

CLAUDIA SORLINI¹

I microrganismi salveranno l'agricoltura?

¹ Professore Emerito di Microbiologia Agraria, Università di Milano

PREMESSA

Parlare di microrganismi che possono salvare l'agricoltura può sembrare un paradosso in una fase nella quale un virus sta mandando in tilt l'intero pianeta. Tuttavia una analoga potenza, ma di segno positivo, viene esercitata da tanti altri microrganismi che erogano una infinità di servizi ecosistemici, di cui tutti gli esseri viventi, compreso l'uomo, beneficiano senza neppure sapere chi li ha prodotti. Eppure questi servizi sono fondamentali per la stabilità, la resilienza e la produttività di ecosistemi e di agroecosistemi.

I 60 anni della *green revolution* hanno prodotto e diffuso benessere, ridotto la percentuale degli individui che soffrono la fame, prolungato la vita media delle popolazioni di tutto il pianeta, affrancato da molti lavori pesanti operai, agricoltori, manovali. Questo modello di agricoltura è stato caratterizzato da una forte dipendenza dai prodotti agro-chimici e dall'uso di varietà di piante selezionate sulla base di "ideotipi": due innovazioni strettamente correlate in quanto la produttività delle piante dipendeva dall'uso consistente di prodotti agrochimici e di risorse idriche. Le conseguenze sull'ambiente sono state pesanti: riduzione della biodiversità naturale e di quella delle piante coltivate, inquinamento delle acque superficiali e profonde, danni agli ecosistemi e cambiamento climatico, fenomeni ai quali, peraltro, hanno contribuito, molto di più, anche altre attività, in primis alcuni settori industriali. Anche fra gli stessi sostenitori della rivoluzione verde, c'è chi guarda al passato con occhio critico, sottolineandone l'impatto ambientale e i limiti.

Il cambiamento climatico, che, insieme con l'attuale pandemia e l'invasione delle plastiche, è l'emergenza di questa fase, porta con sé siccità, desertificazione, nuovi patogeni (di piante e animali, compreso l'uomo) e parassi-

ti diffusi dalla globalizzazione, che, grazie al riscaldamento globale, trovano nuove aree di colonizzazione. Ne sono una conseguenza anche gli eventi meteorologici estremi che aumentano in violenza, frequenza e durata e che si manifestano anche in nuove regioni, prima risparmiate. La disponibilità sul pianeta di acqua dolce e pulita scarseggia mentre si continua a fare grande uso di energie non rinnovabili che alimentano l'effetto serra. Le colate di cemento sottraggono terreni fertili all'agricoltura, mentre l'eccessivo sfruttamento dei suoli per lunghi periodi li impoverisce di sostanza organica e di nutrienti, esponendoli all'erosione; ogni anno si perdono 24 miliardi di tonnellate di suolo erosi dal vento e dalle piogge (Ipbcs, 2018) con gravi danni economici che l'Italia sta pagando più degli altri Paesi europei. In questo contesto la produzione di cereali non cresce più con lo stesso trend dei decenni passati e in alcune zone del pianeta si è arrestata o ha subito addirittura una flessione (Ray et al., 2013).

L'agricoltura è insieme concausa e vittima di questa situazione creata con il concorso di tutti i settori produttivi e degli stili di vita e di alimentazione. E il prezzo più alto viene paradossalmente pagato dai Paesi che meno concorrono a causare il cambiamento climatico.

I risvolti negativi di questo modello di sviluppo si riscontrano anche a livello sociale dove, nonostante che la forbice dei PIL tra i Paesi del nord e del sud del pianeta si sia ridotta, è invece aumentata quella tra gli strati più ricchi e quelli più poveri all'interno di ogni Paese, con una povertà destinata, anche per effetto dell'attuale pandemia, ad aggravarsi pesantemente. Questa stessa pandemia da SARS-CoV-2, che viene dopo altre epidemie da zoonosi, secondo diversi scienziati e istituzioni prestigiose non sarebbe estranea alle modalità con le quali si è gestito il rapporto tra uomo e natura. In particolare la deforestazione, eliminando gli habitat di molti animali selvatici, li pone a un contatto diretto con gli insediamenti umani, che vengono così esposti al rischio di *spillover*, cioè di contagio da parte di virus che fanno il salto di specie (Afelt et al., 2018; Unep, 2020).

La domanda di cibo sta crescendo più rapidamente dell'offerta non solo per effetto dell'incremento della popolazione, ma anche della transizione nutrizionale, che ha comportato il passaggio da una dieta con alto consumo di cereali e fibre a un'altra con elevato contenuto di zuccheri, grassi e soprattutto di alimenti di origine animale. Il futuro da progettare è quello di una vita di benessere anche per le generazioni future, senza rinunciare ai benefici delle innovazioni tecnologiche appropriate, da attuarsi attraverso un diverso rapporto con la natura, basato su un concetto di convivenza e di rispetto. In questo scenario l'agricoltura gioca un ruolo cruciale in quanto è il settore economico

cui è affidata la gestione di una grande parte delle terre emerse e quindi nel bene e nel male può incidere enormemente sulla salute dell'intero pianeta. Da un lato non può né deve abdicare al suo ruolo di nutrire il pianeta e quindi produrre in quantità e qualità, e dall'altro ha davanti a sé la necessità di farlo utilizzando modelli e sistemi di gestione atti a conservare le risorse e che consentano di continuare a produrre anche in futuro. D'altronde la futura Politica Agricola Comune (PAC) attribuisce molta importanza alla capacità dell'agricoltura europea di contribuire a contrastare il cambiamento climatico (la futura PAC «deve mostrare maggior ambizione a livello ambientale e climatico e rispondere alle aspettative dei cittadini per quanto concerne la loro salute, l'ambiente e il clima» e su tali obiettivi sta investendo; Commissione Europea, 2018).

In questo compito gravoso l'agricoltura può però contare su una risorsa in grado di svolgere una molteplicità straordinaria di funzioni che è rappresentata dal mondo dei microrganismi. Essi sono agenti importanti di processi ciclici che possono aiutare nella prospettiva di uno sviluppo basato non più su una crescita lineare infinita, ma declinata sulla finitezza delle risorse che il pianeta offre.

MICRORGANISMI E SIMBIOSI

Con il termine microrganismi si intende far riferimento a batteri, archaea, funghi, protozoi, microalghe e virus. Essi sono ampiamente diffusi sul pianeta. La loro presenza si spinge anche in ambienti estremi dove rappresentano l'unica forma di vita. Per dare un'idea del "peso" anche fisico, essi costituiscono nel loro complesso una biomassa in carbonio di 70 miliardi di tonnellate, contro i 60 milioni della popolazione umana, i 100 milioni degli animali in allevamento, i 7 milioni dei mammiferi selvatici e i 450 miliardi delle piante (Bar-On et al., 2018). La scarsa attenzione e la poca considerazione di cui essi sono oggetto è da attribuirsi al fatto di essere invisibili anche se governano processi di enorme impatto. Inoltre sui microrganismi pesa una reputazione negativa in quanto, nell'immaginario collettivo, ancora è presente il binomio "microrganismi = malattia". In realtà il numero dei microrganismi patogeni per l'uomo, gli altri animali e le piante è infinitamente più esiguo di quello dei microrganismi indispensabili all'ambiente, alla vita e alla salute degli altri esseri viventi e all'agricoltura. È di questi microrganismi che si parlerà nelle pagine seguenti, tralasciando quelli dannosi, di cui, comunque, non si disconosce certo l'importanza.

Uno degli aspetti più affascinanti del mondo dei microrganismi è il fatto che un grande numero di specie vivono in simbiosi all'interno di altri organismi viventi: le piante, gli animali dal più semplice degli invertebrati ai mammiferi più complessi, compreso l'uomo; una convivenza che incide sulla salute, sulla difesa da agenti dannosi, sulla tutela contro molte patologie, e sulla produttività.

