

**Annamaria Bevivino<sup>1\*</sup>, Andrea Sonnino<sup>2</sup> e Luigi Rossi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Responsabile Laboratorio Sostenibilità, Qualità e Sicurezza delle Produzioni Agroalimentari, Divisione Biotecnologie e Agroindustria, Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali, ENEA

<sup>2</sup> Presidente della Federazione Italiana dei Dottori in Scienze Agrarie e Forestali (FIDAF)

<sup>3</sup> Presidente Emerito della Federazione Italiana dei Dottori in Scienze Agrarie e Forestali (FIDAF)

\*Autore corrispondente

email: [annamaria.bevivino@enea.it](mailto:annamaria.bevivino@enea.it)

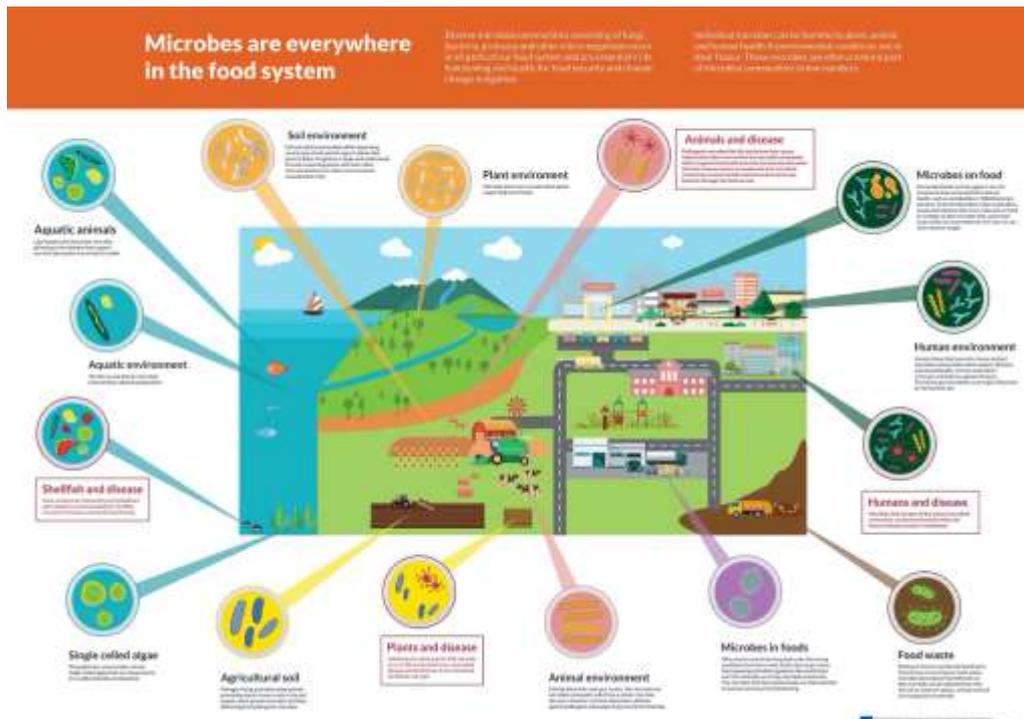
## **Il microbioma dell'agro-ecosistema al servizio della produzione primaria**

### **Introduzione**

I microrganismi svolgono un ruolo fondamentale nel mantenimento della vita sulla Terra. Le risposte alle sfide del nostro secolo risiedono in una visione olistica globale che riconosce la stretta connessione tra salute umana e salute degli ecosistemi terrestri. L'idea di coltivare piante per la salute umana e il benessere generale, piuttosto che per il consumo come solo cibo, sta cambiando la percezione delle persone nei confronti della biotecnologia vegetale e della biologia sintetica. Il concetto di *One Health* mette insieme la Salute del Pianeta con la Salute dell'Uomo (Atlas, 2013; Wolf, 2015). Riconoscendo che le persone, gli animali e l'ambiente sono indissolubilmente legati, l'approccio *One Health* propone una prospettiva univoca che, trasversalmente, mediante la promozione di un programma di ricerca multidisciplinare, si prefigge di affrontare in modo efficace i problemi legati alle patologie emergenti, per migliorare la salute e il benessere degli organismi viventi ([www.onehealthcommission.org](http://www.onehealthcommission.org)) (Destoumieux-Garzón et al., 2018). Nella visione *One Health* le piante rivestono un ruolo fondamentale. Le piante sono gli organismi viventi che più di ogni altro condizionano la vita del nostro Pianeta (Fletcher et al., 2009). La loro salute è strettamente connessa alla salute umana e al benessere animale, è parte essenziale di quella dell'intera biosfera, dai microrganismi all'uomo, senza priorità, ed è garanzia di sicurezza alimentare per la specie umana. Ma un ruolo fondamentale è svolto dai microrganismi che non conoscono confini. Ecosistemi microbici complessi, denominati collettivamente microbioti, svolgono una posizione centrale nel concetto di *One Health*, contribuendo a una nuova prospettiva integrata della salute degli organismi viventi (Trinh et al., 2018). I microbioti si trovano negli esseri umani, nelle piante e negli animali, nonché negli ambienti terrestri e marini, fornendo benefici per il pianeta nel suo insieme e tutto ciò che vive su di esso.

L'incremento della domanda di cibo dovuta all'incremento della popolazione mondiale ha per anni causato un'intensificata pressione sulle risorse naturali. L'introduzione di varietà di colture ad alto

rendimento geneticamente migliorate e l'impiego di nuove tecnologie in campo agricolo, come i fertilizzanti chimici, gli erbicidi e i fitofarmaci sintetici, hanno determinato un considerevole aumento della produzione e della produttività, ma con un costo ambientale elevato, oggi non più sostenibile. L'espansione della produzione alimentare ha comportato un impatto significativo sull'ambiente, causando l'erosione della diversità genetica delle piante e diversità microbica del suolo, fonte di microbiomi benefici per le piante (Pérez-Jaramillo et al., 2016), con conseguenti danni sull'equilibrio del suolo, dell'acqua e su tutti i servizi offerti dagli ecosistemi. Per tutti questi motivi è quanto mai urgente e necessario promuovere un cambiamento nel modo in cui produciamo e consumiamo cibo. In questi ultimi anni, abbiamo assistito a una maggiore consapevolezza e preoccupazione su questi temi e vi è un consenso generale sulla necessità di definire e adottare alternative agricole più sostenibili e rispettose dell'ambiente. La recente pandemia di COVID-19 ha portato a un ripensamento radicale della modalità di produzione di cibo, aumentando i dubbi sui possibili impatti che un'agricoltura non sostenibile sta avendo sull'equilibrio dell'intero ecosistema, dall'uomo alle piante, animali e natura (Bahadur Poudel et al., 2020). Produrre di più e nel contempo migliorare le pratiche agricole per diminuire l'impatto ambientale, usando in maniera efficiente le scarse risorse naturali, sono queste le principali sfide che il settore agricolo mondiale si troverà a dover affrontare nei prossimi decenni. Una possibile alternativa è offerta dai microbiomi che si trovano ovunque nell'intero sistema alimentare (Figura 1). Circolano nell'oceano aperto dove fungono da base della catena alimentare marina, dimorano nell'intestino degli animali o colonizzano le radici, e foglie e frutti di tutte le piante coltivate, aumentano l'assorbimento di nutrienti delle piante coltivate e sono, fin dall'antichità, attori chiave nella produzione alimentare, essenziali per la salute delle piante, degli animali, dell'uomo e dell'ambiente. Sfruttare il "microbioma al lavoro" e capitalizzare i tratti microbici benefici per l'ospite o per l'ambiente o per entrambi, rappresenta una strada promettente per lo sviluppo di un'agricoltura di nuova generazione più sostenibile (Schlaeppi & Bulgarelli, 2015).



