

Funghi micorrizici e agricoltura innovativa

A cura di

Vincenzo Michele Sellitto
e Raffaella Balestrini



1^a edizione: aprile 2025



© Copyright 2025 by «Edagricole - Edizioni Agricole di New Business Media srl», via Eritrea, 21 - 20157 Milano - Redazione: p.zza G. Galilei, 6 - 40123 Bologna - Vendite: tel. 051/6575833; fax: 051/6575999 - e-mail: libri.edagricole@newbusinessmedia.it - www.edagricole.it

5678

Proprietà letteraria riservata - Printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguitabile (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o trasmessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norma di legge.

Realizzazione grafica: Emmegi Group, via F. Confalonieri, 36 - 20124 Milano
Impianti e stampa: LOGO S.p.A., Via Marco Polo 8, 35010 - Borgoricco (PD)

Finito di stampare nell'aprile 2025

ISBN-978-88-506-5678-3

Prefazione

Le simbiosi tra piante e microrganismi rappresentano uno degli aspetti più affascinanti della biologia e dell'ecologia. Tra queste, le simbiosi micorriziche sono una delle più diffuse e importanti, coinvolgendo la maggior parte delle piante terrestri e influenzandone la nutrizione, la resistenza agli stress ambientali e la protezione da patogeni. Questo libro approfondisce il ruolo dei funghi micorrizici e le loro interazioni con le piante, con un focus sulle implicazioni ecologiche e applicative, in particolare in agricoltura e gestione ambientale.

Negli ultimi decenni, la ricerca ha mostrato che la simbiosi micorrizica non è solo un rapporto mutualistico statico, ma una rete complessa di interazioni che modellano interi ecosistemi. I funghi micorrizici facilitano l'assorbimento di nutrienti, in particolare fosforo e azoto, in cambio di carbonio organico fornito dalle piante. Inoltre, migliorano la resistenza a stress come siccità, salinità e attacchi di patogeni radicali.

Tuttavia, non tutte le piante formano simbiosi micorriziche.

Nonostante ciò, anche piante non ospiti possono interagire con funghi micorrizici. Studi recenti hanno evidenziato che alcune radici possono essere colonizzate da strutture fungine senza sviluppare una simbiosi funzionale. Inoltre, le piante micorrizzate possono influenzare le non ospiti nelle vicinanze, generando interazioni complesse che meritano ulteriori studi.

L'interesse scientifico e applicativo per le micorrize è in costante crescita, soprattutto nell'ambito dell'**agricoltura sostenibile**. La riduzione dell'uso di fertilizzanti chimici e pesticidi richiede alternative naturali per migliorare la fertilità del suolo e la produttività delle colture. I funghi micorrizici si sono rivelati preziosi nel migliorare l'assorbimento dei nutrienti, ridurre il fabbisogno di concimi e aumentare la qualità delle produzioni. Inoltre, giocano un ruolo chiave nel **biorisanamento** dei suoli contaminati, facilitando la degradazione di inquinanti e il ripristino degli ecosistemi degradati.

Nonostante il potenziale delle micorrize, la loro applicazione pratica presenta ancora delle sfide. L'efficacia della simbiosi dipende da variabili come il tipo di suolo, i genotipi vegetale e fungino coinvolti, la presenza di altri microrganismi nel suolo le condizioni ambientali, ecc. La ricerca attuale sta cercando di ottimizzare l'uso di inoculi micorrizici per garantire la loro efficienza e compatibilità con diverse colture. Questo libro offre un quadro completo delle conoscenze attuali sui funghi micorrizici, il loro ciclo di vita, i meccanismi molecolari e fisiologici alla base

Prefazione

della simbiosi e le strategie applicative in agricoltura e ambiente. Ci auguriamo che possa rappresentare un riferimento utile per ricercatori, studenti, agricoltori e professionisti del settore, contribuendo alla diffusione di pratiche sostenibili per il futuro dell'agricoltura e della gestione ambientale.

I Curatori

Gli Autori

Raffaella Balestrini, Dirigente di Ricerca del CNR

Miriana Bortolot, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Matteo Chialva, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Walter Chitarra, Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria, Centro di ricerca Viticoltura ed Enologia, Conegliano (TV)

Valentina Fiorilli, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Manuela Giovannetti, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali, Università di Pisa

Luca Giovannini, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante, Torino

Mirco Iotti, Dipartimento di Medicina Clinica, Sanità pubblica, Scienze della Vita e dell'Ambiente, Università dell'Aquila

Luisa Lanfranco, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Guido Lingua, Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università del Piemonte Orientale

Elena Martino, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Nadia Massa, Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università del Piemonte Orientale

Alessandra Pepe, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali, Università di Pisa; 4 DSM Nutritional Products Ltd. (CH)

Gli Autori

Silvia Perotto, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Alessandra Salvioli di Fossalunga, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università di Torino

Cristiana Sbrana, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biologia e Biotecnologia Agraria, Pisa

Vincenzo Michele Sellitto, University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine of Banat - Timisoara (Romania)

Fabiano Sillo, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante, Torino

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

Elisa Zampieri, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante, Torino

Indice

Prefazione	III
Gli Autori	V
1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria (C. Sbrana, R. Balestrini, V.M. Sellitto)	1
1.1 Simbiosi ed Evoluzione: l'intricato mondo delle interazioni biologiche	1
1.2 La coevoluzione tra piante e funghi micorrizici: un viaggio nel tempo	2
1.3 Diversità morfologica e funzionale delle simbiosi micorriziche	3
1.4 I tipi di micorrize e il loro valore ecologico	5
1.5 Aspetti applicativi della produzione di inoculi a base di funghi micorrizici	6
1.6 L'importanza dei funghi micorrizici oltre l'agricoltura: il biorisanamento	10
1.7 Il ruolo dei funghi micorrizici: comunicazione e visione olistica	11
Bibliografia	12
2. Struttura e funzioni della rete micorrizica (C. Sbrana, L. Giovannini, A. Pepe, M. Giovannetti)	17
2.1 Introduzione	17
2.2 I funghi micorrizici arbuscolari: ciclo vitale e formazione della simbiosi	18
2.3 Struttura della rete micorrizica: <i>Wood Wide Web</i>	22
2.4 Assorbimento e traslocazione dei nutrienti dal suolo	24
2.5 Resilienza della rete micorrizica nel suolo	27
Bibliografia	30
3. Meccanismi molecolari pianta-fungo nelle simbiosi micorriziche (M. Chialva, V. Fiorilli, L. Lanfranco)	35
3.1 La fase pre-simbiotica: dialogo molecolare tra il partner fungino e la pianta ospite	35