D'altra parte è proprio da una simbiosi che ha avuto origine un passaggio fondamentale dell'evoluzione della vita sulla terra cioè quello dalla cellula ancestrale a quella più evoluta (eucariota) che è avvenuto per effetto di una endosimbiosi tra cellule microbiche. Questa teoria fu elaborata negli anni '60 da Lynn Margulis (1938-2011), una scienziata tenace e coraggiosa, che rivoluzionò le precedenti teorie sull'evoluzione delle cellule, e proprio per questo dovette lottare contro un conformismo scientifico che si concretizzò nel reiterato rifiuto da parte di molte riviste scientifiche di pubblicare i suoi lavori; solo al dodicesimo tentativo ottenne che le sue tesi fossero divulgate. Ed è ancora grazie agli studi di questa scienziata che si comprese quanto la simbiosi tra microrganismi e gli organismi collocati ai livelli trofici superiori sia generalizzata e influenzi fortemente il metabolismo e la vita dell'ospite. Da qui il conio del termine *obionte*, per indicare l'insieme dell'organismo e dei suoi ospiti microbici. Oggi è condiviso il concetto che le due componenti, l'organismo superiore e i microrganismi simbiotici, emanano da un processo co-evolutivo (Lake J., 2011).

I microrganismi sono parte integrante del corpo umano e della sua fisiologia, al punto che il microbioma umano è considerato un vero e proprio organo, con funzioni fondamentali per la salute. Esso rappresenta una comunità di archaea, batteri, funghi, protozoi e virus, il cui numero è pari a quello delle cellule dell'organismo umano. Il metagenoma microbico, cioè l'insieme delle informazioni genetiche contenute nel genoma dei microrganismi simbiotici dell'uomo, è stimato essere superiore a quello del genoma umano. Il microbioma umano interviene in una lunga lista di attività per lo più benefiche e fondamentali per la salute, ma in casi di squilibrio (disbiosi) può essere causa di patologie.

Il microbioma varia da persona a persona, tuttavia alcune specificità rilevanti caratterizzano intere popolazioni. È quanto emerso per esempio da un lavoro che rileva come nei soggetti che vivono in Paesi orientali si registri la presenza di genomi microbici che non si riscontrano nell'intestino degli occidentali, presumibilmente come conseguenza di un diverso stile di vita, diverse abitudini alimentari, della diffusione di cibi industriali, oltre che dell'uso di antibiotici e di igienizzanti (Pasolli et al., 2019).

Anche le piante hanno un loro microbioma (questo termine potrà essere sostituito nelle pagine seguenti con il termine microflora, o genericamente microrganismi, con analogo significato) che svolge una serie di funzioni importanti, e quindi anch'esse possono essere considerate degli *olobionti*.

I MICRORGANISMI E L'AMBIENTE

Nell'ambiente i microrganismi eterotrofi, che sono coinvolti nella chiusura dei cicli biogeochimici degli elementi e della sostanza organica, garantiscono costantemente la liberazione di nutrienti per le piante. Negli ambienti marini i microrganismi del fitoplancton concorrono a sottrarre anidride carbonica dall'aria e a liberare ossigeno; essi hanno un turnover molto più veloce di quello delle piante e pertanto rispondono più velocemente al cambiamento climatico. Si calcola che forniscano il 50% dell'ossigeno totale liberato sul pianeta, anche se la loro biomassa è solo l'1% di quella delle piante terrestri (Cavicchioli et al., 2019).

In ecosistemi acquatici e terrestri diversi microrganismi sono in grado di decontaminare i terreni da metalli pesanti attraverso trasformazioni che ne comportano la detossificazione. Altri ancora vengono applicati con successo in aree inquinate per risanare siti contaminati da perdite di petrolio, o altri composti organici. Anche una quota di composti di sintesi chimica può essere mineralizzata; infatti la microflora dell'ambiente, a contatto da tanti decenni con queste molecole, ha messo in atto strategie adattative di demolizione attraverso meccanismi quali il cometabolismo, che coinvolge l'attività congiunta e coordinata di microrganismi diversi, e, in certi casi, il trasferimento orizzontale di geni, che rafforza così la capacità degradativa del microbioma del suolo (Aminov, 2011). Ora sappiamo che molecole di sintesi chimica, che qualche decennio fa venivano considerate recalcitranti, grazie a processi di adattamento evolutivo dei genomi dei microrganismi esposti per lungo tempo a esse possono venire attaccate, trasformate e a volte anche mineralizzate. Tuttavia sono molte le molecole di sintesi che non vengono riconosciute dagli enzimi della microflora a causa della struttura chimica, complessa e differente da quella delle molecole naturali; pertanto esse si accumulano nel terreno e nelle acque, come avviene per varie plastiche e per certi solventi, farmaci e fitofarmaci e altri prodotti. Nel caso di accumulo di fitofarmaci si creano condizioni favorevoli all'insorgenza di forme di resistenza fra gli agenti bersaglio, e di presenza di residui negli alimenti.

Se esistono le condizioni necessarie, il biorisanamento, applicato in campo, è, sotto il profilo ambientale, più vantaggioso dei trattamenti fisici e/o

chimici perché reca minore sconvolgimento al terreno da trattare e può essere più conveniente anche sul piano economico, anche se richiede tempi più lunghi. In Italia i siti contaminati di interesse nazionale nel loro insieme coprono una superficie di 170.000 ha. Vale la pena considerare la prospettiva di avvalersi dell'impiego dei microrganismi.

Inoltre nell'ambiente sono molto diffusi microrganismi le cui capacità di produrre idrogeno e metano vengono sfruttate in impianti per la produzione di bioenergie. È un altro dei tanti contributi che i microrganismi sono in grado di dare alla sostenibilità ambientale.

MICROORGANISMI E AGRICOLTURA

Diversità microbica dei suoli

Difendere e migliorare la qualità del suolo è una priorità. Infatti il suolo presiede a innumerevoli funzioni: produttività primaria, moderazione del clima, purificazione delle acque e protezione delle falde, biodegradazione degli inquinanti, nutrizione delle piante, cicli biogeochimici, tutte attività nelle quali i microrganismi giocano un ruolo primario e fondamentale.

È stato dimostrato che il microbioma partecipa alla formazione e all'accumulo di sostanza organica nei suoli e che a questo processo concorrono comunità microbiche distinte, ciascuna contribuendo con composti chimicamente diversi. Risulta inoltre che l'accumulo e la stabilizzazione della sostanza organica avvengono più a opera della microflora che non attraverso processi abiotici e che la sostanza organica è più elevata nei suoli dove maggiore è l'abbondanza di funghi (Kallenbach et al., 2016). Questo sta a testimoniare che la microflora, se messa nelle condizioni di svolgere le sue attività, può essere un formidabile mezzo per contrastare l'impoverimento di sostanza organica.

Sempre nel campo del contributo dei microrganismi alla qualità e specificità dei suoli, stanno crescendo le ricerche finalizzate a dimostrare che a costruire e delineare le caratteristiche dei terroir dei vigneti concorre anche la microflora. A questa conclusione, che sembra quasi ovvia, si è giunti attraverso indagini condotte sul metagenoma di funghi e batteri che vivono associati ai diversi organi della vite. Risulta infatti che la composizione del microbioma viene modellata oltre che dalla vite anche dall'insieme delle condizioni geografiche, pedologiche, climatiche e ambientali specifiche del territorio; viene così generato un microbioma unico e specifico per la fermentazione nella regione; questa partecipazione del microbioma alla caratterizzazione del

terreno dei vigneti e alla fermentazione suggerisce l'esistenza di un *microbial terroir*, come fattore che concorre a determinare la specificità delle produzioni vitivinicole (Gilbert et al., 2014).

C'è un sostanziale accordo sul fatto che pratiche a basso input energetico permettano lo sviluppo o la conservazione di una più ampia biodiversità. È quanto si evince anche da ricerche che mettono a confronto diversi modelli di agricoltura (convenzionale, integrata, biologica e biodinamica) (Turrini et al., 2017). La monocoltura protratta per anni sullo stesso terreno incide negativamente sulla biodiversità microbica. Un interessante esperimento ha messo in rilievo come un suolo coltivato con la stessa coltura (arachide) per diversi anni presenti una riduzione della biodiversità microbica, una presenza ridotta di tratti relativi alla sintesi di fitormoni, in particolare di citochinina e di auxina, un arricchimento in specie microbiche rare e una minor crescita delle piante rispetto a un terreno coltivato in rotazione con altre piante. L'evidenza di questo fenomeno induce a ritenere che esista una sorta di memoria dei terreni, definita anche con il termine *legacy of land use* (Li et al., 2019).