**Figura 1.** La diffusione dei microorganismi nel sistema alimentare (tratto da: Microbiome Support Action <https://www.microbiomesupport.eu/wp-content/uploads/2020/06/A4-infographic.jpg>). Le comunità di microbi sono essenziali per la salute delle piante, degli animali, dell'uomo e dell'ambiente, con un conseguente impatto in termini di produttività delle colture e del bestiame, qualità e sicurezza alimentare, nonché per i processi di decomposizione e riciclaggio dei rifiuti alimentari. La composizione delle comunità microbiche differisce nel sistema alimentare, a seconda delle condizioni ambientali.

## Il microbioma e il concetto di olobionte

Il campo della ricerca sul microbioma si è evoluto rapidamente negli ultimi decenni ed è diventato un argomento di grande interesse scientifico e pubblico (Hadrich, 2018). Come risultato di questa rapida crescita di interesse che copre diversi settori, ci manca una chiara definizione comunemente concordata del termine "microbioma". Come anche un consenso sulle migliori pratiche nella ricerca sul microbioma. Alcuni con il termine microbioma indicano i batteri presenti in una comunità microbica, non considerando affatto i virus, i protozoi e altri organismi che possono essere presenti; altri usano le parole microbiota e microbioma in modo intercambiabile, anche se questi termini sono diversi. Di recente, un gruppo di esperti internazionali ha fornito una nuova definizione di "microbioma" (<https://www.microbiomesupport.eu/the-microbiome-re-defined/>) (Berg et al., 2020), basandosi su quella suggerita da un Whipps e dai suoi colleghi nel 1988 (Whipps et al., 1988), con alcuni dettagli aggiuntivi basati sulle nuove conoscenze che abbiamo sul microbioma. *Con il*

termine **microbioma** si intende una caratteristica comunità microbica che occupa un ben definito habitat con distinte proprietà fisico-chimiche. Il microbioma non si riferisce ai soli microorganismi ma abbraccia anche il loro teatro di attività, con la formazione di nicchie ecologiche specifiche. Il microbioma, che forma un micro-ecosistema dinamico e interattivo soggetto a cambiamenti nel tempo e nello spazio, è integrato nel macro-ecosistema comprensivo dell'ospite eucariotico, rivelandosi cruciale per il suo funzionamento e stato di salute. Il **microbiota**, invece, consiste nell'assemblaggio di microorganismi appartenenti a differenti Regni [Procarioti (Batteri e Archea), Eucarioti (e.g. Protozoi, Fungui e Alghe)], mentre il suo **teatro di attività** include elementi strutturali microbici (proteine/peptidi, lipidi, polisaccaridi), metaboliti microbici (molecole segnale, tossine, molecole organiche), acidi nucleici ed elementi genetici mobili (e.g. trasposoni, fagi, virus) come pure "relic-DNA", ovvero frammenti di DNA extracellulare rilasciati nell'ambiente o in cellule non integre (Carini et al., 2016).

La maggior parte degli ecosistemi naturali è caratterizzata da un alto grado di strutturazione spaziale, che è stata considerata importante per molti servizi ecosistemici (Soliveres et al., 2016). I terreni sono costituiti principalmente da microaggregati (<0,25 mm), che legano il carbonio organico del suolo e lo proteggono dalla rimozione per erosione e da macroaggregati (da 0,25 a 2 mm), che limitano la diffusione dell'ossigeno e regolano il flusso dell'acqua; ciascuno degli aggregati fornisce una nicchia ecologica unica, con la sua caratteristica struttura del microbioma. I suoli sono caratterizzati dall'esistenza dei cosiddetti hotspot microbici colonizzati da una frazione di microorganismi con un metabolismo attivo circa 2–20 volte superiore rispetto agli hotspot non microbici, rendendo i cambiamenti temporali nella struttura e nella funzione del microbioma molto più dinamici rispetto ai siti con minore attività microbica (Kuzuyakov & Blagodatskaya, 2015). I suoli sono gli ecosistemi con la composizione più diversificata di microbiota sulla Terra come conseguenza della presenza di così tante nicchie diverse. Poiché le piante e la lavorazione del terreno influenzano in larga misura la struttura del suolo, una perdita di diversità vegetale ha un forte impatto anche sulla biodiversità del microbioma del suolo. Tuttavia, la risposta alla domanda "i cambiamenti nel microbioma del suolo inducono cambiamenti nella diversità delle piante o viceversa?" rimane ancora poco chiara. Anche la colonizzazione della pianta da parte del microbiota non è uniforme. È noto che, ad esempio, le foglie ospitano un microbiota diverso rispetto alla radice, e la radice stessa è colonizzata in modo eterogeneo dai microbi, con microbiota diverso lungo la lunghezza della rizosfera e alla superficie della radice rispetto alla radice interna. Recentemente, il tema del microbiota da seme ha attirato l'attenzione come possibile modalità per la trasmissione verticale di un microbiota di base da una generazione di piante all'altra (Berg & Raaijmakers, 2018). Simile alle piante, il corpo umano non è colonizzato in modo omogeneo dai microbi: ogni compartimento del corpo contiene il proprio

microbiota (Proctor & Relman, 2017) e anche il microbiota di un sito del corpo può differire a seconda dell'area di campionamento.