Indice

3.2	Il processo di colonizzazione e lo scambio di nutrienti	39
3.3	Il controllo genetico del processo di colonizzazione	41
3.4	La riprogrammazione dell'espressione genica durante la colonizzazione AM	44
3.5	La regolazione nutrizionale della simbiosi AM	45
3.6	Dalle risposte locali a quelle sistemiche	46
3.7	Conclusioni	49
	Bibliografia	50
4.	I molteplici ruoli dei funghi micorrizici arbuscolari nella tolleranza alla siccità delle piante coltivate (<i>W. Chitarra, E. Zampieri, R. Balestrini</i>)	55
4.1	Effetti della mancanza di acqua nel suolo e sulla produttività di piante di interesse agroalimentare	55
4.2	Impatto dei funghi micorrizici arbuscolari nella tolleranza delle piante alla siccità	57
4.3	Conclusioni e prospettive	61
	Bibliografia	62
5.	La simbiosi micorrizica ericoide tra scienza e agricoltura (<i>A. Salvioli di Fossalunga, E. Martino, M. Bortolot, S. Perotto</i>)	67
5.1	Morfologia delle micorrize ericoidi	68
5.2	Il ruolo ecologico delle ErM negli ecosistemi naturali	69
5.3	Diversità dei funghi ErM	70
5.4	Le basi genetiche del ruolo ecologico dei funghi ErM	71
5.4.1	Capacità antagoniste	72
5.4.2	Capacità detossificanti nei confronti dei metalli pesanti	73
5.5	Il mirtillo come pianta di interesse agronomico	75
5.5.1	Le sfide nella coltivazione del mirtillo	76
5.6	Importanza del microbiota in un'ottica di agricoltura sostenibile	77
5.7	Studio dei microrganismi associati alle radici di mirtillo	79
5.8	Il microbiota di mirtillo: prospettive applicative	80
5.9	Conclusioni	81
	Bibliografia	81
6.	Le ectomicorrize, tipi di funghi micorrizici e piante: l'esempio del tartufo (<i>M. Iotti, F. Sillo, E. Zampieri, A. Zambonelli</i>)	85
6.1	I tartufi: inquadramento tassonomico	86
6.2	La coltivazione dei tartufi	88
6.3	Conclusioni e prospettive future	95
	Bibliografia	95
7.	Le piante di interesse agroalimentare che non formano simbiosi micorriziche (<i>E. Zampieri, R. Balestrini, C. Sbrana</i>)	103

7.1	Tipologie di piante non simbiotiche	103
7.2	Interazioni e difese delle piante non ospiti con funghi micorrizici	104
	Bibliografia	107
8.	I funghi micorrizici arbuscolari come biostimolanti (<i>G. Lingua e N. Massa</i>)	111
8.1	Introduzione	111
8.2	Le simbiosi micorriziche	113
	8.2.1 Effetti delle simbiosi micorriziche arbuscolari	115
8.3	Perché inoculare	119
	8.3.1 Scelta degli inoculi	122
	8.3.2 Produzione degli inoculi	123
8.4	Pratiche agronomiche di gestione del suolo	126
8.5	Funghi micorrizici arbuscolari e batteri promotori della crescita	127
8.6	Conclusioni	128
	Bibliografia	129

1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria

*Cristiana Sbrana, Raffaella Balestrini,
Vincenzo Michele Sellitto*

1.1 Simbiosi ed Evoluzione: l'intricato mondo delle interazioni biologiche

I microrganismi interagiscono con le piante attraverso vari modi. Nei modelli ecologici le interazioni tra unità biologiche possono essere *positive* (+), *negative* (-) o *neutre* (0). Secondo Drew *et al.* (2021) qualsiasi tipo di interazione biologica stretta e a lungo termine tra microrganismi e piante, sia positiva che negativa, viene definita simbiosi. Kodera *et al.* (2022) distinguono diverse categorie di interazione considerando la bi-direzionalità delle interazioni tra microrganismi e piante: mutualismo (++) , commensalismo (+0), amensalismo (-0), competizione (-) e predazione/parassitismo (+-). Nella definizione originaria di **Anton De Bary**, patologo della fine del XIX secolo, la **simbiosi** (etimologicamente: *vivere insieme*) è intesa come un'associazione che persiste nel tempo e che si stabilisce tra specie diverse. Questa definizione include un ampio spettro di relazioni, che vanno dai benefici reciproci (simbiosi mutualistiche) alle relazioni antagonistiche (simbiosi patosistiche), fino a quelle in cui solo uno dei partner trae vantaggio (commensalismo).

Le dinamiche di queste associazioni non sono statiche, ma variano a seconda dell'ambiente e dello stadio di sviluppo degli organismi coinvolti. **Lynn Margulis**, una delle principali sostenitrici della **teoria endosimbionte**, ha ampliato il concetto di simbiosi includendo tutte le forme di coabitazione tra organismi di specie diverse. Margulis ha sottolineato come la simbiosi permetta agli organismi di acquisire nuove capacità metaboliche dal proprio partner, una caratteristica fondamentale delle interazioni simbiotiche. Il mondo vegetale offre numerosi esempi di simbiosi, con gradi di complessità variabili. Un esempio è quello dei cianobatteri che vivono nelle foglie della felce Azolla, dove il simbionte mantiene la propria individualità senza evidenti variazioni fenotipiche. Tuttavia, questi stessi cianobatteri possono formare talli lichenici associandosi a funghi, dando origine a strutture morfologicamente e metabolicamente diverse. Un ulteriore livello di complessità è rappresentato dalle simbiosi intracellulari, come quelle tra rizobi fissatori di azoto e leguminose. In questo caso, i rizobi si trovano all'interno delle cellule dell'ospite in compatti chiamati simbiosomi.

1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria

Questo tipo di simbiosi ha profonde conseguenze biologiche, portando alla formazione di nuovi organi (i noduli) e conferendo nuove capacità metaboliche (la fissazione dell'azoto).

