestione delle risorse e il cambiamento climatico.

Le biomolecole vegetali rappresentano una risorsa fondamentale per il benessere umano e per nuove applicazioni in biochimica, farmacologia, agroalimentare e biotecnologia. La loro valorizzazione in un'ottica circolare non solo riduce l'impatto ambientale, ma apre nuove prospettive economiche, creando valore da ciò che altrimenti sarebbe scarto o sottoprodotto.

Il lavoro di questo libro non è solo un'analisi delle potenzialità scientifiche, ma una riflessione su come queste risorse possano contribuire a costruire un modello economico sostenibile, rispondendo alle sfide globali in modo innovativo e responsabile.

Come Cluster italiano della Bioeconomia circolare SPRING, siamo convinti che la ricerca, l'innovazione e la collaborazione siano essenziali per la transizione ecologica. Siamo orgogliosi di supportare il progresso verso un futuro in cui le risorse naturali siano gestite in modo circolare, riducendo gli sprechi e massimizzando il valore estratto. Questo libro è un tassello importante in questo percorso, offrendo strumenti e visioni utili a chiunque sia coinvolto nella valorizzazione delle risorse vegetali.

Insieme, possiamo contribuire attivamente alla costruzione di un futuro più sostenibile e biobased.

Il Cluster SPRING

Cluster Italiano della Bioeconomia circolare SPRING

SPRING è il Cluster italiano della bioeconomia circolare, che riunisce quasi 170 stakeholder tra università, centri di ricerca pubblici e privati, PMI e grandi imprese nazionali e multinazionali, attivi in diverse filiere produttive: chimica verde, agro-alimentare, carta e cellulosa, gestione risorse idriche, aerospazio, automotive, ecc. L'obiettivo è contribuire a creare le condizioni per lo sviluppo di un contesto e di un tessuto industriale e accademico attrattivo, dinamico, innovativo, competitivo e in continua crescita. SPRING favorisce la creazione di una comunità forte, coesa e rappresentativa, ne rappresenta gli interessi di fronte alle istituzioni regionali, nazionali, europee ed internazionali, ne promuove la visibilità e la conoscenza da parte del pubblico generale e specialistico. Per raggiungere i propri obiettivi identifica e valorizza le sinergie esistenti e potenziali con tutti gli attori esistenti a livello regionale, nazionale, europeo e globale. Il Cluster è membro del Gruppo nazionale di coordinamento sulla bioeconomia costituito in seno alla Presidenza del Consiglio dei Ministri, è Full member della Circular Biobased Joint Undertaking europea ed è membro della European Circular Bioeconomy Alliance.

www.clusterspring.it

1

Bioeconomia e inquadramento normativo

Lasorella M. V.

*Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA),
Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia*

Sostenibilità ambientale e bioeconomia

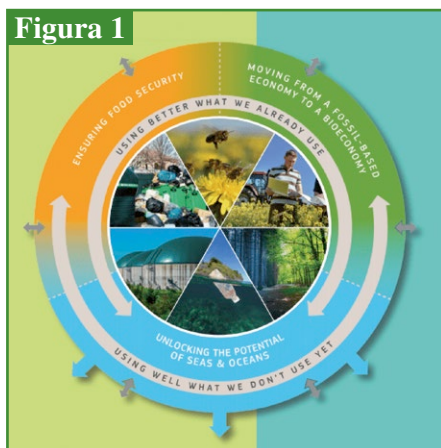
L'economia basata sui combustibili fossili negli ultimi settant'anni ha determinato un reale incremento sia dal punto di vista economico, ma soprattutto demografico, sociale e tecnologico diventando il motore principale dello sviluppo a livello globale, ma questo progresso ha portato anche a problemi ambientali significativi, spingendo la ricerca verso modelli più sostenibili come la bioeconomia per bilanciare sviluppo e impatto ambientale. La transizione dalle fonti fossili a fonti rinnovabili rappresenta quindi una sfida complessa ma estremamente promettente. Integrare agricoltura, energia e tecnologie innovative non solo può contribuire a ridurre la dipendenza energetica e contrastare il cambiamento climatico, ma offre anche l'opportunità di sviluppare nuovi modelli economici, sociali e ambientali che possano migliorare la qualità della vita nelle aree rurali, creare occupazione e promuovere la sostenibilità a lungo termine. La problematica della sostenibilità ambientale è divenuta, quindi, un tema fondamentale in quanto il pianeta ha una crescita demografica tendenzialmente infinita ma con risorse in progressivo esaurimento. Nel 2050, secondo l'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite), la popolazione mondiale raggiungerà i 9.8 miliardi con enormi implicazioni per la domanda di cibo, acqua, energia, materiali per le costruzioni edili, abbigliamento, trasporti, etc. Per soddisfare la crescita demografica globale, gestire gli impatti ambientali in atto, incrementare la capacità di resilienza degli ecosistemi e garantire la sostenibilità ambientale occorre cambiare paradigma economico e di sviluppo utilizzando fonti energetiche e risorse biologiche rinnovabili affinché la produzione primaria sia più sostenibile ed i sistemi di trasformazione più efficienti, capaci di produrre alimenti, fibre ed altri prodotti a base biologica con minor utilizzo di fattori produttivi e con minore produzione di rifiuti e di emissioni di gas climalteranti e inquinanti atmosferici (Annuario dell'Agricoltura Italiana – CREA, 2025).

La bioeconomia comprende quelle attività economiche che utilizzano biorisorse rinnovabili del suolo e del mare – come colture agricole,

foreste, animali e microrganismi terrestri e marini – per produrre cibo, materiali ed energia. Della bioeconomia, quindi, fanno parte il comparto della produzione primaria (agricoltura, foreste, pesca e acquacoltura) e i settori industriali che utilizzano o trasformano biorisorse (agroalimentare, carta e cellulosa, parte dell'industria chimica, delle biotecnologie e dell'energia; **Figura 1**). Col termine bioeconomia, si fa riferimento al sistema socioeconomico associato alla valorizzazione delle risorse biologiche rinnovabili terrestri ed acquatiche al fine di creare bioprodotto, con l'obiettivo fondamentale di generare filiere multidisciplinari integrate alle aree locali e valorizzare i residui delle suddette filiere in prodotti a valore aggiunto (Bastioli, 2017).

La bioeconomia, infatti, è in grado di conciliare lo sviluppo economico con la salvaguardia dell'ambiente e con l'incremento dell'occupazione. La quantificazione, il monitoraggio e l'analisi approfondita delle filiere della bioeconomia rappresentano elementi imprescindibili per indirizzare e delineare le future politiche per uno sviluppo sostenibile, inclusivo, climaticamente neutro, resiliente e in linea con l'Accordo di Parigi, gli obiettivi dell'Agenda ONU 2030, il Green New Deal, la Strategia sulla Biodiversità 2030 e la Strategia Farm to Fork dell'Unione Europea (Commissione Europea, 2018).

La bioeconomia ha come obiettivo prioritario lo sviluppo di una società innovativa, efficiente e competitiva, in grado di conciliare la sicurezza alimentare con lo sfruttamento sostenibile delle risorse rinnovabili a fini industriali e con la protezione dell'ambiente. Tuttavia, occorre rilevare che le attività della bioeconomia sono sempre state messe in relazione con le prospettive della produzione. Infatti, non a



La bioeconomia (Fonte: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC140285>)

caso, la bioeconomia rappresenta uno strumento strategico in grado di rigenerare i territori fondandosi sul mantenimento e rafforzamento della fertilità dei suoli, sul ripristino della materia organica, sull'aggiunta di carbonio organico e nutrienti nei suoli, sulla riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera, sulla costruzione di un nuovo rapporto tra città ed aree agricole, tra modelli di produzione, di consumo ed abitudini alimentari più sostenibili. Inoltre, i prodotti della bioeconomia sono in grado di ridurre le pressioni sull'ambiente in quanto sostituiscono le sostanze inquinanti con bioprodotto circolari che non si disperdono e non si accumulano nelle matrici ambientali. La bioeconomia, quindi, non deve porsi come unico obiettivo quello di incrementare la produzione agricola o di utilizzare la biomassa, bensì deve contribuire ad un uso più sostenibile delle risorse, a mitigare i cambiamenti climatici e a adattarsi ad essi, e, infine, a promuovere modelli di produzione e consumo sostenibili. Lo sviluppo definito entro i limiti delle risorse implica che la bioeconomia debba essere efficiente ed incentrata sulla circolarità e sulla realizzazione di prodotti, processi e servizi ecosistemici (come incrementare la fertilità del suolo e migliorare la qualità dell'aria e dell'acqua) prioritari per la società (es. biomateriali, bioprodotto, energia, reintegro dei nutrienti e sostanza organica nei suoli). Inoltre, la bioeconomia mira alla creazione di nuove catene del valore resilienti e locali in grado di promuovere l'utilizzo a cascata delle risorse biologiche, di incrementare la resilienza degli ecosistemi, di garantire la rinnovabilità delle risorse, di conservare gli stock di capitale naturale, di salvaguardare la sicurezza alimentare e di migliorare l'efficienza dei materiali. Infine, offre importanti opportunità di creazione di nuovi posti di lavoro, sviluppo economico regionale e miglioramento della coesione territoriale anche in zone remote o periferiche. Può, infatti, offrire un'importante fonte di diversificazione del reddito ad agricoltori, silvicoltori e pescatori ed essere di stimolo per le economie rurali locali grazie all'incremento degli investimenti in competenze, conoscenze ed innovazione (Marchetti *et al.*, 2020). Inoltre, l'utilizzo di risorse biologiche rinnovabili, provenienti dal mare e dalla terra, come input

per la produzione industriale, alimentare ed energetica è un motore per la chimica biobased, che rappresenta un valore aggiunto per molti comparti produttivi che hanno l'opportunità di ridurre e valorizzare i propri scarti, trasformandoli in nuova materia prima, con benefici economici e sulla competitività. Infatti, la crescita della chimica biobased è il primo tassello per lo sviluppo e il consolidamento di molti altri comparti: biopolimeri, biocarburanti, biolubrificanti, bioerbicidi e biocosmetici. Uno dei meriti principali della chimica biobased è infatti quello di stimolare interconnessioni tra filiere diverse e donare un nuovo valore al mondo agricolo. Quest'ultimo è il primo protagonista nell'applicazione di pratiche rigenerative in grado di curare e custodire il suolo ma è anche fruitore dei prodotti ottenuti attraverso la valorizzazione delle biomasse e, al tempo stesso, partner di innovazione: proprio sui terreni agricoli si sperimenta l'applicazione dei prodotti chimici biobased.

Bioeconomia e inquadramento normativo

Il 28 novembre 2018 la Commissione Europea si è riunita per discutere una nuova visione strategica, a lungo termine, per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra. In tale occasione si ribadisce l'impegno dell'Europa a guidare l'azione internazionale per il clima tracciando una transizione verso l'azzeramento delle emissioni nette di gas a effetto serra entro il 2050.

Già nel corso del 2012, la Commissione Europea pubblicò la sua "Strategia per la bioeconomia", ovvero la visione europea in grado di approcciare e promuovere la produzione di risorse biologiche rinnovabili e la loro successiva conversione in prodotti alimentari e vitali, in biocarburanti e bioenergia al fine di migliorare la sicurezza alimentare, la gestione sostenibile delle risorse naturali, la riduzione della dipendenza delle risorse fossili, la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, la competitività europea per originare e mantenere nuovi posti di lavoro. Lo stesso documento, inoltre, forni-

sce una definizione di tale teoria: “la bioeconomia può essere definita come un’economia basata sull’utilizzazione sostenibile di risorse naturali rinnovabili e sulla loro trasformazione in beni e servizi finali o intermedi”. All’interno della “Strategia per la bioeconomia”, “L’innovazione per una crescita sostenibile: una bioeconomia per l’Europa” ha un duplice obiettivo: ridurre le pressioni sull’ambiente e contemporaneamente soddisfare la richiesta di alimenti, risorse e di acqua potabile per la popolazione mondiale in aumento. A tale scopo, le tre linee di azione proposte riguardano gli investimenti in attività di ricerca, innovazione e competenze; il rafforzamento dei mercati e della competitività nel settore della bioeconomia e la maggiore interazione tra le politiche. Pertanto, possiamo dedurre che essa comprenda non solo settori tradizionali come l’agricoltura, la pesca, l’acquacoltura e la selvicoltura, ma anche settori economici più moderni come quelli delle biotecnologie e delle bioenergie (Carus *et al.*, 2018).

Gli investimenti, erogati sia a livello comunitario che da parte dei singoli Stati Membri, devono essere volti a garantire una solida base finanziaria per sviluppare le competenze necessarie a sostenere la crescita e l’integrazione dei settori della bioeconomia ed a promuovere azioni di ricerca e innovazione multidisciplinari.

All’interno del Programma di Cooperazione contenuto nel Settimo Programma Quadro, infatti, sono stati allocati 1.9 miliardi di euro per attività di ricerca e innovazione nei settori dell’alimentazione, dell’agricoltura, della pesca e delle biotecnologie. Le attività di ricerca e innovazione nei settori della bioeconomia sono state finanziate nell’ambito di Horizon 2020; in particolare è stato proposto di stanziare quasi 4,7 miliardi di euro per la sfida “Sicurezza alimentare, agricoltura sostenibile, ricerca marina e marittima nonché bioeconomia”. Ulteriori sostegni riguarderanno le sfide “Azione per il clima, efficienza delle risorse e materie prime”; “Energia sicura, pulita ed efficiente” e “Salute, cambiamento demografico e benessere”. La Strategia dell’Unione Europea del 13 febbraio 2012 è stata revisionata con il Piano di Azione presentato l’11 ottobre del 2018 (COM (2012) 60 final) nel cui contesto si definisce la bioeconomia come la

componente rinnovabile dell'economia circolare. Secondo la visione comunitaria, la salute degli ecosistemi è alla base dello sviluppo di una bioeconomia sostenibile che possa contribuire agli obiettivi climatici dell'UE stabiliti con l'Accordo di Parigi ed a quelli di sviluppo sostenibile (SDG) dell'Agenda ONU 2030 (Srivastav *et al.*, 2025).

A novembre 2025 la Commissione Ue ha adottato la **nuova Strategia per la bioeconomia** ("A strategic framework for a competitive and sustainable EU bioeconomy"), con la previsione di emanare le prime proposte legislative già nel primo trimestre del 2026, per poi adottare ulteriori misure fino al 2030. L'obiettivo è sostituire materiali e prodotti derivati da fonti fossili con soluzioni a basso impatto e circolari utilizzando risorse biologiche rinnovabili, su terra e in mare, per produrre alimenti, materiali, energia, prodotti chimici, biomasse, fibre tessili, bioplastiche, fertilizzanti, e molto altro (Strategic Framework for a Competitive and Sustainable EU Bioeconomy, CE, 2025). La strategia ribadisce il principio della sicurezza alimentare come obiettivo prioritario, seguito da quelli relativi alla gestione sostenibile delle risorse naturali; alla riduzione dell'utilizzo delle risorse fossili non rinnovabili; alla mitigazione ed all'adattamento ai cambiamenti climatici; alla crescita della competitività e dell'occupazione. Per il raggiungimento di tali obiettivi la strategia individua tre campi di azione: i) l'incremento e il rafforzamento dei settori biobased attraverso una maggiore mobilitazione di risorse pubbliche e private nella ricerca e nell'innovazione; ii) l'introduzione rapida della bioeconomia in tutta Europa; iii) la protezione dell'ecosistema e la comprensione dei limiti ecologici della bioeconomia. La valorizzazione del potenziale della bioeconomia di modernizzare il settore economico e le industrie europee, garantendo una prosperità sostenibile ed a lungo termine, potrà attuarsi creando una piattaforma di investimento tematica dedicata alla bioeconomia circolare con una dotazione di 100 milioni di euro, in grado di incentivare il mercato delle bio-innovazioni.

La Commissione si propone di far fronte alle grandi sfide, tra cui l'aumento della popolazione, il cambiamento climatico e il degrado del suolo, introducendo un sistema di monitoraggio a livello dell'UE

per seguire i progressi compiuti verso una bioeconomia circolare e sostenibile, come segue: ampliando la base di conoscenze relative a specifici settori della bioeconomia (migliorandone la comprensione attraverso la raccolta di dati e garantendo un miglior accesso agli stessi) e promuovendo buone pratiche per operare nell'ambito della bioeconomia entro limiti ecologici sicuri (ECCO Climate, 2025). Per quanto concerne il *contesto normativo italiano*, la *Strategia Italiana per la Bioeconomia* (BIT), adottata nel 2017, è stata promossa dalla Presidenza del Consiglio dei Ministri e sono coinvolti nella sua definizione e attuazione diversi Ministeri (Ministero per lo Sviluppo Economico come co-coordinatore, il Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca ed il Ministero della Tutela del Territorio e del Mare), la Conferenza delle Regioni e delle Province autonome, nonché l'Agenzia per la Coesione Territoriale ed i Cluster tecnologici nazionali della chimica verde (SPRING) e del settore agro – alimentare (CLAN). La Strategia si pone come obiettivo al 2030 quello di conseguire un incremento del 20% delle attività economiche (circa 250 miliardi di euro/anno) e dei posti di lavoro afferenti alla bioeconomia italiana (circa 1.7 milioni). Le azioni che determineranno il raggiungimento dei suddetti obiettivi riguardano: il miglioramento della produzione sostenibile e della qualità dei prodotti in ciascuno dei settori; la valorizzazione efficace della biodiversità sia terrestre che marina, dei servizi ecosistemici e della circolarità (con la creazione di nuove catene del valore, più lunghe e maggiormente radicate al territorio, in cui le azioni pubbliche e private si integrino lungo i diversi livelli); la rigenerazione dei siti industriali abbandonati e delle terre marginali. La *Strategia Italiana per la Bioeconomia* è stata parte della *Strategia nazionale di specializzazione intelligente* (SNSI) ed è stata attuata attraverso specifiche iniziative dei Programmi Operativi Nazionali 2014 – 2020 (PON) e attraverso piani strategici finanziati con risorse pubbliche della politica di coesione nazionale, fondi ordinari regionali e risorse private. Con riferimento alla bioeconomia, sono stati definiti due piani strategici: Agrifood e Bio-based economy. Inoltre, la pro-

grammazione 2014 – 2020 della politica di coesione poneva al centro degli interventi lo sviluppo economico e sociale dei territori, guidato dall'innovazione e gestito attraverso un nuovo modello di governance multilivello e multistakeholder e la strategia di specializzazione intelligente (S3) con la finalità di individuare le priorità di investimento in ricerca, sviluppo e innovazione che completino le risorse e le capacità produttive di un territorio per costruire vantaggi comparati e percorsi di crescita sostenibile nel medio e lungo termine (<https://politichecoesione.governo.it/it/politica-di-coesione/strategie-tematiche-e-territoriali/strategie-tematiche/strategia-di-specializzazione-intelligente-s3/s3-nella-programmazione-2014-2020/>).

Nel 2018, si è reso necessario un aggiornamento della BIT (la *Strategia Italiana per la Bioeconomia*) al fine di adeguare la stessa con la nuova Strategia adottata dalla Commissione UE e con le priorità individuate nell'ambito del nuovo programma quadro della ricerca europea Horizon Europe 2021-2027, nonché con i conseguenti investimenti previsti dall'Impresa Comune per le Bioindustrie (BBi JU) per lo sviluppo di un settore industriale sostenibile, guidato dall'innovazione e da un modello di governance multilivello e multistakeholder basato sulla biobased in Europa (Comunicazione CE, 2025).

Bibliografia

- Bastioli, C., *Un approccio circolare alla bioeconomia*, “Edizioni Ambiente” (2017).
- Carus, M., & Dammer, L., *The circular bioeconomy – concepts, opportunities, and limitations*, “Industrial biotechnology” (2018), 14(2), pp. 83-91.
- Marchetti, M., & Palahí, M., *Le prospettive della bioeconomia, tra strategie, Green Deal e Covid19*, “Forest@-Journal of Silviculture and Forest Ecology” (2020), 17(1), pp. 52.
- Srivastav, A. L., Bagherian, A., & Ghosh, D., *The circular bioeconomy: pathways to sustainability and resource optimization*, “Clean Technologies and Environmental Policy” (2025), 27(2), pp. 815-832.

2

Molecole bioattive e valorizzazione dei sottoprodotti vegetali

**Ficco D.B.M.*, Balconi C.*, Marone D.*, Mastrangelo A.M.*,
Cariello M.***, Pacifico D.***

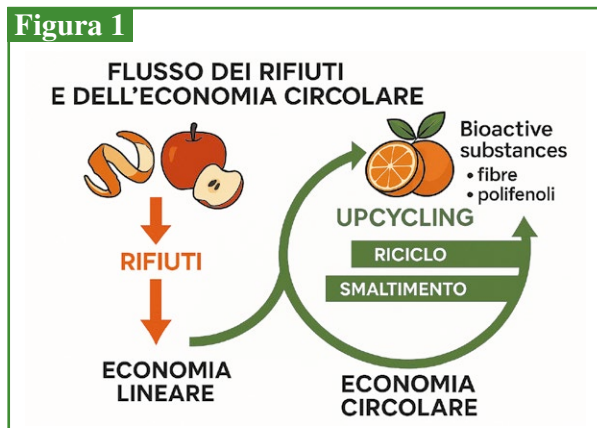
**Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA),
Centro di ricerca Cerealicoltura e Colture Industriali*

***Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA),
Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia*

Il contesto dell'*upcycling*

La gestione inefficace dei prodotti alimentari e la conseguente generazione di perdite e sprechi a tutti i livelli della catena di approvvigionamento agroalimentare costituiscono una crisi globale di natura urgente, che esercita un impatto deleterio e misurabile sull'ambiente, sull'economia e sulla salute pubblica. Le stime attuali evidenziano l'entità di questa inefficienza strutturale, indicando che, su scala globale, almeno un terzo di tutto il cibo prodotto annualmente viene sprecato, con percentuali che si attestano tra il 30% e il 40% negli Stati Uniti (Bhatt *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2024). In Europa, l'entità del problema è similmente preoccupante, con l'Unione Europea che nel 2020 ha generato approssimativamente 60 milioni di tonnellate di rifiuti lungo l'intera filiera, un volume di cui Germania, Francia e Italia sono state responsabili per circa il 50% (Chiaraluce *et al.*, 2024). L'impatto ambientale di tali sprechi è duplice in quanto comporta: da un lato, lo sperpero delle ingenti risorse naturali (acqua, suolo ed energia) impiegate nella produzione del cibo non consumato, e dall'altro, le emissioni di gas serra (metano e anidride carbonica), derivanti dalla decomposizione dei rifiuti organici nelle discariche, che contribuiscono significativamente al cambiamento climatico. Sotto il profilo economico, le perdite si traducono in una significativa riduzione del reddito per agricoltori e consumatori, con un costo stimato di 197,7 miliardi di dollari negli Stati Uniti già nel 2009. La comunità internazionale ha risposto a questa emergenza definendo obiettivi ambiziosi, come il traguardo stabilito dalle Nazioni Unite, nell'ambito degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), di dimezzare lo spreco alimentare globale pro capite entro il 2030.

Per affrontare questa sfida in modo proattivo, è fondamentale attuare una transizione da un sistema economico lineare basato sull'estrazione, produzione e smaltimento, verso un modello di **economia circolare** che enfatizza la rigenerazione e il recupero di materiali e risorse, adottando un approccio più resiliente e sostenibile (**Figura 1**). All'interno di questo nuovo paradigma economico, l'*upcycling* alimen-



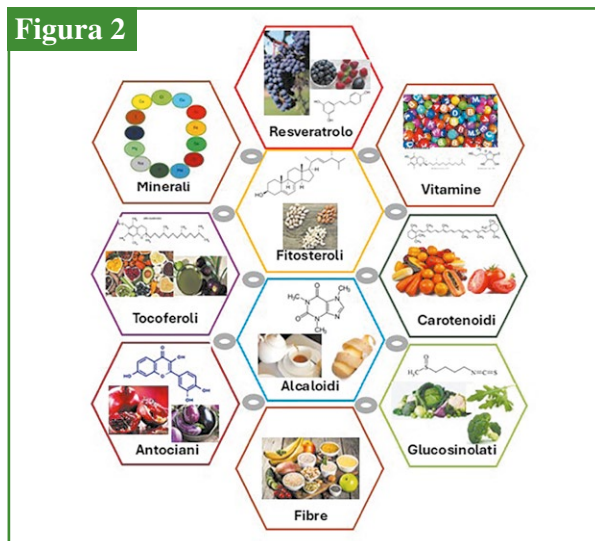
Economia lineare ed economia circolare

tare è emerso quale soluzione molto promettente, poiché si concentra sulla riduzione del problema alla fonte, trasformando i sottoprodotti della lavorazione e i materiali di scarto che, altrimenti sarebbero destinati allo smaltimento, in nuovi prodotti alimentari

commestibili e di maggiore valore. A differenza del **downcycling** (o semplice riciclo), l'**upcycling** eleva la funzione del materiale di scarto, conferendogli un valore aggiunto superiore rispetto sia all'uso originario che all'alternativa della discarica. Questa pratica non solo contribuisce a mitigare l'impatto ambientale, ma stimola anche l'innovazione nel settore, generando nuove fonti di reddito e aumentando la resilienza delle aziende alimentari.

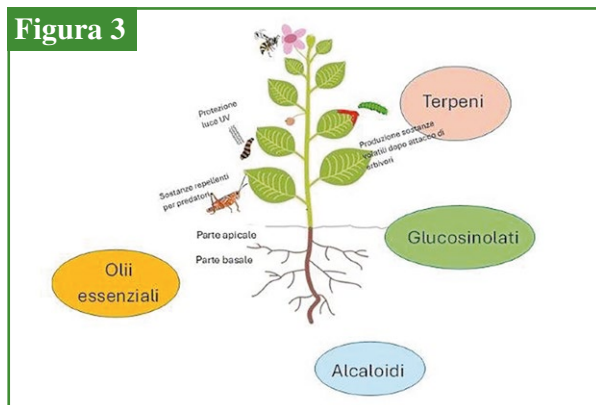
I Biocomposti del mondo vegetale e l'**upcycling**

L'agricoltura e l'industria di trasformazione rappresentano una fonte quasi illimitata di materiali secondari, ovvero **sottoprodotti vegetali** generati durante le fasi di lavorazione e intrinsecamente ricchi di **molecole bioattive** e di nutraceutici. La valorizzazione di questi scarti, che spesso includono bucce, semi, gambi, polpe e residui di spremitura, frazioni cruscali etc., permette il recupero di componenti essenziali, come fibre, minerali, proteine, acidi grassi, e un ampio spettro di fitochimici, tra cui vitamine, polifenoli, glucosinolati e fitosteroli. La loro incorporazione in nuove matrici alimentari può offrire benefici aggiuntivi per la salute contribuendo, potenzialmente, a prevenire ma-

Figura 2*Principali sostanze bioattive del mondo vegetale*

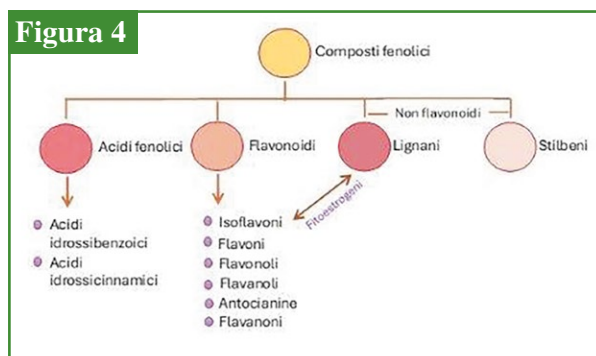
lattie croniche (cancro, diabete e disturbi cardiovascolari). Numerosi studi hanno infatti evidenziato l'esistenza di un binomio stretto tra alimentazione e salute favorendo la diffusione di **alimenti funzionali**, definiti come nuovi formulati che, oltre a veicolare nutrienti, possono anche espletare un'azione benefica nella preven-

zione delle malattie, grazie al contenuto in sostanze bioattive o microrganismi vivi (**Figura 2**; Temple, 2022). Tra i composti naturalmente presenti nelle specie vegetali, ci sono i metaboliti secondari, che seppur sintetizzati dalle piante in fasi non direttamente coinvolte nella crescita, forniscono vantaggi in termini di adattamento e sopravvivenza nell'ambiente circostante. Il loro contenuto e la loro composizione dipendono principalmente dalla specie, dal genotipo, da fattori agronomici (ad es. caratteristiche del suolo e tecnica colturale), da fattori ambientali (ad es. luce, condizioni meteorologiche, epoca di semina, stress biotici e abiotici) e dai processi di trasformazione. Alcuni contribuiscono all'attivazione di meccanismi di difesa contro erbivori e patogeni, oltre che alla resistenza agli stress ambientali, altri sono in grado di attrarre insetti impollinatori per la dispersione dei semi e partecipare alla competizione tra piante (**Figura 3**). I composti fenolici, in particolare, sono oggetto di crescente interesse scientifico e industriale grazie al loro ruolo di antiossidanti (**Figura 4**); Marone *et al.*, 2022). Tra questi i flavonoidi, specialmente gli antociani, presenti in molti frutti (lamponi, more, mirtilli, fragole, ciliegie, melograno, uva, mele



Metaboliti secondari per la crescita e la difesa della pianta da stress biotici e abiotici

arricchite in antociani, provenienti da frutti di bosco, ciliegie e uva nera hanno un ridotto tenore in zuccheri nella formulazione e una maggiore durata del prodotto rispetto a quelle tradizionali (*shelf-life*). Un esempio di *novel food* è rappresentato da confetture contenenti carote nere. Nell'ottica di far fronte alle sempre maggiori richieste di prodotti innovativi, anche la produzione di cereali per la prima colazione, arricchiti con polvere di frutta disidratata (come mirtillo, uva e lampone), ha consentito di raggiungere un miglioramento sia del colore che delle proprietà funzionali dei prodotti finali. Anche le bevande possono essere arricchite con estratti di antociani provenienti da sotto-



Classificazione dei composti fenolici presenti nelle specie vegetali

rosse, arance, prugne viola etc.) e nei vegetali (cavolfiore viola, ravanelli, cipolle rosse, melanzane etc.) costituiscono una preziosa opportunità nell'ambito dell'industria alimentare, per potenziare l'azione antiossidante dei prodotti trasformati. Ad esempio, marmellate

prodotti dell'industria vinicola (come bucce e semi d'uva) per aumentarne i benefici per la salute. L'uso di tecniche di estrazione con gli ultrasuoni e i fluidi supercritici ha permesso di ottenere estratti da aggiungere ai succhi d'uva, mi-

gliorando significativamente le loro proprietà antiossidanti e funzionali (Do *et al.*, 2023). Gli antociani risultano promettenti anche come costituenti di imballaggi funzionali, i cosiddetti *active packaging*, grazie al ruolo attivo di conservanti legato alle loro proprietà antimicrobiche, estremamente utili nel contenere gli sprechi alimentari. Se aggiunti a soluzioni filmogeniche a base di pectina e cera d'api, risultano utili per garantire una significativa attività antimicotica contro *Colletotrichum siamense*, rendendoli ottimi rivestimenti attivi in grado di aumentare la sicurezza e i tempi di conservazione alimentare (Vergel-Alfonso *et al.*, 2025). Tra i polifenoli, il resveratrolo, presente principalmente nella buccia dell'uva rossa e derivati, nei frutti di bosco (come mirtilli e lamponi), nelle arachidi e nel cacao, ha una forte azione antiossidante e antinfiammatoria. Alte concentrazioni di resveratrolo si ritrovano quindi nei sottoprodotti dell'industria vinicola, ad es. nella vinaccia (composta da semi e residui di buccia) che rappresenta il 20-25% del peso dell'uva, aumentando, in tal modo, l'interesse per la ricerca su questi sottoprodotti (Căpruciu, 2025). Tra i carotenoidi, presenti in carote, patate dolci, zucca, peperoni, albicocche, melone, cavoli etc., il β -carotene è il più stabile. Grazie alle sue esclusive proprietà bioattive come antiossidante e provitamina A, il β -carotene viene generalmente utilizzato come pigmento rosso-arancio nell'industria alimentare, cosmetica e farmaceutica. Vari studi riportano che i carotenoidi, come il licopene nel pomodoro, sono potenti antiossidanti la cui biodisponibilità aumenta con la cottura e l'aggiunta di grassi, come l'olio d'oliva (Ebadi *et al.*, 2023). Anche i glucosinolati, presenti nelle *Brassicaceae*, come ad esempio la rucola e il cavolo, sono ampiamente studiati per le loro proprietà antiossidanti e chemio-preventive. Particolare attenzione al fine di preservare questi composti dopo la raccolta, va rivolta alla conservazione (a temperature ottimali tra 4 e 8 °C) e alla cottura (da preferire quella a vapore rispetto alla bollitura che provoca perdite dal 57 al 81% per lisciviazione; Baenas *et al.*, 2019).

