

# **La metà nascosta delle piante**

*Gli invisibili nel terreno agrario*

**A cura di**

**Giuliano Mosca e Marco Nuti**



**edagricole**

1ª edizione: giugno 2026



5687

© Copyright 2026 by “Edagricole – Edizioni Agricole di Tecniche Nuove S.p.A.”,  
via Eritrea, 21 – 20157 Milano  
Redazione: p.zza G. Galilei, 6 – 40123 Bologna  
Vendite: tel. 051/6575833  
e-mail: libri.edagricole@tecniche nuove.com – <http://www.edagricole.it>

Proprietà letteraria riservata – printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (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 norme di legge.

Realizzazione grafica: Lucio Elio Berardinelli, Via Filippo Schiassi, 11 – 40138 Bologna  
Impianti e stampa: Logo srl, via Marco Polo, 8 – 35010 Borgoricco (PD)

Finito di stampare nel giugno 2026

ISBN 978-88-506-5687-5

# Presentazione

*Marco Nuti e Giuliano Mosca sono miei due cari amici e compagni di strada; da sempre Marco – ci siamo incontrati sui banchi di Università – e da molto tempo Giuliano, arguto e competente collega Accademico, incessantemente impegnato sia nell'attività scientifica come in quella comunicativa. Entrambi hanno una forte attenzione ai temi scientifici attuali e alle innovazioni tecnologiche.*

*Basterebbe così; la garanzia di buone cose sta nei loro nomi. Ma “La metà nascosta delle piante” merita qualche considerazione in più.*

*Chiunque abbia un minimo di accortezza circa la vita delle piante, sia spontanee che coltivate, si accorge che c'è una importante attività biologica invisibile che condiziona inesorabilmente le piante e – direi – la biosfera: quella della radice e quella della popolazione microbica del suolo. Per tanti anni negletta? Non so; forse data per scontata e quindi colpevolmente trascurata.*

*Con deciso piglio autorevole i professori Marco e Giuliano hanno affrontato questa lacuna del sapere offrendo una visione che – se proprio vogliamo ricordare le grandi iniziative – è quella più appropriata al forte appello di One Health, il Piano di azione congiunto per una azione globale, condotto all'interno dell'ONU con la partecipazione di FAO, di UNEP programma per l'ambiente, dell'OMS e di WOAHL'Organizzazione mondiale per la salute animale. Nonostante personalmente conservi un vago scetticismo sulle decisioni di queste mastodontiche organizzazioni transnazionali, non si può non riconoscere che esse indichino quanto di meglio debba essere fatto per un futuro adeguato alle nuove generazioni.*

*I miei due amici e colleghi hanno sentito, ancora una volta, l'impegno – civico e professionale – di portare un serio contributo a questa scelta di civiltà, introducendoci, come già detto, nel semi-dimenticato mondo nascosto della radice e dei microrganismi del suolo agrario; dimenticato perché non è evidente come la parte verde, sede della “nobile” fotosintesi, ma è ugualmente fondamentale per la sopravvivenza sul pianeta delle piante, degli animali, degli organismi tutti, e quindi anche di quei “singolari subiecti” che siamo noi.*

**Amedeo Alpi**  
Accademia dei Georgofili

# Premessa

Questo saggio è la testimonianza dei notevoli progressi del sapere agronomico, compiuto in chiave radicale, degli “invisibili” del terreno (microrganismi, micro- e macro-aggregati) e delle loro interazioni. Aumentando le conoscenze dei numerosi fenomeni biologici che incidono sul miglioramento quali-quantitativo delle produzioni primarie, la sostenibilità ambientale viene quindi realizzata. L’obiettivo principale è raggiungere un nuovo livello di innovazione applicata al conseguimento del riequilibrio dei terreni agroforestali. Il riequilibrio tra caratteristiche chimico-fisiche, rinnovo della sostanza organica e attività del microbioma del suolo rappresenta dunque il nuovo traguardo da raggiungere con finalità produttivistiche.