Uno degli esempi più affascinanti e diffusi di simbiosi nel mondo vegetale è quello delle micorrize. Queste associazioni simbiotiche si stabiliscono tra le radici di quasi tutte le piante terrestri (circa il 90%) e un gruppo numeroso di funghi del suolo. Le micorrize, in particolare quelle arbuscolari, sono state descritte per la prima volta nel 1885 dal tedesco **Albert Bernhard Frank**. Frank riconobbe la loro presenza nelle radici di alberi ad alto fusto e suggerì il loro ruolo attivo nell'interazione pianta-fungo. Le micorrize arbuscolari, discusse ampiamente in questo volume, sono le più antiche e diffuse tra le micorrize. La loro scoperta risale agli inizi del XX secolo, con le pionieristiche osservazioni di Beniamino Peyron nel negli anni 1920-1922. Queste associazioni simbiotiche sono fondamentali per la salute delle piante e la fertilità del suolo. I funghi micorrizici arbuscolari migliorano l'assorbimento di nutrienti, aumentano la resistenza delle piante agli stress abiotici e biotici, e contribuiscono alla stabilità degli ecosistemi. In sintesi, la simbiosi, dalla sua definizione originaria alle sue manifestazioni più complesse, rappresenta un elemento cruciale per comprendere le interazioni biologiche. Attraverso questo volume, esploreremo in dettaglio il mondo affascinante dei funghi micorrizici arbuscolari, l'importanza di queste simbiosi per la vita sulla Terra e il loro uso per un'agricoltura innovativa.

1.2 La coevoluzione tra piante e funghi micorrizici: un viaggio nel tempo

I funghi micorrizici, e in particolare le micorrize arbuscolari, rappresentano un affascinante esempio di coevoluzione tra piante e funghi. Questa simbiosi, che risale ad almeno 450 milioni di anni fa (durante l'Ordoviciano), ha probabilmente giocato un ruolo cruciale nella colonizzazione delle terre emerse da parte delle piante. Le prime piante terrestri avevano apparati radicali rudimentali o inesistenti, e l'associazione con funghi micorrizici avrebbe permesso loro di sostenere adeguatamente la crescita. Gli studi molecolari e fossili dimostrano la lunga storia di questa simbiosi; infatti resti fossili presentano strutture fungine all'interno di cellule parenchimatiche che somigliano incredibilmente a quelle dei moderni funghi arbuscolari. Questi funghi, grazie alla loro capacità di migliorare la nutrizione minerale delle piante ospiti, hanno favorito la sopravvivenza e la diffusione delle specie simbiotiche, specialmente in terreni poveri di nutrienti. Inoltre un'affascinante ipotesi sostiene che nelle leguminose la simbiosi che permette la fissazione di azoto si sia instaurata su piante che già erano in simbiosi con i funghi arbuscolari, sfruttando meccanismi molecolari già esistenti.

A differenza delle micorrize arbuscolari, le ectomicorrize e le micorrize ericoidi sono comparse più tardi nell'evoluzione delle piante. Identificate per la prima volta da Albert Bernhard Frank nel 1888, le ectomicorrize e le più specializzate

1.3 Diversità morfologica e funzionale delle simbiosi micorriziche

micorrize ericoidi sembrano avere uno sviluppo indipendente da più linee evolutive e si sono adattate a habitat ricchi di sostanza organica. Questa differenza suggerisce che le condizioni ambientali e le necessità ecologiche abbiano guidato l'evoluzione di diversi tipi di simbiosi micorriziche.

La coevoluzione tra piante e funghi micorrizici solleva interessanti domande sulle forze selettive che hanno favorito questa coesistenza mutualistica. Nel caso delle micorrize arbuscolari, i funghi sono diventati completamente dipendenti dalle piante ospiti, sviluppando un meccanismo di biotrofismo obbligato. Questo significa che i funghi non possono completare il loro ciclo vitale senza la pianta ospite, dimostrando un livello estremo di interdipendenza evolutiva. Un concetto utile per comprendere meglio questa interazione è quello di “olobionte”.

Un **olobionte** è un'entità costituita da un organismo ospite e tutti i microrganismi che vivono in simbiosi con esso. Nel contesto delle micorrize, le piante e i loro funghi simbionti possono essere considerati un olobionte, dove la coabitazione porta a benefici reciproci e a nuove capacità metaboliche che nessuno dei due partner potrebbe sviluppare da solo. Questo concetto sottolinea l'importanza della simbiosi come forza evolutiva che va oltre la semplice interazione tra due organismi, creando un'unità funzionale che contribuisce alla biodiversità e alla stabilità degli ecosistemi. La coevoluzione tra piante e funghi micorrizici è dunque un processo complesso e affascinante, che ha plasmato la vita sulla Terra per milioni di anni.

1.3 Diversità morfologica e funzionale delle simbiosi micorriziche

Le micorrize, associazioni simbiotiche tra funghi del suolo e radici, sono diffuse in gran parte delle specie vegetali, e vengono distinte in base alla loro morfologia e all'identità dei partners (Smith e Read, 2010; van der Heijden *et al.*, 2015). Nonostante le strutture fungine osservabili nella radice di piante ospiti appartenenti alle diverse famiglie botaniche possano essere anche fortemente diversificate, dal punto di vista funzionale le simbiosi micorriziche si basano su una interazione mutualistica, in cui il fungo fornisce alla pianta ospite acqua e nutrienti minerali assorbiti dal suolo e riceve in cambio composti del carbonio originati dall'attività fotosintetica della pianta (Smith e Read, 2010; Balestrini *et al.*, 2013; Balestrini e Bonfante, 2014; van der Heijden *et al.*, 2015; Rich *et al.*, 2017; Luginbuehl *et al.*, 2017). Il fungo è capace di assorbire i nutrienti del suolo con alta efficienza perché all'esterno della radice colonizzata cresce formando il micelio extraradicale, una estesa rete di ife che si comporta da apparato assorbente ausiliario, traslocando poi i nutrienti al micelio intraradicale e quindi alla pianta. Nella simbiosi il fungo riceve dalla pianta ospite carbonio in forma di zuccheri e di acidi grassi, che in alcune specie fungine non possono essere sintetizzati in quanto sono assenti enzimi chiave del loro metabolismo (Jiang *et al.*, 2017). Dal punto di vista morfologico, la principale differenza tra le tipologie di micorrize consiste nella capacità del fungo di colonizzare o meno le cellule radicali della

1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria

pianta ospite, e permette di distinguere le **ectomicorrize** (ECM), in cui il fungo cresce solo intercellularmente all'interno della radice, dalle **endomicorrize**, dove è presente anche colonizzazione intracellulare (Smith e Read, 2010; Balestrini e Bonfante, 2014). Quest'ultima tipologia di micorrize viene ulteriormente suddivisa in tre distinte associazioni: **micorrize arbuscolari** (AM), **micorrize delle orchidee** e **micorrize ericoidi**.