Alcuni di questi biocomposti rientrano già nell'upcycling di prodotti di scarto. Ad esempio, i gambi di cavolfiore arancione vengono recuperati, trasformati in farina e incorporati in prodotti surgelati

a base di pizza margherita conferendo al prodotto un contenuto nutrizionale che può contribuire attivamente all'abbassamento dei livelli di colesterolo nel sangue, riducendo conseguentemente il rischio di patologie coronariche. Similmente, la sansa (o pastazzo) di arancia (residuo della spremitura) si distingue per l'elevato contenuto di fibre alimentari, pari a circa il 40%, una bassa percentuale di grassi (2-14%) e una ricca composizione minerale, qualità che lo rendono ideale per migliorare le formulazioni alimentari. Anche i sottoprodotti della lavorazione delle olive e delle vinacce sono fonti significative di fenoli, i cui estratti possono essere utilizzati per l'arricchimento nutrizionale di vari prodotti, come il pane o i derivati caseari, mentre le vinacce stesse sono state studiate per l'estrazione di pigmenti a base di antocianine, utili come alternativa naturale ai coloranti sintetici. La polpa di mela residua, o *apple pomace*, è ricca di pectina e fibre, con una proporzione di fibre alimentari totali del 74%, e mostra eccellenti proprietà viscoelastiche per migliorare le strutture dei prodotti, oltre a contenere polifenoli come diidrocalconi e flavonoli, che hanno evidenziato proprietà anti-ipertensive, anti-diabetiche e anti-cancerogene. L'estrazione di phlorizin dalla sansa di mela, ad esempio, è alla base dello sviluppo di una nuova classe di farmaci orali antidiabete, grazie alla sua capacità di inibire il co-trasportatore sodio-glucosio-2 (SGLT2). Altri sottoprodotti, come i residui della frutta stella (*Averrhoa carambola L.*), hanno dimostrato un'attività antiossidante superiore rispetto al succo estratto, rendendo le loro polveri residue utili come ingredienti funzionali per prodotti alimentari. Nei cereali, il processo di macinazione, o molitura, finalizzato ad ottenere sfarinati raffinati (es. semole, farine bianche etc.), porta ad un progressivo impoverimento dei composti bioattivi (ad es. fibre, vitamine, minerali, composti fenolici, etc.; **Tabella 1**) presenti negli strati più esterni della cariosside a causa dell'allontanamento dei suoi strati periferici (crusca, aleurone e germe). Pertanto, per evitare la perdita dei composti bioattivi possono essere impiegate tecniche di frazionamento selettivo – come la micronizzazione e la turboseparazione – volte ad isolare e concentrare

Tabella 1 – Composti bioattivi presenti nelle cariossidi dei cereali

Composto	Localizzazione	Attività
Beta-glucani (orzo e avena)	Endosperma, strato leuronico	Ipocolesterolemica/ ipoglicemica
Tocoferoli / tocotrienoli	Germe	Antiossidante/ antinfiammatoria
Folati	Strato aleuronico, germe	Funzionalità del sistema nervoso centrale
Fruttoligosaccaridi (FOS)	Granella allo stadio di maturazione latte	Prebiotica
Fitosteroli	Strato aleuronico, germe	Ipocolesterolemica
Polifenoli	Pericarpo, strato aleuronico	Antiossidante, antinfiammatoria, antidiabetica e antiobesità
Policosanoli	Pericarpo	Ipocolesterolemica
Pentosani / arabinoxilani	Pericarpo	Ipocolesterolemica
Lignani	Pericarpo	Antiossidanti e anti-estrogeniche
Alchilresorcinoli	Pericarpo	Antiossidante
Carotenoidi	α - and β -carotene (7.7%) nel germe e luteina (86- 94%) ugualmente distribuita lungo la cariosside (aleurone, endosperma e germe). Zeaxantina nell'aleurone e germe	Provitamina A, antiossidante

determinate frazioni integrali, un tempo considerate ‘di scarto’, da aggiungere agli sfarinati raffinati nella formulazione di nuovi prodotti cerealicoli arricchiti sotto il profilo nutraceutico. Tali tecniche riscuotono un particolare interesse anche nella lavorazione di cereali pigmentati per separare le frazioni cruscali (pericarpo e aleurone)

più ricche di antociani (che determinano la colorazione viola, rossa, blu o nera nelle cariossidi), da impiegare come ingredienti per lo sviluppo di alimenti funzionali, con risvolti positivi anche sulle proprietà sensoriali.

L'upcycling a difesa delle colture

Polifenoli, glucosinolati e carotenoidi possono essere impiegati come alternativa ai pesticidi chimici grazie alla loro capacità di limitare la crescita di batteri e funghi patogeni capaci di influenzare la qualità e la produzione vegetale. Tuttavia, un uso eccessivo di composti sintetici, spesso tossici, può causare problemi per la salute dell'uomo e la contaminazione dell'ambiente. Le agenzie regolatorie europee si sono già più volte espresse contro formulazioni sintetiche normalmente usate come pesticidi. L'utilizzo di composti bioattivi di origine vegetale (acidi fenolici, flavonoidi, tannini, cumarine, lignani, chinoni, stilbeni e curcuminoidi) con proprietà antifungine può superare questi problemi, rendendo le colture più sicure e sostenibili da un punto di vista ambientale. In un'ottica di economia circolare, di particolare interesse, è l'utilizzo di matrici vegetali derivanti da scarti dei processi industriali come fonte di composti bioattivi per la costituzione di prodotti innovativi sostenibili.

Tra i composti fenolici, le fitoalessine svolgono un ruolo importante nel sistema di protezione della pianta, in particolare contro le infezioni microbiche, grazie a diversi meccanismi di inibizione della crescita. Il resveratrolo, ad esempio, agisce tramite un'attività di permeabilizzazione delle membrane cellulari del fungo con conseguente inibizione della crescita di diverse specie fungine, tra cui *Botrytis cinerea*, le cui infezioni sulla vite provocano gravi problemi ai produttori di vino in tutto il mondo (Umberath *et al.*, 2024). Oltre al resveratrolo, anche il pterostilbene risulta tossico per i funghi e i batteri fitopatogeni, oltre che per il nematode parassita *Setaria cervi Rudolphi*. La produzione di questi due composti è stimolata dalla presenza dei patogeni stessi;

infatti, la pianta utilizza questi composti bioattivi per difendersi iniziando la crescita del patogeno. Tuttavia, le fitoalessine possono accumularsi in quantità diverse non solo a seconda dello stadio di sviluppo, ma anche a seconda dell'organo o tessuto della pianta. Ad esempio, si è visto che *Rhizopus stolonifer Vuillemin* stimola la produzione di entrambi i composti nell'uva, con livelli più elevati, da 4 a 8 volte, di resveratrolo rispetto allo pterostilbene. In generale, le concentrazioni di fitoalessine risultano più elevate nelle bucce dell'uva rispetto ai semi, e i livelli nei semi sono più elevati rispetto alla polpa, aprendo la possibilità di estrarre grandi quantità di resveratrolo e pterostilbene da scarti della lavorazione dell'uva. Inoltre, proprio perché la produzione di queste molecole nelle piante viene indotta dalla presenza del patogeno, è possibile stimolare la pianta a produrre questi composti trattandola con molecole non tossiche, come la chitina che mima la presenza del patogeno. Infine, la produzione di composti bioattivi varia anche da cultivar a cultivar, rendendo necessario individuare un protocollo in cui le varietà più "rispondenti" vengano trattate con la chitina, al fine di poter disporre di grandi quantità di resveratrolo e pterostilbene da estrarre per un loro impiego in formulati con attività antifungina e antibatterica che possano costituire un'effettiva alternativa ai comuni fungicidi di sintesi (Duke, 2022). Anche carotenoidi e antociani sono da tempo studiati per la loro attività antiossidante e antimicotica. La buccia del pomodoro è, ad esempio, ricca in licopene, la cui azione nella protezione delle colture da diversi patogeni, tra cui *Aspergillus parasiticus* e *Aspergillus flavus*, è stata dimostrata, soprattutto nell'ambito di particolari tecniche di incapsulamento in composti di silice, anche in associazione con altre molecole come il propiconazolo (Raza *et al.*, 2025). Gli antociani della patata dolce viola, invece, si sono dimostrati efficaci contro la crescita fungina di *Geotrichum candidum* e *Candida albicans* (Wen *et al.*, 2016). Risultati simili sono stati ottenuti per gli antociani estratti dalla buccia di melanzana (Zearah, 2024) e, in particolare, dalla malvidina-3-O-glucoside, estratta da alcune varietà di vite e attiva nei confronti del fungo *Botrytis cinerea* (Mendoza *et al.*, 2013).

In questo contesto, si colloca perfettamente il progetto applicativo SUSinCER (*Sustainable use of bioactive compounds from Brassicaceae and Solananceae wastes for cereal crop protection* / Utilizzo sostenibile di composti bioattivi estratti da scarti di Brassicaceae e Solanaceae per la protezione di colture cerealicole), finanziato dalla Fondazione Cariplo e giunto al secondo posto nella competizione che ha visto oltre cento progetti candidati al bando 2019 “Circular Economy for a Sustainable Future”. SUSinCER si è proposto di intercettare opportunità di valorizzazione dello scarto per definire bioprodotto innovativi e sostenibili di interesse per la filiera cerealicola. Il concetto alla base della strategia progettuale è semplice. Le bucce di patata e i residui della disoleazione della rucola (radice e fusto) sono, infatti, preziose fonti di biocomposti che il progetto ha valutato e sperimentato con l’obiettivo di reintrodurli nella filiera, secondo un modello di economia circolare in cui il flusso di scarti industriali sia impiegato come risorsa innovativa e sostenibile per la difesa delle due colture alimentari più diffuse al mondo: mais e frumento. Tali colture rivestono un ruolo fondamentale nel panorama agroindustriale italiano, rendendo prestigioso il *Made in Italy* in tutto il mondo. Tuttavia, oggi, alla luce delle nuove sfide poste dal *Green Deal* (strategia di crescita per la neutralità climatica entro il 2050), sono richiesti interventi mirati a sostenere e rafforzare la loro competitività, incrementando la capacità produttiva e riducendo, allo stesso tempo, l’impatto ambientale. Tale traguardo può essere raggiunto tramite l’adozione di innovazioni nella difesa fitosanitaria e di una gestione più sostenibile, ad esempio valorizzando i sottoprodotti agricoli per la produzione di biopesticidi. In quest’ottica, lo sviluppo di formulazioni innovative per proteggere le colture cerealicole risulta una sfida cruciale, al fine di rendere disponibili agli agricoltori strumenti essenziali per la qualità e la resa, secondo un modello di economia circolare. Inoltre, potrebbero trarne beneficio anche le aziende che operano nel settore dei fertilizzanti che, interessate a sviluppare nuovi prodotti, potrebbero, contestualmente, aumentare il valore economico e ambientale dei propri scarti industriali, oltre ai consumatori stessi divenuti

oggi più attenti all’ecosostenibilità del prodotto acquistato. Per un approfondimento, si suggerisce di riferirsi ai capitoli 4 e 5 e a due video divulgativi disponibili in rete (<https://youtu.be/6ea0MsbL53g>; <https://youtu.be/BYYtUS0EWm0>).

I benefici ambientali derivanti dall’utilizzo di prodotti a base di molecole bioattive

I prodotti *biobased* rappresentano una componente sempre più rilevante nelle strategie di transizione verso un’economia circolare e a basse emissioni di carbonio. La loro principale caratteristica risiede nell’impiego di materie prime rinnovabili di origine biologica, il che consente di ridurre in modo significativo la dipendenza dalle risorse fossili e, di conseguenza, l’impronta carbonica associata ai cicli produttivi. Tuttavia, la valorizzazione delle biomasse e il recupero delle molecole biologiche che le compongono richiedono un’attenta valutazione dei processi coinvolti, poiché l’intero sistema produttivo deve mantenere un equilibrio tra benefici ambientali, sostenibilità delle risorse e costi industriali. Dal punto di vista ambientale, l’utilizzo di materiali *biobased* può contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra, grazie alla capacità della biomassa di fissare CO₂ durante la crescita. Questa caratteristica, unita alla possibilità di realizzare materiali biodegradabili o compostabili, permette di limitare l’accumulo di rifiuti e di favorire cicli di vita più compatibili con i principi dell’economia circolare. Inoltre, un ulteriore vantaggio deriva dalla possibilità di utilizzare come materia prima residui agricoli, forestali o zootecnici: in questo modo si ottiene una doppia valorizzazione, riducendo i volumi di scarto e generando prodotti a valore aggiunto. Nonostante queste potenzialità, il settore dei *biobased* presenta alcune criticità. Una sfida è legata ai costi: i processi di estrazione, frazionamento e purificazione delle molecole biologiche risultano spesso più onerosi rispetto ai processi consolidati basati su materie prime fossili. Questi procedimenti, inoltre, possono essere energivo-

ri o richiedere tecnologie avanzate, rischiando di ridurre i benefici ambientali. Inoltre, anche il fine vita dei prodotti *biobased* rappresenta un tema cruciale. Sebbene molti materiali di origine biologica siano biodegradabili o compostabili, non tutti presentano queste caratteristiche, e la loro degradazione dipende spesso dalle condizioni operative degli impianti di trattamento. Una gestione inadeguata potrebbe quindi compromettere il reale vantaggio ambientale del materiale. In questo contesto, assume un ruolo fondamentale la trasparenza delle informazioni e la presenza di sistemi di certificazione affidabili, necessari per garantire che i prodotti immessi sul mercato siano effettivamente *biobased* e conformi ai criteri di sostenibilità. In sintesi, i prodotti *biobased* costituiscono una risorsa strategica per la riduzione dell'impatto ambientale e lo sviluppo di filiere più sostenibili, ma richiedono un approccio integrato che tenga conto dell'intero ciclo di vita: dalla disponibilità della biomassa, ai processi industriali, fino alla gestione del fine vita e alla certificazione del prodotto.

Come massimizzare l'accumulo in pianta di molecole bioattive: biodiversità e biotecnologie

In natura, esiste una grande variabilità genetica che si riflette in un'altrrettanta variabilità in quantità e qualità di sostanze bioattive. Esistono, infatti, varietà autoctone e adattate a particolari ambienti che rappresentano una valida risorsa genetica. Il lavoro italiano di De Rossi *et al.* (2023), infatti, analizzando il contenuto dei metaboliti secondari e le proprietà antiossidanti di sette diverse specie, officinali e da frutto, in diversi siti della regione Basilicata per due anni consecutivi, ha dimostrato come diverse varietà della stessa specie avessero profili di composti bioattivi differenti, a seconda dell'area di campionamento e dell'anno di raccolta, suggerendo un ruolo sia dei fattori genetici sia ambientali nel determinare i risultati osservati. Anche in un lavoro in cui sono stati comparati i livelli di carotenoidi in 10 generi di le-

guminose, è stata identificata una drastica riduzione, quasi del 50%, passando dai selvatici alle varietà coltivate (Ku *et al.*, 2020). Quindi, sfruttare la biodiversità esistente è sicuramente una via per aumentare la concentrazione dei composti bioattivi. L'esplorazione di materiali selvatici che contengono alleli utili per l'accumulo di metaboliti secondari offre la possibilità di introgredirli – cioè di introdurre geni utili di una specie nel patrimonio genico di un'altra specie tramite la tecnica dell'incrocio – nel panorama coltivato per migliorare questo carattere, e altri, come la tolleranza agli stress biotici.

Oggi, il sequenziamento dell'intero genoma di diverse specie e gli studi di associazione consentono la mappatura genetica dei geni strutturali e regolatori delle vie biosintetiche di metaboliti secondari. L'identificazione di QTL (*quantitative trait loci*, regioni cromosomiche che contengono i geni responsabili di un carattere) e di geni coinvolti nella biosintesi di questi composti può migliorare l'uso delle risorse genetiche e accelerare ulteriormente il miglioramento genetico convenzionale. In riso, ad esempio, una collezione di 270 genotipi (varietà locali e cultivar) è stata utilizzata per condurre un'analisi di mappatura su diversi caratteri connessi all'attività antiossidante, tra cui il contenuto di antociani e flavonoidi; diversi QTL sono stati identificati, alcuni dei quali possono essere impiegati come marcatori per la selezione di varietà ad alta capacità antiossidante (Bastia *et al.*, 2022). Oltre agli studi di associazione basati su collezioni di germoplasma, popolazioni segreganti sono state utilizzate in diverse specie per identificare QTL coinvolti nella produzione dei metaboliti secondari. Una delle popolazioni di mappa più studiate per questi caratteri è quella di pomodoro, *S. pennellii* nel background genetico di *S. lycopersicum*, che ha permesso di identificare 30 robusti mQTL (*metabolic QTL*) che controllano l'accumulo di flavonoidi nel pericarpo del frutto (Alseekh *et al.*, 2015). L'introgressione (*pyramiding*) di più QTL in una stessa varietà mediante l'uso di marcatori molecolari si è dimostrata efficace per migliorare l'accumulo di questi composti nelle piante. In peperone, il QTL *fc5.1*, che porta un allele favorevole per l'alto contenuto di flavonoidi, è stato trasferito in una varietà com-

merciale e le piante risultanti hanno mostrato effettivamente un più elevato contenuto di questi composti (Wu *et al.*, 2022).

Inoltre, diversi progressi nelle tecnologie di ingegneria metabolica e genetica sono stati fatti per modificare, in maniera precisa, geni regolatori ed enzimi principali al fine di reindirizzare o aumentare la sintesi di metaboliti secondari delle piante. In pomodoro l'ingegneria genetica ha dato un grosso contributo allo sviluppo di nuovi risultati sulla sintesi dei polifenoli (Rosa-Martinez *et al.*, 2023). Recentemente, l'editing genomico mediato da CRISPR/Cas9 ha offerto un'accuratezza senza pari nel modificare in maniera mirata geni coinvolti nella biosintesi di metaboliti secondari. Alcuni esempi in cui la tecnologia CRISPR/Cas9 è stata applicata con successo sono rappresentati da pomodoro e riso. Il silenziamento del gene SIMYB12, un gene coinvolto nel metabolismo del colore del frutto, e quindi nella biosintesi dei fenilpropanoidi, ha causato la produzione di bucce di pomodoro più trasparenti e quindi l'ottenimento di frutti rosa (Rosa-Martinez *et al.* 2023), dimostrando che questo gene è il principale attivatore della sintesi dei flavonoidi. In riso, invece, una varietà arricchita di β -carotene è stata ottenuta mediante l'inserzione mirata di due geni della biosintesi dei carotenoidi, senza alcuna penalità né nella morfologia né nella produttività (Dong *et al.*, 2020). Comprendere meglio questi meccanismi consentirà sempre più di produrre varietà con profili di metaboliti secondari favorevoli, il che migliorerà l'adattamento al cambiamento climatico, le interazioni benefiche con fattori biotici e la salubrità per le piante destinate al consumo umano.

Bibliografia

- Alseekh S., Tohge T., Wendenberg R., Scossa F., Omranian N., Li J., *et al.*, *Identification and mode of inheritance of quantitative trait loci for secondary metabolite abundance in tomato*, "Plant Cell" 27 (3), (2015), pp. 485-512.
- Baenas N., Marhuenda J., García-Viguera C., Zafrilla P., Moreno D.A., *Influence of Cooking Methods on Glucosinolates and Isothiocyanates Content in Novel Cruciferous Foods*, "Foods" 8, 257 (2019).
- Bastia R., Pandit E., Sanghamitra P., Barik S.R., Nayak D.K., Sahoo A., Moharana A., Meher J., Dash P.K., Raj R., *et al.*, *Association Mapping for Quantitative Trait Loci Controlling Superoxide Dismutase, Flavonoids, Anthocyanins, Carotenoids, γ -Oryzanol and Antioxidant Activity in Rice*, "Agronomy" 12, 3036 (2022).

- Bhatt S., Ye H., Deutsch J., Ayaz H., Suri, R., *Consumers' willingness to pay for upcycled foods*, "Food Quality and Preference" 86, 104035 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104035>
- Căpruciu R. *Resveratrol in Grapevine Components, Products and By-Products – A Review*, "Horticulturae" 11, 111 (2025).
- Chiaraluce G., Bentivoglio D., Del Conte A., Lucas M. R., Finco A., *The second life of food by-products: Consumers' intention to purchase and willingness to pay for an upcycled pizza*, "Cleaner and Responsible Consumption" 14, 100198. (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100198>
- De Rossi S., Di Marco G., D'Agostino A., Braglia R., Mecca G., Canini A., Gismondi A., *Influence of environmental conditions on the production of nutraceuticals in Italian edible plant landraces*, "Food Res Int" 165, 112483 (2023).
- Do D.T., Harbourn N., Ellis A., *Anthocyanins*, in *Handbook of Food Bioactive Ingredients*, Editors Jafari S.M., Rashidinejad A., Simal-Gandara J., "Springer Nature" (2023), pp. 341-364.
- Dong O.X., Yu S., Jain R., Zhang N., Duong P.Q., Butler C., Li Y., Lipzen A., Martin J.A., Barry K.W., Schmutz J., Tian L., Ronald P.C., *Marker-free carotenoid-enriched rice generated through targeted gene insertion using CRISPRCas9*, "Nat. Commun" 11, 1178 (2020).
- Duke S.O., *Benefits of Resveratrol and Pterostilbene to Crops and Their Potential Nutraceutical Value to Mammals*, "Agriculture" 12, 368 (2022).
- Ebadi M., Mohammadi M., Pezeshki A., Jafari S.M., *Beta-Carotene*. in *Handbook of Food Bioactive Ingredients*, Editors Jafari S.M., Rashidinejad A., Simal-Gandara J. "Springer Nature" (2023), pp. 603-628.
- Ku Y-S, Contador C.A., Ng M-S, Yu J., Chung G., Lam H-M., *The Effects of Domestication on Secondary Metabolite Composition in Legumes*, "Front. Genet." 11, 581357 (2020).
- Lu P., Parrella J. A., Xu Z., Kogut A., *A scoping review of the literature examining consumer acceptance of upcycled foods*, "Food Quality and Preference" 114, 105098. (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.105098>
- Marone D., Mastrangelo A.M., Borrelli G.M., Mores A., Laidò G., Russo M.A., Ficco D.B.M., *Specialized metabolites: Physiological and biochemical role in stress resistance, strategies to improve their accumulation, and new applications in crop breeding and management*, "Plant Physiol Biochem" 172 (2022) pp. 48-55.
- Mendoza L., Cotoras M., Vivanco M., Matsuhira B., Torres S., Aguirre M., *Evaluation of antifungal properties against the phytopathogenic fungus BOTRYTIS CINEREA of anthocyanins rich-extracts obtained from grape pomaces*, "J. Chil. Chem. Soc." 58, 2 (2013) pp. 1725-1727.
- Raza H., Javaid R., Hayat M., Manzoor S., Ashraf A., Khan M., Ahmad F., Shanableh A., Luque R. *Sustainable lycopene/propiconazole-based nanoencapsulated formulations and their synergistic effect against Aspergillus parasiticus and Aspergillus flavus*, "Results Eng." 25 (2025).
- Rosa-Martinez E., Bovy A., Plazas M., Tikunov Y., Prohens J., Pereira-Dias L., *Genetics and breeding of phenolic content in tomato, eggplant and pepper fruits*, "Front. Plant Sci." 14,1135237 (2023).
- Temple N.J., *A rational definition for functional foods: A perspective*, "Front. Nutr." 9, 957516 (2022).
- Umberath K.M., Mischke A., Caspers-Weiffenbach R., Backmann L., Scharfenberger-Schmeer M., Wegmann-Herr P., Schieber A., Weber F., *Curse or blessing: Growth- and laccase-modulating properties of polyphenols and their oxidized derivatives on Botrytis cinerea*, "Food Res. Int." 192,114782 (2024).
- Vergel-Alfonso A.A., Arias-Avelenda R., Casariego-Año A., Giménez M.J., Ruíz-Cruz S., López-Corona B.E., Del-Toro-Sánchez C.L., Gonzalez-Bravo A.L., Plascencia-Jatomea M., Menchaca-Armenta M., et al., *Development and Characterization of Pectin and Beeswax-Based Coatings Enhanced with Anthocyanins and Its Antioxidant and Antifungal Properties*, "Processes" 13, 542 (2025).
- Wen H., Kang J., Li D. et al. *Antifungal activities of anthocyanins from purple sweet potato in the presence of food preservatives*, "Food Sci. Biotechnol." 25, (2016), pp. 165-171.

- Wu Y., Popovsky-Sarid S., Tikunov Y., Borovsky Y., Baruch K., Visser R.G.F. *et al.*, *CaMYB12-like underlies a major QTL for flavonoid content in pepper (Capsicum annuum) fruit*, "New Phytol." 237 (2022), pp. 2255-2267.
- Zearah S.A., *Assessment of the antioxidant potential of anthocyanin-rich Extract of eggplant (Solanum melongena L.) and evaluation of its antimicrobial activity*, "Trop. J. Nat. Prod. Res." 8(3) (2024), pp. 6558-6562.

3

Recupero e riutilizzo di molecole bioattive: cosa ne pensano i consumatori

Cariello M.

*Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA),
Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia*

Il successo commerciale dei prodotti derivati dall'*upcycling*, nonostante il loro indubbio potenziale nel contribuire alla risoluzione dell'urgente problema globale dello spreco alimentare, dipende in maniera cruciale dalla loro accettazione da parte del consumatore. L'introduzione di alimenti che impiegano ingredienti recuperati o sottoposti a processi di trasformazione non convenzionali si scontra, tuttavia, con una diffusa ritrosia del pubblico, poiché i consumatori tendono a manifestare scetticismo verso cibi nuovi e verso le tecnologie innovative di lavorazione (Chiaraluce *et al.*, 2024). Questa esitazione è acuita dalla consapevolezza che gli ingredienti *upcycled* provengono da materiali che altrimenti verrebbero scartati, percepiti come input di valore inferiore o "low-value" (Bhatt *et al.*, 2020). Tale percezione negativa può persistere nonostante le evidenze scientifiche che l'*upcycling* trasformi sottoprodotti e materiali di scarto in prodotti commestibili, sicuri per il consumo umano (Borah *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2024).

La maggiore difficoltà risiede nelle associazioni concettuali negative che il termine "scarto" o "rifiuto" può innescare nella mente dei consumatori, evocando preoccupazioni circa la sicurezza, l'attrattiva o la qualità del prodotto (Chiaraluce *et al.*, 2024). Pertanto, evitare riferimenti diretti a concetti come "spazzatura", "discarica" o "rifiuti" è una necessità comunicativa, poiché la loro menzione può attivare associazioni con i rifiuti fisici, riducendo l'accettazione del prodotto *upcycled* (Lu *et al.*, 2024). Analogamente ad altri prodotti ottenuti tramite approcci radicalmente nuovi, come l'acqua recuperata, la produzione di alimenti *upcycled* solleva timori impliciti nella mente dei consumatori riguardo all'idoneità per il consumo umano, richiedendo sforzi proattivi per superare tali barriere psicologiche (Bhatt *et al.*, 2020).

Le barriere psicografiche: neofobia e percezione di sicurezza

Le resistenze all'acquisto e al consumo di alimenti *upcycled* sono fortemente influenzate da specifiche variabili psicografiche che ri-

flettono la riluttanza dei consumatori verso la novità nel dominio alimentare. In particolare, la **neofobia alimentare** (FN), definita come la paura o il rifiuto verso cibi non familiari, e la **neofobia tecnologica alimentare** (FTN), ovvero l'avversione nei confronti delle tecnologie di trasformazione e produzione non conosciute, sono state identificate come fattori chiave che predicono negativamente l'atteggiamento dei consumatori e le loro intenzioni di acquisto (Chiaraluce *et al.*, 2024). Gli individui con alti livelli di FN e FTN mostrano un atteggiamento più negativo verso gli alimenti *upcycled* e sono meno propensi ad acquistare prodotti contenenti ingredienti recuperati o trasformati mediante processi innovativi (Lu *et al.*, 2024). Ad esempio, la neofobia alimentare e quella tecnologica influenzano negativamente la volontà di acquisto dei *Millennials* nei confronti di alimenti con ingredienti *upcycled* (Chiaraluce *et al.*, 2024). Tale correlazione negativa è stata riscontrata anche nell'accettazione di alimenti arricchiti con sottoprodotti della lavorazione delle olive, sebbene in quel contesto specifico la familiarità culturale con l'oliva nella dieta italiana possa avere mitigato l'effetto della FN (Lu *et al.*, 2024).

Un'ulteriore barriera significativa è rappresentata dalla mancanza di informazioni chiare e adeguate sul concetto di *upcycling*, sull'origine degli ingredienti e sui benefici specifici offerti dal prodotto (Chiaraluce *et al.*, 2024). I consumatori che esprimono disinteresse verso l'acquisto motivano la loro scelta principalmente con la necessità di ricevere maggiori informazioni per superare il timore che l'inclusione dei sottoprodotti possa alterare negativamente le caratteristiche organolettiche del prodotto, soprattutto il gusto, che rimane un fattore determinante per l'accettazione alimentare (Lu *et al.*, 2024). La comunicazione insufficiente e la percezione che l'ingrediente provenga da scarti possono innescare preoccupazioni sulla sicurezza che devono essere affrontate attraverso la trasparenza e l'educazione (Bhatt *et al.*, 2020).

L'indicatore economico cruciale: la Willingness to Pay (WTP)

La **Willingness to Pay (WTP)** costituisce la misura economica fondamentale utilizzata per quantificare il livello di accettazione di una nuova categoria di prodotti alimentari, agendo come un indicatore predittivo del loro successo commerciale (Chiaraluce *et al.*, 2024). Le analisi condotte in diversi contesti geografici e su diverse tipologie di prodotti indicano che, in assenza di specifici interventi comunicativi o promozionali, la WTP per gli alimenti *upcycled* è generalmente inferiore rispetto a quella per le loro controparti convenzionali (Bhatt *et al.*, 2020; Ghazanfar *et al.*, 2022). Questa tendenza riflette l'aspettativa del consumatore che un prodotto derivato da materiali di scarto debba logicamente comportare un costo inferiore, percependo gli ingredienti *upcycled* come input di minor valore (Lu *et al.*, 2024).

Per diverse categorie di prodotti, studi condotti negli Stati Uniti hanno stimato che la WTP media per gli alimenti *upcycled* si aggira intorno a \$4.46 USD, cifra significativamente inferiore rispetto ai \$4.95 USD registrati per gli equivalenti convenzionali (Bhatt *et al.*, 2020). Questa differenza non è marginale, poiché è stato calcolato che i consumatori mostrano una sensibilità al prezzo superiore in media del 17.6% per gli alimenti *upcycled* (Lu *et al.*, 2024). Tale maggiore sensibilità implica che i consumatori sono più propensi a rifiutare un prezzo ritenuto elevato per un prodotto *upcycled*, riflettendo un maggiore desiderio di ridurre il sacrificio monetario percepito, a fronte dell'acquisto di un prodotto ritenuto non convenzionale o di qualità potenzialmente inferiore (Bhatt *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2024).

Sensibilità al prezzo e differenze tra categorie di prodotto (virtù vs. vizio)

La WTP non è uniforme per tutti i prodotti *upcycled*, ma varia in relazione alla specifica categoria merceologica e, in modo significativo, in

funzione della percezione edonica o salutistica dell'alimento (Bhatt *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2024). Le ricerche hanno mostrato che i consumatori sono significativamente meno disposti a pagare lo stesso prezzo per le versioni *upcycled* di prodotti come *granola bars*, bocconcini di pollo o gelato, rispetto alle loro controparti convenzionali (Bhatt *et al.*, 2020). Per contro, la differenza di WTP si è rivelata statisticamente non significativa per prodotti come *muffins* e salse per pasta, suggerendo che l'accettazione degli ingredienti *upcycled* può variare a seconda della matrice alimentare in cui vengono incorporati (Lu *et al.*, 2024).

Un elemento di differenziazione critico è rappresentato dalla classificazione dei prodotti in categorie di “virtù” (prodotti percepiti come salutari, come un succo di frutta naturale) e di “vizio” (prodotti indulgenti o meno salutari, come il gelato o le barrette ad alto contenuto di grassi). Le scoperte hanno rivelato che, in assenza di comunicazioni pro-sostenibilità, la WTP per i prodotti *vice* (vizio) è intrinsecamente inferiore rispetto ai prodotti *virtue* (virtù), una tendenza che si accentua nel contesto degli alimenti *upcycled*. Il minor interesse verso i prodotti *upcycled* classificati come vizio può essere parzialmente spiegato dal senso di colpa associato al loro consumo, che richiede una giustificazione etica o razionale, rendendo il consumatore più riluttante a pagare un prezzo equivalente o superiore al convenzionale (Ghazanfar *et al.*, 2022). Tale dinamica sottolinea l'importanza cruciale di strategie di marketing capaci di mitigare queste percezioni negative e di valorizzare gli attributi positivi del prodotto, come i benefici per la salute e la sostenibilità, per superare la barriera del prezzo e aumentare l'accettazione (Bhatt *et al.*, 2020; Chiaraluca *et al.*, 2024).