Non è un caso dunque che l'influenza della microflora della rizosfera sia più significativa nelle piante che crescono in ambienti naturali che non in quelli coltivati. Infatti negli ambienti naturali le specie vegetali locali si sono co-evolute con i microrganismi di quel terreno, la cui ricchezza in specie non è stata impoverita dallo sfruttamento agricolo; inoltre in queste aree la biodiversità delle piante consente lo sviluppo di interazioni multiple importanti per la microflora della rizosfera. Tali interazioni sono meno sviluppate nei campi coltivati, dove a incidere maggiormente sulla produttività sono soprattutto le pratiche agronomiche (Philippot et al., 2013).

I microrganismi per la crescita delle piante

Le attività microbiche più intense si svolgono nella rizosfera dove la diversità dei composti organici rilasciati negli essudati radicali crea le condizioni per una consistente proliferazione di batteri e funghi. Infatti gli essudati radicali contengono molecole di varia natura chimica, anche volatili, che svolgono un ruolo decisivo nel processo di selezione e di attrazione delle popolazioni microbiche con le quali la pianta scambia segnali biologici e fisici. L'acido salicilico, per esempio, un ormone di difesa di diverse piante, è coinvolto anche nella modulazione della colonizzazione delle radici. La selezione della microflora della rizosfera, del rizopiano e anche della fillosfera viene fatta

dalla stessa pianta. Essendo il microbioma in buona parte il risultato di un processo di selezione, ciò implica che la composizione sia decisamente diversa da quella del suolo nudo e che anche la biodiversità sia inferiore.

Nell'ambito della microflora, dove si possono trovare microrganismi neutrali, patogeni o benefici, questi ultimi vengono definiti PGPM (*Plant Growth Promoting Microorganisms* o microrganismi promotori della crescita vegetale) e comprendono batteri eterotrofi, quali *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, funghi, e batteri fotosintetici, come *Nostoc* e *Anabaena*, tra l'altro produttori di acido indolacetico, un ormone vegetale.

Le funzioni che svolgono i PGPM nel loro insieme sono molteplici: aumentano la fertilità dei suoli e promuovono la crescita delle piante, grazie alla fissazione dell'azoto atmosferico, e alla loro capacità di rendere biodisponibili macronutrienti (fosfati e ferro) e micronutrienti; producono fitormoni ed enzimi (ACC deaminasi), che interferiscono con il bilancio ormonale della pianta, oltre che osmoliti e esopolisaccaridi, che contribuiscono a mantenere il bilancio osmotico e favoriscono la ritenzione dell'umidità. Svolgono anche attività di difesa nei confronti di patogeni agendo direttamente o stimolando i meccanismi di difesa della pianta.

La selezione dei batteri operata dalla pianta viene fatta sulla base dell'intera comunità microbica che si trova nel suolo; più ricca in biodiversità è questa comunità e più ampia è la gamma di specie nell'ambito della quale vengono selezionati i microrganismi funzionali alla pianta stessa. Laddove le pratiche agronomiche poco virtuose e reiterate nel tempo hanno ridotto la ricchezza in diversità, anche la selezione operata dalla pianta ne sarà influenzata negativamente.

L'azotofissazione

L'azoto è un elemento indispensabile alla vita delle piante e spesso è anche un fattore limitante della produttività per la scarsa disponibilità nel suolo di specie chimiche azotate utili. Per secoli la scarsità di azoto nei terreni veniva compensata con la rotazione o con co-culture associate ai legumi e con l'uso di letame, deiezioni zootecniche e ceneri di vegetali.

Durante la rivoluzione verde è stata distribuita sui suoli agricoli una grande quantità di fertilizzanti azotati, ottenuti dall'aria oppure dal gas naturale, con conseguenze straordinarie sulla produzione (in 50 anni la produzione mondiale di cereali è stata triplicata), ma anche con dispersione nell'ambiente di composti azotati, in quanto generalmente non più del 40% del fertilizzante

viene utilizzato dalle piante. La conseguenza è stata l'inquinamento delle acque superficiali, con fenomeni di eutrofizzazione, e delle falde acquifere. A questi effetti negativi vanno aggiunti anche quelli derivanti dal consumo di combustibili fossili (petrolio) necessari per il recupero dell'azoto dall'aria in forma utile per le piante, stimato pari all'1-2% del totale, con incremento delle emissioni di gas climalteranti e impatto sulla volatilità dei prezzi dei cereali, spesso non sostenibili per i Paesi in via di sviluppo (Dawson & Hilton, 2011).

Da qui discende la stimolante prospettiva per i ricercatori e per il mondo della produzione di potenziare la via biologica alla fissazione dell'azoto. In natura esiste una vasta gamma di specie batteriche in grado di fissare l'azoto atmosferico sia in autonomia, sia in associazione con altre piante e organismi. L'azotofissazione effettuata da batteri liberi dà rese modeste, mentre ben più elevate sono quelle ottenute dalle simbiosi di rizobi con le radici delle leguminose e da attinobatteri del gruppo *Frankia* con piante di numerose altre famiglie attraverso la formazione di noduli: ciò rappresenta un tipico esempio di co-evoluzione. Le piante coinvolte appartengono a 18.000 specie, molto diffuse sul pianeta, comprese in quattro ordini: *Fabales*, *Fagales*, *Cucurbitales* e *Rosales*. I batteri azotofissatori simbiotici ricavano l'energia necessaria da substrati carboniosi prodotti dalle radici della pianta e soddisfano la maggior parte della domanda di azoto della pianta (attorno al 65%). Si calcola che l'azoto fissato si aggiri su valori di 50-465 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in campi coltivati con leguminose (Pankievicz et al., 2019).

Si stima che un incremento dell'efficienza della fissazione simbiotica in grado di eliminare la fertilizzazione chimica estesa alle principali colture di leguminose possa comportare, solo negli USA, un risparmio di 4,48 miliardi di dollari all'anno (Seshadri et al., 2018).

Lo studio di due modelli di leguminose, *Medicago truncatula* e *Lotus japonicum*, ha consentito di approfondire le conoscenze sul meccanismo di formazione dei noduli: esso risulta essere mutuato, con le necessarie modifiche, da quello della formazione delle radici laterali. Inoltre molte recenti ricerche hanno dimostrato che il fenomeno dell'azotofissazione è molto più diffuso e diversificato nei pathway metabolici e nella stessa anatomia dei noduli di quanto non si ritenesse precedentemente. Per esempio risulta che anche i β -proteobatteri, presenti in diverse aree geografiche, sono in grado di fissare l'azoto atmosferico formando noduli con le radici di leguminose; l'ipotesi è che si siano evoluti dai rizobi (α -proteobatteri) a seguito di un trasferimento orizzontale di geni *nod* e *nif* presenti su un grosso plasmide (Chen et al., 2003). Si è così ampliata la gamma di azotofissatori su cui fare ricerca. Indagini condotte in diverse bioregioni del pianeta hanno portato all'identificazione

di nuove famiglie di proteine, non ancora esplorate, che potrebbero avere un ruolo nella interazione con l'ospite e di biocontrollo. Gli studi sull'operone *nifHDK* che codifica per la nitrogenasi, il complesso enzimatico che rappresenta la chiave di volta del processo di fissazione dell'azoto, hanno messo in evidenza come esistano 20 geni *nif* diversi, suddivisi in 3 famiglie (Pankievicz et al., 2019).