Le ECM sono presenti soprattutto nelle piante forestali, che nonostante rappresentino una frazione esigua delle specie vegetali sono ampiamente diffuse nei diversi biomi terrestri (Martin *et al.*, 2007). Le radici simbiotiche sono caratterizzate da un mantello di ife che dall'esterno dell'apice radicale penetra tra le cellule corticali a formare una fitta rete detta reticolo di Hartig, ritenuta la sede degli scambi di nutrienti tra fungo e ospite. Sebbene i funghi che formano ECM siano più conosciuti per i loro corpi fruttiferi commestibili - in alcuni casi di notevole valore commerciale, quali tartufi, boleti, amanite (Mello *et al.*, 2015) - dal punto di vista funzionale essi sono uno dei gruppi microbici chiave dei cicli dei nutrienti degli ambienti forestali e permettono alle piante ospiti di sfruttare le risorse del suolo a raggio più ampio, rispetto a quello che sarebbero in grado di assorbire le sole radici (Smith e Read, 2010).

Tra i diversi funghi che formano endomicorrize, quelli che stabiliscono micorrize arbuscolari (AM), appartenenti al phylum Glomeromycota, sono senza dubbio i più diffusi, perché capaci di interagire con la maggior parte delle specie di piante terrestri, incluse molte importanti specie coltivate (ad esempio mais, grano, soia, riso, pomodoro, leguminose da granella e da foraggio, vite, olivo e molte altre).

I **funghi micorrizici arbuscolari** (AMF) sono simbionti obbligati, in quanto incapaci di completare il loro ciclo vitale in assenza dell'interazione con l'ospite, e dipendono dalla pianta per il carbonio, che ricevono sotto forma di zuccheri e lipidi, necessario alla loro crescita. Nelle AM il fungo penetra e cresce intercellularmente nella radice per poi colonizzare le cellule corticali con ife così fortemente ramificate da assumere una forma ad alberello (arbuscolo). Questa struttura è considerata l'unità funzionale della simbiosi, dove avvengono gli scambi di nutrienti. Anche gli AMF formano fruttificazioni nel suolo, dove producono spore resistenti la cui morfologia viene utilizzata per l'identificazione tassonomica delle specie: in condizioni ottimali di temperatura e umidità le spore sono capaci di germinare e colonizzare le radici di nuove piante ospiti.

Nelle micorrize Ericoidi, formate con piante appartenenti all'ordine Ericales (ad esempio erica, calluna, rododendro, mirtillo) da diversi generi fungini, le sottili radici laterali vengono colonizzate da ife intracellulari a forma di gomitolo. I funghi capaci di formare questo tipo di micorrize, diffuso principalmente nelle brughiere, hanno un ruolo importante nella degradazione della sostanza organica e nella nutrizione azotata delle specie ospiti (Read e Perez-Moreno, 2003).

Le piante appartenenti alla famiglia Orchidaceae dipendono dai funghi simbionti per l'intero ciclo vitale: il seme infatti, privo di endosperma e quindi delle riserve necessarie per la germinazione, necessita dell'apporto di azoto e carbonio da parte di un fungo simbionte per sviluppare il protocormo e la plantula. Anche la pianta

1.4 I tipi di micorrize e il loro valore ecologico

adulta stabilisce una simbiosi, con funghi generalmente diversi da quello con cui ha interagito nella prima fase, in cui la radice mostra ife intercellulari e strutture intracellulari a gomitolo (*pelotons*) (Dearnaley, 2007; Dearnaley *et al.*, 2017).

Esiste inoltre un tipo di micorriza “intermedio”, detto ectoendomicorriza, in cui le strutture tipiche della ECM possono essere presenti e più o meno sviluppate ma si osserva anche colonizzazione intracellulare, come ad esempio nel corbezzolo (*Arbutus unedo*) (Smith e Read, 2010).

Diversi studi hanno dimostrato una stretta correlazione tra la distribuzione dei diversi tipi di micorrize e le caratteristiche del suolo e delle comunità vegetali locali: ad esempio, le ectomicorrize predominano nelle foreste di latifoglie e conifere nelle regioni temperate e fredde, adattandosi a suoli ricchi di materiale organico come lignina e tannini, comuni nella lettiera fogliare, mentre, le micorrize arbuscolari sono tipiche di piante erbacee e arboree delle regioni temperate e calde, dove il suolo è caratterizzato da una rapida decomposizione della materia organica e da limitate risorse di fosforo.

Queste considerazioni evidenziano come le micorrize siano non solo un elemento chiave per la salute degli ecosistemi terrestri, ma anche un campo di studio affascinante per comprendere le dinamiche nutrizionali e ecologiche tra piante e funghi.

1.4 I tipi di micorrize e il loro valore ecologico

Oltre ad avere un ruolo importante nella regolazione dei cicli del carbonio e dei nutrienti le micorrize sono in grado di influenzare la formazione degli aggregati nel terreno (Rillig e Mummey, 2006), la decomposizione della lettiera superficiale (Lindahl *et al.*, 2007) e la sopravvivenza delle plantule (van der Heijden *et al.*, 2015, e letteratura qui citata), in particolare in condizioni di stress. Le simbiosi micorriziche infatti migliorano la crescita e la produzione delle piante e incrementano la loro tolleranza agli stress biotici (Pozo *et al.*, 2009) e abiotici, come lo stress idrico (Porcel *et al.*, 2006; Kivlin *et al.*, 2013; Rapparini e Peñuelas, 2014), e lo stress salino (Evelin *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2024) sebbene gli effetti osservati siano fortemente variabili in funzione dell’identità dei simbionti, delle condizioni ambientali e della disponibilità delle risorse nutrizionali (van der Heijden *et al.*, 2015; Walder e van der Heijden, 2015; Berruti *et al.*, 2016).