Fattori che determinano l'intenzione di acquisto e il prezzo premium

Aspetti sociodemografici e psicografici nel profilo del consumatore ricettivo

L'accettazione e la propensione all'acquisto di prodotti alimentari derivati dall'*upcycling* sono significativamente determinate da una

complessa interazione di variabili sociodemografiche e di caratteristiche psicografiche, che delineano un profilo di consumatore target particolarmente ricettivo. I fattori sociodemografici, sebbene manifestino risultati di influenza eterogenei tra i vari contesti internazionali, indicano una maggiore intenzione di acquisto tra i consumatori più giovani, specialmente tra quelli inclusi nelle fasce d'età dei *Millennials* e della Gen Z. Questa maggiore apertura generazionale è spesso correlata a minori livelli di neofobia alimentare (FN) e neofobia tecnologica alimentare (FTN), conferendo a questi segmenti una minore riluttanza verso i cibi non convenzionali e i processi produttivi innovativi. Parallelamente, è stato riscontrato che i consumatori con un livello di istruzione più elevato, come i laureati, tendono a manifestare una maggiore volontà di acquistare alimenti contenenti ingredienti *upcycled*, probabilmente in virtù di una maggiore familiarità con concetti complessi come l'economia circolare e le tematiche di sostenibilità (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024).

Il ruolo del genere nell'influencare l'accettazione è misto in letteratura, ma evidenze specifiche suggeriscono una maggiore disponibilità a pagare (*Willingness to Pay*, WTP) tra le donne (Chiaraluce *et al.*, 2024). Tale propensione può essere ricondotta al fatto che le donne spesso gestiscono le decisioni di acquisto alimentare domestico, consentendo loro una migliore valutazione del rapporto tra qualità, prezzo e valore aggiunto del prodotto, inclusi i benefici ambientali e per la salute. Inoltre, le variabili psicografiche legate alla sostenibilità e all'innovazione si configurano come i predittori più robusti dell'intenzione di acquisto e dell'accettazione. La consapevolezza del problema dello spreco alimentare e la maggiore preoccupazione per l'ambiente sono correlate positivamente ad un atteggiamento favorevole verso gli alimenti *upcycled*, poiché questi prodotti vengono percepiti come una soluzione concreta per la riduzione dei rifiuti e la promozione di un sistema alimentare più responsabile (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024).

Il Ruolo dell'innovatività e del comportamento pro-ambientale

Il comportamento pro-ambientale dei consumatori, in particolare la loro attitudine verso il riciclo e l'innovazione, si riflette direttamente nell'accettazione degli alimenti *upcycled*. I soggetti che manifestano una propensione elevata verso il **riciclo domestico frequente** sono significativamente più inclini all'acquisto di cibi *upcycled*. L'atteggiamento positivo verso il recupero dei materiali, misurato dalla *Recycled Product Scale* (RPS), influenza positivamente sia l'intenzione di acquisto sia la WTP per tali prodotti, suggerendo che l'accettazione del concetto di "dare una seconda vita" a un materiale si estende logicamente all'ambito alimentare. Questa correlazione indica che la base di consumatori attenta al riciclo è un segmento altamente sensibile alle comunicazioni relative alla sostenibilità dei prodotti *upcycled* (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024).

Cruciale per l'intenzione di acquisto è anche l'innovatività specifica per il dominio alimentare (*Domain-Specific Innovativeness*, DSI). La DSI, che valuta la tendenza pionieristica di un individuo ad accettare novità all'interno di una specifica categoria di prodotti (in questo caso, il cibo), si è dimostrata un fattore predittivo robusto dell'intenzione di acquisto degli alimenti *upcycled*. I consumatori con DSI elevata sono meno inibiti dalla novità degli ingredienti non convenzionali e più propensi a sperimentare, facilitando l'introduzione sul mercato di queste categorie alimentari innovative. La conoscenza pregressa del concetto di *upcycling*, sebbene spesso limitata nella popolazione generale, esercita un'influenza positiva sull'intenzione di acquisto, evidenziando che l'informazione gioca un ruolo determinante nel superare la diffidenza iniziale (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024).

Percezione di qualità, attributi estrinseci e WTP premium

Per convertire l'accettazione teorica in acquisto effettivo, i produttori devono valorizzare gli attributi intrinseci ed estrinseci degli alimenti *upcycled*. La qualità percepita dal consumatore, insieme alle aspettative positive sul gusto, è un fattore intrinseco fondamentale, e l'aumento della qualità percepita si traduce direttamente in una maggiore inten-

zione di acquisto (Lu *et al.*, 2024). Gli attributi estrinseci, ovvero le caratteristiche non legate alla composizione fisica, ma visibili e comunicabili sull'imballaggio, sono essenziali per giustificare un eventuale prezzo superiore (Bhatt *et al.*, 2020; Chiaraluce *et al.*, 2024). L'**origine del prodotto** è considerata un'informazione critica, con il 92% dei consumatori che ritiene cruciale conoscere il paese o la regione di origine degli ingredienti *upcycled*. Evidenziare la provenienza locale o regionale può aumentare l'accettazione, poiché tale informazione riduce la neofobia tecnologica (FTN) e rafforza la fiducia, in particolare perché i consumatori sono motivati ad acquistare questi prodotti per sostenere gli agricoltori locali nella riduzione degli sprechi.

L'utilizzo strategico di **loghi, etichette e certificazioni** sull'imballaggio è un meccanismo efficace per segnalare la qualità e il valore aggiunto (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024). È stato dimostrato che un logo *upcycled* ben progettato, con elementi appropriati (forma, colore e descrittività), può migliorare la percezione di qualità del prodotto e incrementare l'intenzione di acquisto (Lu *et al.*, 2024). Inoltre, l'inclusione di specifiche etichette nutrizionali (ad es. rivendicazioni come “fonte di proteine” o “con fibre di mela”) o di certificazioni ambientali di terze parti (come l'etichetta *Carbon Trust*) è stata associata a una maggiore WTP. Tali segnali estrinseci contribuiscono a posizionare l'alimento *upcycled* non come un semplice prodotto di scarto, ma come un prodotto funzionale e sostenibile, giustificandone un costo maggiore (Bhatt *et al.*, 2020; Chiaraluce *et al.*, 2024).

La determinazione del prezzo premium e la categoria di prodotto

Contrariamente all'aspettativa generale di un prezzo inferiore per i prodotti derivati da scarti (Bhatt *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2024), i consumatori sono disposti a pagare un **prezzo premium** per gli alimenti *upcycled*, quando il loro valore aggiunto viene chiaramente percepito e comunicato (Chiaraluce *et al.*, 2024; Ghazanfar *et al.*, 2022). Questa disponibilità a pagare di più, è determinata dalla combinazione dei benefici ambientali (riduzione dello spreco) e dei benefici per la salute derivanti dall'arricchimento nutrizionale fornito dalle molecole bioattive recupe-

rate (Borah *et al.*, 2023; Chiaraluce *et al.*, 2024). In un'analisi condotta su consumatori italiani, è stata stimata una WTP di €4,98 per una pizza margherita surgelata arricchita con farina di gambi di cavolfiore (un sottoprodotto ad alto valore nutraceutico) (**Figura 1**), riconoscendo un prezzo premium di circa €0,93 rispetto alla controparte convenzionale, il cui prezzo medio di mercato era di €4,05. Questo risultato evidenzia che il valore di sostenibilità e salute attribuito al prodotto ha permesso di superare la tradizionale sensibilità al prezzo legata all'origine da scarto (Chiaraluce *et al.*, 2024; Ghazanfar *et al.*, 2022).

Inoltre, la categoria di prodotto influenza la risposta al prezzo premium, in particolare in relazione alla distinzione tra prodotti “**virtù**” (salutari) e “**vizio**” (indulgenti, ma meno salutari) (Bhatt *et al.*, 2020; Ghazanfar *et al.*, 2022). Le rivendicazioni di sostenibilità sono efficaci nell'aumentare la WTP per entrambe le categorie di prodotti *upcycled*; tuttavia, l'incremento della WTP si è rivelato più significativo per i prodotti *upcycled* classificati come “vizio” (Ghazanfar *et al.*, 2022). Tale effetto è interpretato come un meccanismo psicologico in cui l'associazione di una causa etica (la sostenibilità e la riduzione dello spreco) a un consumo edonistico, aiuta i consumatori a mitigare il senso di colpa associato al consumo di prodotti meno salutari. Pertanto, il *marketing* basato sui benefici etici può trasformare un fattore di esitazione (il prezzo) in un elemento

di giustificazione per l'acquisto di prodotti *upcycled* indulgenti, massimizzando il potenziale di prezzo premium in segmenti di mercato, altrimenti, meno propensi a pagare cifre elevate (Ghazanfar *et al.*, 2022).



Esempio di utilizzo di un sottoprodotto ad alto valore aggiunto

Strategie di comunicazione e framing per massimizzare l'accettazione

Necessità di comunicazione proattiva e trasparenza

L'introduzione di alimenti derivati dall'*upcycling* nel mercato, benché supportata da solidi presupposti di sostenibilità e benefici nutrizionali derivanti dal recupero di molecole bioattive, richiede l'implementazione di strategie di comunicazione proattive e mirate, fondamentali per superare le barriere cognitive e la neofobia manifestate dai consumatori. La comunicazione deve essere attentamente bilanciata, mirando a fornire informazioni incisive ed esaurienti sui contributi positivi che tali prodotti apportano alla salute, alla nutrizione, alla sostenibilità, alla riduzione dei rifiuti alimentari e, in senso più ampio, all'economia. Risulta cruciale, infatti, che le aziende si impegnino a rendere il concetto di *upcycling* chiaro e accessibile, poiché la scarsità di informazioni comprensibili e dettagliate sull'origine degli ingredienti è stata identificata quale motivazione primaria per l'iniziale riluttanza all'acquisto (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024).

Parallelamente alla promozione dei benefici, è imperativo che il *messaging* eviti accuratamente di richiamare associazioni concettuali negative, quali “spazzatura”, “discarica”, “rifiuti” o “immondizia”. L'utilizzo di un linguaggio che faccia riferimento a scarti fisici o a discariche può innescare associazioni mentali che influenzano negativamente l'atteggiamento dei consumatori, inducendoli a percepire gli alimenti *upcycled* come insicuri, poco attraenti o destinati allo smaltimento, vanificando gli sforzi di marketing. Alcune ricerche suggeriscono che porre l'enfasi sui benefici per la salute e la nutrizione, anziché concentrare l'attenzione esclusivamente sulla riduzione dei rifiuti, può essere un approccio più efficace per aumentare l'accettazione, poiché in tal modo si riduce la probabilità che emergano associazioni negative (Tsa *et al.*, 2023).

L'efficacia del framing: appelli razionali e vantaggi etici

Il modo in cui le informazioni relative ai prodotti *upcycled* vengono presentate al pubblico, noto come *framing*, influenza in modo significativo sia l'atteggiamento del consumatore sia la sua disponibilità a pagare (WTP) (Bhatt *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2024). Studi empirici che hanno confrontato l'efficacia degli appelli comunicativi hanno evidenziato che l'**inquadramento razionale** (o *rational messaging*) è significativamente più efficace nell'incrementare la WTP per gli alimenti *upcycled* rispetto all'**inquadramento emotivo**. Il *framing* razionale fornisce ai consumatori argomentazioni logiche, supportate da fatti e statistiche, che illustrano chiaramente il valore del prodotto e la sua relazione con la risoluzione del problema dello spreco alimentare (Bhatt *et al.*, 2020). Tale approccio cognitivo è preferito, specialmente per una categoria di prodotti considerata non convenzionale, poiché i consumatori ricercano giustificazioni basate sui fatti per validare la loro decisione di acquisto. Al contrario, gli appelli emotivi, che mirano a stimolare sentimenti legati alla fame o alla sofferenza, pur potendo essere efficaci per i prodotti convenzionali, sono risultati meno performanti nel contesto degli alimenti *upcycled* (Bhatt *et al.*, 2020).

Per quanto concerne la tipologia dei benefici enfatizzati, il *framing* basato sui **benefici ambientali** e sulla **frugalità** (intesa come l'uso efficiente delle risorse) genera atteggiamenti più favorevoli verso gli alimenti *upcycled* rispetto a un *framing* incentrato esclusivamente sui benefici di gusto (Aschemann-Witzel *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2024). La rivendicazione di **sostenibilità** è un fattore che incrementa la WTP per i prodotti *upcycled* in generale, sia per quelli classificati come “virtù” (salutari) sia per quelli “vizio” (indulgenti o meno salutari). Tuttavia, l'effetto delle rivendicazioni di sostenibilità sulla WTP risulta essere *maggiore* e più significativo per i prodotti *upcycled* classificati come “vizio”. Questo fenomeno è attribuito al meccanismo psicologico per cui l'associazione di una causa etica (la sostenibilità) a un prodotto edonistico (vizio) aiuta il consumatore a giustificare il senso di colpa intrinseco al consumo di prodotti meno salutari (Ghazanfar *et al.*, 2022).

Il ruolo critico dell’etichettatura e dei loghi

Gli elementi estrinseci del prodotto, quali il *packaging*, l’etichettatura, i loghi e le certificazioni, rivestono un ruolo cruciale nel plasmare l’accettazione del consumatore e influenzare l’intenzione di acquisto (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024). L’inclusione di un **logo upcycled** sul *packaging* è un fattore determinante: è stato dimostrato che i consumatori sono più propensi ad acquistare alimenti *upcycled* quando l’imballaggio include un logo ben progettato e con elementi estetici appropriati (forma, colore, descrittività), rispetto a prodotti senza logo o con un logo di cattiva concezione. Tale strumento visivo non solo facilita l’identificazione del prodotto, ma potenzia anche la percezione di qualità del cibo.

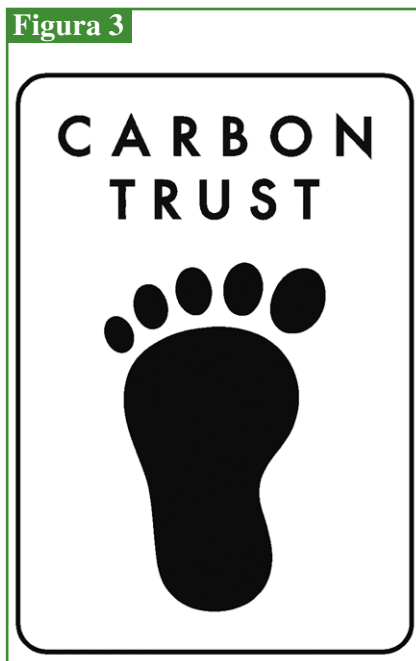
Per quanto concerne la terminologia utilizzata per descrivere gli ingredienti recuperati, il termine “**upcycled**” è il preferito dai consumatori (Figura 2), che lo classificano più in alto rispetto a descrittori alterna-

Figura 2



Esempio di logo “Upcycled Certified”

Figura 3



Esempio di logo “Carbon Trust”

tivi come “riprocessato” o “recuperato”. È anche stato riscontrato che i consumatori che prestano attenzione alla lettura delle etichette e delle informazioni sul prodotto (incluse le certificazioni) sono più propensi ad acquistare alimenti *upcycled*. L'efficacia di specifiche etichette nutrizionali, come quelle che riportano la dicitura “fonte di proteine” o “con fibre di mela”, è stata dimostrata nel generare una maggiore WTP. Allo stesso modo, l'inclusione di etichette ambientali di terze parti, come il *Carbon Trust label*, aumenta la WTP e rafforza l'immagine di sostenibilità del prodotto (**Figura 3**). L'utilizzo di tali elementi estrinseci permette di comunicare il valore aggiunto del prodotto, contribuendo a giustificare un eventuale prezzo *premium* e a ridurre l'iniziale scetticismo del consumatore (Chiaraluce *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2024).

Valorizzazione dell'origine e dei benefici funzionali

La trasparenza relativa all'**origine del prodotto** è un attributo estrinseco a cui i consumatori attribuiscono un'importanza elevata: il 92% dei consumatori considera cruciale conoscere il paese o la regione di provenienza degli ingredienti *upcycled* durante l'acquisto. La valorizzazione dell'origine locale o regionale degli ingredienti può agire come meccanismo per ridurre la neofobia tecnologica e aumentare l'accettazione. Strategie di marketing che enfatizzano la provenienza locale offrono l'opportunità di costruire campagne narrative incentrate sulla sostenibilità, sottolineando come l'acquisto contribuisca a sostenere gli agricoltori e i produttori locali nella riduzione dei loro sprechi alimentari (Lu *et al.*, 2024).

Infine, l'*upcycling* di sottoprodotti vegetali permette di recuperare molecole bioattive come vitamine, fenoli e fitosteroli, offrendo un'opportunità unica per combinare l'aspetto ambientale con i **benefici funzionali e salutistici** (Borah *et al.*, 2023). L'inclusione di questi composti, come la farina derivata dai gambi di cavolfiore arancione, ricca di elementi nutritivi che contribuiscono all'abbassamento del colesterolo, permette di posizionare il prodotto come un alimento salutare e sostenibile (Chiaraluce *et al.*, 2024). La comunicazione di tali benefici per la salute, parallelamente all'impatto positivo sulla

riduzione dei rifiuti, è un elemento che giustifica la disponibilità dei consumatori a pagare un prezzo maggiore rispetto ai prodotti convenzionali, trasformando l'ingrediente di scarto in un componente ad alto valore aggiunto. Una comunicazione efficace e razionale, che evidenzia chiaramente i molteplici benefici (salute, nutrizione, sostenibilità), è la chiave per massimizzare l'accettazione e il successo degli alimenti *upcycled* nel panorama alimentare contemporaneo (Bhatt *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2024).

Bibliografia

- Bhatt S., Ye H., Deutsch J., Ayaz H., Suri, R., *Consumers' willingness to pay for upcycled foods*, "Food Quality and Preference" 86, 104035 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104035>
- Borah M. S., Tiwari A., Sridhar K., Narsaiah K., Nayak P. K., Stephen Inbaraj B., *Recent trends in valorization of food industry waste and by-products: Encapsulation and in vitro release of bioactive compounds*, "Foods" 12-20, 3823. (2023). DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12203823>
- Chiaraluce G., Bentivoglio D., Del Conte A., Lucas M. R., Finco A., *The second life of food by-products: Consumers' intention to purchase and willingness to pay for an upcycled pizza*, "Cleaner and Responsible Consumption" 14, 100198. (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100198>
- Ghazanfar S., Abdullah M., Ummar R., Shabbir R., Saqib, S., *Effect of sustainability claim on willingness to pay for upcycled food in digital era: Differential effect of sustainability claim between virtue and vice product category*, "Frontiers in Environmental Science" 10, 870401. (2022). DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.870401>
- Lu P., Parrella J. A., Xu Z., Kogut A., *A scoping review of the literature examining consumer acceptance of upcycled foods*, "Food Quality and Preference" 114, 105098. (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.105098>
- Tsa C., Yi C., Man D., Wang J., Feng M., Feng, S., *Labeling and framing effects in the willingness to purchase upcycled food* [Student research report]. University of British Columbia SEEDS Sustainability Program. (2023). DOI: <https://doi.org/10.14288/1.0435133> (Nota: Link basato sul database UBC SEEDS)

4

Valorizzazione dei composti bioattivi presenti nella buccia di patata

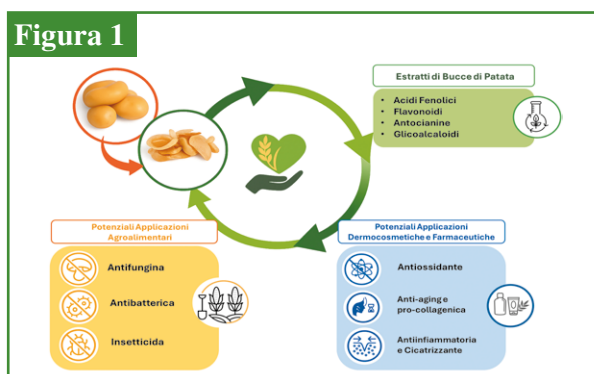
Pacifico D.*, Parisi B.*, L Lanzanova C.*, Palmieri A.,
Prata C.***, Zalambani C.*****

**Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA)*

***Alma Mater Studiorum Università di Bologna*

**** Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Dipartimento di Farmacia e
Biotecnologie*

Considerata il più delle volte uno scarto, la buccia di patata (*Solanum tuberosum* L.) ha acquisito un crescente interesse scientifico per il suo elevato contenuto di composti bioattivi e le possibili applicazioni in filiere produttive strategiche. L'elevato tenore in amido, caratteristica che accomuna tutti i tessuti del tubero, viene sfruttato per la conversione in biogas, a opera dei biodigestori. Tuttavia, il recupero dell'intero tubero scartato dall'industria di trasformazione della patata non sfrutta le peculiarità della buccia, il cui profilo biochimico risulta straordinariamente ricco di metaboliti secondari che conferiscono agli estratti (*Potato Peel Extracts*, PPE) proprietà biocide, antiossidanti, antinfiammatorie, antimicrobiche e antivirali (**Figura 1**). Per comprenderne il potenziale economico, oltre a quello scientifico, è importante inquadrare la complessità di una filiera tradizionalmente radicata nel territorio italiano.



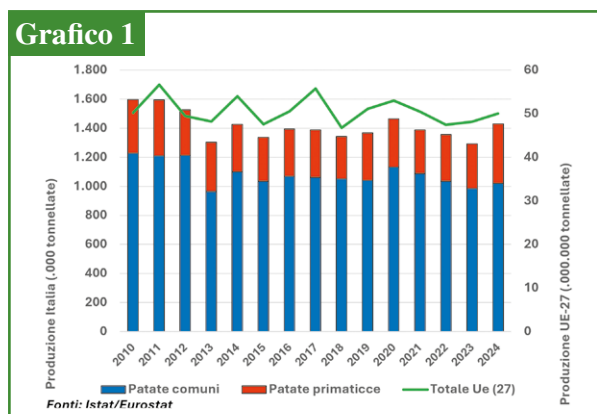
Principali metaboliti secondari delle bucce di patata e loro possibili utilizzi

La patata da industria in Italia

Focus economico

L'Italia ha una consolidata tradizione pataticola che affonda le sue radici quasi ovunque lungo il territorio nazionale, ma dal punto di vista produttivo il suo ruolo è piuttosto marginale, sia in ambito mondiale, sia nell'area europea. In particolare, l'offerta nei Paesi UE-27 ammonta a circa 50 milioni di tonnellate annue ed è dominata dai Paesi centro-settentrionali (Germania, Francia, Paesi Bassi e Belgio), cui si aggiunge la Polonia a est.

La coltivazione della patata in Italia, anche a causa delle difficoltà di marginalità economica (Palmieri, 2022), è in fase declinante nel lungo periodo, tanto che fino al 2010 erano coltivati circa 70.000 ettari, mentre nel 2024 poco meno di 50.000 (dati ISTAT). Nell'ultimo decennio la dinamica degli investimenti si è stabilizzata, ma la produzione media annua si è comunque contratta, passando da 1,6 milioni di tonnellate annue registrate fino al 2012 a 1,3-1,4 milioni degli ultimi anni (**Gra-**



Produzione di patate in Italia e nell'UE (27)

fico 1 pari dunque a meno del 3% della produzione totale di area UE-27.

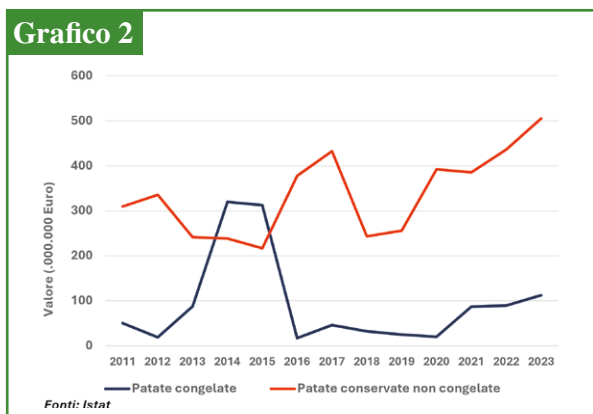
Circa i $\frac{3}{4}$ dell'offerta nazionale sono costituiti da patate comuni, mentre il resto è rappresentato da patate precoci (meglio declinate anche come novelle o primaticce).

Pur essendo pratica-

mente ubiquitaria, la coltivazione della patata si concentra in pochi areali. Relativamente alla patata comune, la produzione è ripartita equamente tra le diverse latitudini del Paese: poco più del 35% proviene dalle regioni settentrionali, Emilia-Romagna e Veneto in particolare, mentre una percentuale analoga proviene dall'area meridionale, soprattutto da Campania e Calabria e la restante quota dal Centro, dove l'Abruzzo ed il Lazio concentrano la maggior parte della produzione. Le patate precoci, invece, sono localizzate in larga prevalenza nel Sud Italia, dove spiccano per rilevanza Campania, Sicilia e Puglia.

Entrambe le tipologie di patate si prestano sia al consumo fresco, sia alla trasformazione industriale: una quota attorno al 10% della produzione interna di patate, in tendenziale crescita negli ultimi anni, è destinata all'industria di trasformazione per l'ottenimento di numerosi prodotti, tra i quali chips e snack di pronto consumo, prefritti (stick, spicchi e

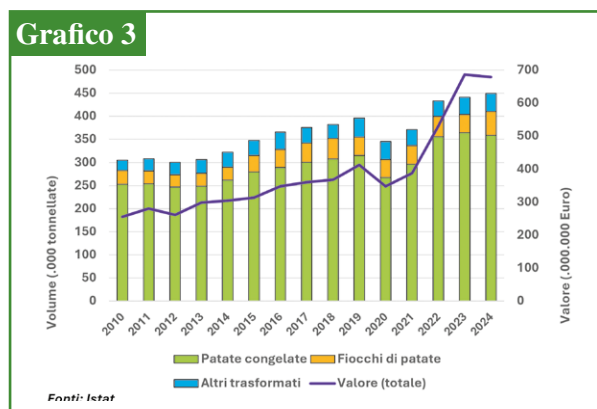
tondello), surgelati (stick, spicchi, purea, gnocchi e cubettame), disidratati, appertizzati e IV/V gamma. I principali lavorati industriali sono comunque rappresentati da patate congelate e da patate conservate, laddove sono incluse le referenze pronte all'uso, quali chips, snack e altri prodotti imbutati. La produzione industriale italiana di quest'ultima referenza è in decisa crescita (**Grafico 2**), essendo passata da 300 a oltre 500 milioni di euro in valore dal 2011 al 2023, mentre la produzione di patate congelate risulta più altalenante con un picco superiore a 300 milioni di euro nel biennio 2014-15, cui ha seguito un netto calo e quindi una ripresa fino a 90-100 milioni di euro nel triennio 2021-23.



Italia: valore della produzione industriale dei principali prodotti a base di patate

L'Italia è un Paese fortemente deficitario, tanto che la disponibilità interna di patate è normalmente integrata da più del 30% di offerta estera. Negli ultimi 2 anni, peraltro, le importazioni di patate fresche sono fortemente aumentate, superando in volume 800.000 tonnellate, per un controvalore di quasi 320 milioni di euro. Modeste sono le esportazioni, benché anch'esse in crescita, tanto da superare 100.000 tonnellate pari a poco meno di 70 milioni di euro di valore: il disavanzo commerciale è così pari a 250 milioni di euro.

Nel tempo, anche le importazioni di trasformati hanno subito una decisa accelerata: dal 2010 al 2021 si è passati da 300 a 370.000 tonnellate, mentre nel triennio 2022-24 l'import in volume è balzato da 370 a 450.000 tonnellate, mentre in valore da 390 a quasi 700 milioni di euro (**Grafico 3**), portando così il disavanzo commerciale a oltre 630 milioni di euro, in virtù della modesta quota di prodotto esportato.



Italia: importazioni di patate trasformate in volume e valore

Il prodotto acquistato dall'estero è costituito in larga maggioranza da congelato, che è di fatto il principale responsabile del trend di crescita generale dell'import, essendo passato da 250 a 360 milioni di euro negli ultimi 15 anni. Aumenta comunque anche

l'import delle altre referenze, fra le quali spiccano i fiocchi di patate. Riassumendo, i flussi della filiera pataticola nazionale partono da un'offerta complessivamente disponibile (produzione ed importazioni) di poco superiore a 2 milioni di tonnellate, di cui l'8% circa rappresentato da scarto a perdere o per alimentazione animale e il 4% destinato all'esportazione. La restante parte viene lavorata dall'industria di trasformazione o avviata al consumo fresco. Quest'ultimo, in particolare, è suddiviso tra retail (63%) e Ho.Re.Ca. (37%).

Nel segmento della produzione destinata alla trasformazione industriale, un ruolo di primo piano è svolto dalle Associazioni dei Produttori. A esse spetta il compito di permettere il dialogo fra una realtà frammentata e caratterizzata da imprese di piccole dimensioni come quella agricola ed una realtà di maggiori dimensioni e più organizzata come quella industriale. Per il produttore, inoltre, vi è la possibilità di contrattualizzare un prezzo di vendita, evitando le oscillazioni del mercato del fresco, mentre per l'industria vi è l'opportunità di dettare le proprie richieste qualitative, che sono ben differenziate rispetto al fresco.

Con i consumi, si rileva una tendenziale crescita degli acquisti di prodotto fresco e dei trasformati, sebbene altalenante. La penetrazione al consumo è tra le più alte tra le referenze agro-alimentari, con il 95% delle famiglie italiane che le acquista almeno una volta all'anno, in una delle diverse forme (dati osservatorio GfK). Le patate sono l'ortaggio

fresco più consumato in Italia a volume, con una quota del 18%, che scende a poco meno del 9% in valore (dati Ismea/Nielsen IQ).

Fra i trasformati, le patate surgelate rappresentano il 7% in volume rispetto al totale acquistato nella categoria congelati e inscatolati ed il 6% in valore. Rapportate ai soli consumi di prodotti surgelati, invece, le patate rappresentano il 15% degli acquisti retail, con un volume di 110.000 tonnellate nel 2023 (dati Istituto Italiano Alimenti Surgelati) e ben il 25% nel fuori casa. La versatilità di preparazione e il gradimento di tutte le fasce della popolazione sono i punti di forza del segmento surgelato. Il mercato delle patatine fritte sta registrando anch'esso una crescita decisa, che ha portato il valore degli acquisti a quasi 600 milioni di euro (dati Agripat) ed è dovuto principalmente alla crescente domanda di snack comodi e pronti al consumo. L'innovazione del gusto è diventata il principale elemento di differenziazione nel mercato degli snack a base di patate e, come conseguenza, le industrie perseguono una crescita delle attività di sviluppo del prodotto.

Superfici coltivate e criticità agronomiche

In Italia, la coltivazione della patata per la trasformazione industriale ha avuto una espansione molto modesta in termini di ettari, attualmente inferiore al 10% dell'intera superficie nazionale destinata a questa coltura, rispetto ad altri Paesi europei e, tutt'ora, le superfici investite forniscono volumi di materia prima non sufficienti alle esigenze dell'industria di lavorazione che si approvvigiona costantemente sui mercati esteri.

La coltivazione della patata da industria in Italia presenta vari fattori di debolezza (Van Loon *et al.*, 2025), e quelli più complessi da gestire sono di carattere agronomico e strettamente correlati al fatto che l'industria di trasformazione utilizza prevalentemente cultivar di ciclo medio-tardivo e tardivo che hanno cicli di produzione che vanno incontro alle condizioni critiche di stress termico da elevate temperature, tipiche del periodo estivo, che si verificano in quasi tutti i bacini di produzione, che oltre a far lievitare i costi diretti (spese di irrigazione, fertilizzazione, fitoprotezione etc.), tendono a far peggiorare la qualità tecnologica

dei tuberi, causa fitopatie non parassitarie (Pentangelo *et al.*, 2021), di difficile gestione tecnica (maculatura ferruginea, *sugar-end*, *vascular discoloration* etc.).

L'importanza della materia prima

I tuberi destinati alla trasformazione industriale devono rispettare requisiti tecnologici specifici per il tipo di uso finale. Gli opifici per ottenere un prodotto gradito da parte del consumatore esigono materia prima che risponda a precisi requisiti di tipo tecnologico (contenuto in sostanza secca, contenuto in zuccheri riducenti, colore della pasta) e morfologico (forma e calibro dei tuberi). Di seguito, si riportano i principali parametri tecnologici richiesti:

- peso specifico >1,085, e ciò è fondamentale per la lavorazione in chips, dove ogni aumento della sostanza secca si traduce in un aumento di resa industriale e, al tempo stesso, in una diminuzione del contenuto in olio trattenuto dal prodotto finito;
- % elevate di calibri specifici (60+ mm prefritti surgelati, 45-60 mm chips)
- assenza di imbrunimento non enzimatico alla frittura e di imbrunimento post-taglio (surgelazione)
- basso accumulo di glucosio (<0,25-0,3%) ed asparagina per evitare formazione acrilammide durante la frittura
- bassa/nulla incidenza di fisiopatie non parassitarie (macchie nere/*bruising*)

Approvvigionamento

Fondamentale nell'industria di trasformazione, per poter operare efficacemente, è la disponibilità di tuberi di qualità tecnologica adeguata per periodi di lavorazione ampi ed a cifre che le consentano di ottenere un trasformato da posizionare a prezzi concorrenziali in un mercato molto competitivo.