Le piante hanno sviluppato una strategia unica per contrastare gli stress biotici e abiotici co-evolvendo simbioticamente con i microrganismi e sfruttando il loro genoma per questo scopo. Gli studi dell'ultimo decennio hanno rivelato che le piante si sono evolute con una pletera di microrganismi le cui funzioni sono vitali ed essenziali per la crescita e la salute delle piante stesse. Le strette relazioni tra la pianta e i microrganismi ad essa associati hanno dato origine alla teoria della coevoluzione dell'ospite e del suo microbiota associato (Cordovez et al., 2019). La coevoluzione è l'adattamento reciproco degli organismi che condividono lo stesso ecosistema in risposta alle modificazioni dell'ambiente in cui vivono. Ad esempio, la formazione e crescita di piante terrestri primitive è facilitata dalle associazioni simbiotiche fungine, suggerendo che le piante si sono evolute con i microbi sin dalla loro prima apparizione sulla terra. Un altro esempio lo ritroviamo negli eucarioti; mitocondri e plastidi sono organelli all'interno delle cellule eucariotiche che derivano da batteri endosimbiotici e che, durante la coevoluzione, sono diventati interamente dipendenti dai loro ospiti e viceversa (Berg et al., 2020). La coevoluzione del microbo ospite è importante da considerare per facilitare una comprensione olistica del microbiota (Rosenberg & Zilber-Rosenberg, 2016; Zilber-Rosenberg & Rosenberg, 2008). L'approccio olistico vede l'ospite e il suo microbiota associato come un'unità (il cosiddetto olobionte), che coevolve come un'unica entità. Il flusso dinamico di microrganismi da un ospite all'altro e all'ambiente, descritto dal concetto di *One Health*, è alla base dell'approccio olistico nella coevoluzione. Il genoma della pianta e il genoma dei microrganismi che la pianta ospita nei diversi tessuti vegetali, vale a dire il "microbioma vegetale", costituiscono quel che si definisce un "olobioma" che è ora considerato come unità di selezione, ovvero un unico bersaglio della selezione naturale che evolve come un unico individuo: "l'olobionte". Questo genoma esteso (l'ologenoma) meglio definisce le capacità reali di un organismo rispetto ai soli genomi vegetali presenti in ciascuna delle sue cellule. Il concetto di olobionte, introdotto da Lynn Margulis nel 1991 (Margulis, 1991), ha assunto oggi un significato generale con il riconoscimento della universale presenza di microrganismi variamente associati ad organismi eucarioti pluricellulari, che ha portato ad indicare nell'olobionte e nel suo ologenoma uno dei livelli fondamentali della selezione evolutiva, un'entità dinamica, sempre impegnata nella ridefinizione dell'equilibrio vantaggioso tra le varie componenti in gioco. Un "olobionte" è quindi un assemblaggio dell'individuo e dei suoi simbionti che vivono e funzionano come un'unità di organizzazione biologica, che hanno la capacità di replicarsi e trasmettere l'informazione genetica; quindi, un'unità di selezione (Zilber-Rosenberg & Rosenberg, 2008). In effetti, il genoma collettivo del microbioma della rizosfera è molto più grande di quello della pianta e quindi indicato come secondo genoma o pan-genoma della pianta (Berendsen

et al., 2012). Lo sviluppo della teoria dell'olobionte sta ora svelando una nuova base di variazione genetica, che è ereditabile e offerta dal microbioma vegetale, in particolare dal compartimento endofitico (Nogales et al., 2016; Ryan et al., 2008). Il miglioramento delle piante deve riconoscere questa evidenza e procedere considerando pianta e microrganismi associati come un'unica unità di selezione (Gopal & Gupta, 2016). Le comunità microbiche endofitiche associate ai semi sono di grande importanza perché rappresentano la principale fonte di inoculo microbico nella coltivazione delle colture. I progressi nella conoscenza del microbioma associato ai semi sono pertanto diventati fondamentali in quanto costituiscono la base della trasmissione verticale dei microrganismi e, quindi, agiscono come un serbatoio strettamente collegato del microbioma endofitico delle piante che ha molti effetti positivi sulla germinazione e sulla crescita delle piante. La trasmissione di batteri endofitici può avvenire dalla pianta madre ai semi e quindi alle piantine (trasmissione verticale) oppure orizzontalmente dall'ambiente (attraverso il suolo, l'atmosfera e gli insetti) ad ogni nuova generazione (Frank et al., 2017).

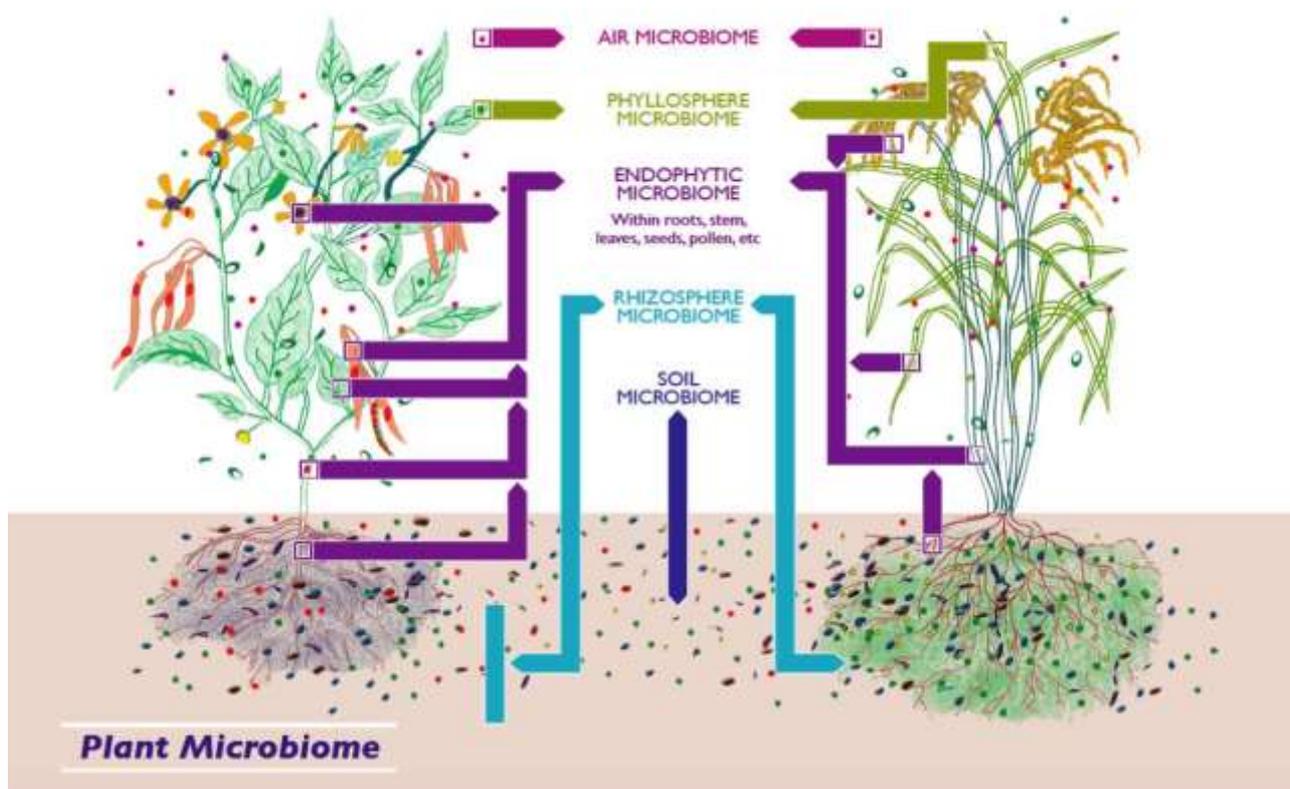
### **Le potenzialità del microbioma per una nuova rivoluzione agricola**

La maggior parte del cibo che mangiamo è prodotta nel suolo e sul terreno. Il cibo che mangiamo e il modo in cui lo produciamo hanno subito profondi cambiamenti nell'ultimo secolo. Il consumo di alimenti trasformati con una durata di conservazione più lunga e di cibi pronti è in aumento. Allo stesso tempo, la popolazione umana è in rapida espansione. L'agricoltura moderna non si preoccupa pertanto più di salvaguardare la fertilità dei suoli, ma per garantire la produzione di alimenti in maggiori quantità e a prezzi più accessibili, ha determinato un eccessivo consumo di acqua ed energia e un aumento nella produzione di anidride carbonica più del necessario. Ora è giunto il momento di ripensare il nostro rapporto con il cibo che consumiamo e anche con il territorio e le comunità che lo producono. Al giorno d'oggi, la produzione agricola deve affrontare molte sfide come il cambiamento climatico, lo sviluppo demografico ed il conseguente aumento della domanda alimentare, e c'è una crescente domanda di produzione sostenibile e la necessità di una continua innovazione nell'identificazione di nuove fonti alimentari a prezzi accessibili e di alimenti altamente nutrienti.