Purtroppo questo genere di simbiosi così produttive non esiste nei cereali che rappresentano la principale fonte di alimentazione umana del pianeta, cioè riso, frumento e mais, ma questa è la sfida che da più di 100 anni tenta microbiologi e biologi vegetali, ed è ancora senza successo, anche se molti progressi sono stati fatti. Anche i cereali vivono in associazione con batteri diazotrofi, la cui presenza può provenire dai semi, dal suolo, o anche dall'acqua di irrigazione. Si sono trovati anche nelle radici, come endofiti; è il caso, per esempio, di piante di riso coltivate, con aumento delle rese, in campi precedentemente destinati a trifoglio (Yanni et al., 1997). Alcuni di questi azotofissatori sono in grado di esprimere la nitrogenasi all'interno della pianta. Tuttavia il loro contributo di azoto fissato è modesto, non paragonabile a quello fissato dai rizobi nelle leguminose, ma comunque significativo.

Infatti, per esempio nel caso del riso, si stima che la quantità di azoto fissata possa raggiungere il 25% (13-22 kg N ha⁻¹ yr⁻¹) dell'azoto totale necessario, anche se non è stato ancora chiarito quanto sia fissato da diazotrofi liberi e quanto da quelli associati (Ladha et al., 2016). Miglioramenti delle rese produttive si possono ottenere con nuovi diazotrofi mutanti, usati con successo come commensali per la promozione della crescita della piante (Rosenblueth et al., 2018).

Fra i cereali, quello su cui forse si è lavorato di più nel campo dell'azotofissazione è il mais, nell'intento di ridurre la quantità di fertilizzante azotato usato per questa coltura. Vi sono alcune interessanti sorprese, come quella di una varietà di mais coltivata in terreni poveri di azoto a Oaxaca, Mexico, per lo più senza uso di fertilizzanti azotati. Le sperimentazioni condotte in campo, partendo dall'assunto che questa varietà avesse sviluppato un processo di adattamento alla scarsità di azoto, hanno effettivamente mostrato che il 29%-82% dell'azoto della pianta derivava dall'atmosfera. Tale varietà infatti è caratterizzata da un grande sviluppo di radici aeree che secernono mucillagini ricche di carboidrati. È su questo substrato che si è rilevato un gran numero di batteri azotofissatori (Van Deynze et al., 2018).

In sintesi le linee di ricerca prevalenti sui cereali sono indirizzate a: a) ottenimento di mutanti di rizobi con maggior efficienza di azotofissazione; b)

ingegnerizzazione dei noduli; c) modificazioni genetiche di cereali, per creare in essi i noduli, attraverso l'inserimento nella pianta dei geni della nitrogenasi senza batteri. Le ricerche sulla prima linea progrediscono con risultati interessanti, mentre per le altre, e soprattutto per la terza, i tempi sono ancora lunghi.

Fondamentale è comunque non abbandonare gli studi sull'ampia diversità sia dei microrganismi associati alle piante, sia dei microrganismi diazotrofi non simbiotici perché essi possono offrire nuove possibilità di ricerca e di sviluppo applicativo. L'esempio della varietà di mais coltivato in Messico è interessante in quanto, anche se non può essere utilizzata in gran parte dei sistemi colturali a causa del lungo periodo necessario per la sua crescita, tuttavia essa offre spunti di ricerca e approfondimento utili per ottenere colture più produttive.

L'azotofissazione attuata in simbiosi con le leguminose svolge un ruolo rilevante anche negli ambienti naturali. Studi condotti su una foresta tropicale hanno messo in evidenza come l'incremento della biomassa forestale avvenga soprattutto a opera di piante non coinvolte in simbiosi con azotofissatori, che possono crescere rigogliosamente grazie all'azoto fissato dalle leguminose, nonostante che esse, in termini di biomassa, rappresentino una quota decisamente modesta. Tale osservazione induce a ritenere che gli azotofissatori potrebbero contribuire indirettamente, nei tempi lunghi, anche al sequestro del carbonio sottratto all'atmosfera (Brookshire et al., 2019). D'altronde in diversi Paesi in via di sviluppo, che non hanno accesso ai fertilizzanti di sintesi chimica, si usa seminare nello stesso campo filari di leguminose alternati con filari di cereali e altre colture che beneficiano della azotofissazione simbiotica, risultando più produttive (Seutra Kaba et al., 2019).

Oggi le tecniche di batterizzazione dei semi di leguminose si sono diffuse e offrono prestazioni migliori grazie alla selezione di nuovi ceppi fatta sulla base di numerosi requisiti atti a incrementarne l'efficienza.

I funghi micorrizici arbuscolari

I funghi sono potenti biodegradatori, che contribuiscono alla chiusura dei cicli biogeochimici degli elementi e mettono a disposizione nutrienti per le piante, anche in collaborazione con i batteri del suolo e gli altri degradatori. Da tempo è noto il loro ruolo anche nel biocontrollo dei patogeni. Possono vivere liberi o in simbiosi con le piante con le quali stabiliscono rapporti di ecto o di endosimbiosi. Le endomicorrize penetrano all'interno delle cellule

radicali dove formano strutture ramificate chiamate arbuscoli, da cui il termine funghi micorrizici arbuscolari (AM). Si calcola che circa l'80% delle piante siano in grado di stabilire questo genere di simbiosi. I funghi micorrizici arbuscolari sono molto diffusi nei biomi caratterizzati da alta diffusione di piante erbacee, come i campi coltivati. Come per i batteri, anche nel caso dei funghi la pianta produce molecole segnale, in base alle quali le ife fungine orientano la loro crescita nella direzione delle radici della pianta. Alla base della colonizzazione da parte del fungo c'è uno scambio di informazioni attraverso messaggi chimici.

La simbiosi AM induce cambiamenti citologici e metabolici: proliferazione di plastidi, attivazione del ciclo di Krebs, aumento della produzione di acidi grassi, apocarotenoidi, aminoacidi come la tirosina, che, con la fenilalanina e il triptofano, è il principale precursore dei polifenoli.

Le funzioni che vengono riconosciute alle simbiosi micorriziche arbuscolari sono molteplici: miglioramento della fissazione dell'anidride carbonica della pianta ospite, aumento dell'effetto "sink" (cattura e fissazione dell'anidride carbonica dell'atmosfera); contributo alla mobilitazione del fotosintetato dalle parti aeree alle radici e aumento della nutrizione minerale. Inoltre migliorano la qualità del suolo, influenzandone la struttura e la tessitura. In particolare la glomalina, che viene prodotta dalle ife fungine durante la crescita, contribuisce a migliorare la capacità di ritenzione idrica e quindi a mitigare gli effetti della siccità.

Questi funghi sono particolarmente utili negli interventi di recupero di suoli degradati o in condizioni di stress da siccità, salinità, carenza di nutrienti, temperature elevate, attacchi di erbivori, presenza di metalli pesanti e malattie causate da altri funghi. Infatti in questi casi sono in grado di agire sui meccanismi di regolazione della tolleranza agli stress della pianta e delle colture favorendone la resilienza.

Inoltre i miceti, grazie alla loro struttura filamentosa creano nel terreno particolari interconnessioni. A questo proposito va citato il fenomeno definito *Wood Wide Web* che indica la connessione tra pianta e pianta mediata dai funghi AM: dopo aver stabilito una simbiosi con le radici della pianta di prima colonizzazione il loro micelio cresce nel suolo e colonizza le radici di altre piante, formando così una fitta rete di interconnessione tra le piante anche appartenenti a famiglie, generi e specie diversi. L'aspetto più straordinario è che questa rete può creare un flusso di nutrienti generato dal gradiente che consente di trasferire risorse nutrizionali alle piante che più ne hanno necessità. La natura chimica dei composti trasferiti dipende dal tipo di fungo: i funghi micorrizici arbuscolari traslocano fosforo e azoto inorga-

nico, mentre gli ectomicorrizici possono trasferire anche composti organici e zuccheri della fotosintesi. Recenti studi hanno inoltre dimostrato che i funghi AM vivono in stretta associazione con una grande varietà di batteri, molti dei quali hanno proprietà di *Plant Growth Promotion* (PGP), in quanto capaci di solubilizzare e/o mineralizzare il fosforo, produrre siderofori e ormoni vegetali quali l'acido indolacetico e di fissare l'azoto atmosferico (Turrini et al., 2018).