Mentre la raccolta è concentrata nella stagione tardo primaverile-estiva e di inizio autunno (**Tabella 1**), l'industria di trasformazione

Tabella 1 – Patata da industria in Italia: principali bacini produttivi per precocità di raccolta

Areale	Regione	Varietà	Epoca semina	Epoca raccolta
Acerrano nolano	Campania	Beyonce (C), Fontane (C-S-FP), Innovator (S), Lady Alicia (C), Lady Britta (C), Lady Rosetta (C), Madison (C), Norman (C), Rumba (C), Taurus (C)	dicembre febbraio	maggio luglio
Baia Domizia	Campania	Innovator (S)		
Piana del Sele	Campania	Efera (C), Triple7 (C)	gennaio febbraio	giugno luglio
Fiumicino	Lazio	Fontane (S-FP-A), Innovator (S)	febbraio marzo	
Basso ferrarese	Emilia Romagna	Innovator (S), Jelly (FP), Sinora (C)		
Veronese / Vicentino	Veneto	Alverstone Russet (S), Arsenal (C), Daisy (S), Doribel (S), Fontane (S-FP), Innovator (S), Lady Alicia (C), Lady Amarilla (C-S), Lady Jane (S), Napoleon (C), Tiger (S)	febbraio aprile	giugno settembre
Pianura bolognese	Emilia Romagna	Doribel (S), Innovator (S), Jelly (FP), Lady Jane (S), Travis (S)	marzo aprile	luglio agosto
Mantovano	Lombardia	Alverstone Russet (S), Arsenal (C), Beyonce (C), Daisy (S), Lady Claire (C), Sinora (C)		
Alto veneziano / Basso Friuli	Veneto, Friuli V.G.	Alverstone Russet (S), Bricata (S), Daisy (S), Innovator (S), Lady Jane (S), Nevadine (S)		
Alessandrino	Piemonte	Alverstone Russet (S), Beyonce (C), Lady Alicia (C), SH C 1010 (C)		
Fucino	Abruzzo	Agria (FP-A), Fontane (S-FP-A), Innovator (S)	aprile maggio	settembre ottobre
Sila	Calabria	Agria (C-FP-A), Fontane (C-FP-A)		

C=chips, S=prefritti surgelati, FP=surgelati, A=altre preparazioni (IV e V gamma)

C=chips, S=prefritti surgelati, FP=surgelati, A=altre preparazioni (IV e V gamma)

lavora tutto l'anno; così, vi è la necessità di disporre di patate idoneamente frigostoccate in specifiche strutture con l'aggiunta dei consumi di energia elettrica che fanno lievitare i costi della materia prima.

Per garantirsi un flusso di approvvigionamento, spesso soggetto a svariati fattori di mercato che ne determinano imprevedibili oscillazioni di prezzo, l'industria di trasformazione stipula, sempre più spesso, contratti di produzione/fornitura.

In Italia, le patate assorbite dalla trasformazione industriale ammontano a 270-300.000 t annue, con oltre il 90% destinato alla lavorazione di *crisps&snacks*, *French fries* e surgelati, tutti oggetto di espansione nei consumi. L'industria delle chips utilizza oltre il 70% di materia prima italiana, mentre quella delle *French fries* (bastoncini pre-fritti e surgelati) supera l'80% di prodotto nazionale utilizzato poiché per essa è più semplice ricollocare produzioni di varietà cosiddette «duplice attitudine» che si prestano bene sia al consumo fresco che all'ottenimento di tali prodotti. Ciò non è possibile nel settore delle chips, poiché la materia prima deve avere forma tonda dei tuberi ed elevato peso specifico, entrambe peculiarità di specifiche cultivar. La materia prima mancante (20-30%) è importata principalmente da Olanda, Francia, Germania e Belgio.

Verso la transizione verde: potenziali applicazioni delle bucce di patata

Le biomolecole

Il germoplasma di patata comprende un'ampia gamma di biomolecole (acidi fenolici, flavonoidi, antocianine e glicocalcoidi), la cui distribuzione in pianta non è uniforme e il cui accumulo varia in funzione dell'assetto genetico, delle condizioni ambientali e del regime di coltivazione. I metaboliti secondari, anche se non essenziali per la vita, sono attivi fisiologicamente e spesso risultano particolarmente interessanti per le loro proprietà. Gli alcaloidi sono senza dubbio tra i più interessanti. Basti pensare che appartengono alla famiglia degli

alcaloidi la nicotina (nel tabacco), la caffeina (caffè, tè), la teobromina (cacao), la capsaicina (gusto piccante del peperoncino) ma anche la tubocurarina (curaro) o la coniina o cicutina (cicuta) e la morfina (papavero). Sono prodotti dalla famiglia botanica delle Papaveraceae, Fabaceae, Ranunculaceae e Solanaceae. La patata, come altre Solanaceae tra cui pomodoro e melanzana, è ricca in particolare in glicoalcaloidi steroidei (GA), una classe di glicosidi steroidei contenenti azoto, presenti in tutti gli organi della pianta (foglie, radici, germogli e tuberi). Il germoplasma di patata ne è straordinariamente ricco sia in quantità sia in qualità mostrando circa 80 molecole diverse e a concentrazioni piuttosto alte. Al contrario, i glicoalcaloidi presenti nel tubero della patata coltivata (*Solanum tuberosum*) sono rappresentati per lo più da due molecole: α -solanina (circa il 40% del totale) e α -ciaconina (circa il 60% del totale). Data l'accertata tossicità per l'alimentazione umana (ingestione da 3 a 6 mg GAs/kg peso corporeo), il limite di sicurezza comunemente accettato nel tubero è di 20 mg/100 g di peso fresco, anche se un recente parere dell'Istituto Federale Tedesco per la Valutazione del Rischio (BfR) suggerisce di abbassare il limite di sicurezza nelle patate a meno di 10 mg/100 g di peso fresco. Tuttavia, la maggior parte dei tuberi commestibili contiene solo tracce di SGA nella polpa, grazie a una selezione genetica che negli ultimi decenni ne ha progressivamente ridotto il contenuto. Al contrario, in buccia il contenuto di SGA è spesso elevato, complici le continue sollecitazioni a cui è sottoposta, e varia significativamente da una varietà all'altra. Ad esempio, Friedman (2003) riporta valori tra 0,83 e 352,6 mg/100 g di peso secco in otto cultivar di patata. Studi interessanti hanno riportato che questa variabilità può correlarsi con il colore della polpa: le patate a polpa bianca mostrano un contenuto di SGA nella buccia più alto rispetto a quelle a polpa blu, rossa e gialla.

Oltre ai glicoalcaloidi, la buccia di patata contiene elevate concentrazioni di acidi fenolici, in particolare acido clorogenico, caffeico, protocatecuico, ferulico e gallico. Migliaia di composti fenolici sono stati isolati nel regno vegetale, con ruoli sia come protettori contro

lo stress ossidativo, noti per la loro capacità di neutralizzare specie reattive dell'ossigeno (ROS) e limitare i processi di perossidazione lipidica, sia come agenti di controllo dei parassiti. Sono classificati in diversi sottogruppi in base alla loro struttura che contiene anelli aromatici idrossilati, con il gruppo ossidrilico legato direttamente al fenile, fenile sostituito o a un altro gruppo arilico. Sono sintetizzati tramite le vie dell'acido shikimico e del fenilpropanoide. La buccia di patata è una fonte ben nota di acidi fenolici e flavonoidi: il loro contenuto varia tra 1,02 – 2,92 g/100 g e 0,51 – 0,96 g/100 g di peso secco, rispettivamente, e diminuisce significativamente verso la polpa, come confermato sia da misurazioni dirette (es. analisi HPLC) sia indirette (es. attività scavenger dei radicali). Il composto fenolico più abbondante è l'acido clorogenico (5-O-caffeoilchinico; CGA), insieme ai suoi isomeri. In passato, il CGA era chiamato acido 3-caffeoilchinico, ma dal 1976, secondo le nuove regole IUPAC, la struttura è stata ridefinita. Nella buccia, il CGA raggiunge circa 2115 µg/g di peso secco, diminuendo nel cortex (primi strati cellulari sotto il periderma) sottostante a 276 µg/g (cv. Bionica). Al contrario, gli acidi idrossicinnamici e idrossibenzoici sono presenti solo in tracce, con l'eccezione dell'acido caffeico (CA). Il CA possiede una rilevante attività antiossidante sia *in vitro* che *in vivo*, superiore rispetto al CGA, e può accumularsi nelle piante principalmente in forme coniugate tramite esterificazione con acido chinico, in due isomeri configurazionali: trans e cis. Nei sistemi biologici, la forma trans è la più rilevante per la sua stabilità a pH subacido, anche se l'assorbimento nella regione UVA può indurre la conversione da trans a cis. Il gruppo orto-difenolico conferisce al CA importanti proprietà antiossidanti: riduce l'entalpia di dissociazione del legame OH, aumentando la velocità di trasferimento dell'atomo di idrogeno ai perossili. Inoltre, il sistema orto-difenolico ha una velocità di reazione ossidativa relativamente alta, con l'effetto secondario negativo di causare l'imbrunimento del tubero quando tagliato o danneggiato, con il contributo essenziale dell'O₂ molecolare e di specifiche attività enzimatiche. Il meccanismo molecolare alla base del fenotipo di imbrunimento non è ancora completamente chia-

rito. La catechina è un orto-difenolo appartenente alla famiglia dei flavan-3-oli. Diversamente da altri composti fenolici, la catechina si trova in forma libera. Peculiarmente, può condensarsi in oligomeri o polimeri ad alto peso molecolare, comunemente chiamati “composti tannici condensati”, presenti nel tè nero e nel vino rosso. La sua struttura chimica conferisce interessanti proprietà antiossidanti, superiori a quelle di altri antiossidanti biologici comuni, come glutatione e ascorbato. Sebbene il suo livello nella buccia sia inferiore rispetto al CA, potrebbe essere studiata come potenziale agente bioprotettivo grazie alle sue attività antimicrobiche e antifungine.

Il crescente orientamento verso la valorizzazione dei sottoprodotti agricoli in un’ottica di economia circolare ha ulteriormente incentivato la ricerca su questa matrice vegetale, evidenziandone la potenzialità biotecnologica e il valore ambientale con un enorme potenziale nell’agire come nuovi agenti bioprotettivi. Nonostante ciò, i lavori sistematici che si concentrano sull’utilizzo degli estratti botanici da patata sono ancora piuttosto limitati.

Potenziali applicazioni in agricoltura

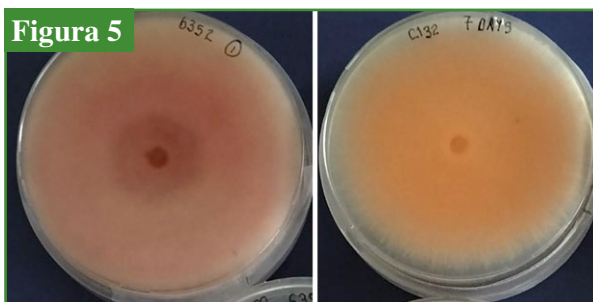
“Le Solanaceae hanno un enorme potenziale per il rilascio di nuovi fitofarmaci, molti di questi composti o un mix di essi sono stati identificati per la protezione delle colture specialmente contro insetti, funghi e acari” (Chowański *et al.*, 2016). Recentemente, uno studio sistematico della letteratura scientifica contemporanea ha raccolto i lavori che attestano l’attività biocida dei composti bioattivi presenti in patata nei confronti di diversi fitopatogeni (Pacífico *et al.*, 2021). L’effetto dei glicoalcaloidi su organismi complessi come alcuni insetti fitofagi sembra, ad esempio, ormai accertato. Ricordiamo i lavori su *Leptinotarsa decemlineata*, più comunemente nota come dorifora della patata, ma anche su *Schizaphis graminum*, *Ceratitis capitata*, *Empoasca fabae*, *Myzus persicae*, *Chrysodeixis includens*, *Galleria mellonella*, *Tribolium castaneum*, *Zophobas atratus*. Negli ultimi anni la comunità scientifica ha rivolto particolare attenzione anche ai meccanismi di azione attraverso i quali esplicano la loro

azione, individuandone i principali nel sapore amaro, che risulta essere un efficace deterrente al gusto, e la tossicità, legata all'idrolisi dell'acetilcolina a livello delle sinapsi del sistema nervoso. A oggi, la maggior parte degli studi approccia metodologicamente alla sperimentazione portando avanti analisi della correlazione indiretta tra la genotipo-resistenza e il contenuto di SGA in tubero oppure conducendo test *in vitro* dose-risposta. La resistenza di cinque genotipi di patata a tignola (*Phthorimaea operculella*) è stata ad esempio indirettamente correlata al contenuto di SGA suggerendo un possibile ruolo chiave dell' α -chaconina nella maggiore resistenza di alcuni genotipi di patata. Analogamente, ma con un approccio metodologico differente, Smith ha dimostrato che all'aumentare delle concentrazioni di α -solanina e α -chaconina, somministrate singolarmente e in forma pura, la chiocciola zigrinata *Cornu aspersum* risponde con una deterrenza crescente (2001). Nello stesso lavoro, l'attività inibitoria risulta inoltre significativamente maggiore quando i composti vengono somministrati in miscela piuttosto che singolarmente. Un effetto sinergico analogo è apparso in uno studio sugli adulti del coleottero della farina rossa (*Tribolium castaneum*) e del punteruolo del riso (*Sitophilus oryzae*), dove l'attività degli SGA mostra un incremento dose-dipendente e dove, ancora una volta, le miscele risultano essere più tossiche rispetto alle molecole pure.

Analogamente, studi dell'effetto della buccia di patata su funghi fitopatogeni hanno dimostrato che i SGA hanno attività antifungina su molte specie differenti, ad esempio *Alternaria brassicicola* e *Pseudopeziza medicaginis*. I rapporti che generavano la massima sinergia e inibizione erano compatibili con quelli naturalmente presenti nelle specie del genere *Solanum*; tuttavia, una concentrazione pari al 10-20% di SGA in miscela era sufficiente per attivare il massimo effetto inibitorio. L'azione dei SGA risulta quindi massimizzato quando le molecole vengono somministrate in combinazione, piuttosto che singolarmente, ma la presenza in buccia di possibili sostanze interferenti in grado di influenzarne l'efficacia ha rappresentato un ulteriore fattore nella valutazione dell'attività della buccia di patata utilizzata

nella sua complessità. L'attività degli estratti grezzi di buccia di patata rispetto alla somministrazione della soluzione equivalente di SGA in miscela ha infatti permesso di osservare un possibile effetto sulla tossicità della buccia di patata di tipo sinergico/additivo, ma, a volte, anche di tipo antagonistico rispetto alla semplice combinazione di molecole pure, suggerendo la presenza nella matrice vegetale di ulteriori molecole che possono interferire con l'attività della componente alcaloide.

Nel 2024, una ricerca condotta nell'ambito del progetto SUSinCER (*Sustainable use of bioactive compounds from Brassicaceae and Solananceae wastes for cereal crop protection* / Utilizzo sostenibile di composti bioattivi estratti da scarti di Brassicaceae e Solanaceae per la protezione di colture cerealicole, finanziato da Fondazione Cariplo) ha comparato *in vitro* l'attività di estratti grezzi di bucce, frazionamenti di quest'ultimi e miscele di molecole pure nel ridurre la crescita di *Fusarium graminearum* e *F. verticillioides* (**Figura 5**). Il lavoro, pubblicato su ACS Food Science & Technology (Pacífico *et al.*, 2025), ha analizzato il profilo biochimico degli estratti grezzi di buccia di quattro varietà di patata da industria rappresentative del panorama di coltivazione italiano (Lady Rosetta, Lady Claire, Hermes e Doribel), dimostrando l'efficacia dell'estratto grezzo di patata nell'inibire la crescita radiale di *Fusarium* fino a un massimo del 30% e gettando una base promettente per il loro utilizzo *in vivo* come biopesticidi naturali. Lo stesso studio, a nostra conoscenza tra i pochi in letteratura riguardanti il contributo dei fenoli all'attività antifungina, individua per la prima volta la componente fenolica delle bucce di patata come la maggior responsabile, capace di ridurre la crescita



Fusarium graminearum (a sinistra)
e *Fusarium verticillioides* (a destra)

fungina di *F. graminearum* fino al 30%. L'efficacia degli estratti grezzi totali in vivo a oggi non è ancora stata saggiata ma i risultati preliminari rendono le bucce candidate promettenti per la formulazione antifungini multifunzionali e sostenibili.

Potenziali applicazioni cosmetiche e mediche

Gli estratti di buccia hanno mostrato proprietà antiossidanti in modelli sperimentali con eritrociti umani e animali, grazie a un'inibizione della perossidazione lipidica fino all'80-85%, a concentrazioni di circa 2,5 mg/mL (Singh & Rajini, 2008). Le antocianine, pigmenti responsabili della colorazione rossa o violacea, dei fiori, dei fusti, della buccia e della polpa di alcune cultivar, potenziano ulteriormente la capacità antiossidante, come evidenziato da Sampaio *et al.* (2021) in uno studio su dieci varietà di patate pigmentate, in cui tutte le bucce hanno mostrato attività *radical scavenging* significativa, con la cultivar Rosemary che presentava i valori più elevati. L'ottimizzazione dei parametri di estrazione (temperatura, solvente, tempo) ha permesso di incrementare la resa in composti fenolici e la relativa attività antiossidante (Amado *et al.*, 2014), con risultati ulteriormente migliorabili attraverso l'impiego di solventi eutettici naturali (NADES) e tecniche ecocompatibili basate su ultrasuoni o microonde (Calcio Gaudino *et al.*, 2020). L'elevata attività antiossidante dei PPE è di particolare rilevanza per la formulazione di prodotti cosmetici ad azione *anti-aging* e fotoprotettiva, poiché lo stress ossidativo è un meccanismo chiave nei processi di invecchiamento cutaneo, infiammazione cronica e degradazione del collagene.

Oltre all'effetto antiossidante, diversi studi hanno documentato proprietà antinfiammatorie degli estratti di buccia di patata (Kenny O.M. *et al.*). In modelli animali, l'applicazione topica o orale di PPE ha mostrato una riduzione dell'infiltrato infiammatorio e una maggiore deposizione di collagene nei tessuti trattati, favorendo la rigenerazione e la guarigione. Tali risultati sono attribuibili all'interazione sinergica tra polifenoli e altre molecole bioattive, che modulano la risposta infiammatoria attraverso la regolazione delle vie di segnalazione redox

e dell'espressione di citochine pro-infiammatorie. Parallelamente, gli estratti presentano una spiccata attività antimicrobica e antivirale: Silva-Beltrán *et al.* (2017) hanno dimostrato che gli estratti fenolici di buccia di patata inibiscono la crescita di *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* e *Staphylococcus aureus* con concentrazioni minime inibenti (MIC) di pochi mg/mL e riducono la carica di fagi modello di virus enterici (Av05 e MS2) dopo tre ore di incubazione. Queste caratteristiche suggeriscono un potenziale impiego dei PPE nella produzione di materiali “attivi” per uso cosmetico e biomedico, come film o garze impregnate a rilascio controllato, con duplice funzione antiossidante e antimicrobica. In tale contesto, Gebrechistos *et al.* (2020) hanno sviluppato film biocompatibili contenenti estratto di buccia di patata, dimostrando efficacia nel limitare la proliferazione microbica e migliorare la conservabilità dei prodotti, un risultato estendibile anche a medicazioni e rivestimenti cutanei.

Un altro ambito di particolare interesse riguarda la capacità dei PPE di stimolare la sintesi di collagene dermico. Suto *et al.* (2019) hanno riportato che un estratto etanolic di buccia di patata induce la produzione di collagene di tipo I in fibroblasti dermici umani normali (NHDF) attraverso l'attivazione delle vie di segnalazione PI3K/Akt e MAPK/ERK mediate dal recettore del TGF- β , senza coinvolgere la via Smad. Tale meccanismo di azione suggerisce un'attività pro-rigenerativa e anti-invecchiamento, indicativa del potenziale impiego dei PPE come ingredienti funzionali in cosmetici *anti-age*, sieri rivitalizzanti o lozioni ristrutturanti per la pelle fotodanneggiata. In combinazione con l'effetto antiossidante, l'attività pro-collagenica dei PPE offre una base scientifica per l'uso in formulazioni mirate al mantenimento dell'integrità della matrice extracellulare.

L'efficacia biologica della buccia di patata è stata confermata anche da applicazioni cliniche storiche: già negli anni '90 le bucce fresche venivano utilizzate come medicazione per ustioni e ferite, dimostrando capacità di mantenere l'umidità, ridurre il dolore e accelerare la guarigione. Studi più recenti hanno mostrato che gel contenenti estratto di buccia di patata favoriscono la riparazione tissutale e la

neoformazione di collagene, riducendo al contempo lo stress ossidativo e l'infiammazione (Santoso *et al.*, 2024). Questi dati, uniti alle proprietà antimicrobiche e antiossidanti, aprono prospettive per l'impiego medico-topico dei PPE in preparazioni cicatrizzanti e nella medicina rigenerativa. **(Tabella 2).**

Tabella 2 – Possibili impieghi medico-topici degli estratti da bucce di patata

Attività	Meccanismo principale	Ref	Potenziali Applicazioni
Anti-aging e dermocosmesi	Attivazione vie Akt/ERK → ↑ collagene tipo I (TGF-β-mediato)	Suto <i>et al.</i> , 2019	Creme e sieri anti-età, prodotti rigeneranti
Antiossidante	Scavenging radicali liberi da acidi clorogenico e caffeico	Silva-Beltrán <i>et al.</i> , 2017	Protezione cutanea da stress ossidativo e fotoinvecchiamento
Antimicrobico	Alterazione membrane batteriche da fenoli/ glicoalcaloidi	Torres <i>et al.</i> , 2019	Formulazioni anti-acne, antisettiche naturali
Antinfiammatorio e cicatrizzante	Riduzione infiltrato infiammatorio, ↑ deposizione collagene	Santoso <i>et al.</i> , 2024; Tiarasanti <i>et al.</i> , 2024	Gel topici, patch rigenerativi, biomateriali
Uso clinico diretto	Mantenimento umidità ferita, barriera fisica e antimicrobica	Lal <i>et al.</i> , 1990	Medicazioni naturali per ustioni e ferite superficiali

Nonostante le potenzialità, permangono criticità legate alla sicurezza e alla standardizzazione. I glicoalcaloidi α -solanina e α -chaconina, naturalmente presenti nella buccia, possiedono attività tossica dose-dipendente; pertanto, è indispensabile controllare e ridurre il loro contenuto attraverso processi di purificazione adeguati (Vescovo *et al.*, 2025). Un'ulteriore difficoltà è rappresentata dall'elevata variabilità fitochimica della buccia, influenzata da fattori genetici (cultivar),

agronomici (luce, umidità, fertilizzazione) e post-raccolta (conservazione, esposizione alla luce, danni meccanici), che rende complessa la standardizzazione dei PPE (Sampaio *et al.*, 2021). Anche la stabilità dei composti fenolici costituisce un limite applicativo, poiché la loro degradazione in presenza di luce, calore o ossigeno può ridurre l'efficacia dei prodotti finiti. Infine, la biodisponibilità cutanea e la capacità dei principi attivi di permeare lo strato corneo restano da verificare in studi preclinici e clinici approfonditi.

Inoltre, lo sviluppo di sistemi di rilascio avanzati – liposomi, nanoparticelle, idrogel o gel bioadesivi – potrà migliorare la penetrazione cutanea, la stabilità e l'efficacia degli estratti. In campo cosmetico, i PPE possono essere incorporati in creme, sieri e maschere con effetto antiossidante, idratante e rigenerante; in ambito medico, trovano potenziale applicazione nella produzione di bendaggi bioattivi, garze antimicrobiche o materiali per la guarigione di ferite. La multifunzionalità della matrice, che racchiude attività antiossidante, antimicrobica e stimolante per la matrice extracellulare, offre inoltre l'opportunità di sviluppare formulazioni sinergiche e naturali, rispondendo alla crescente domanda di prodotti “green” e biocompatibili.

In conclusione, la buccia di patata si configura come una risorsa naturale di grande interesse scientifico e tecnologico, capace di coniugare sostenibilità e innovazione. Gli estratti da essa ottenuti mostrano un ampio spettro di attività biologiche – antiossidante, antinfiammatoria, antimicrobica e pro-collagenica – che li rendono idonei come ingredienti funzionali in cosmetici anti-invecchiamento, prodotti dermolenitivi e dispositivi medici rigenerativi. Rimangono da affrontare aspetti critici legati a tossicità, stabilità, standardizzazione e biodisponibilità, che dovranno essere risolti attraverso ulteriori ricerche in vivo, studi clinici controllati e adeguate valutazioni tossicologiche. Nonostante tali sfide, la valorizzazione della buccia di patata rappresenta un esempio virtuoso di bioeconomia circolare, in cui un sottoprodotto agricolo a basso costo si trasforma in una fonte sostenibile di ingredienti ad alto valore aggiunto per la salute e il benessere umano.

Bibliografia

- Amado I.R. *et al.*, *Optimisation of antioxidant extraction from Solanum tuberosum potato peel waste by surface response methodology*, "Food Chemistry" 165 (2014), pp. 290-9. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.05.103
- Calcio Gaudino E. *et al.*, *Emerging Processing Technologies for the Recovery of Valuable Bioactive Compounds from Potato Peels*, "Foods", 9-11 (2020), pp.1598. DOI: 10.3390/foods9111598
- Chowański S. *et al.*, *Review of Bioinsecticidal Activity of Solanaceae Alkaloids*, "Toxin" 8-60 (2016), pp. 1-28. DOI: 10.3390/toxins8030060
- Friedman M. *et al.*, *Glycoalkaloid and calystegine contents of eight potato cultivars*, "Journal of Agriculture and Food Chemistry" 51-10 (2003), pp. 2964-73. DOI: 10.1021/jf021146f
- Gebrechistos H.Y. *et al.*, *Potato peel extracts as an antimicrobial and potential antioxidant in active edible film*, "Food Science Nutrition" 8-12 (2020), pp. 6338-6345. DOI: 10.1002/fsn3.1119
- Kenny O.M. *et al.*, *Anti-inflammatory properties of potato glycoalkaloids in stimulated Jurkat and Raw 264.7 mouse macrophages*, "Life Sciences" 92-13 (2013), pp.775-82. DOI: 10.1016/j.lfs.2013.02.006
- Pacifico D. *et al.*, *Sustainable Use of Bioactive Compounds from Solanum Tuberosum and Brassicaceae Wastes and by-Products for Crop Protection – A Review*, "Molecules" 26-8 (2021), pp. 2174. DOI: 10.3390/molecules26082174
- Pacifico D. *et al.*, *Potato Peel as a Natural Source of Biocompounds for Cereal Fungal Control*, "ACS Food Science & Technology" 4-8 (2024), pp. 1864-1874 DOI: 10.1021/acsfoodscitech.4c00189
- Palmieri A., *Marginalità ormai al limite per la patata italiana*, "L'Informatore Agrario" 40 (2022), pp. 54-57.
- Pentangelo A. *et al.*, *Effects of highly concentrated KCl foliar spray for managing the occurrence of the internal brown spot, a physiological disorder of potato tubers*, "The Journal of Horticultural Science and Biotechnology" 96-4 (2021), pp. 527–537 DOI: 10.1080/14620316.2020.1869108
- Santoso A.W. *et al.*, *Histopathological Evaluation of Wound Healing and Anti-Inflammatory Effects of Granola Potato Peel Ethanol Extract in Rat Oral Mucosa*, "Journal of Experimental Pharmacology" 16 (2024), pp.377-395. DOI: 10.2147/JEP.S487373
- Sampaio S.L. *et al.*, *Phenolic composition and cell-based biological activities of ten coloured potato peels (Solanum tuberosum L.)*, "Food Chemistry" 363 (2021), pp. 130360. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130360
- Silva-Beltrán N.P. *et al.*, *Phenolic Compounds of Potato Peel Extracts: Their Antioxidant Activity and Protection against Human Enteric Viruses*, "Journal of Microbiology and Biotechnology" 27-2 (2017), pp. 234-241. DOI: 10.4014/jmb.1606.06007
- Singh N. *et al.*, *Antioxidant-mediated protective effect of potato peel extract in erythrocytes against oxidative damage*, "Chemico-Biological Interactions" 173-2 (2008), pp. 97-104. DOI: 10.1016/j.cbi.2008.03.008
- Suto M. *et al.*, *A Potato Peel Extract Stimulates Type I Collagen Synthesis via Akt and ERK Signaling in Normal Human Dermal Fibroblasts*, "Biological and Pharmaceutical Bulletin", 42-9 (2019), pp.1510-1516. DOI: 10.1248/bpb.b19-00193
- Smith D.B. *et al.*, *Synergism between the potato glycoalkaloids alpha-chaconine and alpha-solanine in inhibition of snail feeding*, "Phytochemistry" 57 (2001), pp. 229-234. DOI: 10.1016/s0031-9422(01)00034-6
- Van Loon M.P. *et al.*, *Insights into the potential of potato production across Europe*, "Crop and Environment", 4-2 (2025), pp. 97-106. DOI: 10.1016/j.crope.2025.03.002
- Vescovo D. *et al.*, *The Valorization of Potato Peels as a Functional Ingredient in the Food Industry: A Comprehensive Review*, "Foods" 14-8 (2025), pp. 1333. DOI: 10.3390/foods14081333

5

Caso studio: valorizzazione dei composti bioattivi presenti nelle Brassicaceae

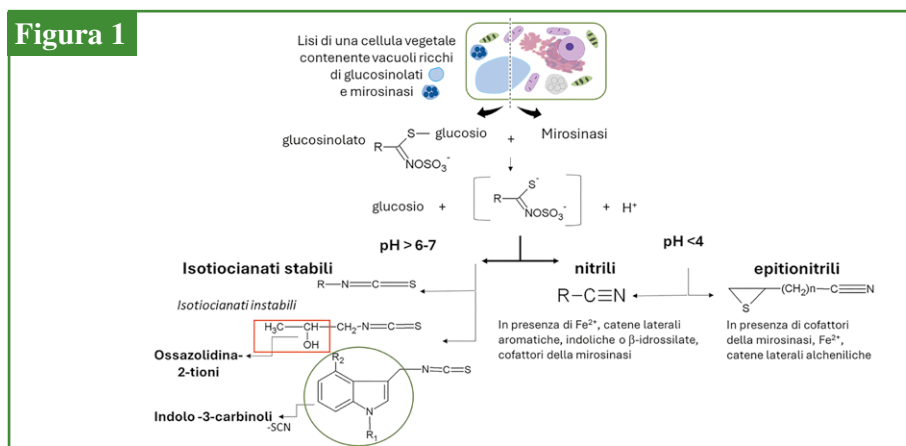
Pagnotta E., Ugolini L., Carloni M., Massafra A., Bassolino L.
Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA)

La famiglia delle *Brassicaceae* appartiene all'ordine Brassicales e comprende a oggi più di 300 diversi generi per un totale di circa 4000 specie classificate che risultano distribuite a livello globale. L'importanza economica di questa famiglia risiede nella grande diversità delle colture che la costituiscono e nell'elevata varietà di caratteristiche agronomiche e funzionali che esse possiedono: dalle radici commestibili, a una grande varietà di ortaggi, ai semi oleosi per l'industria e l'alimentazione. La valenza commerciale di queste piante ricade principalmente sulle brassiche oleaginose, con la colza quale coltura principale, al terzo posto nel consumo mondiale dopo soia e palma. Il suo successo è il risultato di processi di selezione che hanno portato alla creazione di due varietà principali, una tipicamente industriale caratterizzata da alti livelli di acido erucico, adatta quindi al mercato dei lubrificanti, cosmetici e detergenti, allo sviluppo di biodiesel e di formulazioni per il controllo dei patogeni in agricoltura; l'altra nota come "canola" caratterizzata invece solo dal 2% di acido erucico e da bassi livelli di un particolare glucosinolato (GSL), la progoitrina, dannoso per la crescita e la riproduzione degli animali da reddito, in quanto goitrogeno se assunto ad alte dosi con l'alimentazione.

Il sistema glucosinolati/mirosinasi

I GSL sono metaboliti secondari contenenti zolfo la cui variabilità strutturale è riflesso della grande biodiversità della famiglia delle *Brassicaceae*. A oggi, sono state identificate circa 130 diverse strutture chimiche, anche se il numero è in costante aggiornamento. Nella pianta i GSL, come altre classi di metaboliti secondari, svolgono un ruolo nei processi di difesa contro patogeni microbici o insetti erbivori agendo come molecole di trasmissione di segnali a livello cellulare, oppure attivando altri tipi di risposte quali la chiusura degli stomi, l'apoptosi o l'accumulo di callosio. Insieme all'enzima mirosinasi (EC 3.2.1.147), in grado di idrolizzare il legame β -tioglucosidico che

li caratterizza, il GSL formano un sistema molecolare endogeno di difesa, tipico delle *Brassicaceae*. In pianta, il sistema GSL/mirosinasi è compartimentalizzato in tessuti diversi. A volte, metabolita ed enzima possono anche essere presenti all'interno della stessa cellula ma in vacuoli differenti, il cui contenuto può venire in contatto con l'enzima solo in seguito a lisi cellulare che quindi ha come conseguenza l'innesco della reazione che porta alla formazione di una serie di prodotti di idrolisi a diversa attività biologica (**Figura 1**).