Il suolo è la base di produzione della nostra alimentazione e rappresenta la banca della diversità microbica da cui una pianta preleva selettivamente il suo microbioma per soddisfare le sue esigenze. Esso è una preziosa risorsa naturale che ospita hotspot microbici svolgendo un ruolo fondamentale nel mantenimento dell'equilibrio globale dei nutrienti e della funzione degli ecosistemi. Nel suolo sono presenti numerosi e diversi microrganismi che svolgono funzioni essenziali nei cicli degli elementi (C, N, S, P, altri) e che contribuiscono in maniera sostanziale al benessere dell'ecosistema,

sia a livello di salute dei suoli stessi che di sviluppo delle piante. Non soltanto i microrganismi del suolo, ma anche rizobatteri, simbionti ed endofiti partecipano alla vita della pianta, favorendone la crescita attraverso molteplici meccanismi quali fissazione dell'azoto, solubilizzazione del fosforo, produzione di acido indolacetico, siderofori e antibiotici. I diversi gruppi di microrganismi rappresentano pertanto la componente chiave del sistema suolo-pianta, dove è impegnata un'intensa rete di interazioni nella rizosfera, nei tessuti interni della pianta e nella fillosfera (Figura 2) (Barberán et al., 2012; Hassani et al., 2018). I microbiomi del suolo e delle piante (rizosferici, endofitici ed epifiti) svolgono un ruolo importante nella crescita e sviluppo delle piante, e nella salute del suolo; forniscono alla pianta un genoma secondario che offre funzioni ecologiche chiave e favoriscono l'ospite; sono in grado di influenzare la salute delle piante e la produttività, migliorando la tolleranza allo stress e fornendo, pertanto, un vantaggio adattivo; mediano diversi tratti funzionali delle piante; influenzano la plasticità fenotipica delle piante; sono fondamentali per garantire la qualità e la sicurezza della produzione primaria delle piante, compresi i frutti e i relativi alimenti trasformati (Compant et al., 2019; Panke-Buisse et al., 2015; Timmusk et al., 2017). L'utilizzo del potenziale funzionale dei microbiomi del suolo e delle piante potrà portare ad una riduzione degli input chimici, all'aumento della qualità e sicurezza dei raccolti e dei prodotti alimentari, incrementando allo stesso tempo la fornitura di funzioni ecosistemiche benefiche per l'ambiente e la salute umana (Chaparro et al., 2012; Gopal & Gupta, 2016; Song et al., 2020).

La selezione dei microbiomi potrebbe stimolare le strategie di miglioramento genetico delle piante di prossima generazione. I microbiomi vegetali possono essere migliorati per una produzione più sostenibile di alimenti di alta qualità modulando la crescita di piante e animali, controllando il loro sviluppo fisiologico, potenziando le loro difese contro agenti patogeni e insetti nocivi, migliorando la qualità dei nutrienti e controllando la resistenza allo stress (Lugtenberg, 2015). Le soluzioni basate sui microbiomi forniscono spunti di riflessione sulla riprogettazione delle catene alimentari al fine di renderle più resilienti alle crisi connesse con i mercati e le società globali. L'uso di microbi benefici per migliorare non solo la crescita e la resa delle piante, ma anche la qualità dei nutrienti delle colture rappresenta uno strumento promettente che può rispondere alle sfide dell'agricoltura moderna. Un'agricoltura migliorata, modificata e post-COVID-19 richiederà anche un atteggiamento più rispettoso degli equilibri ecologici negli agroecosistemi e il coinvolgimento degli sforzi delle diverse discipline scientifiche verso lo sviluppo di tecnologie mature, a garanzia della produzione di alimenti per tutti (Stanca, 2017).



**Figura 2.** Descrizione del microbioma vegetale, tratta dal Concept paper: Italian microbiome initiative for improved human health and agri-food production, del Comitato Nazionale per la Biosicurezza, le Biotecnologie e le scienze della vita. Il microbioma vegetale può essere descritto come la somma totale del contributo genomico apportato dalle diverse comunità microbiche che abitano la superficie e i tessuti interni delle parti della pianta. Le comunità microbiche si trovano principalmente nella rizosfera, nell'endosfera e nella fillosfera. Il microbioma del suolo è la principale fonte da cui la pianta seleziona e costruisce il suo profilo microbiomico

### **Il microbioma al centro della sostenibilità della produzione alimentare**

In questi ultimi anni si è compreso lo straordinario valore che il microbioma ha per le piante e per l'essere umano e si sta cercando ora di capire come sfruttarlo per migliorare la produzione delle colture e la vita dell'uomo. Nel settore agro-alimentare, le potenzialità del microbioma sono enormi. Come avviene per la salute umana, l'obiettivo dei ricercatori è quello di utilizzare creare degli integratori per avere un microbioma sano e utile alle piante. (Woo & Pepe, 2018). La sfida è quella di individuare, isolare e studiare i batteri "buoni" per poi farli riprodurre e applicarli alle colture. I biostimolanti hanno lo scopo di difendere le piante dagli stress abiotici, come il caldo, la mancanza di luce o la siccità. Ma anche aumentare la capacità di assorbimento dei nutrienti o migliorare la