L'identificazione in entrambi gli ospiti dei fattori che regolano l'associazione simbiotica e i principali *pathway* metabolici sotto differenti stress ambientali, nonché le modulazioni indotte dai funghi micorrizici arbuscolari nei meccanismi di tolleranza rappresentano un obiettivo fondamentale per una comprensione più completa di questi fenomeni e per una possibile applicazione.

L'impiego diffuso dei funghi benefici in agricoltura può diventare un'asse importante della strategia volta a ridurre l'uso di prodotti di sintesi chimica con enormi benefici per i suoli, l'ambiente e l'economia.

I microrganismi nella difesa delle piante

In un quadro di orientamento delle politiche verso la sostenibilità dell'agricoltura, l'uso dei microrganismi per la protezione delle piante sta diventando un settore di grande rilievo in quanto fra i batteri, i funghi e anche i virus, esistono specie in grado di contrastare funghi patogeni e insetti dannosi.

L'esistenza di terreni definiti "soppressivi" è nota sin dall'inizio del 1900; si tratta di terreni nei quali, pur essendo presenti microrganismi patogeni, piante suscettibili a essere infettate e condizioni ambientali favorevoli, la malattia non si sviluppava. Risultò evidente che questa protezione veniva garantita da microrganismi antagonisti in grado di contrastare gli agenti patogeni e di proteggere così la pianta e la sua produttività. Tali microrganismi si trovano non solo nella rizosfera, ma anche nelle parti aeree della pianta compresa la carposfera. Essi agiscono attraverso vie diverse: antibiosi, produzione di enzimi litici, competizione per nutrienti e spazio, interazione diretta (parassitismo) e resistenza indotta stimolando le difese della pianta.

I batteri antagonisti, che sono distribuiti in taxa diversi e in particolare nei generi *Bacillus*, *Actinomyces*, *Pseudomonas* e *Agrobacterium*, agiscono soprattutto attraverso la produzione di metaboliti secondari biologicamente attivi. I funghi antagonisti, utilizzati nell'attività di soppressione dei funghi patogeni, sono numerosi (*Trichoderma*, *Verticillium*, *Phytium*, *Funnelliformis*, *Gliocladium* ecc.) e agiscono con meccanismi d'azione diversi.

Quanto al controllo degli artropodi, fra i batteri *Bacillus thuringiensis* è stato il primo e per molti anni anche l'unico batterio registrato. Produce diversi tipi di proteine tossiche nei confronti delle larve di artropodi. I geni che codificano per queste proteine sono stati ingegnerizzati nelle piante di mais, cotone, colza e soia, coltivate sul pianeta fino a raggiungere la superficie di 180 milioni di ettari. Negli ultimi anni la superficie coltivata con queste piante è andata riducendosi, a causa, tra l'altro, dell'insorgenza di artropodi resistenti. In letteratura sono descritti più di cento batteri patogeni degli artropodi, ma quello più sfruttato anche commercialmente resta il *Bacillus thuringiensis*.

Anche alcuni virus, in particolare della famiglia dei *Baculoviridae*, sono impiegati nella lotta contro gli artropodi. L'utilizzo limitato dipende dal fatto che essi sono altamente specifici e quindi utilizzabili solo in settori ristretti di mercato.

I funghi filamentosi invece utilizzano la rete del micelio micorrizico che essi formano tra le radici come mezzo di trasmissione del segnale tra le piante, per lanciare, in caso di infestazione, l'allarme a quelle non ancora attaccate dagli insetti erbivori, sollecitando l'attivazione dei sistemi di difesa. Nel caso del fagiolo, sulla base delle informazioni trasmesse da funghi micorrizici, le piante rilasciano metilsalicilato che funge da repellente degli afidi e da attrattivo per parassitoidi antagonisti degli afidi, prima che avvenga il contatto con gli afidi stessi (Babikova et al., 2013).

L'uso commerciale dei funghi antagonisti è facilitato dalla semplicità di produzione e dalla versatilità che li rende attivi su una vasta gamma di artropodi, anche se va segnalata la loro scarsa efficacia in climi secchi. Fra i più utilizzati commercialmente si ricordano funghi appartenenti ai generi *Beauveria* e *Paecilomyces*. Diversi funghi sono utilizzati anche per la soppressione dei nematodi.

L'uso dei microrganismi per il biocontrollo nella gestione degli agenti biologici avversi sta conquistando spazio. In particolare grande interesse riveste la strategia del controllo effettuato sui microrganismi che vivono in simbiosi con gli insetti vettori finalizzata a ridurre la competenza del vettore. Si tratta di un settore complesso ma molto promettente (Rio et al., 2004).

Cambiamento climatico e microrganismi

L'aumento della concentrazione di anidride carbonica, il principale gas climalterante, di regola stimola la fotosintesi. Tuttavia alcuni lavori segnalano come in colture di riso, al crescere del livello di anidride carbonica, si riduca

il contenuto proteico e si verificano perdite consistenti di vitamine B1, B2, B5 e B9, ferro, zinco (Zhu et al., 2018). Inoltre l'aumento della temperatura, creando siccità e incremento della salinità dei terreni, deprime l'attività fotosintetica e incide sulla produzione di essudati modificandone la composizione chimica e quindi le condizioni nutrizionali per la microflora della rizosfera.

In questa condizione di stress, il microbioma del suolo manifesta una grande flessibilità e attitudine all'adattamento alle nuove condizioni. La stessa composizione del microbioma si modifica, anche arricchendosi di microrganismi che provengono dall'esterno, trasportati dal vento, e la sua attività viene declinata in funzione dell'evoluzione del cambiamento climatico e degli stress da esso causati, con grande vantaggio delle colture che non godono della stessa rapida adattabilità. Il microbioma in questo modo è in grado di contrastare la siccità, e di operare a concentrazioni saline più elevate, di mettere in atto sistemi diretti e indiretti di difesa contro agenti biologici avversi. Gli inoculanti possono fornire un prezioso contributo alle colture testate non solo in laboratorio, ma anche in campo in termini di sviluppo radicale, fogliare, di attività fotosintetica e di produzione (Rolli et al., 2014, 2017). In certi casi le piante, stimolate dal microbioma, mettono in atto meccanismi particolari come il potenziamento di una pompa protonica vacuolare che conferisce maggior resistenza alla siccità (Vigani et al., 2018).

L'agricoltura in aree desertiche

Le ricerche condotte in aree desertiche sono molto utili perché possono fornire suggerimenti da applicare nelle zone temperate investite dal riscaldamento globale. Queste zone sono caratterizzate da scarsa diversità filogenetica e funzionale dei microrganismi. Nonostante questo, il microbioma è in grado di esprimere versatilità metabolica, e meccanismi multipli di riparazione dei guasti procurati dai raggi UV, oltre che, naturalmente, tolleranza nei confronti di salinità e temperatura elevate. È interessante rilevare che le piante selezionano rapidamente i microrganismi funzionali alla propria performance, anche se provengono da altre aree geografiche e dalla rizosfera di altre specie vegetali. In altri casi in condizioni estreme alcuni generi di *Fusarium*, conosciuti come patogeni che crescono liberi, convertono il loro sistema di vita in mutualistico ed endofitico simbiotico; le piante migliorano la loro performance grazie a sostanze prodotte dal metabolismo secondario di funghi endofitici ed epifitici. Infine molte varietà di erbe spontanee del deserto dispongono le radici colonizzate dai microrganismi in modo da formare strutture cilindriche

avvolte da una guaina (*rhizosheath*), costituita dalle stesse radici e da granelli di sabbia tenuti insieme da mucillagini prodotte da entrambi i simbionti per catturare e conservare l'umidità (Marasco et al., 2018).