Prodotti di idrolisi dei glucosinolati in funzione della diversa struttura chimica della catena laterale (R), della presenza di specifiche proteine o cofattori dell'enzima mirosinasi e delle condizioni fisico-chimiche di reazione. Tratta e adattata da: Pacifico D. et al., 2021, Molecules <https://doi.org/10.3390/molecules26082174>

I prodotti di idrolisi, tra cui gli isotiocianati, sono stati da tempo riconosciuti come molecole a elevata attività biologica contro diverse specie di organismi patogeni per le piante, ma anche come molecole utili per attivare la detossificazione da cancerogeni e i meccanismi chemiopreventivi nell'uomo e negli animali. Le specie industriali di *Brassicaceae*, in particolare le oleaginose, sono state oggetto di studio negli ultimi anni per il loro elevato potenziale relativo sia all'utilizzo del loro olio che dei pannelli residui di estrazione in un'ottica di bioraffineria green. I pannelli residui di estrazione dell'olio sono un materiale particolarmente ricco di GSL e polifenoli e possono essere utilizzati,

se opportunamente formulati, tal quali, sotto forma di pellet, farine o come base di partenza per estratti altamente concentrati in molecole bioattive. Trovano applicazione sia in agricoltura, per il contenimento dei patogeni, sia nella valutazione della loro efficacia in ambito *feed/food* e *pharma*, grazie alle interessanti attività antiossidanti, antinfiammatorie, anti-nocicettive e protettive del sistema cardiovascolare. Dal punto di vista molecolare, comprendere i meccanismi che sottendono alla sintesi e regolazione della sintesi di GSL risulta essenziale per efficientare, attraverso approcci agronomici o di miglioramento genetico avanzato, il loro accumulo e biodisponibilità. A titolo di esempio, in un recente lavoro è stato indagato l'effetto di Na_2SO_4 nella modulazione del contenuto di GSL alifatici in diversi organi di una selezione di rucola da anni in studio sia per le sue caratteristiche di “pianta trappola” per nematodi che per gli utilizzi in ambito nutraceutico dei suoi residui di disoleazione (Pagnotta *et al.*, 2025). Lo studio ha evidenziato che la sintesi di questi composti è molto stabile in rucola sebbene si sia osservata l'induzione di glucoerucina nelle radici. Sarà necessario acquisire ulteriori conoscenze di tipo genomico sui geni coinvolti nella sintesi dei GSL nonché ottimizzare le pratiche agronomiche per indurre l'accumulo di specifici GSL in organi utili alla valorizzazione dell'intera pianta.

Applicazioni in agricoltura: biofumigazione, attività biostimolante e servizi agrosistemici

Kirkegaard e Matthiessen diedero per primi una chiara definizione di biofumigazione nel 2004: “la soppressione di parassiti e malattie da parte di piante contenenti GSL, derivante in modo specifico dalle proprietà dei prodotti di idrolisi dei GSL, in particolare dagli isotiocianati (ITC), rilasciati dai tessuti di *Brassicaceae* incorporati nel terreno o dalle colture in rotazione”.

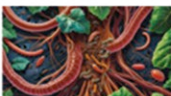
Le principali strategie di biofumigazione a oggi utilizzate sono le seguenti: i) sovesci biofumiganti; ii) formulazioni solide a base di

pellet o biomasse in polvere contenenti GSL a elevate concentrazioni; iii) formulazioni liquide in grado di rilasciare ITC in emulsioni con oli vegetali.

Le piante da sovescio sono selezionate principalmente in base alla concentrazione di GSL nella parte aerea e alla resa in biomassa. Al momento della massima fioritura vengono trinciate e immediatamente incorporate nel terreno dove rilasciano direttamente gli ITC. Queste piante svolgono anche un'importante azione di cover crops, data la loro elevata produzione di biomassa, e risultano generalmente resistenti a climi aridi-semiaridi. A oggi vengono considerati due diversi tipi di piante da sovescio, le cosiddette biofumiganti (*Brassica juncea*, *Brassica nigra*, *Brassica carinata*) che contengono alti livelli del GSL sinigrina, idrolizzato ad allil-ITC dalla mirosinasi, e le cosiddette piante trappola (*Eruca sativa*, *Raphanus sativus*) che hanno la caratteristica di contenere nelle radici GSL tiofunzionalizzati, ossia contenenti atomi di zolfo nella loro catena laterale, i cui prodotti di idrolisi sono in grado di attirare nematodi galligeni e di bloccarne lo sviluppo larvale andando ad abbattere la loro presenza nel terreno.

Le formulazioni solide a base di farine disoleate o di altre biomasse selezionate per l'elevata concentrazione di GSL possono essere riattivate mediante l'aggiunta di farine selezionate contenenti alta attività mirosinica in modo da rilasciare ITC nel terreno anche attraverso distribuzione meccanizzata come trattamenti pre-semina. La loro composizione chimica, ricca di materia organica, le rende inoltre degli ottimi ammendanti per il terreno, il quale si arricchisce di nutrienti prima dei nuovi impianti. Le formulazioni liquide infine trovano il loro razionale nella natura idrofobica degli ITC che ha suggerito la possibilità di creare prodotti liquidi a base di emulsione di olio vegetale in acqua. Dopo la distribuzione dell'emulsione, un sottile microfilm di olio permane sugli organi vegetali, esercitando su alcuni patogeni un'azione fisica di soffocamento potenziata dall'effetto allelopatico degli ITC.

In **figura 2** sono riportate le principali attività biologiche-biofumiganti individuate a oggi per i prodotti di idrolisi dei GSL, associate ai GSL che le inducono.

Figura 2	Attività antimicrobica contro funghi e pseudofunghi		Glucocapparina, Sinigrina, Gluconapina, Glucobrassicinapina Glucorafanina, Glucorafenina Glucotropeolina, Gluconasturtina
	Attività contro nematodi, elateridi insetti e artropodi		Sinigrina, Gluconapina, Glucobrassicinapina, Glucorafanina, Glucorafenina, Glucotropeolina, Gluconasturtina, Glucosinolati Indolici
	Attività contro piante infestanti e parassite		Glucosinolati Indolici

Principali attività dei glucosinolati e dei loro prodotti di idrolisi contro stress biotici nella protezione delle piante. I glucosinolati precursori a oggi studiati per ogni azione sono evidenziati. Tratta e adattata da: Pacifico D. et al., 2021, Molecules (<https://doi.org/10.3390/molecules26082174>)

Infine, le spiccate proprietà antifungine degli ITC derivati dall'idrolisi dei GSL, hanno incoraggiato l'utilizzo di queste molecole bioattive nella fase di post-raccolta sia su frutti come pera e fragole che su cereali come il mais; in particolare composti volatili come allile, benzile o feniletil ITC sono in grado di inibire la crescita di diverse specie fungine quali *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*, *Aspergillus niger*, *Fusarium verticillioides* e controllare lo sviluppo di micotossine sia in vitro che nei prodotti alimentari (Pacifico *et al.*, 2021).

Oggi, in un'ottica di agricoltura moderna in continuo equilibrio tra sostenibilità e produttività e in un contesto di importanti cambiamenti climatici, le *Brassicaceae* rappresentano una risorsa strategica non solo per la protezione da patogeni ma anche per migliorare la resistenza e risposta agli stress ambientali. Infatti, l'elevato contenuto di proteine e sostanze bioattive presenti nei panelli di disoleazione delle brassiche oleaginose può essere reso biodisponibile per lo sviluppo di biostimolanti che, in un contesto di crescente attenzione all'economia circolare, possono ridurre l'utilizzo e l'impatto di prodotti fertilizzanti di sintesi. Come definito dall'European Biostimulant Industry Council (EBIC), un biostimolante è "una sostanza e/o microrganismi applicati alle piante con l'intenzione di migliorare l'efficienza nutrizionale, la tolleranza agli stress abiotici

e/o le caratteristiche qualitative delle colture, indipendentemente dal loro contenuto di nutrienti”. Nello specifico delle brassiche, da alcuni sottoprodotti come i pannelli di disoleazione (ad es. *Eruca sativa*, *Crambe abyssinica*) o foglie e steli (ad es. *Brassica oleracea*), è possibile produrre idrolizzati proteici tramite idrolisi chimica o enzimatica. Questi idrolizzati sono composti da una miscela di peptidi, aminoacidi liberi e altre molecole bioattive che interagiscono con il metabolismo delle piante, stimolando lo sviluppo radicale, migliorando l’efficienza nutrizionale e la fotosintesi, nonché la crescita vegetale, in particolare sotto condizioni di stress abiotico come siccità, salinità e temperature elevate. Le valutazioni sull’effetto di un idrolizzato proteico ottenuto da farina disoleata di *Crambe abyssinica* mostrano come questi possano avere un effetto stimolante sullo sviluppo radicale indipendente dalla loro concentrazione di azoto, distinguendosi quindi dai comuni fertilizzanti (Ugolini *et al.*, 2023). Un aspetto importante da considerare è la presenza, all’interno degli idrolizzati, degli stessi GSL. Infatti, lo studio della relazione dose-risposta è fondamentale, in quanto è stato osservato che alte concentrazioni possono risultare fitotossiche o auto-tossiche, inibendo dunque la crescita delle piante (Giannini *et al.*, 2021). Sicuramente l’uso di biostimolanti e la loro produzione da scarti e sottoprodotti favorisce sistemi a ciclo chiuso, riducendo l’impatto ambientale delle pratiche agricole. Inoltre, il grande valore in termini di molecole bioattive presente nella famiglia delle *Brassicaceae* pone anche l’attenzione sull’uso e la valorizzazione di quelle che vengono definite “minor crop” nell’industria alimentare. Un’agricoltura sostenibile deve, inoltre, salvaguardare gli insetti impollinatori e altri artropodi utili che sono minacciati dall’uso intensivo di agrofarmaci, dalla rimozione delle tare produttive e delle cosiddette specie infestanti, nonché dall’introduzione di organismi non autoctoni. Una particolare attenzione va posta nella tutela dei siti di nidificazione e di *microhabitat* diversificati, fondamentali per la deposizione delle uova e lo sviluppo larvale di molte specie di apoidei selvatici. Per questo, nelle aree agricole intensive è

prioritario conservare o ripristinare siepi e vegetazione spontanea, che forniscano nettare, polline, rifugio e substrati ideali per la nidificazione. Un'ulteriore strategia consiste nell'utilizzo di miscele di semi di fiori selvatici e piante nettarifere da seminare ai margini dei campi, capaci di attrarre api, sirfidi e altri insetti utili. In alcuni Paesi europei, queste pratiche sono state promosse attraverso la semina di specie vegetali selezionate e l'erogazione di sussidi agli agricoltori, con l'obiettivo di preservare gli habitat e sostenere sistemi multi-trofici (Nicholls and Altieri, 2013). In quest'ottica, la nuova Politica Agricola Comune (PAC) 2023–2027 della Commissione Europea (https://agriculture.ec.europa.eu/cap-my-country_it) sostiene la transizione verso un'agricoltura e una silvicoltura più sostenibili. I beneficiari di aiuti basati sulla superficie coltivata devono rispettare obblighi specifici per la tutela della biodiversità, come la diversificazione colturale, la conservazione dei prati permanenti e l'adozione di pratiche ecologiche nelle cosiddette “aree di interesse ecologico”. In questo contesto, le specie appartenenti all'ordine delle Brassicales si rivelano particolarmente efficaci. Infatti, alcune di queste specie, spesso impiegate come colture da sovescio o copertura, producono abbondante nettare e polline, risultando molto attrattive per un ampio spettro di impollinatori, in particolare api mellifere. La loro fioritura, spesso precoce o in momenti in cui altre fonti di cibo scarseggiano, contribuisce a colmare i vuoti temporali nella disponibilità di risorse, garantendo continuità alimentare e favorendo la presenza stabile degli insetti utili all'impollinazione. L'inserimento programmato di brassiche nelle rotazioni colturali rappresenta dunque una strategia vantaggiosa non solo per la fertilità del suolo, ma anche per il sostegno concreto alla biodiversità funzionale degli agroecosistemi. Oltre alla loro funzione ecologica in campo, recenti studi hanno esplorato l'utilizzo di sottoprodotti, quali farine disoleate di *Brassica nigra* ed *Eruca sativa*, miscelate nei canditi utilizzati come alimento per api, per valutarne l'effetto sulle infezioni da *Nosema ceranae*, sia in laboratorio che in campo. *N. ceranae* è un microsporidio parassita che infetta l'intestino

delle api, compromettendo le loro funzioni digestive e immunitarie, riducendo la vitalità degli individui e contribuendo al declino delle colonie a livello globale. Le farine di *Brassicaceae* hanno mostrato risultati promettenti su api infette da *N. ceranae* evidenziando, a livello intestinale, la presenza di ITC e dunque della completa attivazione del sistema GSL-MYR per la difesa delle api dall'infezione (Ugolini *et al.*, 2021).

Applicazioni industriali: dall'alimentare al non food

Il successo evolutivo della famiglia delle *Brassicaceae*, evidenziato dalla vasta biodiversità di specie diffuse in tutto il mondo, si riflette anche nella loro versatilità che consente un'ampia gamma di applicazioni industriali, che, oltre al settore agronomico già analizzato, trovano impiego nel settore alimentare, cosmetico, farmaceutico e nutraceutico, fino ai settori energetico e dei materiali bio-based. Tra le specie più conosciute a livello industriale rientrano i cavoli di tutte le varietà (*Brassica oleracea*), le senapi, in particolare *Brassica nigra* e *Brassica juncea*, nota in particolare per la ricetta della senape di Digione, la colza (*Brassica napus*), il rafano (*Armoracia rusticana*), la rucola (*Eruca sativa*) e molte altre. Le loro applicazioni industriali si fondano su una composizione chimica particolarmente ricca. I già citati GSL, olio, proteine di alta qualità, composti fenolici e fibre rappresentano il patrimonio biochimico che rende queste piante interessanti per molte filiere produttive.

In ambito alimentare, le *Brassicaceae* non sono utilizzate esclusivamente come ortaggi freschi, ma anche come ingredienti funzionali e nutraceutici in numerose formulazioni industriali. L'estrazione di composti bioattivi, in particolare GSL e ITC, ha aperto nuove strade per la produzione di alimenti funzionali con proprietà antiossidanti, antinfiammatorie e potenzialmente chemioprotettive (Testai *et al.*, 2022). Inoltre, diverse industrie alimentari utilizzano estratti di *Brassicaceae* come agenti aromatizzanti o conservanti naturali gra-

zie alla loro ricchezza in precursori degli ITC e antiossidanti. Gli oli essenziali di alcune senapi, ad esempio, possono essere impiegati come conservanti e antimicrobici naturali, ma anche gli ITC stessi hanno mostrato proprietà interessanti a basse concentrazioni a partire dal mantenimento della frutta in post-raccolta fino alla conservazione del pane tagliato o di prodotti da forno di largo consumo.

Un settore in forte crescita negli ultimi anni è quello dei prodotti fermentati a base di *Brassicaceae*. A partire da cibi tradizionali e un tempo conosciuti solo a livello regionale come i crauti altoatesini o il kimchi coreano, ottenuti dalla fermentazione lattica di particolari varietà di cavolo, si sta sviluppando un rinnovato interesse in alimenti probiotici, sempre più oggetto di produzioni industriali standardizzate destinate sia al mercato europeo che internazionale. La fermentazione non solo prolunga la *shelf-life*, ma migliora anche la biodisponibilità di alcuni nutrienti e composti bioattivi utili per il mantenimento di un organismo in salute.

Nella moderna alimentazione, la crescente consapevolezza ambientale e sanitaria, infine, ha reso sempre più urgente la necessità di ridurre il consumo di carne e di trovare fonti proteiche alternative più sostenibili. In questo contesto, si stanno esplorando numerose alternative proteiche vegetali, oltre a quella nota delle leguminose. Le farine di *Brassicaceae* sono spesso sottoprodotti della disoleazione dei semi o della lavorazione di scarti di orticole; dunque, possono contribuire alla nascita e sostentamento di filiere più circolari e sostenibili, riducendo gli sprechi e valorizzando scarti agricoli. Le proteine estratte da semi di canola, ad esempio, sono studiate come fonti proteiche vegetali alternative alla soia, grazie al loro profilo amminoacidico, particolarmente ricco di amminoacidi essenziali, sebbene l'uso di queste farine sia ancora limitato a causa della presenza di alcuni composti anti-nutrizionali tipici delle *Brassicaceae*, come l'acido erucico nei semi di colza e senapi, i fitati, o alcuni GSL. Per questi ultimi, al momento non esistono limiti suggeriti per il consumo umano dall'EFSA, mentre sono evidenziati valori di riferimento stringenti in ambito mangimistico. A livello alimentare,

di tutte le *Brassicaceae* note e utilizzate per alimentazione umana, sono regolamentate in tal senso solo la *Brassica rapa* L. e la colza, *Brassica napus* L., il cui contenuto di farine proteiche è previsto al 7% massimo in pane e panini e fino al 20% in barrette ai cereali e cereali misti per colazione, con l'indicazione di segnalare la presenza di allergeni della senape (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32017R2470>). In generale per queste specie sono da tenere sotto controllo i livelli di alcuni GSL potenzialmente dannosi per la salute come progoitrina, sinalbina e neoglucobras-sicina, ma appunto non esistono ancora limiti precisi a riguardo. I progressi nella tecnologia alimentare stanno permettendo di sviluppare tecniche di estrazione, idrolisi, fermentazione e purificazione sempre più efficaci e in grado di valorizzare il contenuto di molecole bioattive delle brassiche, minimizzando il contenuto di potenziali anti-nutrizionali e/o allergeni.

In ambito non-food, è senz'altro la colza la specie più commercializzata ed utilizzata a livello mondiale, il cui consumo è stato inizialmente considerato per la produzione di olio tecnico e biocarburante, in particolare biodiesel. Oggi anche altre specie vengono studiate in questo senso, come *Eruca sativa* nelle zone centro meridionali dell'Asia e *Camelina sativa*, in America, Canada e Nord-Europa. Gli oli delle *Brassicaceae*, per il loro profilo di acidi grassi, sono facilmente esterificabili e rappresentano dunque una delle materie prime più diffuse per la produzione di esteri metilici destinati al settore energetico. I pannelli di disoleazione, come già discusso, possono essere ulteriormente valorizzati in diversi ambiti.

Un aspetto particolarmente interessante delle *Brassicaceae* è la loro rusticità: sono infatti spesso adatte a climi semi-aridi e aridi e possono essere coltivate anche in aree marginali con bassi input. Lo sviluppo di coltivazioni controllate, ma sempre a bassi costi di gestione, può portare, infatti, alla creazione di filiere per il settore della cosmesi e della farmaceutica naturale, sia per l'utilizzo degli oli che degli estratti ricchi in molecole bioattive che trovano impiego nella produzione di creme, detergenti e lozioni, come pure

formulazioni ad azione antibatterica e sebo-regolatrice. A livello farmacologico, infine, sono tanti gli studi di efficacia in vitro e in vivo per prodotti e/o molecole bioattive derivati da *Brassicaceae* in diversi ambiti, dalla protezione della salute cardiovascolare, all'attività antitumorale, antinfiammatoria, o di controllo del dolore neuropatico. Sull'uomo sono ormai disponibili oltre un centinaio di trial clinici sul sulforafano, il primo ITC identificato come responsabile degli effetti antiossidanti e antitumorali dei broccoli nei primi anni Novanta; una decina riguardano il feniletil ITC o nasturtina, quattro la rucola, e quattro la *Camelina sativa* per ora tutti legati alla particolare ricchezza in omega 3 del suo profilo acidico (<https://clinicaltrials.gov/>, data di accesso 11 agosto 2025).

La famiglia delle *Brassicaceae* rappresenta una risorsa strategica e multifunzionale per affrontare alcune delle principali sfide dell'agricoltura e dell'alimentazione contemporanee: dalla sostenibilità produttiva alla protezione degli agroecosistemi, dalla sicurezza alimentare alla promozione della salute umana. La valorizzazione dei sottoprodotti di queste colture – in particolare farine disoleate e residui di lavorazione – offre opportunità concrete per sviluppare filiere circolari in cui nutraceutica, biostimolazione, biofumigazione e protezione degli impollinatori possano integrarsi e rafforzarsi reciprocamente (**Figura 3**).

Per tradurre queste potenzialità in soluzioni efficaci e scalabili, è fondamentale promuovere strategie sinergiche che includano: l'adozione di sistemi colturali a basso input anche in aree marginali, programmi di miglioramento genetico mirati alla riduzione di composti anti-nutrizionali o accumulo di specifici GSLs, lo sviluppo di tecnologie estrattive in grado di selezionare e purificare le molecole bioattive, e l'inserimento sistematico delle brassiche in rotazioni colturali multifunzionali. È altresì necessaria una revisione del quadro normativo, ancora oggi limitante in ambito feed-food, spesso basato su criteri obsoleti e non aggiornati rispetto ai progressi scientifici. Un altro passo cruciale sarà il rafforzamento della ricerca interdisciplinare, promuovendo collaborazioni tra agricoltori,

Figura 3



Schema di una ideale bioraffineria basata sulla valorizzazione delle biomasse derivate da specie della famiglia delle Brassicaceae. I processi di conversione consentono l'ottenimento di una varietà di prodotti biobased ad alto valore aggiunto, tra cui biofumiganti, ingredienti alimentari, cosmetici, materiali per la salute e applicazioni biomediche, in un'ottica di economia circolare e sostenibilità

industria e mondo accademico. Solo attraverso un approccio olistico sarà possibile sfruttare appieno il potenziale delle *Brassicaceae*, che si candidano a essere un elemento chiave nella costruzione di sistemi agricoli e produttivi più resilienti, sostenibili e orientati alla salute, contribuendo in modo concreto alla transizione ecologica ed economica richiesta dalle sfide globali.

Bibliografia

- Giannini V. *et al.*, *Testing Eruca sativa defatted seed meal as a potential bioherbicide on selected weeds and crops*, "Industrial Crops and Products" 171 (2021), numero articolo 113834. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113834
- Kirkegaard J.A. *et al.*, *Developing and refining the biofumigation concept*, "Agroindustria" 3 (2004), pp 233-9.
- Nicholls, C. I., *et al.*, *Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review*, "Agronomy for Sustainable development", 33 (2013), pp. 257-274. DOI: 10.1007/s13593-012-0092-y
- Pacifico, D. *et al.*, *Sustainable Use of Bioactive Compounds from Solanum Tuberosum and Brassicaceae Wastes and by-Products for Crop Protection – A Review*, "Molecules", 26 (2021), numero articolo 2174. DOI: 10.3390/molecules26082174
- Pagnotta, E. *et al.*, *Effect of Sodium Sulfate Treatment on the Modulation of Aliphatic Glucosinolates in Eruca sativa Mill Organs at Flowering Stage*, "Applied sciences" 15 (2025), numero articolo 8757. DOI: 10.3390/app15158757

- Testai, L. *et al.*, *Cardiovascular benefits of Eruca sativa Mill. defatted seed meal extract: Potential role of hydrogen sulfide*, “Phytotherapy Research”, 36 (2022), pp. 2616 – 2627. DOI:10.1002/ptr.7479
- Ugolini, L. *et al.*, *Protein Hydrolysates from Crambe abyssinica Seed Cake as Potential Biostimulants for Root Development*, “Agronomy”, 13 (2023), numero articolo 2755. DOI:10.3390/agronomy13112755
- Ugolini, L. *et al.*, *Glucosinolate bioactivation by Apis mellifera workers and its impact on Nosema ceranae infection at the colony level*, “Biomolecules”, 11 (2021), numero articolo 1657. DOI: 10.3390/biom11111657

6

Tecnologie convenzionali e tecnologie green per la produzione di Bioestratti

Lo Scalzo R., Bianchi G., Calzone A.

Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA)

Tecnologie convenzionali

La valorizzazione degli scarti di produzione delle filiere vegetali passa per la produzione di biomolecole a diversa attività biologica. Lo studio delle loro possibili applicazioni deve necessariamente passare da un primo step di estrazione e purificazione. La scelta della tecnica di estrazione deve essere sottoposta ad attenta valutazione. È necessario infatti prendere in considerazione:

- a) preparazione e stabilizzazione del campione iniziale;
- b) tipologie molecolari coinvolte e stabilità chimico-fisica delle molecole estratte;
- c) tecniche cromatografiche dedicate che possano permettere la separazione dei composti di interesse;
- d) presenza di attività enzimatiche e strutturali endogene che abbiano come bersaglio le molecole di interesse.

Punto a. Per poter procedere a una buona estrazione del principio attivo di interesse, innanzitutto è consigliabile preparare il campione che dovrebbe presentare un'omogeneità accoppiata a una facilità di penetrazione della matrice estraente, che, se costosa, deve essere ridotta al minimo. Dato che l'acqua molto spesso rappresenta una componente preponderante di una matrice vegetale allo stato fresco (generalmente dal 50 al 90%), l'eliminazione dell'acqua è un passo fondamentale per ridurre il volume di estraente necessario. La disidratazione più semplice è rappresentata dall'essiccamento, ma questa tecnica, che prevede l'uso di alte temperature (generalmente 50-80 °C), molto spesso porta a una degradazione delle biomolecole, per cui si deve porre una grande attenzione a questo momento. Un buon metodo di uscita da questo problema è rappresentato dalla liofilizzazione, che prevede una sublimazione dell'acqua nella matrice effettuata a temperature molto basse (intorno a -40 °C) e sotto un vuoto molto spinto (minore di 100 mTorr). In questo modo, le specie chimiche componenti il residuo secco sono considerate inalterate, per cui questo metodo è molto interessante anche per la riduzione del volume da

estrarre. Purtroppo, si deve fare molto spesso attenzione a fenomeni di degradazione anche quando si lavora con un prodotto liofilizzato. Un esempio di questo è la matrice pomodoro, in cui, anche a seguito della liofilizzazione, si hanno delle perdite molto significative di licopene, un carotenoide che rappresenta il principale pigmento di questo frutto allo stadio maturo (Tan *et al.*, 2021).

Punto b. Tra i solventi in uso per l'estrazione dei principi attivi da una matrice vegetale, il migliore è rappresentato dall'etanolo, oppure da molecole simili, ad esempio il metanolo. L'etanolo, grazie a una elevata stabilità e biocompatibilità è molto impiegato, ad esempio, per la preparazione delle tinture madri dalle matrici vegetali in fitoterapia. È generalmente previsto l'uso di estratti preparati da 9 parti di etanolo ed 1 parte di materiale vegetale precedentemente essiccato. Allo stesso modo, la preparazione di estratti con lo scopo di isolare biomolecole prevede un approccio simile ma generalmente con un rapporto soluto:solvente da 1:10 a 1:20. Il soluto, ad esempio per la estrazione di componenti polifenolici, è rappresentato da materiale vegetale liofilizzato. Il vantaggio nell'uso dell'etanolo sta nella solvatazione delle molecole di interesse (generalmente i polifenoli sono facilmente solubili in etanolo) e nella coagulazione e precipitazione di materiale polimerico vegetale polisaccaridico e proteico, che viene eliminato per filtrazione o centrifugazione, iniziando a purificare il campione. Comunque, le miscele di estrazione prevedono anche l'uso di percentuali variabili di acqua, la cui presenza deve essere testata in prove preliminari per valutare la resa di estrazione. La resa di estrazione può essere migliorata attraverso trattamenti con ultrasuoni, che facilitano la intima interazione tra le molecole del solvente e la struttura del soluto, oppure attraverso la modifica del pH.

Nel caso studio riportato nel capitolo 4, le biomolecole di interesse sono i glicoalcaloidi steroidei (alfa-solanina ed alfa-chaconina) e le molecole polifenoliche, principalmente l'acido clorogenico ed i suoi isomeri, presenti nella buccia di patata. In questo caso, il migliore solvente da utilizzare per stabilizzare i composti di interesse è una miscela di etanolo ed acqua al 50%, acidificato con lo 0.2% di acido formico. La miscela

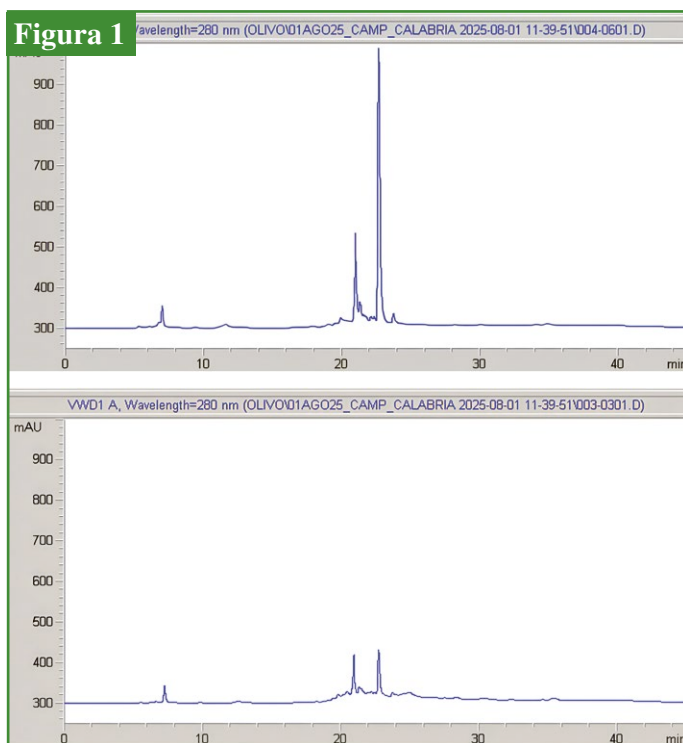
finale dovrebbe essere portata a pH di circa 3. Questo consente sia una migliore solubilizzazione dei glicoalcaloidi, grazie alla loro protonazione, sia una stabilizzazione delle sostanze polifenoliche, prevenendone l'ossidazione. Quest'ultima può infatti avvenire sia enzimaticamente a causa dalle ossidasi endogene (inibite dal basso valore di pH) sia spontaneamente per via chimica, molto più lenta a basso pH. Di solito, è sempre utile mantenere un livello elevato di solvente nell'estratto, almeno il 50%, al fine di prevenire fenomeni degradativi della matrice dovuti ad inquinamento di tipo microbico, che di solito è sensibilmente inibito a alti livelli di presenza di solvente.

Punto c. Data la presenza di varie classi di composti in un estratto vegetale, si rende necessaria una loro separazione, al fine di valutarne la bioattività individuale. Nel caso studio riportato in capitolo 4, il riferimento analitico è la matrice della buccia di patata e l'esigenza è separare i principali componenti ritenuti interessanti per la loro putativa attività antifungina. Qui, l'approccio utilizzato sfrutta le differenti caratteristiche chimiche in un sistema di estrazione in fase solida (SPE) che prevede la eluizione differenziata su un supporto cromatografico dell'estratto (resina C18 in questo caso), opportunamente trattato (Pacífico *et al.*, 2024): siccome i glicoalcaloidi hanno la proprietà di essere insolubili ad alto pH, l'estratto totale, acidificato a pH 3 con l'acido formico, è stato portato a un pH di circa 9 con una soluzione di ammoniacale all'1%. In questo modo, si è permessa la eluizione della componente fenolica, trattenendo la frazione dei glicoalcaloidi sul supporto cromatografico. Successivamente, si è eluita la frazione dei glicoalcaloidi riportando a pH 3 l'eluente. Nel caso delle bucce pigmentate, la frazione fenolica conteneva anche antocianine, separabili con una semplice estrazione liquido-liquido, utilizzando l'acetato di etile, che estrae selettivamente l'acido clorogenico ed i suoi derivati, lasciando le antocianine, evidentemente molto più solubili in acqua, nella fase acquosa. In questo modo è stato possibile valutare separatamente le attività biologiche delle singole classi di biomolecole presenti nel frazionato rispetto all'estratto totale, al fine di valutare eventuali effetti additivi, di sinergia od antagonismo.

Punto d. La estraibilità di biomolecole da una matrice complessa effettuata con la metodologia tradizionale può essere molto influenzata dalla presenza di diverse temperature, che possono influenzare notevolmente la composizione chimica dell'estratto oggetto di studio. Ad esempio, lo studio di estratti da campioni di frutti di melanzana oggetto di studio per la loro capacità antiossidante (Lo Scalzo *et al.*, 2010), ha avuto come risultato inaspettato un consistente aumento dei livelli di capacità antiossidante nei campioni di melanzana che erano stati trattati termicamente, simulando un processo di cottura per grigliatura e bollitura. La causa di questo fenomeno è stata attribuita da una parte alla relativa termostabilità dell'acido clorogenico, il principale componente antiossidante di tipo fenolico di questo frutto e dall'altra alla evidente inattivazione degli enzimi ossidasici endogeni, che sono riconosciuti come molto attivi nei confronti di substrati simili all'acido clorogenico. Un secondo esempio è relativo alla estrazione delle biomolecole presenti nelle drupe di olivo, il cui fitocomposto predominante è rappresentato dalla oleuropeina, appartenente alla classe dei secoiridoidi di tipo fenolico. Se l'estratto è condotto con solvente organico migliore per resa (etanolo al 70%) ed effettuato a temperatura ambiente con l'ausilio di ultrasuoni, abbiamo una resa in principio attivo sensibilmente minore (circa un ordine di grandezza) rispetto alla stessa procedura, ma utilizzando lo stesso solvente a temperatura di ebollizione. Evidentemente la oleuropeina in queste condizioni è termostabile e viene liberata nell'estratto dalle strutture cellulari in maniera molto più significativa con l'ausilio di alte temperature, come evidenziato dai cromatogrammi in **Figura 1**.