In molti casi, le piante micorrizzate da funghi AM mostrano maggiore tolleranza nei confronti della tossicità indotta dalla presenza di metalli pesanti nel suolo (Tamayo *et al.*, 2014; Cicatelli *et al.*, 2014; Meier *et al.*, 2015; Ferrol *et al.*, 2016); infatti il sequenziamento del genoma del fungo arbuscolare *Rhizophagus irregularis* (Tisserant *et al.*, 2013) ha permesso di identificare diversi geni che codificano per trasportatori di rame, ferro e zinco (Tamayo *et al.*, 2014). Inoltre, sebbene nella famiglia delle Ericaceae siano conosciute specie e ecotipi tolleranti la presenza di metalli pesanti, questo carattere sembra in buona parte attribuibile alla presenza e all’attività dei funghi micorrizici ad esse associati (Daghino *et al.*, 2016). Infatti, mentre poco ancora è conosciuto sui meccanismi con cui la

1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria

micorrizzazione esercita il suo effetto di “protezione” nei confronti dell’ospite ericoide, alcune informazioni importanti sono emerse dagli studi “omici” effettuati sui funghi simbionti e dagli studi di espressione eterologa dei geni coinvolti, utilizzando organismi modello (Daghino *et al.*, 2016, e letteratura qui citata). La tolleranza alla presenza di metalli pesanti è stata osservata anche nel caso delle ECM, grazie allo studio di alcuni isolati di funghi ECM capaci di colonizzare le piante di ambienti particolarmente ostili (Colpaert *et al.*, 2004, 2011) e alle analisi delle comunità fungine di giovani foreste di pini, che crescevano in terreni contaminati da zinco e cadmio, dove *Suillus luteus* risultava la specie dominante (Op De Beeck *et al.*, 2015).

Le piante appartenenti alla famiglia delle orchidacee dipendono dai simbionti fungini per tutto il loro ciclo vitale: poiché il seme non ha riserve, la colonizzazione dei suoi tessuti da parte di un primo simbionte, generalmente solo temporaneo, è condizione necessaria per lo sviluppo dei primordi e della plantula, che durante la sua crescita forma micorrize con altri simbionti (Smith e Read, 2010). Dal punto di vista funzionale, anche le micorrize delle orchidacee, sia autotrofe che mixotrofe, hanno un ruolo importante non solo nella nutrizione ma anche nel miglioramento della “fitness” del loro ospite (Dearnaley *et al.*, 2016). Un caso ecologico particolare è quello della nutrizione esclusivamente “a carico” del fungo simbionte e della sua rete che si osserva nelle orchidee aclorofilliche, che non sarebbero in grado crescere se non fossero collegate, tramite i loro comuni simbionti, alle piante fotosintetizzanti, che possono essere altre orchidacee autotrofe o piante ectomicorriziche che si sviluppano nello stesso ambiente, in un *continuum* di interazioni in larga parte non ancora conosciute (Selosse *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2021).

1.5 Aspetti applicativi della produzione di inoculi a base di funghi micorrizici

L’uso di biostimolanti al fine di favorire la crescita, nutrizione, protezione e produzione delle piante in agricoltura è divenuto più frequente e include non solo i ben conosciuti prodotti a base di rizobi ma anche altri microrganismi, tra cui diverse specie di *Bacillus* e *Trichoderma* e di *funghi micorrizici arbuscolari* (AMF). Nonostante la presenza delle popolazioni di AMF nel suolo sia distribuita in quasi tutti gli ambienti, e sia possibile incrementarla con adeguate pratiche agricole quali la riduzione di pesticidi e fertilizzanti e l’uso di *cover crops*, nei casi in cui la fertilità biologica naturale del suolo sia scarsa l’intervento con inoculo prodotto *ex-situ* si dimostra utile nel ripristinare la colonizzazione micorrizica e la salute delle colture. La loro capacità di facilitare l’assorbimento di macro- e micronutrienti, e di migliorare la resistenza ai fitopatogeni e la tolleranza agli stress abiotici (Giovannini *et al.*, 2020) ha portato i prodotti a base di AMF ad essere utilizzati in molte diverse colture, e ha fatto aumentare il numero di aziende interessate alla loro produzione.

1.5 Aspetti applicativi della produzione di inoculi a base di funghi micorrizici

Il più diffuso sistema di produzione di inoculi contenenti AMF su larga scala è quello basato sulla coltivazione in vaso con piante ospiti, in substrati inerti sterilizzati: il substrato di crescita stesso, ricco di radici colonizzate, micelio e spore, rappresenta a fine ciclo vegetativo una fonte di inoculo che, una volta essiccato, può mantenere la vitalità dei propaguli a lungo termine. Questo sistema ha il vantaggio di essere adattabile a tutte le specie e isolati di AMF, modificando le condizioni ambientali per favorire la sporificazione (temperatura, pH del substrato, specie ospiti), dato che i singoli isolati, in particolare quelli provenienti da ambienti marginali in cui specie generaliste sono meno efficaci, possono avere preferenze anche molto diverse. Inoltre si presta allo sviluppo di consorzi multispecie, presenti in circa due terzi del mercato degli inoculi, comprendenti più isolati di AMF e altri microrganismi benefici per le piante, naturalmente associati o selezionati e inoculati durante la produzione. La maggior parte degli inoculi è basata su specie appartenenti alle Glomeraceae, in particolare *Rhizophagus irregularis*, *Funneliformis mosseae* e *Claroideoglomus etunicatum*, mentre più raramente si è cercato di sviluppare la produzione di specie appartenenti a Gigasporaceae e Acaulosporaceae (Basiru *et al.*, 2020). Si tratta sicuramente della metodica di produzione più semplice e a basso costo, anche se c'è un margine di rischio dovuto soprattutto alla contaminazione da microrganismi o organismi indesiderati e a fluttuazioni nella sporificazione. Sebbene le risposte delle colture agli inoculi micorrizici siano sempre il risultato di interazioni non prevedibili tra coltura, microrganismi, caratteristiche del suolo e condizioni ambientali (Bender *et al.*, 2019), la scarsa qualità della produzione è uno dei motivi per i quali in diversi casi sono stati ottenuti risultati inaspettati dall'applicazione di inoculi in campo o è stata verificata l'incapacità di indurre colonizzazione micorrizica (Salomon *et al.*, 2022). Per migliorare la qualità degli inoculi a base di funghi micorrizici e standardizzare la certificazione dei prodotti, in seguito all'entrata in vigore della nuova legislazione Europea sui fertilizzanti ((EU) 2019/1009), un comitato Europeo (*European Standardization Committee CEN TC 455 “Plant biostimulants”*) sta valutando le procedure per l'armonizzazione delle diverse metodiche di analisi che mirano a valutare vitalità e capacità di colonizzazione dei propaguli e assenza di organismi patogeni. Importante per il mantenimento a lungo termine dell'efficacia del prodotto è sicuramente una alta concentrazione di propaguli nel prodotto, che in questo sistema è piuttosto variabile (Feldmann e Grotkass, 2002), poiché non solo la capacità di colonizzazione a partire dai frammenti di radice colonizzata ma anche il tasso di germinazione delle spore tendono a ridursi nel tempo, anche se in alcuni casi la ridotta germinabilità è dovuta alla dormienza delle spore e può essere rimossa con trattamenti a bassa temperatura. L'uso di specie modello, adatte alla valutazione della risposta alla micorrizzazione quali ad esempio mais, sorgo, porro, cicoria, in biosaggi che prevedono la quantificazione della colonizzazione dopo crescita in condizioni controllate e standardizzate permette di controllare la vitalità, germinabilità e capacità di colonizzazione dei propaguli contenuti nell'inoculo a fine produzione e durante il periodo di conservazione.