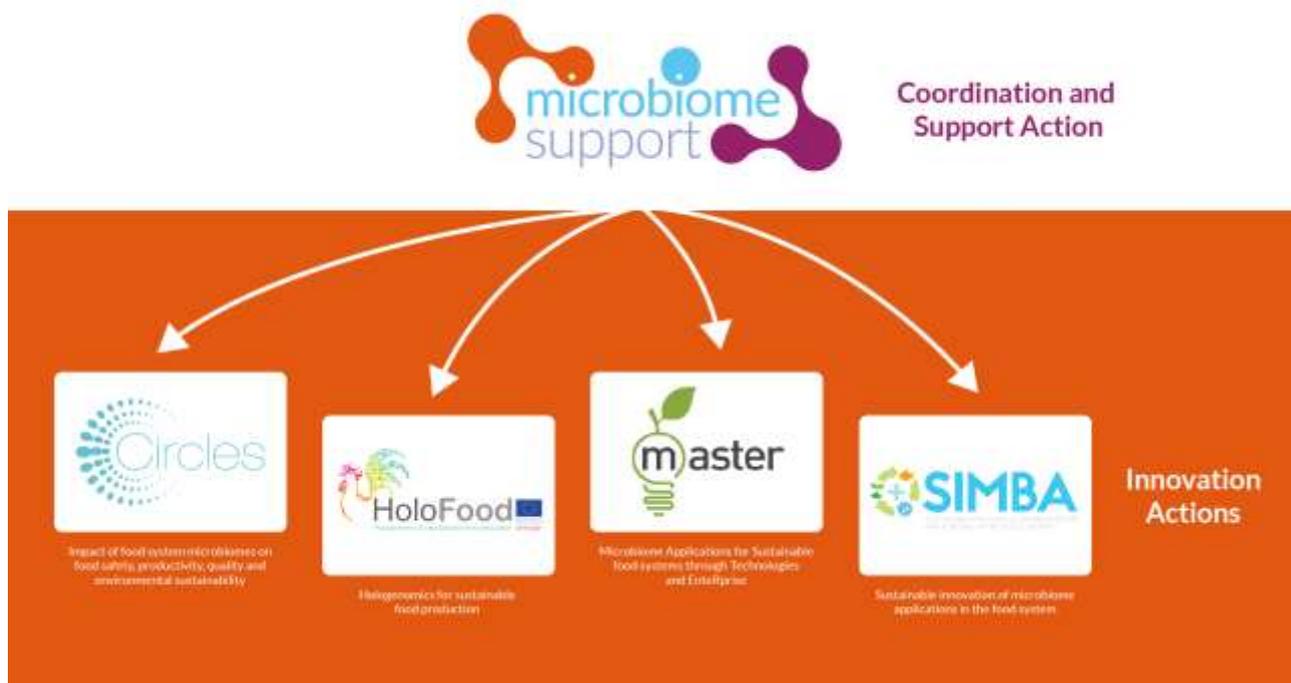
qualità della produzione. I batteri possono essere utilizzati anche per difendere le colture da altri microrganismi, come i funghi, o da insetti. Possono proteggere le piante competendo con i microrganismi patogeni per la stessa nicchia ecologica, producendo inibitori o inducendo resistenze sistemiche nella pianta ospite. L'utilizzo di consorzi microbici sintetici costituiti da microrganismi benefici per la pianta con diverse funzioni, come batteri che fissano l'azoto, microbi solubilizzanti fosfatici, rizobatteri che promuovono la crescita delle piante (PGPR) e micorrize arbuscolari, in grado di agire in maniera sinergica, sono diventati un'alternativa ecologicamente favorevole per integrare gli input inorganici e favorire lo sviluppo della pianta. Tuttavia, le applicazioni microbiche non hanno sempre funzionato ai livelli previsti in condizioni ecologiche diverse (Ambrosini et al., 2016). Una delle possibili spiegazioni potrebbe essere che i microbi introdotti non sono stati in grado di trovare nel suolo i loro gruppi interdipendenti come nei terreni nativi da cui erano originariamente isolati, il che li avrebbe aiutati a condividere e scambiare metaboliti critici come gli aminoacidi e zuccheri per promuovere la loro sopravvivenza in microambienti difficili. In breve, i microrganismi dipendono dai loro gruppi affinché i metaboliti chiave possano coesistere in un ambiente con diverse comunità microbiche (Zelezniak et al., 2015). Ciò evidenzia ancora una volta il fatto che i microrganismi funzionano in modalità di rete e la loro rete offre un'ampia base di diversità genomica microbica che potrebbe influire sulla variabilità genetica delle piante.

Selezionare e portare in campo i batteri buoni quindi può non essere sufficiente, bisogna anche creare un ambiente favorevole al loro sviluppo. Molti ricercatori hanno affrontato il tema degli inoculanti microbici e hanno cercato di garantire e assicurare l'efficacia anche in pieno campo, non sempre con successo. Si è visto come le pratiche agricole o il genotipo della pianta possano influenzare il microbioma della pianta, e quindi il suo funzionamento. Anche l'uso di biochar come ammendante porta ad un miglioramento della struttura del suolo, aumentandone la ritenzione idrica, e fornisce ai batteri buoni l'habitat ideale dove moltiplicarsi. Più di recente, utilizzando il trapianto di suolo, è stato dimostrato che le comunità vegetali possono essere ripristinate rapidamente su terreni degradati o disturbati, con comunità del suolo come microbi, nematodi e microartropodi che rappresentano i principali driver (Wubs et al., 2016). Diverse sono quindi le strade che possono portare ad una nuova generazione di inoculanti e all'applicazione di microbiomi in agricoltura che potrebbe dare avvio a una nuova rivoluzione verde, molto più sostenibile rispetto alla precedente (Qiu et al., 2019).

Le applicazioni microbiche rappresentano strumenti di eccellenza per lo sviluppo della *bioeconomia* e della *biosostenibilità*. La *bioeconomia* si prefigge di favorire l'accesso alle importanti collezioni nazionali di microorganismi e valorizzare la biodiversità microbica; migliorare la comprensione del ruolo dei microrganismi come attori biologici strategici per la resilienza ma anche la salute e la produttività delle piante e degli animali terrestri e acquatici/marini nonché degli ecosistemi del suolo

e delle acque; utilizzare i microbiomi benefici come determinanti di produttività, qualità, sicurezza, adatti per la produzione agroalimentare sostenibile nel contesto delle grandi sfide climatiche.

Nel 2018, ha preso avvio una proposta di azione di coordinamento e sostegno (CSA) delle attività di Ricerca e Innovazione (R&I) sul microbioma nel sistema alimentare a sostegno degli obiettivi della Comunità Europea e della bioeconomia internazionale. MicrobiomeSupport: Towards a sustainable and circular, microbiome-based bioeconomy (<https://www.microbiomesupport.eu/about/>) ha l'obiettivo generale di stabilire una rete internazionale di esperti sul microbioma, elaborando microbiomi da vari ambienti come terrestre, vegetale, acquatico, alimentare, animale e umano al fine di valutarne l'applicabilità e l'impatto sul sistema alimentare. Tale azione tuttora in corso promuoverà la ricerca e l'innovazione nel microbioma e promuoverà la bioeconomia e la strategia FOOD 2030. Il programma Horizon 2020, in risposta alla call *LC-SFS-03-2018 "Microbiome applications for sustainable food systems"*, ha finanziato nel 2018 ben quattro progetti, supportati dal MicrobiomeSupport Project (Figura 3), che si prefiggono di sfruttare le potenzialità del microbioma per *aumentare la produttività e la sostenibilità delle catene alimentari* e creare nuovi alimenti sostenibili e di qualità. I progetti CIRCLES (*Controlling mIcRobiomes CircuLations for bETter food Systems*) (<https://circlesproject.eu>), SIMBA (*Sustainable Innovation of MicroBiome Applications in Food System*) (<https://simbaproject.eu>), MASTER (*Microbiome Applications for Sustainable food systems through Technologies and EnteRprise*) (<https://www.master-h2020.eu>) e HOLOFOOD (*Unlocking a Holo-Omic framework for food production*) (<https://www.holofood.eu>), vedono i ricercatori impegnati nella produzione in modo sostenibile di alimenti di qualità per tutti, aumentando la produttività e la sostenibilità delle catene alimentari e sfruttando meno le risorse grazie all'utilizzo del potenziale metabolico dei microorganismi in tutti i passaggi della filiera alimentare (suolo, acqua, mangimi, piante, animali, uomo). L'obiettivo è quello di utilizzare soluzioni *microbiome-based* in grado di i) identificare le interrelazioni tra i microbiomi attraverso le catene alimentari, ii) provvedere al sostentamento e alla sicurezza alimentare di una popolazione mondiale sempre più in crescita, iii) garantire una maggiore produzione di cibo, sfruttando meno le risorse naturali e riducendo gli sprechi, iv) aumentare la qualità degli alimenti e realizzare anche prodotti alimentari e alimenti fermentati con effetti benefici sulla salute umana e v) migliorare l'efficienza dei sistemi di produzione alimentare mediante l'uso di additivi per mangimi e nuovi mangimi sostenibili negli animali da allevamento.