Tecnologie “green”: caso NADES

La crescente sensibilità verso la sostenibilità ambientale ha portato il mondo scientifico a cercare e sviluppare solventi *eco-compatibili* alternativi da utilizzare nell'estrazione di fitocomposti. L'obiettivo è



Cromatogrammi HPLC in fase inversa di estratto di drupe di olivo in EtOH 70% a t.a. (sotto) e dopo 1 ora di ebollizione a ricadere (sopra). La oleuropeina è rappresentata dal picco a tempo di ritenzione 22.5 minuti

impiegare solventi a basso impatto tossicologico in grado di ridurre o sostituire i tradizionali solventi organici (es. etanolo, metanolo). Negli ultimi dieci anni, i NADES (Natural Deep Eutectic Solvents) hanno suscitato un crescente interesse grazie alla loro biodegradabilità e bassa tossicità. Come indica il nome stesso, essi derivano da fonti biologiche “naturali”, venendo sintetizzati a partire da composti ampiamente presenti in natura: sostanze metaboliche primarie tra cui acqua, zuccheri, alcoli, acidi organici e amminoacidi, che si trovano nelle cellule viventi e sono facilmente reperibili, non tossiche, biocompatibili ed economicamente sostenibili (Kaoui *et al.*, 2023).

I NADES sono comunemente composti da almeno due componenti: uno ha la capacità di fungere da accettore di legami a idrogeno (es. ammine,

amminoacidi), mentre l'altro possiede la proprietà di essere un donatore di legami a idrogeno (es. acidi organici, zuccheri). Grazie a questa interazione intermolecolare si forma un liquido eutettico, ossia con punto di fusione marcatamente più basso rispetto ai singoli componenti puri (da cui il nome “deep eutectic”). In pratica, combinando due o più sostanze solide naturali si ottiene un solvente liquido a temperatura ambiente (Usmani *et al.*, 2023). I NADES possono essere classificati secondo differenti criteri, che riflettono le molteplici proprietà chimiche e funzionali che li caratterizzano. Essi possono essere distinti in base all'origine metabolica dei costituenti, alla polarità complessiva (idrofilici o idrofobici), alla natura chimica delle molecole coinvolte (zuccheri, acidi organici, amminoacidi, ecc.), nonché al tipo di interazioni predominanti che ne determinano la stabilità (ioniche, polari).

Oltre al risvolto “eco-friendly”, vi è sicuramente anche un vantaggio dal punto di vista applicativo, in termini di resa nell'estrazione e stabilità dei bioattivi estratti. Nel complesso, i NADES possiedono eccellenti proprietà come solventi: volatilità trascurabile, punto di fusione molto basso (sono liquidi anche al di sotto dei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), ampio intervallo di polarità e un elevato potere di solubilizzazione di una vasta gamma di composti, compresi quelli scarsamente solubili in acqua (**Tabella 1**).

I NADES possono essere sintetizzati principalmente con tre approcci (Usmani *et al.*, 2023):

- **Miscelazione a caldo:** i componenti vengono mescolati con agitatore, coperti e riscaldati a bagnomaria a una temperatura compresa tra 50 e $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, fino all'ottenimento di una soluzione limpida (30–90 min).
- **Evaporazione:** i costituenti vengono inizialmente solubilizzati in acqua e successivamente l'acqua viene rimossa con un evaporatore rotante; il liquido ottenuto viene poi posto in un essiccatore fino al raggiungimento di peso costante.

Gli studi hanno dimostrato che i NADES sono in grado di estrarre efficacemente un'ampia gamma di sostanze fitochimiche, tra cui fenoli,

Tabella 1 – Viscosità e polarità di alcuni NADES rispetto all’acqua e ai solventi organici più diffusi (metanolo, etanolo)

Composizione del solvente	Rapporto	Viscosità (mPa.s)	Polarità ET (kcal/mol)
Acqua	–		63,10
Metanolo	–		55,00
Etanolo	–		51,90
ChCl*:glucosio	1:1	34400 mPa s (50 °C)	50,43
ChCl:acido citrico	2:1		48,30
acido malico: ChCl: acqua	1:1:2	445,9 Mm ² /s (40 °C)	44,81
Prolina:acido malico:acqua	1:1:3	251 (40 °C)	48,05
ChCl:Urea	1:2	750 (25 °C)	–
ChCl:glicerolo	1:1	376	58,49
Acido citrico: glucosio	1:1	–	47,81
1,2-propandiolo: ChCl: acqua	1:1:1	33 Mm ² /s (40 °C)	50,07
Riadattata da Kaoui et al. 2023			

terpenoidi e saponine, spesso superando le prestazioni dei solventi tradizionali, migliorandone la solubilità, la stabilità e la biodisponibilità. Ad esempio, in Makarova *et al.* (2025), il NADES cloruro di colina-urea (ChCl, rapporto molare 1:2), utilizzato per l'estrazione di polifenoli dai fiori di *Lonicera japonica*, ha ottimizzato parametri di estrazione come i tempi (20-30 minuti) e i rapporti solido-liquido (da 1:12 a 1:15) con persino un aumento del contenuto di bioattivi estratti. Inoltre, è stata utilizzata una diluizione pari al 60% dell'estratto tal quale per lo svolgimento dei saggi, permettendo così l'utilizzo di piccole quantità. È stato persino osservato un tasso di recupero del NADES pari al 77,5%. L'efficienza di estrazione dei NADES varia a seconda della loro composizione, con i NADES a base di cloruro di colina che mostrano prestazioni elevate su più specie vegetali (Makarova *et al.*, 2025). Anche i metodi

di estrazione giocano un ruolo cruciale nella resa. Ad esempio, l'analisi metabolomica di estratti di radici di *Aralia elata*, ottenuti con diverse tipologie di NADES e metodologie estrattive, ha rivelato che l'estrazione assistita da vibrocavitazione (VAE) produce risultati superiori rispetto all'estrazione assistita da ultrasuoni (UAE) e alla macerazione. Inoltre, fattori come il rapporto soluto-solvente, la temperatura e il contenuto d'acqua influenzano significativamente i risultati dell'estrazione.

Tra le diverse metodologie di estrazione si ricordano (Kaoui *et al.*, 2023; Cunha and Fernandes, 2018):

- **Estrazione assistita da ultrasuoni (UAE):** utilizza ultrasuoni per migliorare e facilitare l'efficienza di estrazione, aumentando il trasferimento di massa.
- **Estrazione assistita da microonde (MAE):** utilizza la radiazione a microonde come fonte di calore per migliorare la cinetica di estrazione inducendo il riscaldamento selettivo, sia del solvente che del campione, interagendo direttamente con l'acqua e le molecole polari, causandone la rapida rotazione e generando così calore.
- **Estrazione meccanochimica (MCE):** trattamento meccanico (es. macinatura, uso di piccole sfere) a temperatura ambiente che permette di rompere le cellule e rilasciare i composti bioattivi, senza bisogno di alte temperature (previene l'alterazione di molecole termolabili). L'energia meccanica può rompere legami intermolecolari e favorire nuove interazioni tra la matrice vegetale e il solvente (reazione chimica).
- **Vibrocavitazione (VAE):** genera microbolle che implodono meccanicamente migliorando la rottura cellulare, riducendo tempi e consumi energetici, risultando un'alternativa sostenibile a tecniche più costose come l'ultrasuono o le microonde.

Tuttavia, bisogna anche tener conto delle limitazioni legate all'utilizzo di questi solventi. Gli svantaggi segnalati includono: (i) elevata viscosità, che ostacola e/o rallenta il trasferimento di massa e complica la separazione dei composti; (ii) difficoltà nell'applicazione in

larga scala e, occasionalmente, (iii) un'estrazione inferiore di alcuni composti target rispetto ai solventi tradizionali (Kaoui *et al.*, 2023; Cunha and Fernandes, 2018). In alcuni casi, l'estrazione assistita da ultrasuoni mitiga i problemi di viscosità. Inoltre, vanno approfonditi approcci selettivi di estrazioni per evitare la co-estrazione indesiderata. In letteratura è stato riportato che un aumento della concentrazione di CHCl_3 permette di ridurre la viscosità del solvente, a discapito però della conduttività (solitamente bassa, inferiore a 2 mS cm^{-1} a temperatura ambiente), che aumenta a causa del maggior numero di portatori di carica in un solvente via via meno viscoso (Cunha and Fernandes, 2018). Un'ulteriore sfida è rappresentata dall'isolamento dei composti puri dagli estratti di NADES, poiché l'evaporazione non è possibile, e risultano pertanto necessari metodi alternativi ed efficaci per la rimozione del solvente. In conclusione, sebbene i NADES presentino alcune criticità ancora da superare, le loro proprietà uniche li rendono strumenti estremamente promettenti nei processi di estrazione sostenibile. Lo sviluppo di strategie mirate a ridurre la viscosità, a migliorare le tecniche di separazione e a favorire la rimozione del solvente sarà cruciale per trasformare queste limitazioni in opportunità e permettere un pieno sfruttamento del potenziale dei NADES nelle applicazioni future.

Estratti vegetali di sostanze volatili: gli oli essenziali

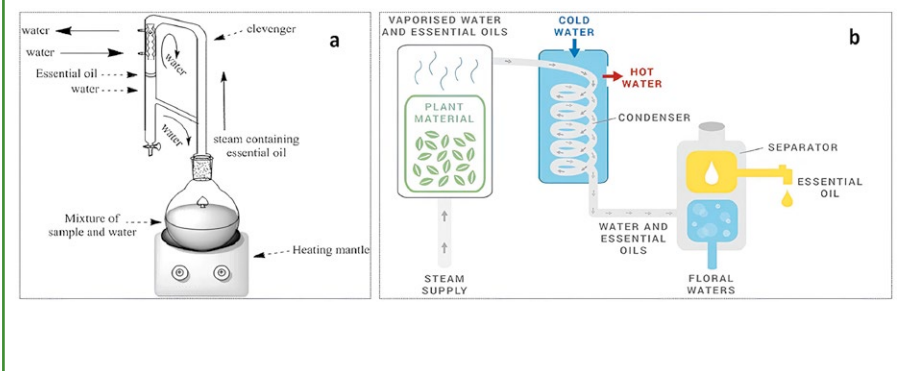
Il metabolismo secondario produce composti che mediano l'interazione delle piante con l'ambiente. Tra le sostanze che facilitano la riproduzione attraendo gli animali responsabili dell'impollinazione o della dispersione dei semi ci sono le sostanze volatili, un insieme eterogeneo di composti che hanno in comune la facilità di passare allo stato gassoso. Questa proprietà è dovuta all'alta tensione di vapore, alla bassa tensione superficiale e al basso peso molecolare (attorno a 300 Da al massimo). I composti volatili hanno gruppi funzionali diversi e generalmente sono molecole apolari, caratteri-

stica che ne consente il passaggio attraverso le membrane cellulari; le proprietà odorose sono aumentate nelle molecole che, grazie a una parte polare, si dissolvono nei fluidi corporei raggiungendo facilmente gli organi di senso. Tra le sostanze volatili naturali vegetali, molte sono apprezzate e ricercate per le proprietà aromatiche, antiossidanti e antimicrobiche. Nel corso degli anni sono stati quindi messi a punto diversi sistemi di estrazione per queste sostanze, impiegate nell'industria cosmetica, alimentare e farmaceutica. Il prodotto dell'estrazione, definito "olio essenziale", è costituito per la maggior parte da terpeni e, a seconda della matrice vegetale, da altri composti quali esteri, fenoli, alcoli, idrocarburi, aldeidi e chetoni. Dipendentemente dalla specie, gli olii essenziali possono trovarsi in diverse parti della pianta, compresi i fiori, le foglie, i semi, i frutti, i rizomi. La messa a punto di sistemi di estrazione più efficienti consente il recupero degli olii essenziali presenti in parti delle piante considerate di scarto. I metodi convenzionali più diffusi si basano sull'applicazione della **distillazione**.

L'**idrodistillazione** (**Fig. 2, a**) comporta il riscaldamento fino all'ebollizione dell'acqua a contatto con il materiale vegetale, mentre la **distillazione a vapore** prevede un generatore esterno di vapore che viene convogliato attraverso il materiale vegetale (**Fig. 2, b**). Il vapore si arricchisce così in composti volatili e viene diretto verso un condensatore (una struttura raffreddata tramite acqua) dove ritorna allo stato liquido. Si ottengono due fasi:

- l'olio essenziale, apolare, solitamente più leggero dell'acqua, in superficie
- la fase acquosa (idrolato), sottoprodotto contenente circa l'1% di aromi, oltre a sostanze idrofile.

Le sostanze termolabili possono essere trasformate o danneggiate dalle alte temperature. Nel caso in cui sia necessario evitare il trattamento termico, si può ricorrere all'**estrazione con solvente**. I solventi più adatti sono quelli apolari, come esano ed etere etilico, data la natura lipofila delle sostanze volatili. La procedura comprende l'immersione del materiale vegetale in un contenitore assieme al sol-

Figura 2

*Schemi del processo di idrodistillazione (a) e della distillazione a vapore (b)
 (da Konfo et al., 2023)*

vente, la filtrazione del liquido ottenuto e la successiva distillazione. L'estratto ottenuto contiene una piccola quantità di solvente, quindi, non è adatto per usi alimentari a meno che il solvente impiegato non sia etanolo, sostanza generalmente riconosciuta come sicura (GRAS, *generally recognized as safe*).

La frazione lipofila contenuta nelle bucce degli agrumi contiene sostanze termolabili e suscettibili di ossidazione. Essa viene estratta per **spremitura a freddo**, un metodo meccanico che porta alla rottura delle vescicole oleifere (otricoli) con l'ottenimento di una emulsione acquosa da cui per centrifugazione si separa l'olio, in questo caso detto essenza. Gli strumenti usati per la pressatura delle bucce (Stratakos & Koidis, 2016) sono torchi manuali o idraulici; a livello industriale l'essenza viene estratta con sistemi automatizzati comprendenti la produzione dei succhi; le macchine dette sfumatrici estraggono meccanicamente gli aromi dalle scorze rimaste dopo l'estrazione del succo, mentre le pelatrici lavorano i frutti interi esercitando un'abrasione in modo tale da rompere gli otricoli, senza alcun contatto con il succo.

Un'alternativa ai metodi tradizionali è costituita dall'**estrazione con fluidi supercritici** (**supercritical fluid extraction, SFE**); il fluido più diffuso è la CO_2 , data la bassa pressione necessaria per l'ottenimento della condizione supercritica. Questa procedura può

essere dimensionata in base all'applicazione dal livello analitico sperimentale alla larga scala industriale, con sistemi a lotti oppure in continuo (Stratakos & Koidis, 2016). Il materiale vegetale è posto in un recipiente dove il fluido supercritico è convogliato a un determinato flusso, fino al raggiungimento delle appropriate condizioni per l'estrazione. Questo sistema ha diversi vantaggi: la selettività dell'estrazione, dovuta al fatto che il grado di interazione del fluido con il materiale può essere regolato modificando la temperatura o la pressione; i fluidi supercritici, rispetto ai solventi liquidi, consentono un'estrazione più efficiente e rapida data la minore viscosità e la maggiore diffusività; il metodo è più sostenibile dal punto di vista ecologico data la non tossicità della CO₂.

Gli **ultrasuoni** possono essere impiegati come metodo di estrazione (in acqua o solvente) o combinati con tecniche convenzionali come l'idrodistillazione, diminuendo la durata del processo e i relativi costi energetici e aumentandone la resa (**ultrasound assisted extraction, UAE**). Altri sistemi innovativi di estrazione prevedono l'impiego delle microonde (**microwave assisted extraction, MAE**). Il riscaldamento e la vaporizzazione dell'acqua effettuati dalle microonde provocano l'aumento della pressione interna delle cellule fino alla rottura delle pareti. Gli olii essenziali sono liberati all'esterno delle cellule. Il calore si diffonde più facilmente all'interno del materiale vegetale, facilitando il trasferimento di massa e diminuendo il tempo necessario. La maggiore velocità del processo e la minore esposizione a temperature elevate possono limitare i cambiamenti indotti dai trattamenti termici. La tecnologia a microonde in assenza di solvente, (**solvent-free microwave extraction, SFME**), consente di estrarre delle sostanze volatili da una matrice vegetale tal quale, senza aggiunta di solventi o acqua. In alternativa, le microonde possono essere comprese in sistemi di estrazione combinati come **l'idrodistillazione assistita a microonde (MAHD)**, in cui producono il riscaldamento rapido e selettivo della matrice vegetale.

Stabilità degli estratti bioattivi

La formulazione di estratti con un'adeguata percentuale di solvente consente di contrastare la degradazione della matrice in seguito alla contaminazione microbica.

Per il mantenimento dell'efficacia degli estratti polifenolici è necessaria la protezione dei composti dall'ossidazione. L'ossidazione enzimatica a opera delle polifenolossidasi (PPO) endogene può essere ridotta con il trattamento termico (Lo Scalzo *et al.*, 2010), che comporta la denaturazione delle proteine e quindi l'inattivazione delle PPO. Inoltre, l'acidificazione del mezzo di estrazione fino a un valore di pH attorno a 3 consente la riduzione dell'ossidazione spontanea per via chimica e la denaturazione delle proteine. I valori bassi di pH consentono anche una migliore solubilizzazione dei glicocalcoidi nei relativi estratti, grazie alla loro protonazione. Questi composti sono stabili anche ad alte temperature (Friedman & McDonald, 1997) e la loro diminuzione nelle preparazioni alimentari varia a seconda della tecnica di cottura impiegata. Nelle patate, ad esempio, i processi che rimuovono fisicamente gli strati esterni (sbucciatura, taglio) in cui si concentrano α -solanina e α -chaconina o che ne favoriscono la lisciviazione o la migrazione in un mezzo esterno (acqua o olio) portano alle riduzioni più significative di questi composti.

Anche i solventi eutettici (NADES), se preparati usando un acido organico quale donatore di legami a idrogeno, hanno valori di pH adatti a contrastare l'ossidazione. Inoltre, l'elevata viscosità dei NADES sembra limitare il movimento molecolare all'interno dell'estratto e prevenire la degradazione chimica dei principi attivi. Questi solventi stabilizzano i bioattivi estratti grazie alle forti interazioni intermolecolari, in particolare ai legami a idrogeno che si creano tra i componenti del solvente e i composti stessi (Vieira *et al.*, 2022).

Per quanto riguarda la frazione volatile, diversi composti presenti negli olii essenziali da piante officinali hanno proprietà antiossidanti e antimicrobiche. Generalmente sono composti ossigenati (monoterpeni ossigenati, fenilpropanoidi, alcoli, aldeidi). L'impiego delle spezie

per prolungare la conservazione degli alimenti è dovuto all'attività di queste sostanze. Altri composti molto abbondanti, i monoterpeni idrocarburici, sono invece tra i più suscettibili all'ossidazione a opera degli enzimi endogeni o della luce. Tra di essi figura il limonene, il composto principale nella frazione volatile degli agrumi. La produzione di olio essenziale comporta il trattamento termico quindi la denaturazione degli enzimi e la selezione delle molecole più stabili. Tuttavia, la separazione dei monoterpeni idrocarburici (deterpenazione) viene eseguita per migliorare la stabilità e il profilo aromatico degli olii essenziali destinati alla profumeria o all'impiego alimentare. Le essenze sono più suscettibili alla degradazione dal momento che possono includere composti non volatili, termolabili o chimicamente instabili.

Bibliografia

- Cunha S. C., & Fernandes J. O., *Extraction techniques with deep eutectic solvents*, "TrAC Trends in Analytical Chemistry" 105 (2018), pp. 225-239. DOI:10.1016/j.trac.2018.05.001
- Friedman M. & McDonald G. M., *Potato glycoalkaloids: chemistry, analysis, safety, and plant physiology*, "Critical reviews in plant sciences" 16 (1997), pp.55-132. DOI: 10.1080/07352689709701946
- Kaoui S. *et al.*, *Deep eutectic solvents as sustainable extraction media for plants and food samples: A review*, "Sustainable Chemistry and Pharmacy" 31 (2023), p. 100937. DOI:10.1016/j.scp.2022.100937
- Konfo T. R. C. *et al.*, *Essential oils as natural antioxidants for the control of food preservation*, "Food Chemistry Advances" 2 (2023), p. 100312. DOI:10.1016/j.focha.2023.100312
- Lo Scalzo R. *et al.*, *Thermal treatments of eggplant (Solanum melongena L) increases the antioxidant content and the inhibitory effect on human neutrophil burst*, "Journal of Agricultural and Food Chemistry" 58 (2010), p.3371. DOI:10.1021/jf903881s
- Makarova A. *et al.*, *Utilizing Natural Deep Eutectic Solvents (NADESs) for Sustainable Phytonutrient Recovery: Optimization and Multi-Matrix Extraction of Bioactive Compounds*, "Applied Sciences" 15 (2025), p. 4843. DOI:10.3390/app15094843
- Pacifico D. *et al.*, *Potato peel as a natural source of biocompounds for cereal fungal control*, "ACS Food Science & Technology" 4 (2024), pp. 1864-1874. DOI:10.1021/acsfoodscitech.4c00189
- Pogorzelska-Nowicka *et al.*, *Extraction of polyphenols and essential oils from herbs with green extraction methods – An insightful review*, "Food Chemistry" 460 (2024), p. 140456. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.140456
- Scandar S. *et al.*, *Boosting the essential oil yield of Coriandrum sativum L. using choline chloride-based NADES: An optimized and systematic study employing response surface methodology (RSM)*, "Industrial Crops and Products" 208 (2024), p.117920. DOI:10.1016/j.indcrop.2023.117920
- Si Tan *et al.*, *Lycopene, polyphenols and antioxidant activities of three characteristic tomato cultivars subjected to two drying methods*, "Food Chemistry" 338 (2021), p. 128062. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128062

- Stratakos A. C., & Koidis A., *Methods for extracting essential oils*, “Essential oils in food preservation, flavor and safety”, Preedy V.R. (ed.), Academic Press (2016) pp. 31-38. DOI:10.1016/B978-0-12-416641-7.00004-3
- Usmani Z. *et al.*, *Biobased natural deep eutectic system as versatile solvents: Structure, interaction and advanced applications*, “Science of The Total Environment”, 881 (2023), p. 163002. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.163002
- Vieira C. *et al.*, *Selective extraction and stabilization of bioactive compounds from rosemary leaves using biphasic NADES*, “Frontiers in Chemistry” 10 (2022) 954835. DOI: 10.3389/fchem.2022.954835

7

Applicazioni in scenari di filiera: mais e frumento

**Lanzanova C., Mastrangelo A.M., Locatelli S.,
Cassol H., Balconi C.**

Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA)

Prospettive e criticità

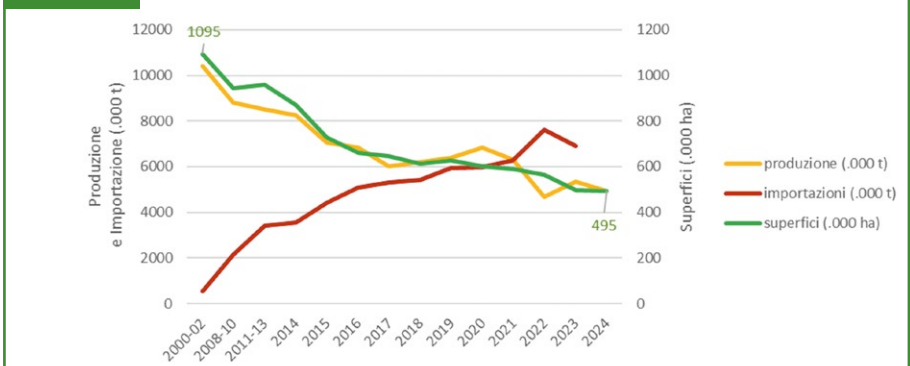
Il mais (*Zea mays* L.) e il frumento tenero (*Triticum aestivum* L.) sono tra le fonti alimentari più importanti al mondo. Nel 2024 in Italia, la produzione di mais si è attestata sui 4,9 milioni di tonnellate (-4,8% rispetto al 2023), mentre quella del frumento sui 2,6 milioni di tonnellate (ISTAT).

Il mais è ampiamente coltivato nel Nord Italia, soprattutto in Piemonte, Lombardia, Veneto, Friuli-Venezia Giulia ed Emilia-Romagna, aree tipicamente dedicate alla filiera zootecnica e a quella alimentare, oltre che all'industria dell'amido e alla produzione di biogas. La coltivazione del frumento si concentra principalmente in Lombardia, dove si supera il 10% della produzione nazionale.

Le superfici coltivate a mais hanno confermato il trend decrescente degli ultimi anni, scendendo a poco più di 495 mila ettari, il livello più basso registrato negli ultimi vent'anni, con una perdita di circa 600 mila ettari e 5,5 milioni di tonnellate rispetto al 1999 (ISTAT, 2024).

Il **grafico 1** evidenzia un calo costante della produzione nazionale e delle superfici coltivate, passate da oltre 1 milione di ettari nel 2000 a circa 495 mila nel 2024, mentre le importazioni sono cresciute in modo significativo, superando la produzione interna a partire dal 2019. L'Ita-

Grafico 1



Andamento della produzione, delle importazioni e delle superfici coltivate a mais in Italia (2000-2024)

lia importa oltre il 60% del mais necessario, con un impatto economico di circa 1,5 miliardi di euro. Questa tendenza evidenzia la perdita di competitività della coltivazione del mais in Italia, dovuta a fattori climatici, economici e normativi, e la conseguente crescente dipendenza dalle importazioni per soddisfare un fabbisogno zootecnico e alimentare strategico per le produzioni DOP e il Made in Italy.

Per entrambe le filiere, mais e frumento, obiettivo prioritario è la sostenibilità. Rendere le coltivazioni più sostenibili da un punto di vista economico e ambientale significa stabilire modelli di produzione alimentare adeguati che garantiscano qualità e quantità e, allo stesso tempo, una giusta remunerazione economica agli agricoltori, promuovendo la tutela dei suoli agricoli e delle risorse naturali. Sostenibilità significa quindi cercare di mantenere nel lungo termine produzione agricola e fertilità del suolo, riducendo i rischi ambientali associati alle pratiche agronomiche stesse.

Per la filiera del mais, le prospettive di rilancio passano dal sostegno economico attraverso premi accoppiati e fondi dedicati, dal rafforzamento dei contratti di filiera soprattutto nelle aree DOP, dall'innovazione agronomica, dalla promozione di reti d'impresa e dall'adozione di tecnologie digitali per una maggiore sostenibilità. Per la filiera del frumento, lo scenario attuale è caratterizzato da problematiche di tipo economico e geo-politico, come la volatilità dei prezzi agricoli, notevolmente aumentata negli ultimi decenni con ripercussioni su produttori e consumatori, e da problematiche legate a un ridimensionamento strutturale delle aziende agricole, il cui numero è in calo in particolare nelle aree montane e collinari. I sistemi cerealicoli basati sulla coltivazione del frumento, in particolare quelli del Centro-Sud Italia, sono, ad esempio, al limite della convenienza economica.

A questo quadro si aggiungono gli effetti negativi del cambiamento climatico. Ad esempio, nell'ultimo ventennio, in Italia, si evidenziano il 2003, 2013 e il 2022, tra gli anni più difficili per la coltura del mais a causa di estati calde e siccitose, con evidenti ripercussioni negative sia in termini di resa che di qualità igienico-sanitaria, dato che condizioni di stress idrico sono in genere associate a una maggior suscettibilità a stress biotici. Inverni caratterizzati da temperature elevate e scarse

precipitazioni hanno reso molto difficile la coltivazione anche del frumento in particolare nelle regioni del Sud negli ultimi cinque anni. Negli ultimi anni, le rese sono ulteriormente messe a rischio a causa di parassiti animali, infestanti e patogeni. In particolare, durante la fioritura e la maturazione i cereali possono essere colpiti da infezioni causate da patogeni fungini. I funghi dei generi *Fusarium* e *Aspergillus* sono patogeni del mais ampiamente diffusi, che causano malattie su plantule, radici, stocchi e spighe. Per quanto riguarda il frumento è del genere *Fusarium* il principale patogeno fungino che può attaccare la pianta e la spiga in maturazione. Producendo micotossine, metaboliti secondari che possono essere tossici o avere altri effetti debilitanti sugli organismi viventi, i patogeni fungini possono compromettere la qualità della granella e danneggiarla dal punto di vista qualitativo e sanitario. Tra queste: le fumonisine (FBs) prodotte da *Fusarium verticillioides*, le aflatossine (AFB1) prodotte da *Aspergillus flavus*, deossinivalenolo (DON) e zearalenone (ZEA) prodotti da *Fusarium graminearum*, principale patogeno fungino del frumento. La contaminazione da micotossine nel mais e nel frumento rappresenta una minaccia globale sia per la sicurezza alimentare umana che per quella animale. Indagini condotte sulla granella di mais in Italia hanno mostrato che i funghi del genere *Fusarium* sono i più comuni nel mais e che le fumonisine sono le micotossine più frequentemente presenti; inoltre, i cambiamenti climatici stanno favorendo un fenomeno preoccupante: negli ultimi anni si è osservato un aumento della presenza di aflatossine, legato alle condizioni più calde e siccitose (Locatelli *et al.*, 2022). Analogamente, il frumento è colpito dalla ruggine fogliare, la ruggine del fusto e la ruggine gialla. Le infezioni da ruggine possono causare perdite di resa fino al 50%, principalmente a causa di una riduzione della biomassa, dell'indice di resa e della quantità di cariossidi per metro quadrato. La recente comparsa di nuovi ceppi di ruggine ampiamente virulenti e aggressivi (in particolare la ruggine gialla, come sopra e la ruggine del fusto) minaccia la produzione di frumento italiana, soprattutto in un contesto di temperature e umidità più elevate. Inoltre, si annovera la fusariosi della spiga, causata dal fungo *F. graminearum*, in particolare,

diffusa soprattutto nelle aree dell'Italia centrale e settentrionale, a causa delle condizioni di elevata umidità, piogge frequenti e temperature moderate-calde durante la fioritura e la maturazione.

Data l'importanza della presenza di micotossine in mais e frumento il MASAF (Ministero dell'agricoltura, della sovranità alimentare e delle foreste) ha promosso la stesura di linee guida che riassumono finalità operative, punti critici e interventi per ridurre la probabilità di elevate contaminazioni da micotossine, partendo dalla coltivazione fino alle fasi di conservazione (Reyneri *et al.*, 2021). Nuove normative sui limiti consentiti di micotossine negli alimenti e nei mangimi sono state introdotte in molti paesi. Le normative vincolanti dell'Unione Europea sulla contaminazione da tossine per il consumo umano e per l'alimentazione animale sono riportate in **Tabella 1**.

Tabella 1 – Limiti massimi di micotossine nel mais e nel frumento secondo la normativa UE, distinti per destinazione d'uso (umana e animale)

Regolamento	Destinazione	Micotossina	Cereale	Limite µg/Kg
REG 2024/1022	umana	DON – Deossinivalenolo	frumento	1.000
			mais	1.500
REG 2023/915	umana	AFB1 – Aflatossina B1	cereali	2
		ZEA – Zearalenone	frumento	100
			mais	350
		FBs – Fumonisine	cereali	4.000
REG 2011/574	animale	AFB1 – Aflatossina B1	mais	20
RACC 2006/576	animale	DON – Deossinivalenolo	cereali	8.000
		ZEA – Zearalenone	cereali	2.000
		FBs – Fumonisine	cereali	60.000

Il mais può essere attaccato da più specie di *Fusarium*, ma le fusariosi che rivestono un reale interesse sono:

- il marciume rosa della spiga causato dall'infezione di *F. verticillioides* (**Figura 1**) e la conseguente produzione di fumonisine (FBs). A oggi sono state isolate oltre quindici fumonisine, ma le più importanti per quanto riguarda la salute umana e animale sono la fumonisina B1, B2 e B3, di cui la B1 è considerata la più comune e più tossica.
- Il marciume rosso della spiga causato prevalentemente da *F. graminearum* e il conseguente accumulo di DON e ZEA, micotossine di rilevanza tossicologica, segnalate dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro.



Spiga di mais attaccata da *Fusarium verticillioides*

Per quanto riguarda il frumento, principale agente patogeno dannoso per la qualità e sicurezza alimentare è *F. graminearum*, che può attaccare la pianta nello stadio di maturazione della spiga causando risure sulla stessa e accumulo nella granella di DON.