IL MERCATO DEI BIOPRODOTTI PER L'AGRICOLTURA

Comprende *agrobiofarmaci*, *biostimolanti* e *bioinoculanti*, con applicazioni che spaziano dai semi al terreno, dalle foglie al post-raccolta. Con la crescita globale delle superfici coltivate a biologico (2 milioni di ettari in Italia e più di 8 milioni con Spagna, Francia, Germania e Regno Unito), la domanda di questi prodotti è notevolmente cresciuta e, d'altro canto, l'industria sta incrementando la gamma dell'offerta sia in risposta a specifiche domande, sia proponendo in autonomia prodotti nuovi in grado di intercettare l'interesse degli agricoltori. Un aspetto degno di nota è che una quota tutt'altro che secondaria di questi prodotti viene utilizzata da agricoltori che non fanno parte delle associazioni di agricoltura biologica, ma che ritengono comunque vantaggioso od opportuno usarli.

Le previsioni di questo segmento del mercato, tutte in crescita, si basano non solo sul trend registrato negli ultimi dieci anni, ma anche su una serie di considerazioni, quali il fatto che i prodotti in oggetto sono percepiti come ambientalmente più sicuri da una parte non irrilevante di agricoltori; la crescita continua della domanda da parte dei consumatori di cibi di qualità coltivati in ambienti sani e di cibi di origine animale prodotti nel rispetto del benessere animale e dell'ambiente; le restrizioni normative sull'uso degli *agrochemicals* convenzionali spingono gli agricoltori a rivolgersi ai prodotti di origine biologica. Inoltre per quel che riguarda nello specifico gli agrobiofarmaci, i tempi di registrazione sono più brevi che non per gli agrofarmaci di sintesi chimica, con conseguente impatto economico positivo. Pare che fra gli acquirenti resti qualche diffidenza legata al termine batteri che nell'immaginario collettivo sono associati non al benessere, ma alla malattia. Per quel che riguarda i biostimolanti, il recente Regolamento UE 2019/1009, che aggiorna le norme relative all'immissione sul mercato di prodotti fertilizzanti, pone grande attenzione ai requisiti di sicurezza e di qualità.

Ovviamente prima di arrivare alla commercializzazione, i prodotti vengono vagliati per diversi aspetti: sicurezza, carrier, agenti specializzanti, shelf life, resistenza agli stress, competitività con i microrganismi del suolo, dosaggio, la possibilità di raggiungere la stessa nicchia nella quale si trova il patogeno (in caso di biofarmaci), le affinità dei ceppi selezionati nei confronti delle varie

specie di piante e dei loro tessuti. Dunque anche nel processo di miglioramento genetico delle piante dovrà essere tenuta presente la loro affinità alle simbiosi con microrganismi funzionali. Una strategia per ampliare l'efficacia degli inoculanti consiste nel commercializzare prodotti che contengano consorzi di microrganismi selezionati che possono intercettare più facilmente le diverse esigenze della pianta e dunque offrire migliori possibilità di successo (Compant et al., 2019).

È interessante sottolineare come il mercato internazionale dei prodotti biologici per l'agricoltura veda sempre il coinvolgimento delle grandi imprese dell'agrochimica.

Per quanto riguarda nello specifico gli *Agrobiofarmaci*, il mercato ha fatto registrare tra il 2002 e il 2012 un incremento annuo del 15-20% e in totale del 200% nel periodo. Le previsioni al 2025 sono di un volume di affari di 9,4 miliardi di dollari con un tasso annuo di crescita composto del 16% (Market Research Engine, 2020). Gli Stati Uniti d'America continuano a essere il Paese che utilizza di più questi prodotti, seguito dall'Europa. L'associazione internazionale dei produttori di agrobiofarmaci è l'*International Biocontrol Manufacturers Association* (IBMA). In Europa l'associazione conta oltre 260 aziende, per lo più di piccola e media dimensione, che mettono sul mercato prodotti e mezzi tecnici per la bioprotezione delle piante.

Quanto ai *Biostimolanti*, anche questo mercato è cresciuto rapidamente soprattutto in Europa dove vengono usati su circa 8,5 milioni di ettari (dati 2016). Si stima che il mercato di questi prodotti, che nel 2019 era di 2,9 miliardi, raggiunga i 4,9 miliardi di dollari entro il 2025, con un incremento annuale composto dell'11,24% (Market Research Engine, 2020). L'associazione europea di riferimento delle imprese del settore è l'*European Biostimulants Industry Council* (EBIC).

Infine le vendite degli *Inoculanti*, stimate in 808 milioni di dollari nel 2019, sono cresciute negli ultimi anni a un ritmo del 10% l'anno con previsioni di raggiungere 1,2 miliardi di dollari entro il 2025. L'incremento più consistente è stato quello degli inoculanti per insilati in relazione all'accresciuta domanda di cibi di origine animale, sia carnei che lattiero caseari (Market Research Engine, 2020).

I microrganismi sono indispensabili anche nella produzione, trasformazione e conservazione di diversi alimenti. Da qui discende l'importanza degli inoculanti anche destinati all'industria alimentare. Essi offrono innumerevoli vantaggi: facilitano il processamento della materia prima, migliorano il valore nutrizionale conferendo aroma e gusto, garantiscono sicurezza igienico-

sanitaria; molti di essi aggiungono al prodotto vitamine, enzimi e coloranti naturali. È anche grazie a questi microrganismi se l'*Italian food* e i vini italiani nel mondo godono di un'ottima reputazione e se in questi ultimi anni le esportazioni di prodotti alimentari sono cresciute in misura ragguardevole, con beneficio dell'occupazione e del PIL nazionale.

CONCLUSIONI

Adottare pratiche agricole e sistemi di gestione che non compromettano la biodiversità in genere e dei suoli in particolare consentirebbe al microbioma di estrinsecare pienamente le sue potenzialità e all'agricoltore di ridurre l'uso dei prodotti di sintesi e di contenere i consumi energetici e le importazioni di materie prime necessarie alla produzione di tali prodotti, e, di conseguenza, anche i costi; inoltre si otterrebbe una riduzione del fabbisogno idrico, un incremento della sostanza organica, della biodiversità, della fertilità e anche del valore dei suoli non solo per l'immediato, come avviene con l'utilizzo dei prodotti convenzionali, ma anche per il futuro. Da subito si renderebbero più resilienti i sistemi colturali che stanno soffrendo degli stress biotici e abiotici determinati dal cambiamento climatico.

Tecniche colturali virtuose concorrono anche a migliorare la qualità dei prodotti alimentari, nei quali si sono riscontrati sia un incremento dell'attività antiossidante e dei polifenoli, sia concentrazioni più basse di alcuni metalli pesanti; inoltre il rischio della presenza di residui di fitofarmaci viene minimizzato.

Per un'ulteriore diffusione dell'utilizzo commerciale degli agrobioprodotti, il salto di qualità per sfruttarne le grandi potenzialità lo può fare solo la ricerca scientifica che deve essere intensificata per acquisire ulteriori conoscenze su come il microbioma influenzi l'omeostasi ormonale della pianta e favorisca l'adattamento agli stress e su come incida sulla qualità del prodotto. È necessario inoltre comprendere come i microrganismi benefici si relazionano oltre che con la pianta, anche con la rimanente microflora del suolo e con il contesto ecologico. Vanno superate le difficoltà di riprodurre in laboratorio i processi che avvengono in natura e colmare il gap tra i dati genomici acquisiti su microrganismi non coltivabili e il loro ruolo funzionale. Le ricerche sui microrganismi non potranno essere disgiunte da quelle sulle piante e sul loro miglioramento genetico, anche per rendere più efficienti le simbiosi con i microrganismi. Occorre dunque spingere più in là le frontiere dell'attuale conoscenza su entrambi i partner (piante e microbioma), ma ne vale la pena.

In campo ambientale è sempre la microflora, prevalentemente del terreno, la chiave di volta della chiusura dei cicli biogeochimici degli elementi ed è il mezzo con cui la natura, rimettendo costantemente in circolo le risorse, ne permette l'utilizzo perché la vita continui. Infatti i microrganismi sono componenti importanti degli ecosistemi nei quali tutti gli esseri viventi e l'ambiente sono in stretta relazione. Una possibile definizione di salute degli ecosistemi si basa sulla stabilità, cioè la capacità di resistenza della comunità biologica a eventi di disturbo, su uno stato di minima perdita di nutrienti e di energia e su un alto grado di biodiversità e di interconnessione tra unità funzionali. Anche la ricchezza in sostanza organica dei suoli, favorendo la biodiversità, agisce positivamente sulla salute dell'ecosistema favorendo la crescita dei soppressori di patogeni anche umani, presenti nei suoli. I microrganismi dal terreno passano alla pianta, agli animali e all'uomo e ritornano all'ambiente e al terreno. Questo significa che la salute di ciascuna di queste categorie di esseri viventi non può essere disgiunta da quella delle altre e dell'ambiente. Questo concetto, che viene espresso efficacemente col termine *One Health*, sta conquistando sempre più ricercatori, istituzioni e opinione pubblica (van Bruggen et al., 2019).