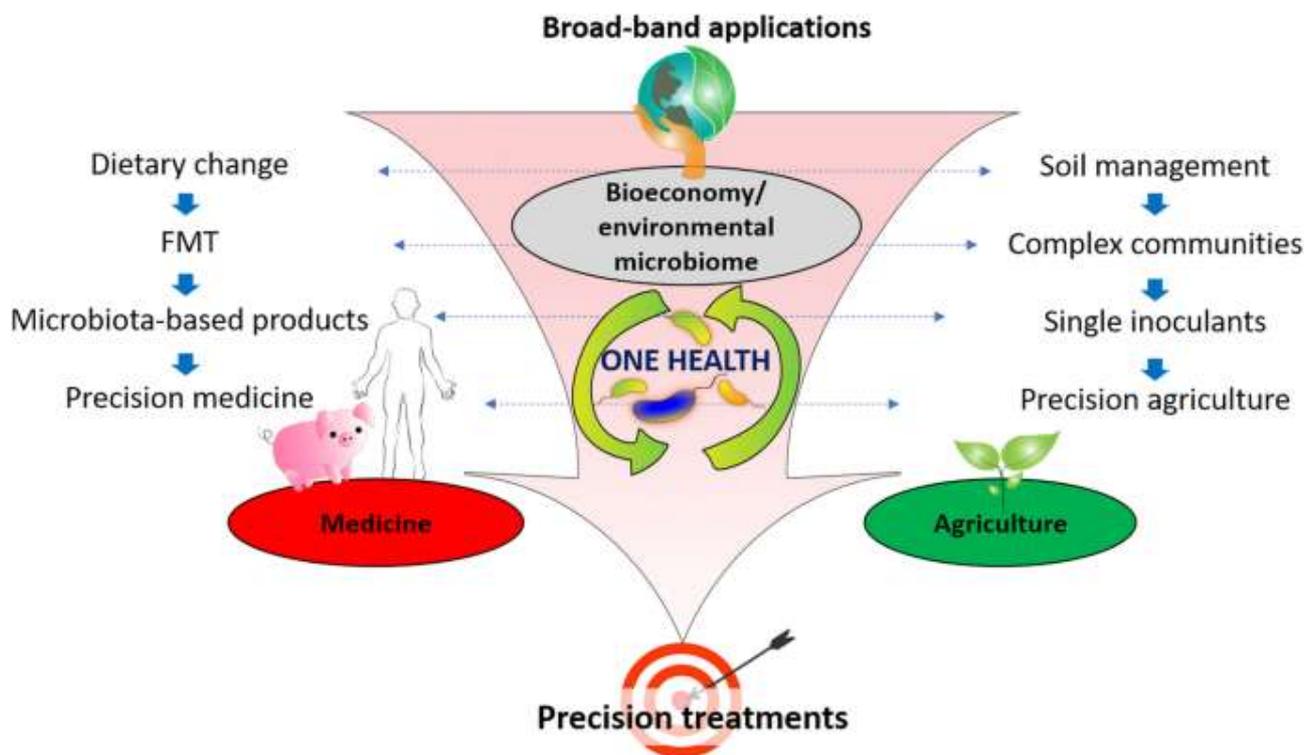


**Figura 3.** L'azione di coordinamento MicrobiomeSupport e i progetti ad essa legati <https://www.microbiomesupport.eu/project-partners-2/>

### Le applicazioni dei microbiomi: dalla salute delle piante alla salute dell'essere umano

La crescente disponibilità di dati sul microbioma, guidata dai progressi nelle tecnologie delle scienze omiche, ha portato a un aumento nella nostra comprensione del potenziale dei microbiomi per migliorare la produttività e la sostenibilità del sistema agroalimentare, ma non solo (Sergaki et al., 2018; Wei et al., 2019). La grande visione della ricerca applicata sul microbioma è quella di migliorare la salute di esseri umani, animali, piante e di interi ecosistemi. In generale, i microbiomi possono essere gestiti direttamente applicando (i) trapianti di microbiomi, (ii) microbiomi sintetici contenenti le specie *keystone* con proprietà benefiche o (iii) metaboliti attivi per il microbiota, o indirettamente modificando le condizioni ambientali in modo che anche i microbiomi possano cambiare la loro struttura e funzione passando dalla disbiosi allo stato di salute (Berg, 2009; Hadrich, 2018). Quando si confrontano le applicazioni basate sul microbioma tra esseri umani, animali e sistemi di coltivazione, è visibile una straordinaria sinergia (Figura 4). Sebbene i rispettivi campi non siano ancora ben collegati, una tendenza coerente è diventata evidente in tutte le aree. Questa tendenza prevede un focus su trattamenti su misura, come ad esempio l'agricoltura di precisione di "prossima generazione" o la medicina personalizzata. Questo concetto si basa sulla comprensione fondamentale di quelle particolari interazioni ospite-microbo, ambiente-microbo e microbo-microbo che mediano l'assemblaggio del microbioma e le capacità funzionali in diversi contesti.

La medicina personalizzata si riferisce a un modello medico che propone di adattare pratiche o prodotti sanitari su misura per il singolo paziente. Le terapie ottimali vengono scelte sulla base dei risultati ottenuti dalla diagnostica molecolare e nel contesto del corredo genetico del paziente. Ispirata al concetto di medicina personalizzata, l'agricoltura di nuova generazione dovrebbe mirare a personalizzare le pratiche e gli strumenti adattati all'ambiente del suolo individuale. Analogamente, il microbioma vegetale è stato identificato come la chiave di volta per la prossima rivoluzione verde e potrebbe fornire la base per la scelta razionale del trattamento agricolo appropriato (Berg et al., 2020). Il vasto mondo degli invisibili, egregiamente descritto da Marco Nuti (Nuti, 2020), rappresenta un alleato fondamentale per una crescita sana e vigorosa delle piante e per la produzione di alimenti con maggior valore nutraceutico. La ricerca sui microbiomi vegetali sosterrà approcci di gestione mirati e predittivi che sono adatti alle condizioni specifiche del campo e possono quindi portare a una maggiore sostenibilità. Grazie alle tecniche di sequenziamento genetico e alle tecnologie di produzione, siamo ora arrivati a un punto in cui possiamo identificare e coltivare efficacemente e a basso costo i batteri chiave e le giuste specie di funghi e applicarli in agricoltura su larga scala. Possiamo produrre questi "fertilizzanti biologici" e aggiungerli a semi di soia, mais, verdure o altri semi per coltivare e nutrire la pianta. Possiamo immaginare un futuro in cui, sulla base della determinazione precisa del microbioma del suolo e delle piante, si possa delineare un intervento razionale con inoculanti microbici sul campo. Gli agricoltori potranno così ottimizzare i propri raccolti capitalizzando le caratteristiche microbiche e, allo stesso tempo, riducendo gli input costosi e non sostenibili di prodotti chimici per l'agricoltura (Schlaeppi & Bulgarelli, 2015). Anche il microbiota post-raccolta, strettamente legato al nostro microbiota alimentare, può essere gestito per la produzione di alimenti sani, di qualità o con nuove proprietà funzionali. Questa ulteriore applicazione del microbioma ancora poco esplorata porterà benefici emergenti sugli ecosistemi alimentari (Wisniewski & Droby, 2019).