Lo sviluppo dei funghi del genere *F. verticillioides* è favorito da un clima temperato-caldo mentre *F. graminearum* da temperature leggermente più fresche e da un clima più umido. Queste condizioni si verificano normalmente nella Pianura Padana, zona tipicamente a coltivazione maidicola dove, dunque, sono sempre presenti contaminazioni da fumonisine e nelle annate fresche e piovose si può rilevare anche la presenza di DON, non solo nella granella di mais ma anche in quella di frumento. *F. verticillioides* è in grado di infet-

tare la spiga di mais in tre modi: i) da seme endofiticamente infetto ma apparentemente sano, ii) attraverso le setole dell'infiorescenza femminile o iii) come conseguenza di lesioni alla spiga come, ad



Attacco di *Fusarium graminearum* sulla spiga di frumento

esempio, gli attacchi della piralide (*Ostrinia nubilalis*). Anche *F. graminearum* ha ottime capacità saprofitarie. Si conserva nei residui colturali infetti nel terreno durante l'inverno e dissemina propaguli nell'ambiente che, raggiunta l'infiorescenza femminile del mais, germinano dando origine allo sviluppo del fungo che successivamente arriverà a infettare la cariosside. Per quanto riguarda il frumento, gli attacchi dei funghi responsabili della Fusariosi della spiga (*F. graminearum*) avvengono durante la spigatura e maturazione delle cariossidi, anche

se la fioritura è sicuramente il momento più a rischio. Le spore possono raggiungere la pianta attraverso gocce di pioggia o correnti d'aria. Una volta giunte sulla spiga, le spore germinano producendo inizialmente un micelio. Con condizioni favorevoli di temperature elevate e piogge frequenti l'infezione progredisce velocemente, portando alla morte il tessuto vegetale. In campo, dunque, le spighe appaiono disseccate, di un colore bianco che nelle infezioni precoci risalta grandemente rispetto al resto della coltura, di colore verde (**Figura 2**). Le infezioni sono meno evidenti se si verificano quando già la spiga è in fase di disseccamento.

Strategie per la protezione del raccolto

Il verificarsi di condizioni climatiche limitanti e la necessità di modificare i sistemi produttivi per far fronte alle diverse esigenze, suggeriscono di adottare strategie integrate di difesa.

Le risorse genetiche cerealicole conservate presso le banche del germoplasma in Italia e all'estero, costituiscono una preziosa sorgente di nuovi caratteri utili per il miglioramento genetico (Balconi *et al.*, 2024). Diventa quindi necessario approfondire le conoscenze circa la variabilità disponibile nelle collezioni di genotipi adattati ad ambienti caratterizzati da condizioni climatiche estreme. La valorizzazione di nuova variabilità genetica, anche tramite il recupero di varietà locali (*landrace*) per preservare biodiversità e adattabilità delle colture cerealicole, potrebbe mitigare la condizione di sofferenza dovuta all'inasprimento delle condizioni ambientali. In questo contesto, programmi di ricerca innovativi e strategici per poter fronteggiare le criticità menzionate si possono basare sulla capitalizzazione di risorse genetiche cerealicole mediterranee con tolleranza alla siccità e agli stress correlati al cambiamento climatico, e alla valutazione della loro risposta negli areali del Sud Europa e Nord Africa e, in prospettiva, in aree più ampie di diffusione di queste colture. Al fine di individuare risorse genetiche che possano contrastare i cambiamenti climatici, particolare interesse rivestono le varietà di mais e frumento tradizionalmente coltivate nelle regioni meridionali e insulari italiane, che, proprio perché coltivate in questi areali potrebbero essere state selezionate dagli agricoltori per particolare tolleranza alle alte temperature e alla siccità. In questo contesto, la ricerca sta puntando su ibridi innovativi a bassa taglia, più resistenti agli eventi climatici estremi. L'esplorazione delle risorse genetiche diventa quindi fondamentale per il miglioramento genetico. In frumento, l'intensa attività di *breeding* iniziata nel secolo scorso ha portato ad aumentare significativamente la resa potenziale; infatti, è possibile osservare una relazione lineare tra resa e anno di rilascio della varietà (ad es. Calderini *et al.*, 1999). In generale, nell'ultimo secolo è stato riscontrato

un guadagno genetico da 10 a 50 kg ha⁻¹ anno⁻¹ in tutti i paesi studiati. Tuttavia, diversi fattori, tra cui quelli legati ai cambiamenti climatici, con temperature in aumento e riduzione della disponibilità idrica per le colture, mettono a rischio le produzioni reali annullando di fatto i benefici ottenuti con il miglioramento genetico. Le nuove tecnologie di intervento sui genomi, “*New Breeding Techniques*” (Tecnologie di Evoluzione Assistita – TEA), potranno consentire tramite approcci innovativi e mirati, la creazione di varietà più adatte alle nuove condizioni climatiche (es. più resistenti a stress idrici, termici), anche tramite recupero delle varietà locali, originariamente adattate alla variegata geografia e al clima diversificato del nostro Paese. Al momento sono state individuate molte fonti di resistenza alle ruggini del frumento, e sono stati identificati geni di resistenza cosiddetti “magici” in quanto conferiscono una resistenza trasversale a multiple razze e specie di patogeni fungini, come il gene *Lr67* (Moore *et al.*, 2015). La situazione relativa alla fusariosi della spiga è invece molto più complicata, in quanto esistono diverse cultivar di frumento tenero con una buona resistenza all’infezione del fungo e all’accumulo di micotossine, mentre per il frumento duro non sono al momento disponibili varietà con un livello di resistenza paragonabile a quella del tenero (Viviani *et al.*, 2025).

In questa partita, l’innovazione tecnologica gioca un ruolo altrettanto determinante, tra cui l’“*Information and Communication Technology*” (ICT), ovvero le tecnologie digitali, basate sui nuovi sistemi di rilevamento (a terra, aerei, satellitari) integrati con la localizzazione GPS. Il monitoraggio e la raccolta dei dati ambientali (meteo, condizioni suolo, stato vegetativo della coltura), i sistemi di irrigazione intelligente, e le soluzioni di agricoltura di precisione permettono di ridurre l’impatto ambientale e aumentare l’efficienza produttiva. Ad esempio, una gestione più sostenibile delle risorse idriche, tramite l’utilizzo di sensori per la rilevazione dell’umidità del suolo, modelli di simulazione dei bilanci idrici colturali e metodi di monitoraggio avanzati, consentiranno di mitigare gli impatti negativi delle colture agricole/cerealicole sull’ambiente.

Infine, riportiamo possibili strategie da adottare durante tutto il ciclo colturale fino al post- raccolta che possono aiutare a mitigare i danni da stress biotici.

Strategie di protezione in campo

Tra le principali strategie di contenimento della contaminazione di *F. verticillioides* in mais vi sono:

- valutazione dell'epoca di semina che anticipi la maturazione della spiga e riduca l'esposizione alla piralide
- riduzione dell'esposizione della coltura agli stress a/biotici (in particolare stress idrico in fioritura e in tarda maturazione)
- monitoraggio dello stato fitosanitario della pianta
- corretta concimazione azotata
- trattamenti insetticidi adeguati contro la piralide
- raccolte tempestive che riducano l'esposizione della coltura ai patogeni fungini (umidità della granella intorno al 22-24%)
- concia delle sementi con sostanze attive (sostanze naturali e microrganismi, anche con azione di promozione della crescita) e adiuvanti specifici (adesivanti naturali, microincapsulamento, ecc.) che permettano la protezione della pianta durante le prime fasi di sviluppo.

Per quanto riguarda il contenimento della contaminazione di *F. graminearum* su frumento vi sono:

- ✓ avvicendamento con colture per un miglior controllo sullo sviluppo di funghi
- ✓ scelta varietale verso genotipi tolleranti con precocità adeguata all'ambiente
- ✓ controllo delle infestanti che creano un ambiente favorevole allo sviluppo di inoculo fungino
- ✓ fertilizzazione azotata la cui carenza causa sviluppo stentato della coltura predisponendola agli attacchi dei funghi
- ✓ trattamenti fungicidi per la difesa della spiga

✓ epoca di raccolta tale da avere umidità della granella inferiore al 14% in condizioni di elevato rischio di contaminazioni

Come anticipato, il mais può essere attaccato anche da funghi del genere *Aspergillus*, noti per la loro azione saprofita sui residui colturali. Alte temperature (tra i 32 e i 38 °C) e un'alta percentuale di umidità (90-98%) sono le condizioni ideali di sviluppo per il fungo. In particolare, su mais si registra la presenza della specie tossigena *A. flavus* produttrice di aflatossine B1 e B2, spesso in concomitanza con presenza di lesioni della granella dovuti a grandine e attacchi da insetti fitofagi. Il principale sintomo di attacco del fungo sulla spiga è la presenza di una muffa di aspetto granuloso e di colore verdastro con sfumature gialle (**Figura 3**). È importante osservare che l'aflatossina B1 è stata riconosciuta come una delle micotossine più potenti in termini di genotossicità e cancerogenicità, soprattutto a livello epatico, dunque, rappresenta un rischio significativo per la salute umana.

Tra le principali strategie di contenimento della contaminazione di *Aspergillus* in mais vi sono:

- contenimento dello stress idrico tramite una corretta gestione agronomica soprattutto in fioritura e maturazione
- corretta irrigazione sulla base delle effettive esigenze idriche della coltura, anche in fasi avanzate del ciclo colturale qualora le temperature siano elevate e lo stress rilevante.



Presenza di *Aspergillus flavus* sulla spiga di mais
verticillioides

- monitoraggio dello stato fitosanitario
- trattamenti insetticidi in modo tale da limitare la presenza di cariossidi danneggiate da insetti fitofagi che possono causare ingressi secondari del fungo sulla spiga
- raccolte tempestive quando l'umidità della granella è al di sopra del 20%.

Strategie di protezione post-raccolta

L'accumulo delle micotossine avviene prevalentemente durante le fasi colturali in campo ma può evolvere anche nelle fasi di raccolta, stoccaggio e trasformazione. Le condizioni ambientali (elevata umidità, eccessi di piovosità e basse temperature) hanno un ruolo fondamentale come fattore predisponente dell'insorgenza della malattia fungina e del conseguente accumulo di micotossine.

Durante la conservazione, le principali problematiche sono rappresentate da attacchi di fitofagi o artropodi, che possono essere responsabili di importanti perdite qualitative e quantitative di prodotto. Possono inoltre causare innalzamenti della temperatura e dell'umidità favorendo la possibilità di attacchi fungini, con conseguente produzione di micotossine. La corretta conservazione dei cereali post raccolta, sia in granella sia in farine, è quindi fondamentale per garantire la sicurezza alimentare e offrire prodotti di qualità sicuri e sani. Per quanto riguarda il contenimento di parassiti e infestanti (insetti, batteri e miceti), sono consentiti mezzi fisici e biologici, quali trattamenti termici, microonde, raggi UV, ultrasuoni, modificazioni di atmosfera, alte pressioni, feromoni, prediligendo comunque l'attività di prevenzione.

Biomolecole vegetali nella protezione di mais e frumento

Le sostanze naturali impiegate per migliorare la resistenza di mais e frumento includono biopesticidi vegetali, elicitori naturali, biostimolanti e nuove biomolecole emergenti. Queste molecole non agiscono come i tradizionali pesticidi, che puntano a eliminare il patogeno, ma lavorano in modo più "intelligente": stimolano le difese naturali della

pianta, rafforzano le sue strutture o creano un ambiente sfavorevole ai microrganismi dannosi. Gli elicitori sono sostanze che attivano i meccanismi di autodifesa della pianta; tra questi troviamo gli estratti ricchi in polifenoli e flavonoidi, capaci di stimolare le vie metaboliche della difesa; i terpeni e gli oli essenziali, che possiedono attività antimicrobica e repellente nei confronti degli insetti vettori; e le saponine, che rafforzano la membrana cellulare rendendo più difficile l'ingresso dei patogeni. Tra i biopesticidi naturali più diffusi rientra l'azadiractina, estratta dai semi dell'albero di Neem, che agisce come insetticida naturale e riduce la diffusione dei vettori di patogeni. Gli estratti di equisetolo, ricchi di silicio, rafforzano le pareti cellulari rendendo la pianta più resistente, mentre gli estratti di alghe marine apportano polisaccaridi utili a stimolare le difese biologiche. Tra i corroboranti, il chitosano, un derivato naturale molto utilizzato in agricoltura, induce la produzione di sostanze come lignina e callosio, che irrobustiscono i tessuti vegetali. È inoltre noto per la sua efficacia nel contenimento del *Fusarium* nel frumento. L'acido salicilico può anch'esso essere applicato per attivare la resistenza sistemica acquisita. I composti umici e gli estratti di alghe brune sono biostimolanti che migliorano il metabolismo generale della pianta e potenziano la capacità di reagire agli stress biotici. Sono strumenti preziosi per rendere mais e frumento più resilienti.

Una delle innovazioni più interessanti è rappresentata dall'RNA interferente (RNAi): frammenti naturali di RNA a doppio filamento possono essere applicati sulle foglie per silenziare geni specifici dei patogeni. Questa tecnologia ha già dimostrato efficacia nel contenimento di *Fusarium* nei cereali.

Le biomolecole naturali applicabili su mais e frumento rappresentano strumenti diversi ma complementari, capaci di potenziare l'immunità vegetale, rafforzare le strutture dei tessuti e interferire con la sopravvivenza dei patogeni. Dall'impiego di estratti vegetali al chitosano, dai biostimolanti alle tecnologie a RNA interferente, queste soluzioni offrono un approccio sostenibile e moderno alla difesa delle colture.

In quest'ottica, risulta esemplificativo il progetto **SUSinCER** (Sustainable use of bioactive compounds from Brassicaceae and Solanaceae wastes for cereal crop protection/Utilizzo sostenibile di composti bioattivi estratti da scarti di Brassicaceae e Solanaceae per la protezione di colture cerealicole, finanziato da Fondazione Cariplo) che si è prefissato lo scopo di caratterizzare e valorizzare composti bioattivi estratti da scarti di colture industriali e di promuovere il loro reimpiego in agricoltura sostenibile, con particolare attenzione alla protezione di mais e frumento tenero da stress biotici.

Le strategie sperimentali adottate nel progetto hanno previsto, in sintesi:

- i) **valutazione *in vitro*** dell'effetto delle molecole bioattive estratte da Brassicaceae e Solanaceae sul rallentamento o inibizione della crescita fungina dei principali patogeni che attaccano mais (*Fusarium verticillioides*) e frumento (*Fusarium graminearum*)
- ii) **valutazione in pieno campo** dei formulati arricchiti in molecole bioattive estratte da Brassicaceae:
 - nella **protezione del mais**, tramite applicazione sulle sete in fioritura, dall'attacco di patogeni fungini; valutazione alla raccolta delle caratteristiche qualitative e fitosanitarie (micotossine) della granella raccolta
 - nella **protezione del frumento** da attacchi delle ruggini e/o eventuali attacchi naturali da parte di altri agenti patogeni, es. Fusariosi della spiga

Per quanto riguarda la valutazione *in vitro*, l'effetto degli estratti grezzi ottenuti dalle bucce, ossia da scarti di lavorazione dell'industria della patata e delle frazioni contenenti glicoalcaloidi o composti fenolici, sulla crescita di *Fusarium verticillioides* e *Fusarium graminearum* sono già stati ampiamente descritti nel capitolo 4. di questo libro.

Mentre, per quanto riguarda le Brassicaceae sono stati ottenuti estratti grezzi da radici e farine disoleate di *Brassica carinata* ed *Eruca sativa* che sono stati testati per la loro capacità di ridurre la crescita

in vitro di *Fusarium graminearum* e *Fusarium verticillioides*. Si è osservato che gli estratti di Brassicaceae sono in grado di inibire *in vitro* la crescita dei ceppi di *Fusarium graminearum* e *Fusarium verticillioides*. L'effetto di inibizione dell'estratto di *Brassica carinata* ed *Eruca sativa* è sempre maggiore in presenza dell'enzima mirosinasi, enzima chiave del sistema di difesa delle piante appartenenti alla famiglia delle Brassicaceae responsabile della trasformazione dei glucosinolati, composti inerti e stabili, in molecole biologicamente attive e tossiche per i patogeni, raggiungendo percentuali di inibizione molto alte (80-100%). L'estratto di *Eruca sativa* ha maggiore effetto sul rallentamento di *F. graminearum* mentre per l'estratto di *Brassica carinata* si è osservato un effetto di inibizione su entrambi i funghi. Si è osservato inoltre che gli estratti puri di glucosinolati (Sinigrina e Glucoerucina) inibiscono significativamente la crescita dei patogeni solo dopo l'attivazione con la mirosinasi, raggiungendo percentuali di inibizione molto elevate (75-100%).

Per quanto riguarda le prove in campo, formulazioni ottimizzate solide e liquide ottenute da farine di semi disoleati di *Brassica carinata* ed *Eruca sativa* sono state testate in prove sperimentali su ibridi commerciali di mais e varietà di frumento tenero, al fine di valutare l'effetto nel contenimento di patogeni fungini quali *F. verticillioides* e *A. flavus* per il mais ruggine gialla e bruna, oltre che *F. graminearum* per il frumento, in un'ottica di riduzione nell'accumulo delle relative micotossine (Fumonisine, Aflatossina B1 e Deossinivalenolo).

Per queste prove sono stati forniti il prodotto commerciale solido a base di *Brassica carinata* e il suo equivalente sperimentale a base di *Eruca sativa* che sono stati interrati allo stadio colturale di emergenza/accestimento per il frumento e allo stadio di IV foglia per il mais. Successivamente dallo stadio di levata fino alla fioritura è stato applicato con una pompa a spalla un prodotto liquido commerciale a base di *Brassica carinata* e un suo equivalente sperimentale a base di *Eruca sativa* per il frumento su tutta la pianta, mentre per il mais sulle infiorescenze. Il trattamento liquido è stato ripetuto ogni 15 giorni per permettere di avere una copertura dell'effetto durante la fase di

fioritura che è una delle più sensibili all'attacco da parte di patogeni fungini.

Per quanto riguarda le prove su frumento sono state condotte per due anni in due località diverse (Bergamo e Foggia) selezionando 10 varietà di frumento tenero e 1 di frumento duro suscettibile alle malattie. Le prove di mais sono state condotte nella località di Bergamo per due anni utilizzando tre ibridi commerciali.

I risultati preliminari ottenuti su mais ci hanno indicato che il trattamento con la *Brassica carinata* ha funzionato su tutti e tre gli ibridi nel contenere le fumonisine con un effetto diversificato nella risposta tra gli ibridi. Non si è invece osservato un effetto significativo dei trattamenti nel ridurre l'accumulo di aflatossina B1, che ancora oggi risulta la micotossina più difficile da contenere nel mais avendo una distribuzione eterogenea.

Per quanto riguarda le prove di riduzione della contaminazione di deossinivalenolo su frumento si è osservato che la località di Bergamo è risultata essere la località «più contaminata» rispetto a Foggia dove il 71% dei campioni presentavano livelli di micotossina bassissima. Inoltre, si è osservato che il trattamento con *Brassica carinata* funziona nel contenere l'accumulo di deossinivalenolo ma solo su poche varietà.

Entrambi i trattamenti sono stati efficaci nel ridurre la severità dei sintomi delle ruggini su alcune varietà di frumento.

In sintesi, alla luce dei primi promettenti risultati ottenuti in SUSIN-CER, è possibile dire che gli estratti da bucce di patata e gli estratti di *Brassica carinata* ed *Eruca sativa* sono stati in grado di contrastare lo sviluppo di patogeni fungini con diversa efficacia, come evidenziato dalle loro attività inibitorie della crescita. Nell'ambito di una strategia verde, i composti bioattivi biodegradabili con attività pesticida derivati da scarti di patate e Brassicaceae potrebbero avere quindi un ampio mercato potenziale, soprattutto nell'ottica di un'agroecologia integrata, ecologica e circolare applicata alle filiere cerealicole.

In conclusione, è necessario condurre azioni a livello politico ed economico tese ad aumentare i redditi agricoli, condizione necessaria

per garantire sostenibilità non solo economica ma anche ambientale e sociale, riorganizzare le filiere e rafforzare l'export, affrontando le sfide legate all'innalzamento di nuove barriere commerciali. Inoltre, risulta strategico puntare sulla ricerca e sull'innovazione per individuare strumenti sostenibili per migliorare la tolleranza delle piante agli stress biotici e agli stress ambientali e quindi più adatte a fronteggiare i cambiamenti climatici in corso. Questi ultimi, infatti, non si manifestano solo in termini di stress abiotici, quali carenza idrica ed elevate temperature, ma stanno anche nella comparsa di nuove razze virulente di patogeni che si diffondono in aree dove prima non erano presenti.

Bibliografia

- Balconi C., Galaretto A., Malvar R.A., Nicolas S.D., Redaelli R., Andjelkovic V., Revilla P., Bauland C., Gouesnard B., Butron A., Torri A., Barata A.M., Kravic N., Combes V., Mendes-Moreira P., Murariu D., Šarcevic H., Schierscher-Viret B., Vincent M., Zanetto A., Kessel B., Madur D., Mary-Huard T., Pereira A., Placinta D.D., Strigens A., Charcosset A., Goritschnig S., *Genetic and phenotypic evaluation of European maize landraces as a tool for conservation and valorization of agrobiodiversity*, "Biology", 13, 454 (2024). DOI: <https://doi.org/10.3390/biology13060454>
- Calderini D.F., Reynolds M.P., Slafer G.A., *Genetic gains in wheat yield and associated physiological changes during the twentieth century*, in *Wheat CRC Press* (1999), pp. 351-377.
- Locatelli S., Scarpino V., Lanzanova C., Romano E., Reyneri A., *Multi-Mycotoxin Long-Term Monitoring Survey on North-Italian Maize over an 11-Year Period (2011–2021): The Co-Occurrence of Regulated, Masked and Emerging Mycotoxins and Fungal Metabolites*, "Toxins" 14, 520 (2022). DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins14080520>
- Moore J. W., Herrera-Foessel S., Lan C., Schnippenkoetter W., Ayliffe M., Huerta-Espino J., Lagudah E. *et al.*, *A recently evolved hexose transporter variant confers resistance to multiple pathogens in wheat*, "Nature genetics" 47-2 (2015), pp. 1494-1498.
- Reyneri A., Scarpino V., Locatelli S., Vaccino P. (a cura di), *Linee guida per il controllo delle micotossine nella granella di mais e frumento*. II Edizione. Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali – Dip.to delle politiche competitive, della qualità agroalimentare, ippiche e della pesca – Piano cerealicolo nazionale, 2020 (2021) <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/17783>
- Viviani A., Haile J.K., Fernando W.D., Ceoloni C., Kuzmanović L., Lhamo D., Cattivelli, L. *et al.*, *Priority actions for Fusarium head blight resistance in durum wheat: Insights from the wheat initiative*, "The Plant Genome" 18 -1, e20539 (2025).

8

Applicazioni per la protezione sostenibile delle colture: mezzi tecnici e legislazione dei prodotti *biobased*

Battaglia V., Lahoz E.

CREA – Centro di ricerca Cerealicoltura e Colture Industriali

L'evoluzione della produzione agricola in Europa ha subito significativi cambiamenti a partire dalla seconda metà del XX secolo, in gran parte grazie all'introduzione di *input* esterni ai sistemi produttivi, quali fertilizzanti minerali e prodotti fitosanitari di sintesi; l'utilizzo di questi mezzi tecnici per aumentare la produttività delle colture, ha rivoluzionato le pratiche agricole "tradizionali", permettendo il miglioramento della resa e la protezione delle colture da malattie e parassiti. Tuttavia, l'uso intensivo di questi prodotti ha suscitato preoccupazioni riguardo agli impatti ambientali e alla salute umana, spingendo l'Unione Europea a promuovere una transizione verso un modello agricolo più sostenibile.

In questo contesto, la normativa europea ha adottato diverse strategie per rispondere a tali sfide, tra cui il *Green Deal* europeo (https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it), che ha l'obiettivo di rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050. All'interno di questo piano, la strategia *Farm to Fork* si concentra sulla sostenibilità della filiera alimentare, con obiettivi specifici da raggiungere entro il 2030 quali: ridurre del 50% l'impiego di prodotti fitosanitari di sintesi; ridurre almeno del 50% le perdite di nutrienti senza deteriorare la fertilità del suolo; ridurre almeno del 20% l'uso di fertilizzanti; ridurre del 50% le vendite di sostanze antimicrobiche (antibiotici) per gli animali di allevamento e l'acquacoltura; l'impegno al raggiungimento del 25% della Superficie Agricola Utilizzata europea (SAU) condotta con il metodo dell'Agricoltura Biologica (BIO) (Commissione Europea, 2020).

La visione dell'UE per l'agricoltura e il cibo (*Vision for Agriculture and Food*) si articola in un sistema agroalimentare che promuove pratiche agricole ecocompatibili, la biodiversità e la sicurezza alimentare. In quest'ottica, l'utilizzo consapevole dei mezzi tecnici impiegabili in agricoltura (prodotti fitosanitari, corroboranti, biostimolanti, fertilizzanti), così come l'adozione di tecnologie innovative (es. agricoltura di precisione), diventano cruciali per perseguire la sostenibilità a lungo termine (Commissione Europea, 2020).

Questo scenario mette in luce il ruolo centrale di *cosa*, di *quanto*, di *quando* e di *come* si impieghi nei sistemi di produzione agrari; la frase “produrre di più con meno” risulta essere un ossimoro in quanto bisogna ottenere produzioni che abbiano caratteristiche quali-quantitative sempre più ottimali e sostenibili dal punto di vista ambientale, sociale ed economico.

La legislazione, particolarmente complessa e articolata, esige una comprensione dettagliata delle modalità di impiego dei mezzi tecnici, non solo per ottimizzare l'efficacia delle applicazioni, ma anche per garantire la sicurezza del consumatore e la compatibilità con la tutela ambientale.

La normativa che disciplina l'autorizzazione, l'immissione in commercio e l'impiego è molto articolata e complessa, spesso viene indicato come “pacchetto dei prodotti fitosanitari” che in questo lavoro viene indicata e riportata graficamente come “fiore della sostenibilità” (Direttiva 2009/128/CE, **Figura 1**).

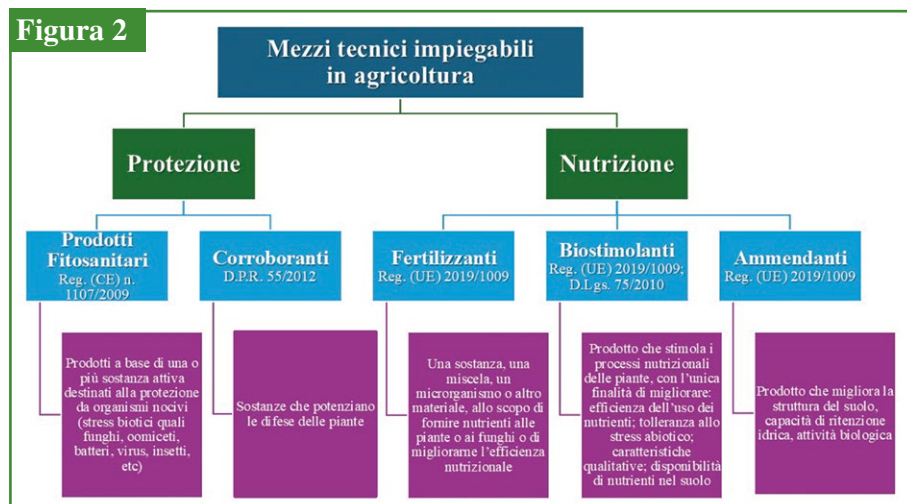


Fiore della sostenibilità: quadro normativo europeo sull'autorizzazione, immissione in commercio e impiego dei prodotti fitosanitari

I mezzi tecnici: definizioni, impieghi e importanza

Nel contesto dell'agricoltura attuale e sostenibile, i mezzi tecnici rappresentano l'insieme dei prodotti e strumenti impiegati per sostenere la produttività e la salute delle colture. Essi includono: prodotti fito-

sanitari, corroboranti, biostimolanti e fertilizzanti; ciascuna categoria è regolata da normative specifiche, a livello europeo e nazionale, con l'obiettivo di garantire sicurezza alimentare, rispetto ambientale e tutela della salute umana (**Figura 2**).



Schematizzazione dei mezzi tecnici e rispettivi riferimenti normativi con le due ripartizioni principali: protezione e nutrizione delle colture

Le diverse categorie di mezzi tecnici, se impiegate per il *claim* per cui sono state studiate e formulate, risultano essere di fondamentale importanza per:

- i) garantire rese produttive elevate e costanti;
- ii) proteggere le colture da stress biotici (patogeni, parassiti, infestanti) e abiotici (siccità, salinità, temperature estreme);
- iii) migliorare la qualità e la conservabilità dei prodotti agricoli;
- iv) ridurre l'impatto ambientale grazie a soluzioni innovative e selettive.

I prodotti *biobased*: classificazione e normativa

Le sostanze di origine naturale sono una macrocategoria che contiene al suo interno altre categorie quali gli estratti vegetali e gli oli essenziali (**Figura 3**).

Figura 3



Diagramma grafico e definizione delle sostanze di origine naturale

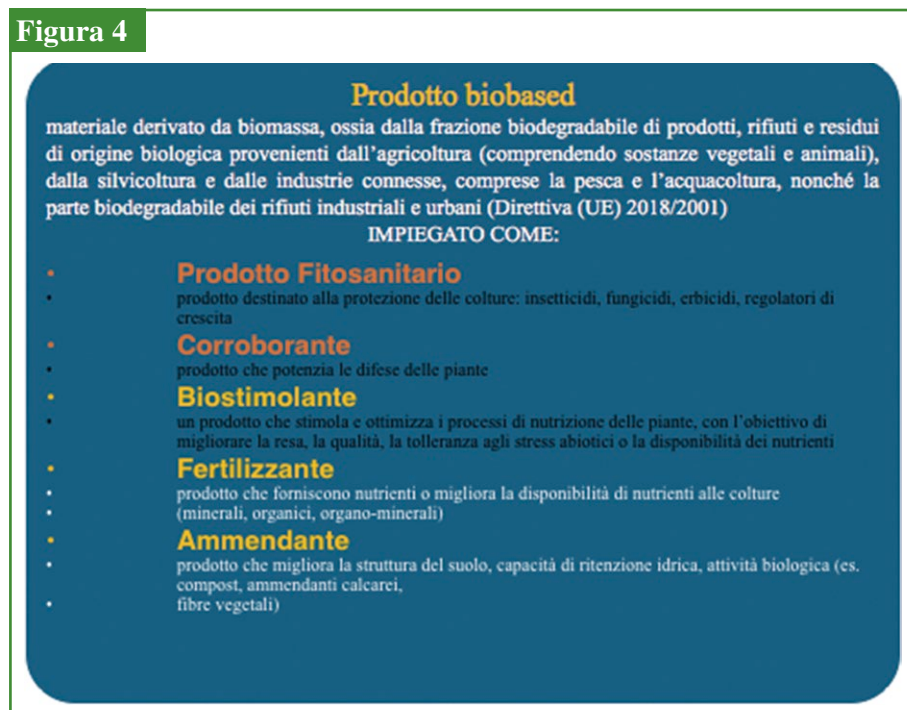
I prodotti di origine naturale sono spesso impiegabili in sistemi colturali regolati secondo il metodo dell’agricoltura biologica e rappresentano un pilastro della difesa integrata e dell’agroecologia. La loro efficacia, seppur a volte inferiore rispetto ai prodotti chimici di sintesi, può essere potenziata attraverso strategie agronomiche appropriate e tecnologie di precisione.

Nell’agricoltura moderna, i mezzi tecnici di origine naturale, in particolare quelli *biobased* (ovvero derivati da materie prime rinnovabili di origine biologica), rappresentano strumenti sostenibili fondamentali, capaci di far fronte a stress biotici (come patogeni e parassiti) e abiotici (quali siccità, salinità, temperature estreme, sostanze tossiche). Essi si distinguono chiaramente dai prodotti fitosanitari di sintesi (“tradizionali”) per la loro azione specifica, il basso impatto ambientale e l’impiego di risorse rinnovabili. Questi strumenti includono biostimolanti, agenti di biocontrollo, estratti

vegetali e corroboranti. Fra i vantaggi dei mezzi tecnici *biobased* si possono evidenziare: i) basso/nullo impatto ambientale, in quanto vi è ridotto rischio di contaminazione di suolo, acqua e aria; ii) minore/nulla tossicità per l'uomo e per gli organismi non bersaglio, come api, impollinatori e fauna utile; iii) compatibilità con i protocolli di produzione previsti dall'agricoltura biologica e integrata; iv) possibilità di ridurre la resistenza degli organismi *target* (patogeni e parassiti), grazie a meccanismi d'azione più diversificati e meno selettivi. Tuttavia, sono da annoverare anche alcune attuali criticità quali: i) spettro d'azione spesso limitato; ii) stabilità e conservazione inferiori rispetto ai prodotti di sintesi; iii) costi di produzione elevati e minore standardizzazione; iv) iter normativi lunghi e onerosi, seppur con tendenze recenti a semplificazioni.