Il cambiamento climatico reca danni a tutti i componenti degli ecosistemi, anche quando apparentemente colpisce solo uno di questi elementi, in quanto essi sono connessi in una relazione circolare. I danni all'agricoltura (a onor del vero si deve riconoscere che in alcuni casi il riscaldamento può favorire alcuni sistemi colturali, i cui vantaggi tuttavia non sono assolutamente in grado di compensare i danni agli altri), possono essere mitigati dall'attività dei microrganismi del terreno e dalla loro capacità di incrementare la resilienza delle colture. Infatti la microflora benefica è in grado di incidere sugli equilibri e sulla fertilità di interi ecosistemi. Se però non si ponesse un freno alle emissioni climalteranti, la loro azione diventerebbe sempre più difficile nel contrastare patogeni e parassiti che stanno ampliando il loro areale di colonizzazione, ai quali potrebbero aggiungersi eventuali patogeni umani ora intrappolati nei ghiacciai in scioglimento del Polo Nord (Cavicchioli et al., 2019).

I microrganismi benefici fanno la loro parte e con l'aiuto della ricerca e degli agricoltori potranno fare di più per salvare l'agricoltura; ma anche la comunità umana che ha contribuito a dare origine all'era *dell'antropocene* dovrebbe assumersi la responsabilità di contrastare il cambiamento climatico e con esso il degrado ambientale. È necessario condividere il concetto di sviluppo sostenibile inclusivo della dimensione economica, ambientale e sociale, come sostenuto da Gro Harlem Brundtland, presidente della Com-

missione mondiale Ambiente e Sviluppo dell'ONU nel Rapporto del 1987 *Our Common Future*: «lo sviluppo sostenibile è uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri». Questo obiettivo può essere raggiunto superando la visione antropocentrica di dominio e mero sfruttamento della natura.

In fondo è quanto viene sostenuto dalle Nazioni Unite con l'Agenda 2030 dedicata agli "Obiettivi per lo sviluppo sostenibile", da papa Francesco con l'enciclica *Laudato si'* e dalla Commissione Europea non solo con la nuova PAC, ma anche con l'*European Green Deal*. Due dei pilastri su cui si basa questa recentissima strategia europea riguardano proprio l'agricoltura con le filiere alimentari e la difesa della biodiversità. Gli obiettivi da raggiungere entro il 2030 sono la riduzione del 50% dei fitofarmaci più dannosi, della dispersione dei fertilizzanti chimici e dell'uso di antibiotici negli allevamenti e in acquacoltura. Inoltre è previsto un sostegno all'agricoltura biologica perché entro il 2030 raggiunga il 25% della superficie agraria. Questi obiettivi richiedono un forte impegno della ricerca in generale e in particolare di quella microbiologica. L'agricoltura di precisione e l'agroecologia sono i modelli su cui punta maggiormente il *Green Deal* (*European Commission*, 2020).

L'agricoltura italiana sta facendo sensibili progressi sulla strada della sostenibilità globale. Lo dimostrano i dati sui consumi energetici in agricoltura, così come quelli del mercato dei fitofarmaci di sintesi, entrambi in lenta ma continua diminuzione (Ispra, 2017, 2018), accanto alla crescita dell'uso degli agrobioprodotti. Molti agricoltori scelgono di adottare sistemi di gestione più rispettosi all'ambiente, condividono l'uso di microrganismi promotori della crescita e della difesa delle piante e si avvalgono delle tecniche digitali avanzate per ridurre consumi e sprechi. E questo è un segnale di buon auspicio; i processi però dovrebbero essere accelerati.

D'altronde migliorare l'agricoltura puntando sulla riduzione degli input energetici è una strategia vincente anche per i Paesi in via di sviluppo, che possono far leva su una maggior biodiversità rispetto ai Paesi occidentali, evitando di mutuare modelli di altri Paesi.

Per concludere, l'infinitamente piccolo, quale è il mondo dei microrganismi, spesso trascurato e negletto perché ogni singolo componente è invisibile all'occhio umano, muove il mondo molto più di quanto non appaia. Gli va dedicata l'attenzione e la ricerca che si merita perché, forse, può aiutarci a salvare la salute dell'uomo, degli altri animali e delle piante, l'agricoltura e l'alimentazione anche per le generazioni future.

BIBLIOGRAFIA

- AFELT A., FRUTOS R., DEVAUX C. (2018): *Bats, Coronaviruses, and deforestation: toward the emergence of novel Infectious diseases?*, «Front Microbiol.», doi.org/10.3389/fmicb.2018.00702.
- AMINOV R.I. (2011): *Horizontal gene exchange in environmental microbiota*, «Front Microbiol.», doi: 10.3389/fmicb.2011.00158
- BABIKOVA Z., GILBERT L., BRUCE TJA, BIRKETT M, CAULFIELD JC, WOODCOCK C, PICKETT JA, JOHNSON D. (2013): *Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack*, «Ecology Letters», 16 (7), pp. 835-843. doi.org/10.1111/ele.12115
- BAR-ON Y.M., PHILIPS R., MILO R. (2018): *The biomass distribution on Earth*, «PNAS», 115, pp. 6506-11. doi.org/10.1073/pnas.1711842115
- BROOKSHIRE E.N.J., WURZBURGER N., CURREY B., MENGE D.N.L., OATHAM M.P., ROBERTS C. (2019): *Symbiotic N fixation is sufficient to support net aboveground biomass accumulation in a humid tropical forest*, «Sci Rep», 9, doi.org/10.1038/s41598-019-43962-
- CAVICCHIOLI R., RIPPLE W.J., TIMMIS K.N. (e altri 30 Autori) (2019): *Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change*, «Nature Reviews Microbiology», 17, pp. 569-586. doi 10.1038/s41579-019-0222-5
- CHEN W.-M., MOULIN L., BONTEMPS C., VANDAMME P., BÉNA G., BOIVIN-MASSON C. (2003): *Legume symbiotic nitrogen fixation by beta-proteobacteria is widespread in nature*, «J Bacteriol.», 185 (24), pp. 7266-72. doi: 10.1128/JB.185.24.7266-7272.2003
- COMMISSIONE EUROPEA (2018): *Proposta di Regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio recante norme sul sostegno ai piani strategici che gli Stati membri devono redigere nell'ambito della politica agricola comune (piani strategici della PAC)*.
- 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, pp. 29-37. doi: 10.1016/j.jare.2019.03.004
- DAWSON C.J., HILTON J. (2011): *Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus*, «Food Policy», 36, pp. 14-22. doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.012
- EUROPEAN COMMISSION (2020): *Communication. A farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*, COM, 381 final.
- GILBERT A.J., VAN DER LELIE D., ZARRAONAINDIA I. (2014): *Microbial terroir for wine grapes*, «PNAS», 111 (1), pp. 5-6. doi: 10.1073/pnas.1320471110
- IACCARINO M. (a cura di) (2006): *Microrganismi benefici per le piante*, Ed. Idelson-Gnocchi, Napoli.
- IPBES/6/15/Add.5 (2018): *Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its sixth session*, 23 aprile.
- ISPRA (2017): *Monitoraggio nazionale dei pesticidi nelle acque*, Manuali e Linee Guida 152.
- ISPRA (2018): *Fattori di emissione atmosferica di gas serra e altri gas nel settore elettrico*.
- KALLENBACH C., FREY S., GRANDY A. (2016): *Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls*, «Nat Commun», 7, 13630. doi.org/10.1038/ncomms13630
- LADHA J.K., TIROL-PADRE A., REDDY C.K., CASSMAN K.G., VERMA S., POWLSON D.S., VAN KESSEL C., DE B. RICHTER D., CHAKRABORTY D., PATHAK H. (2016): *Global*

- nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems*, «Sci Rep.», 6: 19355. doi.org/10.1038/srep19355
- LAKE, J. A. (2011): *Lynn Margulis (1938-2011)*, «Nature», 480, 458. doi.org/10.1038/480458a
- LI X., JOUSSET A., DE BOER W., CARRIÓN V.B., ZHANG T., WANG X., KURAMAE E.E. (2019): *Legacy of land use history determines reprogramming of plant physiology by soil microbiome*, «The ISME Journal», 13, pp. 738-751. doi.org/10.1038/s41396-018-0300-0
- MARASCO R., MOSQUEIRA M.J., FUSI M., RAMOND J.-B., MERLINO G., BOOTH J.M., MAGGS-KÖLLING G., COWAN D.A., AND DAFFONCHIO D. (2018): *Rhizosphere microbial community assembly of sympatric desert spear grasses is independent of the plant host*, «Microbiome», 6, Issue 1, p. 215. doi.org/10.1186/s40168-018-0597-y
- MARKET RESEARCH ENGINE (2020): <https://www.marketresearchengine.com/biopesticides-market-report>
- PANKIEVICZ V.C.S., IRVING T.B., MAIA L.G.S., ANÉ J.-M. (2019): *Are we there yet? The long walk towards the development of efficient symbiotic associations between nitrogen-fixing bacteria and non-leguminous crops*, «BMC Biol», 17, 99. doi.org/10.1186/s12915-019-0710-0
- PASOLLI E., ASNICAR F., MANARA S., ZOLFO M., KARCHER N., ARMANINI F., BEGHINI F., MANGHI P., TETT A., GHENSI P., COLLADO M.C., RICE B.L., DU LONG C., MORGAN X.C., GOLDEN C.D., QUINCE C., HUTTENHOWER C., SEGATA N. (2019): *Extensive unexplored human microbiome diversity revealed by over 150,000 genomes from metagenomes spanning age, geography, and lifestyle*, «Cell», 176 (3), pp. 649-662.
- PHILIPPOT L., RAAIJMAKERS J.M., LEMANCEAU P., VAN DER PUTTEN W.H. (2013): *Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere*, «Nature Reviews Microbiology», 11, 789-799.
- RAY D.K., MUELLER N.D., WEST P.C., FOLEY J.A. (2013): *Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050*, «Plos One». doi.org/10.1371/journal.pone.0066428
- RIO R.V.M., HU Y., AKSOY S. (2004): *Strategies for the home team: symbioses exploited for vector-borne disease control*, «Trends Microbiol.», 12, pp. 325-336.
- ROLLI E., MARASCO R., SADERI S., CORRETTO E., MAPELLI F., CHERIF A., BORIN S., VALENTI L., SORLINI C., DAFFONCHIO D. (2017): *Root-associated bacteria promote grapevine growth from the laboratory to the field*, «Plant Soil», 410, pp. 369-382. doi10.1007/s11104-016-3019-6
- ROLLI E., MARASCO R., VIGANI G., ETTOUMI B., MAPELLI F., DEANGELIS M.L., GANDOLFI C., CASATI E., PREVITALI F., GERBINO R., PIEROTTI CEI F., BORIN S., SORLINI C., ZOCCHI G., DAFFONCHIO D. (2014): *Improved plant resistance to drought is promoted by the root-associated microbiome as a water stress-dependent trait*, «Environmental Microbiology», 17 (2). doi: 10.1111/1462-2920.12439
- ROSENBLUETH M., ORMEÑO-ORRILLO E., LOPEZ-LOPEZ A., ROGEL M.A., REYES-HERNÁNDEZ B.J., MARTÍNEZ-ROMERO J.C., REDDY P.M., MARTÍNEZ-ROMERO E. (2018): *Nitrogen fixation in cereals*, «Front. Microbiol.», doi.org/10.3389/fmicb.2018.01794
- SESHADRI R., REEVE W., ARDLEY J., IVANOV N. (2015): *Discovery of novel plant interaction determinants from the genomes of 163 root nodule bacteria*, «Scientific Reports», 5, 16825. doi: 10.1038/srep16825

- SEUTRA KABA J., ZERBE S., AGNOLUCCI M., SCANDELLARI F., ABUNYEWA A.A., GIOVANNETTI M., TAGLIAVINI M. (2019): *Atmospheric nitrogen fixation by gliricidia trees (Gliricidia sepium (Jacq.) Kunth ex Walp.) intercropped with cocoa (Theobroma cacao L.)*, «Plant and Soil», 435, pp. 323-336.
- TURRINI A., AGNOLUCCI M., PALLA M., TOMÉ E., TAGLIAVINI M., SCANDELLARI F., GIOVANNETTI M. (2017): *Species diversity and community composition of native arbuscular mycorrhizal fungi in apple roots are affected by site and orchard management*, «Applied Soil Ecology», 116, pp. 42-54. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.03.016
- TURRINI A., AVIO L., GIOVANNETTI M., AGNOLUCCI M. (2018): *Functional complementarity of arbuscular mycorrhizal fungi and associated microbiota: the challenge of translational research*, «Frontiers in Plant Science», 9, 1407. doi: 10.3389/fpls.2018.01407
- UNEP (2020): *UNEP steps up work in zoonotics, protecting environment to reduce pandemic risks*. <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/unep-steps-work-zoonotics-protecting-environment-reduce-pandemic>
- VAN BRUGGEN A.H.C., GOSS E.M., HAVELAAR A., VAN DIEPENINGEND A.D., FINCKHE M.R., MORRIS J.G. (2019): *One Health - Cycling of diverse microbial communities as a connecting force for soil, plant, animal, human and ecosystem health*, «Science of the Total Environment», 664, pp. 927-937. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.091
- VAN DEYNZE A., ZAMORA P., DELAUX P.-M., HEITMANN C., JAYARAMAN D., RAJASEKAR S. (2018): *Nitrogen fixation in a landrace of maize is supported by a mucilage-associated diazotrophic microbiota*, «PLoS Biol», 16 (8): e2006352. doi.org/10.1371/journal.pbio.2006352
- VIGANI G., ROLLI E., MARASCO R., DELL'ORTO M., MICHOU D., SOUSSI A., RADDADI N., BORIN S., SORLINI C., ZOCCHI G. AND DAFFONCHIO D. (2018): *Root bacterial endophytes confer drought resistance and enhance expression and activity of a vacuolar H⁺-pumping pyrophosphatase in pepper plants*, «Environmental Microbiology». doi:10.1111/1462-2920.14272
- YANNI Y.G., RIZK R.Y., CORICH V., SQUARTINI A. (+ altri 10 AA) (1997): *Natural endophytic association between Rhizobium leguminosarum bv.trifolii and rice roots and assessment of its potential to promote rice growth*, «Plant and Soil», 194, pp. 99-114.
- ZHU C., KOBAYASHI K., LOLADZE I., ZHU J., JIANG Q., XU X., LIU G., SENEWEERA S., EBI K.L., DREWNOWSKI A., FUKAGAWA N., ZISKA L.H. (2018): *Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice dependent countries*, *Science Advances*, Online Edition. doi: 10.1126/sciadv.aag1012.

Un vivo ringraziamento ai colleghi, professori Daniele Daffonchio, Manuela Giovannetti, Andrea Squartini e Stefano Bocchi per i preziosi consigli e suggerimenti.

Per un approfondimento sul tema “microrganismi e agricoltura” consiglio caldamente la lettura di due recentissime pubblicazioni, che, seppur con approccio diverso, contribuiscono a far conoscere e apprezzare “la grandezza” degli esseri viventi più piccoli.

NUTI M. (2020): *Gli invisibili in agricoltura*, ed. Accademia dei Georgofili.
 SELBITTO V.M. (a cura di) (2020): *I microrganismi utili in agricoltura*, Edagricole, Bologna.