1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria

Altri sistemi di produzione di inoculo micorrizico *in vivo* basati sulle colture idroponiche, ad esempio con *Nutrient Film Technique* (NFT), o aeroponiche, sviluppati e testati con un numero più limitato di isolati, rispetto alle colture in vaso, hanno la necessità di impianti specifici, in cui la circolazione delle soluzioni nutritive deve essere attentamente monitorata per evitare la presenza di contaminanti, e rimangono quindi più difficilmente adottabili a livello produttivo, mentre sono stati utilizzati per la produzione di inoculo da distribuire in campo a scopo di ricerca (Mohammad *et al.*, 2004)

I sistemi di coltura *in vitro*, basati sull'uso di piastre contenenti radici trasformate con *Agrobacterium rhizogenes* (*Root Organ Cultures*, ROCs, Fortin *et al.*, 2002; Declerck *et al.*, 2005) o radici di una pianta integra con la parte aerea esterna alla piastra (Voets *et al.*, 2005; Dupré de Boulois *et al.*, 2006), hanno il vantaggio di ottenere un'alta produzione di propaguli micorrizici in assenza di microrganismi indesiderati. Inoltre, nel caso delle ROCs, non necessitano di spazi ampi e neppure della luce, sebbene sia necessario ridurre periodicamente la biomassa radicale, tranne nel caso in cui venga limitata la crescita delle radici mediante una membrana in cellophane o PVDF, secondo il metodo proposto da Rosikiewicz *et al.* (2017). Hanno però lo svantaggio di essere stati messi a punto solo su una gamma ristretta di isolati, appartenenti a pochissime specie di AMF. La metodica basata sull'uso delle ROCs è già utilizzata a livello di produzione industriale, utilizzando non solo piastre Petri ma anche bioreattori e ottenendo produzioni massive fino a 65.000 spore in un arco di 7 mesi (Douds, 2002). Una volta ottenuta la produzione di inoculo, questo può essere utilizzato direttamente per micorrizzare piante radicate ottenute in coltura axenica oppure combinato con un substrato veicolante inerte, solido o liquido, anch'esso sterile, adatto alla distribuzione *in vivo*. Le colture *in vitro* di piante micorrizzate potrebbero rivestire anche un ruolo importante nella produzione di metaboliti secondari utili alla salute umana, la cui biosintesi nei tessuti vegetali è fortemente stimolata dalla simbiosi (Vangelisti *et al.*, 2018; Kaur e Suseela, 2020). Anche in questo caso la produzione necessita di impianti dedicati dotati di strumenti per la sterilizzazione, camere climatiche e cabine per la manipolazione (solubilizzazione dei gel contenuti nelle piastre, lavaggi delle spore) e il confezionamento dell'inoculo in ambiente sterile, nonché di personale altamente formato. Anche con gli AMF prodotti *in vitro* possono essere sviluppati consorzi, o comunità sintetiche (Syn-Coms) in associazione con microrganismi benefici, spesso dotati di caratteristiche che li classificano come *Plant Growth Promoting* (PGP) (Miransari, 2011).

Le simbiosi ECM coinvolgono una percentuale più limitata di specie vegetali rispetto alle arbuscolari, ma giocano un ruolo fondamentale nell'acquisizione dei nutrienti e nella protezione dagli stress biotici e abiotici di piante forestali arboree e arbustive. La presenza di piante ECM, spontanee o impiantate, in ambienti idonei è alla base della formazione di corpi fruttiferi fungini, ascocarpi prodotti dagli Ascomycota o basidiocarpi prodotti dai Basidiomycota, dotati di valore alimentare e commerciale, come nel caso di molte specie di *Tuber* e di *Boletus*. La produzione naturale dei corpi fruttiferi risente fortemente della stagionalità e

1.5 Aspetti applicativi della produzione di inoculi a base di funghi micorrizici

delle attività di gestione forestale, ma soprattutto è molto variabile in funzione dei simbionti fungini. La formazione dei tartufi ad esempio richiede diversi mesi, ed è influenzata dal clima, dalle caratteristiche del suolo e dalla pianta ospite, mentre molti funghi che formano basidiocarpi hanno cicli più brevi di sviluppo e una maggiore tolleranza anche alle variabili ambientali. La produzione e l'impianto di piantine ECM può avere un ruolo anche nel risanamento di siti contaminati da metalli quali nickel, cromo, alluminio, ad esempio nei siti minerari (Khosla e Reddy, 2008; Jourand *et al.*, 2014).

Le piante appartenenti ai generi *Pinus*, *Castanea*, *Quercus*, micorrizzate in vivaio, che hanno il vantaggio aggiuntivo di una minore necessità di fertilizzanti e pesticidi, sono state utilizzate con successo nella riforestazione di siti degradati (Oliveira *et al.*, 2010; Bauman *et al.*, 2013) e nella reintroduzione di specie vegetali in pericolo di estinzione (Aggangan *et al.*, 2012). Una pratica oramai diffusa è inoltre l'impianto di piante ospiti tartufigene, micorrizzate in vivaio con *Tuber melanosporum*, *Tuber aestivum*, *Tuber borchii*, e altre specie meno valorizzate dal punto di vista commerciale, finalizzato alla raccolta degli ascocarpi. *Tuber magnatum*, la specie di maggior pregio, ancora mostra forti difficoltà di successo, non solo nella fase di micorrizzazione delle piantine in vivaio ma anche nella fase di crescita e impianto, con una scarsa persistenza delle ECM di sintesi rispetto a quelle formate da specie native.