**Figura 4.** Tratto da: Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges (Berg et al., 2020). Lo schema mostra i possibili campi di applicazioni di microbiomi in agricoltura e medicina. L'interconnessione tra queste aree è alla base dell'approccio *One Health*. Le sinergie tra le applicazioni del microbioma nelle aree della medicina (a sinistra) e dell'agricoltura (a destra) sono mostrate con le frecce orizzontali mentre con le frecce verticali è indicato seguono il flusso (dalle applicazioni su vasta scala (parte superiore) ai trattamenti di precisione (parte inferiore)).

## Conclusioni e prospettive

I microbiomi sono in grado di offrire un'importante variabilità genetica alle piante che può essere considerata per le future strategie di selezione delle piante, in particolare quando una tecnica sperimentale come la selezione dell'ecosistema artificiale è ora disponibile per trasferire l'intera comunità microbica. L'approccio del futuro è quello di co-propagare il co-evoluto, cioè il genoma della pianta e il suo microbioma. I futuri programmi di miglioramento genetico dovranno tener conto proprio della funzionalità della parte ipogea e del microbioma vegetale in modo che, ad esempio, le cultivar di piante di nuova generazione abbiano maggiori capacità di interagire con i microbi benefici del microbiota naturale del suolo o di inoculanti microbici (Nuti, 2020; Schlaeppi & Bulgarelli, 2015). La chiave per un'agricoltura sostenibile dipende dall'aumento della cooperazione tra le piante, i loro simbionti e gli agricoltori. Perché ciò accada, la consapevolezza tra gli agricoltori del ruolo benefico dei microrganismi nella produzione e protezione delle piante dovrà essere rafforzata attraverso programmi di comunicazione innovativi (Shugarta & Racaniello, 2015). È necessario, pertanto, un

importante cambiamento di paradigma nella produzione agricola per soddisfare le esigenze di una popolazione mondiale globale che si prevede raggiungerà i 9,7 miliardi nel 2050. Dobbiamo aumentare la produttività delle colture in modo sostenibile preservando la biodiversità, le risorse naturali e il reddito dei coltivatori nel contesto del cambiamento climatico. I sistemi di produzione agricola globale stanno affrontando molte sfide, tra cui un clima in rapida evoluzione, una maggiore esposizione a fattori di stress biotici e abiotici come parassiti, scarsa qualità del suolo, scarsa disponibilità di acqua e calore eccessivo. Inoltre, ci sono restrizioni normative sempre più esigenti che limitano gli strumenti che i coltivatori possono utilizzare per produrre cibo in modo sostenibile e rispettoso dell'ambiente. Per ottimizzare la produttività e la redditività sostenibili in aziende agricole, pascoli e foreste, scienziati e coltivatori devono adottare un approccio olistico a livello di sistema. Per affrontare queste sfide, dobbiamo allontanarci dagli approcci riduzionisti che si concentrano su una o due discipline e spingerci verso una comprensione transdisciplinare delle piante in un ambiente biologico e geofisico specifico, cioè i loro "fitobiomi". Il termine "fitobioma" si riferisce a una pianta che cresce all'interno di un ambiente specifico (o bioma) e tutti i micro e macro organismi che vivono in, su o intorno ad esso - come microbi, animali, insetti e altre piante - e l'ambiente geofisico, che include suolo, aria, acqua, tempo e clima. I fitobiomi hanno un ruolo importante nella salute e nella produttività sostenute delle piante e degli ecosistemi vegetali. Poiché le interazioni all'interno dei fitobiomi sono dinamiche e complesse, è necessario acquisire una maggiore comprensione di come i diversi componenti interagiscono e si influenzano a vicenda per garantire la sicurezza alimentare globale sostenibile nei prossimi decenni nel contesto della crescita della popolazione, dei cambiamenti climatici e della necessità di preservare la biodiversità e le risorse naturali. Un approccio sistemico che integra la selezione delle piante, l'agricoltura di precisione, la gestione agricola e le applicazioni dei microbiomi fornisce una potente strategia per migliorare la produzione di colture sostenibili in un mondo in continuo cambiamento.

### *Riferimenti bibliografici*

- Ambrosini, A., de Souza, R., & Passaglia, L. M. P. (2016). Ecological role of bacterial inoculants and their potential impact on soil microbial diversity. *Plant and Soil*, 400:193-207 <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2727-7>
- Atlas, R. M. (2013). One health: Its origins and future. *In: Mackenzie J., Jeggo M., Daszak P., Richt J. (eds) One Health: The Human-Animal-Environment Interfaces in Emerging Infectious Diseases. Current Topics in Microbiology and Immunology*, vol 365. Springer, Berlin, Heidelberg, [https://doi.org/10.1007/82\\_2012\\_223](https://doi.org/10.1007/82_2012_223)
- Bahadur Poudel, P., Ram Poudel, M., Gautam, A., Phuyal, S., Krishna Tiwari, C., Bashyal, N., & Bashyal, S. (2020). COVID-19 and its Global Impact on Food and Agriculture. *J Biol Today's World*, 9(5): 221.

- Barberán, A., Bates, S. T., Casamayor, E. O., & Fierer, N. (2012). Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities. *The ISME Journal*, 6(2), 343–351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.119>
- Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8): 478-486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Berg, G., & Raaijmakers, J. M. (2018). Saving seed microbiomes. *The ISME Journal*, 12: 1167-1170. <https://doi.org/10.1038/s41396-017-0028-2>
- Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M. C. C., Charles, T., Chen, X., Cocolin, L., Eversole, K., Corral, G. H., Kazou, M., Kinkel, L., Lange, L., Lima, N., Loy, A., Macklin, J. A., Maguin, E., Mauchline, T., McClure, R., ... Schloter, M. (2020). Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. *Microbiome*, 8:103. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0>
- Carini, P., Marsden, P. J., Leff, J. W., Morgan, E. E., Strickland, M. S., & Fierer, N. (2016). Relic DNA is abundant in soil and obscures estimates of soil microbial diversity. *Nature Microbiology*, 2: 16242. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.242>
- Chaparro, J. M., Sheflin, A. M., Manter, D. K., & Vivanco, J. M. (2012). Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 48: 489–499. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0691-4>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19: 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Cordovez, V., Dini-Andreote, F., Carrión, V. J., & Raaijmakers, J. M. (2019). Ecology and evolution of plant microbiomes. *Annual Review of Microbiology*, 73(1): 69-88. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-090817-062524>
- Destoumieux-Garzón, D., Mavingui, P., Boetsch, G., Boissier, J., Darriet, F., Duboz, P., Fritsch, C., Giraudoux, P., Roux, F. Le, Morand, S., Paillard, C., Pontier, D., Sueur, C., & Voituron, Y. (2018). The one health concept: 10 years old and a long road ahead. *Frontiers in Veterinary Science*, 5: 14. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00014>
- Fletcher, J., Franz, D., & Leclerc, J. E. (2009). Healthy plants: necessary for a balanced “One Health” concept. *Veterinaria Italiana*, 45(1), 79–95. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20391392>
- Frank, A., Saldierna Guzmán, J., & Shay, J. (2017). Transmission of Bacterial Endophytes. *Microorganisms*, 5(4): 70. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040070>
- Gopal, M., & Gupta, A. (2016). Microbiome selection could spur next-generation plant breeding strategies. *Frontiers in Microbiology*, 7: 1971. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01971>
- Hadrich, D. (2018). Microbiome research is becoming the key to better understanding health and nutrition. *Frontiers in Genetics*, 9: 212. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00212>
- Hassani, M. A., Durán, P., & Hacquard, S. (2018). Microbial interactions within the plant holobiont. *Microbiome*, 6: 58. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0445-0>
- Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, 83: 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>
- Lugtenberg, B. (2015). Principles of plant-microbe interactions: Microbes for sustainable agriculture. *Principles of Plant-Microbe Interactions: Microbes for Sustainable Agriculture*. Springer International Publishing, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3>
- Margulis, L. (1991). Symbiosis as a source of evolutionary innovation. *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation: Speciation and Morphogenesis*, Lynn Margulis and René Fester (Eds.), Cambridge (Mass): MIT press.
- Nogales, A., Nobre, T., Valadas, V., Ragonezi, C., Döring, M., Polidoros, A., & Arnholdt-Schmitt, B. (2016). Can functional hologenomics aid tackling current challenges in plant breeding? *Briefings in Functional Genomics*, 15: 288-297. <https://doi.org/10.1093/bfpg/elv030>
- Nuti, M. (2020). Gli invisibili in agricoltura. *Accademia Dei Georgofili*.