Le categorie dei mezzi tecnici *biobased* che vengono impiegati in agricoltura sono schematizzate in **Figura 4**.

Figura 4



Schema con la definizione di prodotto biobased e l'impiego secondo le attività svolte dal prodotto

Di seguito si riportano alcuni esempi:

- **Prodotti fitosanitari:** includono microrganismi (es. *Bacillus thuringiensis*, *Trichoderma* spp.), estratti vegetali (es. neem, piretro), sostanze naturali (spinosad) e induttori di resistenza;
- **Corroboranti:** es. caolino, talco, lecitina di soia;
- **Biostimolanti:** derivati da alghe, microrganismi (*Azotobacter* spp.; *Rhizobium* spp.; *Azospirillum* spp.; Funghi micorrizici), idrolizzati proteici;
- **Fertilizzanti/ammendanti:** compost, fibre vegetali.

Un'ulteriore suddivisione, funzionale all'inquadramento dei mezzi *bio-based*, è quella proposta dall'*International Biocontrol Manufacturers Association* (IBMA), come segue:

- **Microrganismi** – funghi, batteri, virus, con funzioni biopesticida o biostimolanti.
- **Macrorganismi** – predatori, parassitoidi, nematodi entomogeni per il controllo biologico diretto.
- **Sostanze naturali** – estratti da piante, alghe, minerali, anche se sintetici ma identici a molecole naturali.
- **Semiochimici** – feromoni, kairomoni, siderochimici usati per influenzare il comportamento dei parassiti.

A chiarire ulteriormente il quadro, gli autori propongono la schematizzazione riportata nella **Tabella 1**, basata su:

- i) la tipologia del prodotto;
- ii) la provenienza (*biobased* vs. sintetico);
- iii) il regime normativo;
- iv) il possibile impiego in agricoltura biologica o integrata.

In particolare, nel contesto dell'agricoltura Biologica, il Regolamento (UE) 2018/848 consente l'impiego di:

- i) prodotti fitosanitari ammessi, come quelli elencati nell'Allegato I del Reg. di esecuzione (UE) 2021/1165, autorizzati ai sensi del Reg. CE 1107/2009, purché utilizzati solo quando le misure preventive risultano insufficienti;

Tabella 1 – Prodotti biobased per la protezione delle colture, strutturata per tipologia, origine, modalità d’azione e quadro normativo

Tipologia	Origine	Modalità d’azione	Esempi	Quadro normativo UE	Note
Biopesticidi microbici	Microrganismi (batteri, funghi, virus, protozoi)	Competizione, antibiosi, parassitismo, induzione resistenza	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma spp.</i> , <i>virus granulosi</i>	Reg. (CE) 1107/2009; Reg. (UE) 2022/1438	Spesso ammessi in agricoltura biologica
Biopesticidi biochimici	Estratti vegetali, metaboliti naturali	Azione tossica diretta o repellente	Olio di neem, piretro, estratto di aglio	Reg. (CE) 1107/2009; possibili come “sostanze a basso rischio” (Reg. (UE) 2017/1432)	Bassa persistenza ambientale
Sostanze di base	Alimenti, sostanze naturali di uso comune	Induzione difesa, azione indiretta	Aceto, siero di latte, lecitina	Art. 23 Reg. (CE) 1107/2009	Nessuna MRL, uso semplificato
Corroboranti	Minerali naturali, sostanze di origine vegetale	Potenziamento resistenza fisica o chimica	Caolino, zeolite, propoli	Reg. (CE) 1107/2009 art. 3; DM 27/11/2009 (Italia)	Non considerati prodotti fitosanitari
Induttori di resistenza	Estratti vegetali, polisaccaridi, elicitori naturali	Stimolo vie metaboliche difensive	Chitosano, laminarina, β -glucani	Reg. (CE) 1107/2009 (se difesa diretta)	Sovrapposizione fra protezione e nutrizione

- ii) Corroboranti, intesi come sostanze o sistemi che potenziano la resistenza delle piante a stress biotici e abiotici, stimolando il metabolismo secondario o agendo come sistemi fisici isolanti. L'uso è regolato a livello nazionale (in Italia: DPR n. 55/2012 e DM 229771/2022). Questi mezzi tecnici *biobased* rappresentano un ponte tra agricoltura preventiva (rotazioni, varietà, ecc.) e interventi diretti, sostenendo la resilienza delle colture senza ricorrere alla sintesi chimica.

Controllo biologico e agenti di biocontrollo

La tematica del biocontrollo è strettamente correlata all'impiego dei mezzi tecnici e, quindi, all'impiego dei prodotti *biobased*. Attualmente, non esiste una regolamentazione europea univoca e specifica per gli agenti di Biocontrollo; essi ricadono generalmente nel Regolamento relativo ai prodotti fitosanitari (Reg. (CE) 1107/2009), insieme alle sostanze chimiche, con *iter* autorizzativi lunghi e poco adatti alla natura di questi prodotti. L'IBMA ha accolto con favore l'inclusione, da parte della Commissione Europea nella proposta del nuovo Regolamento sul "Sustainable Use of Plant Protection Products", di una definizione europea per il biocontrollo: "control of organisms harmful to plants or plant products using natural means of biological origin or substances identical to them...". Inoltre, l'IBMA ha richiesto: i) definizione legale armonizzata di biocontrollo; ii) autorizzazioni specifiche, semplificate e temporanee (*fast track*) per questi prodotti; iii) incentivi nel Piano di Azione Nazionale (PAN) degli Stati membro e nei sistemi di Gestione Integrata (IPM).

L'International Federation of Organic Agriculture Movements – EU Group (Federazione Internazionale dei Movimenti per l'Agricoltura Biologica – Gruppo UE) ha evidenziato che le procedure attuali per autorizzare i mezzi tecnici impiegabili per biocontrollo sono troppo lunghe (fino a 10 anni), ostacolando la disponibilità di soluzioni *bio-based* per gli operatori del settore.

In sintesi, i mezzi tecnici *biobased* – includendo microrganismi, macrorganismi, estratti vegetali, semiochimici, prodotti fitosanitari ammessi in agricoltura biologica, corroboranti e biostimolanti – sono strumenti chiave per mitigare stress biotici e abiotici in processi produttivi sostenibili capaci di rispondere a criteri di gestione e progettazione agroecologica. Tuttavia, l'assenza di una definizione chiara e di un *iter* normativo adeguato costituisce un ostacolo rilevante alla loro diffusione.

Le proposte avanzate dall'IBMA, supportate dall'IFOAM e da organi regolatori tecnici, possono porre le basi per una riforma normativa che valorizzi questi mezzi tecnici, garantendo protezione ambientale, resilienza delle colture e al passo con l'innovazione scientifica, tecnica e tecnologica. Nel corso del 2025 il Parlamento europeo ha adottato un *Report non legislativo* sulla registrazione e l'adozione più rapida degli agenti di biocontrollo, invitando la Commissione a definire giuridicamente il biocontrollo, a introdurre procedure di autorizzazione più rapide e possibilmente provvisorie e a esplorare un regime centralizzato a livello UE per valutazione e autorizzazione, oltre a un quadro dedicato specificamente al biocontrollo. Tale report richiama anche l'adeguamento e la possibile revisione del Regolamento (CE) n. 1107/2009 sui prodotti fitosanitari per includere norme su biocontrollo più proporzionate alla loro natura distintiva. Parallelamente, con la proposta di pacchetto "Simplification Omnibus" della Commissione, si introducono emendamenti mirati che semplificano il percorso di accesso al mercato per gli agenti di biocontrollo. IFOAM ha, inoltre, pubblicato documenti di *position paper* che chiedono la rimozione di ostacoli normativi alla disponibilità delle sostanze naturali e un raccordo più stretto con le pratiche dell'agricoltura biologica. Questi documenti UE, insieme alle alleanze tra Parlamento, Commissione e *stakeholder*, delineano un contesto dinamico che ha come obiettivo quello di ottenere un quadro regolatorio più chiaro, efficiente e favorevole all'innovazione nel biocontrollo.

Approfondimento normativo

-  Commissione Europea. (2020). *The European Green Deal*. Bruxelles: Unione Europea. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it
-  Commissione Europea. *Semplificazione delle norme UE* <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/simplification/>
-  Decreto 10 luglio 2013 Aggiornamento degli allegati del decreto legislativo 29 aprile 2010, n. 75, concernente il riordino e la revisione della disciplina in materia di fertilizzanti.
-  Decreto 27 novembre 2009 Disposizioni per l'attuazione dei regolamenti (CE) n. 834/2007, n. 889/2008 e n. 1235/2008 e successive modifiche riguardanti la produzione biologica e l'etichettatura dei prodotti biologici. (Decreto n. 18354)
-  Decreto Del Presidente Della Repubblica 23 aprile 2001, n. 290. Regolamento di semplificazione dei procedimenti di autorizzazione alla produzione, alla immissione in commercio e alla vendita di prodotti fitosanitari e relativi coadiuvanti.
-  Decreto Del Presidente Della Repubblica 28 febbraio 2012, n. 55. Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 23 aprile 2001, n. 290, per la semplificazione dei procedimenti di autorizzazione alla produzione, alla immissione in commercio e alla vendita di prodotti fitosanitari e relativi coadiuvanti.
-  Decreto Legislativo 14 agosto 2012, n. 150 Attuazione della direttiva 2009/128/CE che istituisce un quadro per l'azione comunitaria ai fini dell'utilizzo sostenibile dei pesticidi.
-  Decreto Legislativo 14 agosto 2012, n. 150 Attuazione della direttiva 2009/128/CE che istituisce un quadro per l'azione comunitaria ai fini dell'utilizzo sostenibile dei pesticidi.
-  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.

-  Direttiva 2009/128/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 ottobre 2009 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria ai fini dell'utilizzo sostenibile dei pesticidi.
-  EFSA (European Food Safety Authority), <https://www.efsa.europa.eu/it/topics/topic/pesticides>
-  EPPO “EPPO Standards – PM 6 Safe use of biological control” https://www.eppo.int/RESOURCES/eppo_standards/pm6_biocontrol
-  European Commission. (2020). *A Vision for Agriculture and Food: New EU Agricultural Policy*. Bruxelles: Unione Europea. https://agriculture.ec.europa.eu/overview-vision-agriculture-food/vision-agriculture-and-food_en
-  IBMA Italia. “L'importanza del biocontrollo” (2021) https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://ibma-global.org/wp-content/uploads/2021/11/2021-09-10-IBMA-Limportanza-del-biocontrollo.pdf&ved=2ahUKewjEgpm74cyRAXWPg_0HHfjVE3sQFnoE-CBwQAQ&usg=AOvVaw0Vp7WznB7eBTCrBTiYXZaK
-  IBMA Italia. “Per una definizione europea di biocontrollo” (ottobre 2022) <https://ibmaitalia.it/2022/10/07/definizione-europea-biocontrollo/>
-  IBMA. “Biological control in the pipelines” (2023–2028 pipeline, autorizzazioni) https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://ibma-global.org/wp-content/uploads/2023/04/2023-04-19-Biological-control-in-the-pipelines.pdf&ved=2ahUKewi2nO_38yRAXXuhv0HHSWYEO0QFno-ECBcQAQ&usg=AOvVawlySBdLQJ82uPvZczpjQtuk
-  IBMA. “Regulation on Sustainable Use of Plant Protection Products proposal: IBMA welcomes the first EU wide definition of biological control and setting national biocontrol targets to deliver on the EU Green deal ambition” (giugno 2022) <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://>

ibma-global.org/wp-content/uploads/2022/06/IBMA-Press-Release-SUR-proposal-IBMA-welcomes-the-first-EU-wide-definition-of-biological-control-and-setting-national-bio-control-targets-to-deliver-on-the-EU-Green-deal-ambition.pdf&ved=2ahUKEwiQkoW438yRAxVI8rsIHTzUHXIQFnoEC-BgQAQ&usg=AOvVaw2eVZBcDFQ9GKydc4OCgKY-

 IBMA. “Vision for Agriculture and Food – IBMA Welcomes EU Commitment to Accelerate Biocontrol” (febbraio 2025) <https://ibma-global.org/latest-news/europe-ready-to-accelerate-biocontrol>

 IFOAM Organics Europe. “The EU must accelerate access to biocontrol: IFOAM Organics Europe publishes recommendations to improve the availability of natural substances” (maggio 2025) https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.organicseurope.bio/content/uploads/2025/05/IFOAMEU_policy_press-release_biocontrol-position-paper_202505.pdf&ved=2ahUKEwiZje3G4MyRAxWgnf-0HHXvhNk8QFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw1-xmi4vkBx2iq2re-be4EFU

 Regolamento (CE) N. 1107/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 21 ottobre 2009 relativo all'immissione sul mercato dei prodotti fitosanitari.

 Regolamento (UE) 2019/1009 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 5 giugno 2019 che stabilisce norme relative alla messa a disposizione sul mercato di prodotti fertilizzanti dell'UE Regolamento REACH (CE n. 1907/2006), relativo alla registrazione, valutazione, autorizzazione e restrizione delle sostanze chimiche.

Appendice 1

1. Definizione generale di prodotto *biobased*

La Direttiva (UE) 2018/2001 (“RED II” – energie rinnovabili), Art. 2(24) riporta: “materiale derivato da biomassa, ossia dalla frazione biodegradabile di prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall’agricoltura (comprendendo sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l’acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”.

Anche se qui è usata nel contesto dell’energia, la definizione è adottata come riferimento in altre policy UE.

La Comunicazione COM(2012)60 “Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe” (Strategia Bioeconomia) riporta: Definisce prodotti biobased come *beni e materiali derivati da risorse biologiche rinnovabili*.

2. Norme tecniche europee (CEN)

Gli standard CEN forniscono definizioni e metodi per misurare il contenuto *biobased*:

- **EN 16575:2014** – *Terminology for biobased products*: “Product wholly or partly derived from biomass”. Specifica che “biobased” descrive solo l’origine della materia prima, non implica automaticamente biodegradabilità o sostenibilità.
- **EN 16785-1:2015** – *Biobased products – Quantification – Part 1*: Metodo per determinare la percentuale di carbonio biobased con analisi isotopica (^{14}C).
- **EN 16785-2:2018** – Quantificazione del contenuto biobased mediante bilancio di massa.

3. Riferimenti in regolamenti di settore

- **Regolamento (UE) 2019/1009** sui prodotti fertilizzanti UE: Non usa il termine “biobased” in senso stretto, ma ammette materie

prime di origine biologica in diverse “Component Material Categories” (CMC), es. CMC 3 (compost), CMC 5 (digestato), CMC 7 (microrganismi).

- **Regolamento (CE) 1107/2009** sui prodotti fitosanitari: Non introduce una categoria “biobased”, ma include *basic substances* e *low-risk active substances*, molte delle quali sono di origine biologica.

4. Documenti di orientamento e policy UE

- **JRC (Joint Research Centre)**, *European Bioeconomy Observatory* – fornisce linee guida e definizioni operative per il monitoraggio dei prodotti biobased.
- **CEN/TR 16957:2016** – Rapporto tecnico su criteri di sostenibilità e tracciabilità per prodotti biobased.

5. Definizioni di prodotto *biobased*, fonte normativa o tecnica, ambito di applicazione e le note utili.

Definizione	Fonte normativa / standard	Ambito	Note
“Materiale derivato da biomassa, ossia dalla frazione biodegradabile di prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall’agricoltura (piante e animali), silvicoltura, pesca, acquacoltura e parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”	Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II), Art. 2(24)	Energia rinnovabile, ma usata come definizione di riferimento in policy bioeconomiche	Include rifiuti organici e sottoprodotti; contesto energetico ma adattabile ad altri settori
“Product wholly or partly derived from biomass”	EN 16575:2014 (CEN) – Terminology for <i>biobased</i> products	Tutti i prodotti <i>biobased</i>	Precisa che “ <i>biobased</i> ” indica solo origine della materia prima, non biodegradabilità o sostenibilità
Determinazione % contenuto <i>biobased</i> tramite $\delta^{14}C$	EN 16785-1:2015 (CEN)	Tutti i prodotti <i>biobased</i>	Metodo analitico per quantificare carbonio di origine biologica
Determinazione % contenuto <i>biobased</i> tramite bilancio di massa	EN 16785-2:2018 (CEN)	Tutti i prodotti <i>biobased</i>	Metodo basato su tracciabilità delle materie prime
Materie prime di origine biologica ammesse in specifiche categorie (es. compost, digestati, microrganismi)	Regolamento (UE) 2019/1009 (EU Fertilising Products Regulation)	Fertilizzanti, biostimolanti, ammendanti	Non usa il termine “ <i>biobased</i> ” ma definisce categorie di componenti di origine biologica
Basic substances e low-risk active substances (molte di origine biologica)	Regolamento (CE) 1107/2009 (PPP)	Prodotti fitosanitari	“ <i>Biobased</i> ” non è termine ufficiale qui, ma molte sostanze approvate hanno origine naturale
Linee guida e monitoraggio bioeconomia	JRC – European Bioeconomy Observatory; COM(2012)60	Policy e strategia UE per bioeconomia	Approccio ampio a tutti i settori <i>biobased</i> , incl. agricoltura

Appendice 2 – I mezzi tecnici impiegabili nel *management* sostenibile delle colture

1. Definizioni e Categorie di Mezzi Tecnici

Categoria	Definizione	Normativa	Note
Prodotti fitosanitari	Proteggono le colture da organismi nocivi o regolano la crescita	Reg. (CE) 1107/2009	Possono essere di sintesi o naturali
Corroboranti	Sostanze naturali che potenziano le difese delle piante	DM 27/11/2009	Utilizzabili anche in agricoltura biologica
Bioestimolanti	Stimolano i processi fisiologici delle piante senza fornire nutrienti direttamente	Reg. (UE) 2019/1009	Migliorano uso dei nutrienti e tolleranza agli stress abiotici
Fertilizzanti	Forniscono nutrienti alle piante	Reg. (UE) 2019/1009; D.Lgs. 75/2010	Minerali, organici, organo-minerali

2. Quadro Normativo

Livello	Riferimenti normativi principali	Contenuti principali
Europeo	Reg. 1107/2009, Dir. 2009/128/CE, Reg. 2019/1009, Reg. REACH	Autorizzazioni, uso sostenibile, requisiti di etichettatura, sicurezza chimica
Nazionale	D.Lgs. 150/2012 (PAN), D.Lgs. 75/2010, DM 27/11/2009, DM 10/07/2013	Recepiscono norme UE, disciplinano uso e autorizzazioni in Italia

3. Prodotti Fitosanitari – Autorizzazione

Livello	Responsabile	Processo
UE	EFSA	Valutazione sicurezza delle sostanze attive
Nazionale	Ministero della Salute	Autorizzazione dei prodotti commerciali; applicazione PAN

4. Mezzi *biobased* (non di sintesi chimica)

Tipologia	Esempi	Vantaggi	Criticità
Biopesticidi	<i>Bacillus thuringiensis</i> , neem, piretro	Basso impatto, compatibili col biologico	Spettro d'azione limitato, instabilità
Corroboranti naturali	Caolino, talco, oli essenziali	Potenziano difese naturali	Efficacia variabile
Bioestimolanti biologici	Alghe, compost, idrolizzati proteici	Migliorano resistenza e qualità	Costi alti, standardizzazione difficile
Feromoni/attrattivi	Trappole, confusione sessuale	Controllo mirato insetti	Effetto localizzato

Autori



Balconi Carlotta

Dirigente Tecnologo, si occupa della valorizzazione delle risorse genetiche del mais italiano e partecipa a programmi nazionali e internazionali sulla resistenza a stress biotici e abiotici. Coordina progetti dedicati allo studio delle proprietà bioattive delle piante in un'ottica di economia circolare.



Bassolino Laura

Ricercatrice biologa molecolare, esperta di genetica agraria applicata alle colture orticole e industriali. Studia la regolazione di pathways metabolici implicati nella produzione di composti bioattivi e la loro modulazione in risposta a stress biotico e abiotico. Svolge attività nell'ambito della genomica funzionale delle piante.



Battaglia Valerio

Patologo vegetale con esperienza nella protezione sostenibile delle colture. Lavora su biosoluzioni, tecniche agronomiche integrate e tecnologie per l'uso ottimizzato dei fitofarmaci. È responsabile del Centro di Saggio di Caserta per la sperimentazione su prodotti fitosanitari e biostimolanti.



Bianchi Giulia

Ricercatrice specializzata nella caratterizzazione biochimica delle matrici alimentari. Si occupa dell'analisi della frazione volatile attraverso metodiche analitiche, sensoristiche e sensoriali. Contribuisce allo sviluppo di tecniche avanzate per lo studio del profilo aromatico degli alimenti.



Calzone Antonella

Tecnico esperto nell'analisi e nella caratterizzazione biochimica di matrici vegetali, con particolare attenzione ai prodotti ortofrutticoli. Utilizza tecniche di spettrofotometria e cromatografia e supporta le attività di laboratorio dedicate allo studio dei componenti biochimici.



Carloni Matteo

Apicoltore e dottorando in Scienze, Tecnologie e Biotecnologie Agro-Alimentari. Si occupa di tematiche legate all'apicoltura e alle produzioni agricole primarie, integrando aspetti biologici e agronomici. Partecipa a progetti di ricerca sulle filiere apistiche e sul miglioramento della produzione.



Cariello Mario

Primo tecnologo attivo nella comunicazione istituzionale e digitale relativa alle politiche di sviluppo rurale e alla PAC. È Digital Communication Editor della rivista REA e cura strategie, contenuti e piattaforme informative. Autore di pubblicazioni su innovazione, bioeconomia e trasformazione digitale nella PA.



Cassol Helga

Assegnista di ricerca che si occupa di genomica del mais, con particolare attenzione alle varianti strutturali legate all'adattamento ambientale. Studia i meccanismi molecolari di risposta delle piante ai fattori esterni e approfondisce dinamiche genetiche associate alla resilienza vegetale.



Ficca Donatella Bianca Maria

Ricercatrice che studia la qualità nutrizionale e salutistica delle risorse genetiche dei cereali. Analizza componenti bioattive per la valorizzazione delle filiere. Co-inventrice di un brevetto riguardante un peptide con potenziale ruolo nella risposta alla celiachia.



Lahoz Ernesto

Esperto in patologia vegetale e micologia, con lunga esperienza su funghi fitopatogeni, metaboliti secondari e agenti di biocontrollo. Ha coordinato progetti nazionali e internazionali su epidemiologia, difesa sostenibile e variabilità genetica. Riconosciuto a livello internazionale per la difesa fitopatologica.



Lanzanova Chiara

Ricercatrice che studia fonti di tolleranza a stress biotici nelle principali colture cereali-cole. Analizza composti bioattivi vegetali per la protezione sanitaria e la sicurezza alimentare. Opera in un'ottica di economia circolare per la valorizzazione delle risorse biologiche.



Lasorella Valentina Maria

Ricercatrice specializzata nella valutazione delle politiche di sviluppo rurale in Italia ed Europa. Partecipa a progetti su sostenibilità, gestione delle risorse naturali e energie rinnovabili. Attiva nel cluster SPRING e nei progetti PRIMA e NextMED con approccio Water-Energy-Food Nexus.



Locatelli Sabrina Monica

Ricercatrice che si occupa di sicurezza e qualità alimentare, con particolare attenzione alle micotossine nel mais. Coordina attività di monitoraggio igienico-sanitario e conduce analisi anche su canapa e frumento. Impegnata nella valutazione del rischio per le principali filiere cerealicole.



Lo Scalzo Roberto

Ricercatore specializzato nella caratterizzazione biochimica delle matrici vegetali. Studia biomolecole con attività antiossidante e contribuisce alla comprensione dei fattori che influenzano la qualità nutrizionale. Ha esperienza nelle tecniche analitiche applicate alle sostanze bioattive.



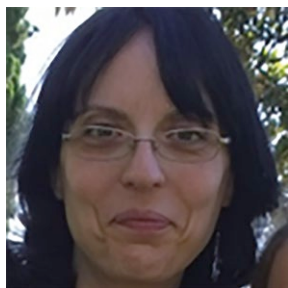
Marone Daniela

Ricercatrice con formazione in Scienze Biologiche e dottorato in miglioramento genetico delle specie agrarie e forestali. Studia le basi genetiche dei caratteri agronomici del frumento duro, con particolare attenzione alle resistenze alle malattie. Contribuisce a programmi avanzati di miglioramento genetico.



Massafra Annamaria

Biologa molecolare, dottoranda in Scienze, Tecnologie e Biotecnologie Agro-Alimentari. Svolge studi sui processi di valorizzazione degli scarti vegetali. Partecipa a progetti dedicati all'innovazione sostenibile nelle filiere agroalimentari.



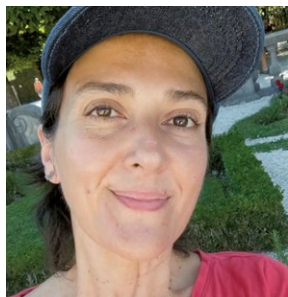
Mastrangelo Anna Maria

Ricercatrice e genetista agraria impegnata nello studio dei caratteri agronomici dei cereali. Co-chair di un gruppo internazionale dedicato alla genomica del frumento duro. Collabora a programmi di miglioramento genetico finalizzati alla resilienza delle colture.



Pacifico Daniela

Tecnologa, biotecnologa e responsabile delle attività di comunicazione del Centro. Coinvolta in progetti nazionali ed europei sulla valorizzazione degli scarti agro-industriali. Gestisce la collezione in vitro di patata e partecipa al progetto RGV-FAO come referente per la specie.



Pagnotta Eleonora

Chimico esperto in metaboliti secondari bioattivi. Studia il sistema mirosinasi-glucosinolati delle Brassicaceae e le relative applicazioni nei settori agroalimentare e farmaceutico.



Palmieri Alessandro

Tecnico ricercatore e docente a contratto in Management delle imprese agro-industriali. Si occupa di analisi delle filiere, valutazioni economiche e sostenibilità delle coltivazioni. Autore di numerose pubblicazioni scientifiche e divulgative in ambito agro-economico.



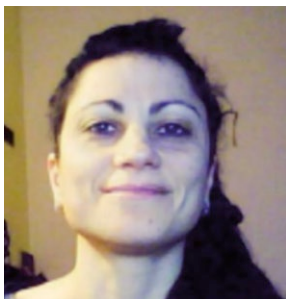
Parisi Bruno

Breeder e crop specialist di patata e leguminose ortive, responsabile di attività sperimentali e di trasferimento tecnologico. Costitutore di diverse nuove varietà, ha pubblicato oltre 270 lavori scientifici e tecnici. Attivo nella ricerca applicata al breeding delle colture industriali.



Prata Cecilia

Professoressa associata di Biochimica, coordinatrice di progetti educativi e di sostenibilità alimentare. Esperta di antiossidanti, stress ossidativo e valorizzazione degli scarti. Supervisiona attività di ricerca e progetti di dottorato.



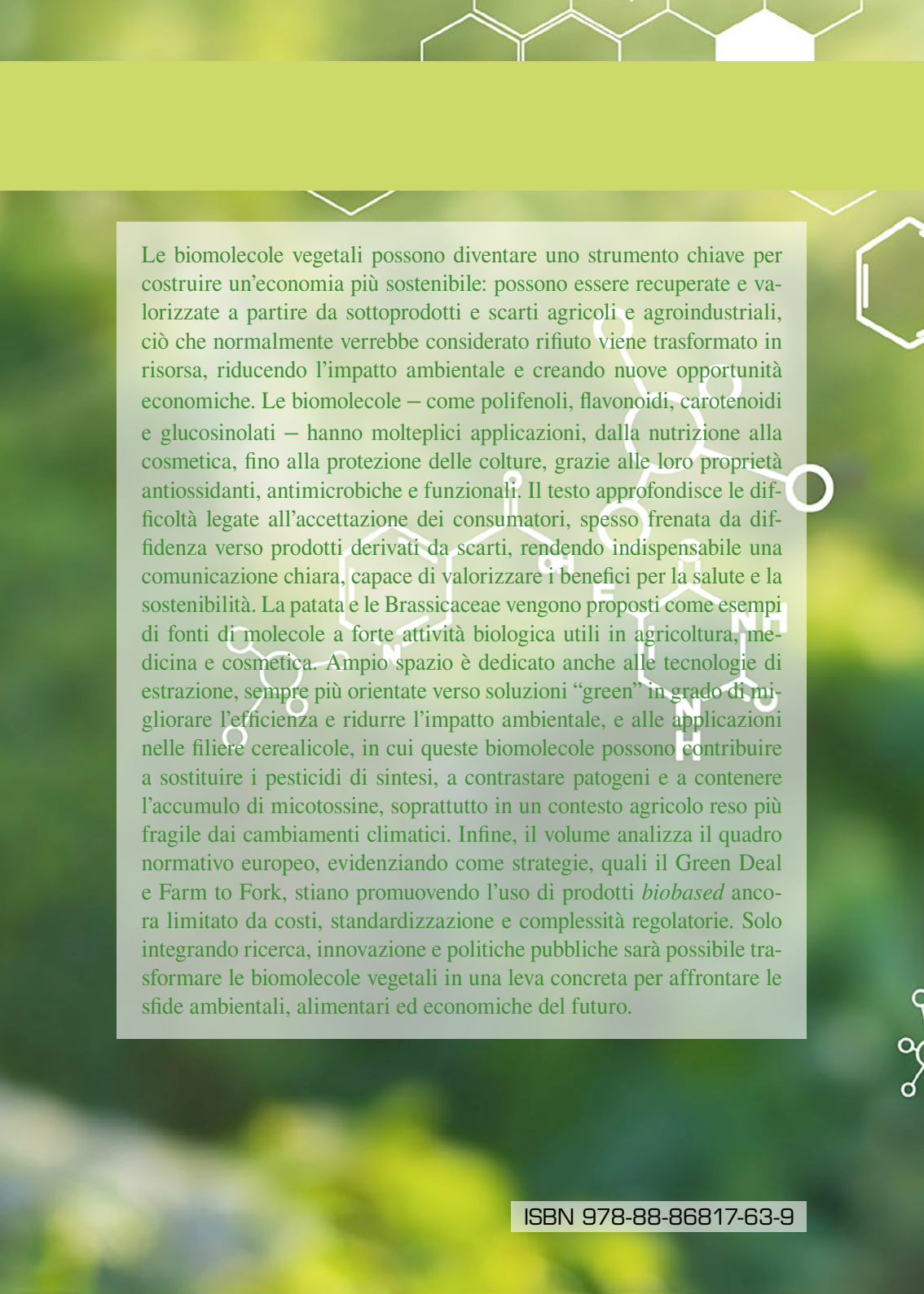
Ugolini Luisa

Chimico esperto in analisi chimica e biochimica di molecole naturali per applicazioni agroalimentari. Studia composti impiegati nella difesa delle colture e nella conservazione dei prodotti vegetali.



Zalambani Chiara

Dottoranda in Biochimica con esperienza in ricerca in vitro su molecole antiossidanti. Lavora sulla valorizzazione di bioattivi da scarti vegetali per applicazioni farmaceutiche e dermocosmetiche. Partecipa a progetti educativi su alimentazione e riduzione dello spreco.



Le biomolecole vegetali possono diventare uno strumento chiave per costruire un'economia più sostenibile: possono essere recuperate e valorizzate a partire da sottoprodotti e scarti agricoli e agroindustriali, ciò che normalmente verrebbe considerato rifiuto viene trasformato in risorsa, riducendo l'impatto ambientale e creando nuove opportunità economiche. Le biomolecole – come polifenoli, flavonoidi, carotenoidi e glucosinolati – hanno molteplici applicazioni, dalla nutrizione alla cosmetica, fino alla protezione delle colture, grazie alle loro proprietà antiossidanti, antimicrobiche e funzionali. Il testo approfondisce le difficoltà legate all'accettazione dei consumatori, spesso frenata da diffidenza verso prodotti derivati da scarti, rendendo indispensabile una comunicazione chiara, capace di valorizzare i benefici per la salute e la sostenibilità. La patata e le Brassicaceae vengono proposti come esempi di fonti di molecole a forte attività biologica utili in agricoltura, medicina e cosmetica. Ampio spazio è dedicato anche alle tecnologie di estrazione, sempre più orientate verso soluzioni "green" in grado di migliorare l'efficienza e ridurre l'impatto ambientale, e alle applicazioni nelle filiere cerealicole, in cui queste biomolecole possono contribuire a sostituire i pesticidi di sintesi, a contrastare patogeni e a contenere l'accumulo di micotossine, soprattutto in un contesto agricolo reso più fragile dai cambiamenti climatici. Infine, il volume analizza il quadro normativo europeo, evidenziando come strategie, quali il Green Deal e Farm to Fork, stiano promuovendo l'uso di prodotti *biobased* ancora limitato da costi, standardizzazione e complessità regolatorie. Solo integrando ricerca, innovazione e politiche pubbliche sarà possibile trasformare le biomolecole vegetali in una leva concreta per affrontare le sfide ambientali, alimentari ed economiche del futuro.