L'inoculo utilizzato per produrre piante ECM può essere costituito da suolo rizosferico di piante ECM, da corpi fruttiferi macerati per produrre una sospensione di spore, da micelio vegetativo riprodotto *in vitro*. Nonostante il suolo sia stato spesso utilizzato, la sua validità come inoculo è messa in discussione dalla possibile contaminazione con microrganismi patogeni o parassiti, difficile da controllare. Anche la sospensione di spore prodotta a partire da ascocarpi o basidiocarpi macerati è suscettibile alla contaminazione, ma rappresenta sicuramente un metodo semplice e adattabile a una grande varietà di binomi pianta/fungo (Iotti *et al.*, 2016), nonostante in alcuni casi abbia dato colonizzazione radicale erratica e con caratteristiche non omogenee. La coltivazione del micelio vegetativo in bioreattori, diffusa per la produzione industriale di metaboliti fungini utilizzabili come additivi, antiossidanti, peptidi dotati di attività farmacologica, è sicuramente un sistema che consente la moltiplicazione massiva omogenea ma non ha successo per tutte le specie fungine, e in alcuni casi non produce inoculo micorrizico dotato di capacità di colonizzazione. Per alcune specie si sono ottenuti risultati positivi solo se il micelio cresciuto *in vitro* viene poi utilizzato per la sintesi della simbiosi *in vivo* (Guerin-Laguette, 2021), mentre per altre la sintesi *in vitro* ha avuto successo, anche se nelle fasi post-trapianto si può assistere alla progressiva sostituzione delle ECM formate dalla specie inoculata con altre dovute a funghi micorrizici nativi (Wang *et al.*, 2012). Una alternativa in grado di far ottenere piante micorrizzate, in alcuni casi in tempi abbastanza brevi, è quella di utilizzare la tecnica della “pianta madre”, sfruttando la capacità di colonizzazione secondaria del micelio extraradicolare di una pianta già colonizzata (Hall *et al.*, 2003).

Le prospettive di sviluppo della produzione di inoculi micorrizici sono molteplici,

ma sono ancora molte le informazioni mancanti, per ottenere le quali è necessario un approccio di ricerca interdisciplinare e una apertura alle collaborazioni tra ricercatori che operano in settori diversi e tra ricercatori e partners aziendali.

1.6 L'importanza dei funghi micorrizici oltre l'agricoltura: il biorisanamento

Questo volume evidenzia chiaramente che la conoscenza e l'utilizzo dei funghi micorrizici, sia da soli che in associazione con i batteri appartenenti alla categoria dei **Rizobatteri Promotori della Crescita delle Piante** (PGPR), apportano significativi benefici alla salute delle piante nei sistemi agricoli. Sebbene ciò possa essere attribuito alla produzione di fitormoni, al rilascio di enzimi, vitamine e stimolatori di crescita, molte spiegazioni sull'efficacia del sinergismo tra funghi AM e batteri rimangono ancora incomplete. Oltre al loro ruolo nell'ambito agricolo, i funghi micorrizici assumono un'importanza crescente anche nel contesto del **biorisanamento ambientale**. Le attività industriali ed estrattive, oltre alle pratiche agronomiche, causano l'accumulo di sostanze tossiche nel suolo, inclusi metalli pesanti e inquinanti organici. Questi possono essere tossici e cancerogeni. Per mitigare la quantità e la tossicità di queste sostanze nell'ambiente, ai metodi fisico-chimici si stanno affiancando strategie di fitoranamento che utilizzano le piante e i loro microrganismi associati. Sebbene ancora in continuo studio, queste strategie promettono di essere più economiche, applicabili su vaste superfici e esteticamente accettabili.

Un prerequisito fondamentale per il fitoranamento è la ricolonizzazione dei siti contaminati da parte di specie vegetali, che può essere facilitata dai funghi micorrizici grazie al loro ruolo nell'acquisizione di nutrienti e al loro effetto positivo sulla salute delle piante. Oltre a questo ruolo generale, i funghi micorrizici svolgono attività specifiche nei confronti degli inquinanti. I metalli pesanti (zinc, rame, ferro) ad esempio non possono essere degradati, perciò le strategie di riduzione della loro tossicità devono prevedere la rimozione dal suolo o l'immobilizzazione in forme non tossiche.

I funghi micorrizici sono spesso presenti in suoli contaminati da metalli pesanti, e sono in grado di alleviare gli effetti tossici dei metalli migliorando la tolleranza della pianta con gradi di "protezione" diversi in base alle specie vegetali, fungine e ai metalli coinvolti. Funghi che formano micorrize ericoidi o ectomicorrize sono spesso dotati di attività detossificanti più elevate rispetto agli altri, e si rilevano anche in ambienti fortemente inquinati. In generale tutti i funghi micorrizici possono limitare la traslocazione dei metalli pesanti in eccesso nel suolo verso la parte aerea dell'ospite, adsorbendoli o accumulandoli nel loro micelio: questo comportamento può essere sfruttato per sviluppare strategie di fitoestrazione o di fitostabilizzazione. Questo ci induce a pensare che nell'ambito del biorisanamento utilizzare piante micorriziche aumenterebbe la loro capacità fitoestrattiva.