<http://www.georgofili.it/Media?c=8d245690-0af3-42bc-bac8-b73c6e07482a>

- Panke-Buisse, K., Poole, A. C., Goodrich, J. K., Ley, R. E., & Kao-Kniffin, J. (2015). Selection on soil microbiomes reveals reproducible impacts on plant function. *The ISME Journal*, 9: 980-989. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.196>
- Pérez-Jaramillo, J. E., Mendes, R., & Raaijmakers, J. M. (2016). Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions. *Plant Molecular Biology*, 90: 635-644. <https://doi.org/10.1007/s11103-015-0337-7>
- Proctor, D. M., & Relman, D. A. (2017). The Landscape Ecology and Microbiota of the Human Nose, Mouth, and Throat. *Cell Host and Microbe*, 21(4): 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2017.03.011>
- Qiu, Z., Egidi, E., Liu, H., Kaur, S., & Singh, B. K. (2019). New frontiers in agriculture productivity: Optimised microbial inoculants and in situ microbiome engineering. *Biotechnology Advances*, 37(6): 107371. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.03.010>
- Rosenberg, E., & Zilber-Rosenberg, I. (2016). Microbes drive evolution of animals and plants: The hologenome concept. *mBio*, 7(2):e01395. <https://doi.org/10.1128/mBio.01395-15>
- Ryan, R. P., Germaine, K., Franks, A., Ryan, D. J., & Dowling, D. N. (2008). Bacterial endophytes: Recent developments and applications. *FEMS Microbiology Letters*, 278(1):1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00918.x>
- Schlaeppli, K., & Bulgarelli, D. (2015). The plant microbiome at work. In *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 28(3): 212-217. <https://doi.org/10.1094/MPMI-10-14-0334-FI>
- Sergaki, C., Lagunas, B., Lidbury, I., Gifford, M. L., & Schäfer, P. (2018). Challenges and approaches in microbiome research: from fundamental to applied. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1205. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01205>
- Shugarta, E. C., & Racaniello, V. R. (2015). Scientists: Engage the public! *mBio*, 6(6), 1–2. <https://doi.org/10.1128/mBio.01989-15>
- Soliveres, S., Van Der Plas, F., Manning, P. et al. (2016). Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality. *Nature*, 536: 456–459. <https://doi.org/10.1038/nature19092>
- Song, C., Zhu, F., Carrión, V. J., & Cordovez, V. (2020). Beyond Plant Microbiome Composition: Exploiting Microbial Functions and Plant Traits via Integrated Approaches. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8: 896. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00896>
- Stanca, M. (2017). La scienza e le biotecnologie vegetali saranno pronte per assicurare alimenti alla popolazione mondiale del 2050? *EAI Speciale - III 2015*, 46–57. <https://doi.org/10.12910/EAI2015-025>
- Timmusk, S., Behers, L., Muthoni, J., Muraya, A., & Aronsson, A. C. (2017). Perspectives and challenges of microbial application for crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 8:49. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00049>
- Trinh, P., Zaneveld, J. R., Safranek, S., & Rabinowitz, P. M. (2018). One Health Relationships Between Human, Animal, and Environmental Microbiomes: A Mini-Review. *Frontiers in Public Health*, 6: 235. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00235>
- Wei, Z., Gu, Y., Friman, V. P., Kowalchuk, G. A., Xu, Y., Shen, Q., & Jousset, A. (2019). Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health. *Science Advances*, 5(9): eaaw0759. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw0759>
- Whipps, J. M., Karen, L., & Cooke, R. C. (1988). Mycoparasitism and plant disease control, pp:161-187. In: *Fungi in biological control systems*. NM Burge (Ed.). Manchester, UK: Manchester University Press. <https://doi.org/10.1186/s40101-015-0061-7>
- Wisniewski, M., & Droby, S. (2019). The postharvest microbiome: The other half of sustainability. In *Biological Control*, 137: 104025. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104025>
- Wolf, M. (2015). Is there really such a thing as “one health”? Thinking about a more than human world from the perspective of cultural anthropology. *Social Science and Medicine*, 129: 5-11.

<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2014.06.018>

- Woo, S. L., & Pepe, O. (2018). Microbial consortia: Promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1801. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01801>
- Wubs, E. R. J., Van Der Putten, W. H., Bosch, M., & Bezemer, T. M. (2016). Soil inoculation steers restoration of terrestrial Ecosystems. *Nature Plants*, 2: 16107 <https://doi.org/10.1038/NPLANTS.2016.107>
- Z Zelezniak, A., Andrejev, S., Ponomarova, O., Mende, D. R., Bork, P., & Patil, K. R. (2015). Metabolic dependencies drive species co-occurrence in diverse microbial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(20): 6449-6454. <https://doi.org/10.1073/pnas.1421834112>
- Zilber-Rosenberg, I., & Rosenberg, E. (2008). Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: The hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiology Reviews*, 32: 723-725. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00123.x>

### **Articoli collegati pubblicati dall'Accademia dei Georgofili:**

Marco N. 2020. Gli invisibili in agricoltura. ed. Accademia dei Georgofili

Sorlini C. 2020. I microrganismi salveranno l'agricoltura? ed. Accademia dei Georgofili

Vamerli T, Dal Cortivo C, Mosca G. 2020. Biostimolanti microbici: una opportunità per accrescere la sostenibilità delle colture erbacee di pieno campo. ed. Accademia dei Georgofili

Autori vari. 2012. Simbionti, una risorsa per il benessere delle piante e degli animali. ed. Accademia dei Georgofili. Supplemento a "I Georgofili. Atti della Accademia dei Georgofili". Serie VIII - Vol. 9.

### **Ringraziamenti:**

Annamaria Bevivino esprime la sua gratitudine al marito Andrea e ai figli Matteo, Marta e Paolo per il sostegno e la pazienza esercitata durante la stesura di questo articolo. Si ringrazia il dott. Massimo Iannetta per i preziosi consigli.