1.7 Il ruolo dei funghi micorrizici: comunicazione e visione olistica

Il biorisanamento di aree contaminate da inquinanti organici, (tra cui bifenili policlorurati come la diossina; idrocarburi policiclici aromatici come il benzo(a)pirene; nitroaromatici come trinitrotoluene; e idrocarburi lineari alogenati come il tricloroetilene), coinvolge principalmente la rizosfera e i suoi microrganismi, dove avvengono le principali tappe degradative degli inquinanti. Questi processi possono avvenire attraverso il metabolismo diretto o il co-metabolismo, utilizzando risorse alternative più semplici come fonte energetica. Ad esempio, i composti fenolici essudati dalle piante possono essere utilizzati per la degradazione dei bifenili policlorurati. Le attività degradative dei funghi micorrizici nei confronti degli inquinanti organici, ancora in fase di studio, sono meno documentate rispetto a quelle per i metalli pesanti. Tuttavia, alcuni funghi ectomicorrizici mostrano capacità degradative dirette. Esperimenti di *screening* hanno dimostrato che molti ceppi di questi funghi possono modificare la struttura di composti policiclici aromatici ad alto peso molecolare, i più difficili da degradare. L'utilizzo delle tecniche di fitoranamento è ancora in fase iniziale, ma la pressione per sviluppare strategie sostenibili è crescente. La riduzione dei siti disponibili per discariche di materiali tossici, i costi elevati degli interventi attuali e la necessità di risanare siti per attività agricole o altre destinazioni umane rendono urgente l'adozione di soluzioni basate sul sinergismo tra piante e microflora rizosferica, che non potrà prescindere dal ruolo cruciale dei funghi micorrizici.

1.7 Il ruolo dei funghi micorrizici: comunicazione e visione olistica

I funghi micorrizici rappresentano una risorsa essenziale nell'agricoltura moderna, non solo per migliorare la salute delle piante e la fertilità del suolo, ma anche per promuovere e sostenere pratiche agricole più sostenibili e resilienti. Questo approccio non si limita alla produzione di cibo, ma integra principi ecologici che promuovono la biodiversità, la salute del suolo e la resilienza delle piante alle variazioni ambientali. I funghi micorrizici fungono da veri e propri intermediari tra le radici delle piante e l'ambiente circostante, facilitando scambi nutrienti fondamentali che contribuiscono alla crescita e al benessere delle colture. Nell'ambito di un'agricoltura olistica, che adotta un approccio sistematico considerando l'intero ecosistema agrario, questi microrganismi giocano un ruolo cruciale nel mantenere l'equilibrio naturale del suolo e delle coltivazioni.

Un aspetto cruciale dell'interazione micorrizica è il miglioramento dell'assorbimento di fosforo e azoto da parte delle piante. Il fosforo, essenziale per processi biologici chiave come la sintesi del DNA e il trasferimento di energia nelle cellule vegetali, è spesso limitato nei suoli agricoli. I funghi micorrizici, specialmente nelle micorrize arbuscolari (AM), hanno sviluppato meccanismi adattativi per solubilizzare e trasferire fosforo alle piante, superando la zona di deplezione radicale e migliorandone significativamente l'assorbimento. Analogamente, l'azoto, fondamentale per la sintesi delle proteine e degli acidi nucleici, può essere

1. I funghi micorrizici in agroecologia: visione olistica e sostenibilità agraria

limitato nei suoli agricoli. I funghi micorrizici possono assimilare azoto organico dal suolo circostante e trasferirlo alle piante, aumentando la disponibilità di questo nutriente critico per la crescita vegetativa. Questa capacità è particolarmente significativa in ambienti dove l'azoto è scarsamente disponibile o sotto forme non immediatamente utilizzabili dalle piante.

L'approccio agroecologico, che promuove la sostenibilità e l'integrazione armoniosa delle pratiche agricole con l'ambiente circostante, riconosce l'importanza dei funghi micorrizici nel migliorare la fertilità del suolo e la salute delle piante. Questo approccio non solo considera le interazioni biologiche tra funghi e piante, ma anche il ruolo dei funghi nell'interconnessione delle comunità vegetali. Attraverso le reti micorriziche, note come *Wood Wide Web*, le radici di diverse specie vegetali vengono messe in collegamento, facilitando lo scambio di nutrienti e informazioni tra individui vegetali diversi. Questo fenomeno non solo migliora la resilienza delle comunità vegetali, ma promuove anche una maggiore biodiversità e stabilità ecologica. La simbiosi micorrizica, migliorando la tolleranza agli stress delle piante, ha anche importanti implicazioni per la mitigazione dei cambiamenti climatici e la gestione sostenibile del carbonio nel suolo. I funghi micorrizici, attraverso la loro capacità di aumentare la crescita delle piante e la fertilità del suolo, contribuiscono attivamente alla fissazione del carbonio attraverso la fotosintesi e al suo sequestro nel suolo, riducendo l'impatto del carbonio nell'atmosfera e migliorando la struttura e la salute generale del suolo agricolo. In sintesi, l'uso dei funghi micorrizici in agricoltura rappresenta una strategia chiave per migliorare la produttività delle colture, promuovere la sostenibilità ambientale e mitigare i cambiamenti climatici. L'approccio olistico dell'agricoltura con una visione agroecologica riconosce l'importanza di comprendere e valorizzare le interazioni complesse tra funghi micorrizici, piante e suolo per raggiungere un equilibrio ecologico duraturo e migliorare la qualità ambientale e alimentare delle nostre coltivazioni. E questo è l'obiettivo del presente volume.

Bibliografia

- AGGANGAN N.S., AGGANGAN J.S., CHARISSE J., BULAN O., LIMOS C.A.S. (2012) – Inoculation of Dipterocarps *Anisoptera thurifera* and *Shorea guiso* with ectomycorrhizal fungi in Philippine red soil. *Philippine Journal of Science*, 141, 229-241.
- BASIRU S., MWANZA H.P., HIJRI M. (2020) – Analysis of arbuscular mycorrhizal fungal inoculant benchmarks. *Microorganisms*, 9, 81.
- BALESTRINI R., BONFANTE P. (2014) – Cell wall remodeling in mycorrhizal symbiosis: a way towards biotrophism. *Frontiers in Plant Science*, 5, 237.
- BALESTRINI R., GHIGNONE S., SILLO F. (2013) – “The contribution of new technologies toward understanding plant-fungus symbioses”. In: *Plant Microbe Symbiosis: Fundamentals and Advances* (pp. 201-214). New Delhi: Springer India.
- BAUMAN J.M., KEIFFER C.H., HIREMATH S., MCCARTHY B.C. (2013) – Soil preparation methods promoting ectomycorrhizal colonization and American chestnut *Castanea dentata* establishment in coal mine restoration. *Journal of Applied Ecology*, 50, 721-729.

A cura di

Vincenzo Michele Sellitto e Raffaella Balestrini

Funghi micorrizici e agricoltura innovativa

Agronomia e coltivazioni erbacee



Acquista



Per informazioni



Scopri i libri
del catalogo
Ed agricole



Contattaci

Servizio clienti libri:
libri.edagricole@newbusinessmedia.it
Tel 051.6575833