Gli studenti iscritti ai corsi di studio in Microbiologia ambientale e Microbiologia del suolo, Agronomia, Scienze forestali e ambientali, Biologia naturalistica possono trovare tra queste pagine il completamento delle loro conoscenze in tema di rigenerazione del sistema primario suolo.

I procarioti sono stati i primi abitanti viventi del nostro pianeta (i primi resti fossili datano 3,7 miliardi di anni fa), ben prima di piante ed animali. Durante il corso dell’evoluzione, i microbi hanno maturato mezzi di comunicazione molto raffinati. Questi tipi di comunicazione sono basati innanzitutto su “parole” chimiche: il sistema di *quorum-sensing* dei batteri, i fattori della micorrizzazione (Myc) nella simbiosi tra funghi micorrizici e radici delle piante, i fattori della nodulazione (Nod) nella simbiosi tra piante leguminose e rizobi del terreno sono solo i casi più noti\*.

Il ruolo strategico della radice ha sempre destato una notevole curiosità in quanto coinvolta in numerosi processi che incidono sia sul miglioramento quantitativo della produzione vegetale, sia sulla sua sostenibilità ambientale. L’interesse per quest’ambito di indagine è tutt’ora attuale e la ricerca incentrata sullo studio delle radici appare oggi orientata in modo sempre più puntuale alla conoscenza delle interazioni tra parte aerea, pedosfera e i così detti invisibili.

Le varie argomentazioni sugli apparati radicali che da più parti irrompono oggi nel campo dell’agronomia, dell’arboricoltura e dell’ecologia vegetale non si som-

## PREMESSA

mano a quelle proprie delle singole discipline, ma le trasformano e le chiariscono consentendo una visione più aggiornata e moderna dei vari problemi agronomici e ambientali.

Negli ultimi anni lo studio del sistema radicale e della sua architettura, specie nelle piante coltivate, ha destato un crescente interesse poiché l'acquisizione di sempre nuove conoscenze aiuta a comprendere i meccanismi di colonizzazione della rizosfera e a più ampio raggio il grado di adattamento delle piante all'ambiente. A fini produttivi, tranne nei casi di attacchi parassitari, il generale assioma che recita "per ottenere una resa elevata non è sempre indispensabile un grande apparato radicale", viene contraddetto dall'affermazione "in genere la causa di una resa scarsa è da porre in relazione ad un apparato radicale troppo ridotto e/o stressato". In altri termini un'approfondita conoscenza del "*biomass partitioning*", sia come massa che come energia, richiede una particolare attenzione nei programmi di breeding per la costituzione di varietà migliorate non solo nell'*harvest index* ma anche nel rapporto tra fitomassa aerea e radicale.

La disponibilità di acqua e nutrienti in molti ecosistemi agrari rappresenta il principale limite al raggiungimento di elevate rese di prodotto, anche se un'eccessiva applicazione di input, può talvolta generare anomalie di ordine ambientale. L'efficienza d'uso dei nutrienti, acqua compresa, rappresenta pertanto un punto focale per la gestione di un'agricoltura eco-sostenibile.

La radice è coinvolta in numerosi processi ecofisiologici tra cui l'architettura del sistema, l'assorbimento, le simbiosi, gli essudati, questi sono i temi che hanno ricevuto grande attenzione da parte della ricerca. Tuttavia, malgrado le più recenti innovazioni tecnologiche abbiano fornito dei validi strumenti di indagine restano ancora da chiarire altri aspetti quali la variabilità spaziale, l'orientamento nella rizosfera, la risposta all'applicazione di nuovi prodotti della *crop protection*, gli effetti della gravità, la presenza del così detto centro decisionale-organizzativo apicale (*brain*) sottocorticale di Charles e Francis Darwin (1880).

In regime di "*climate change*" i viventi che non si adattano tendono a soccombere. Quando, come e quanto la radice possa influenzare l'adattamento delle piante coltivate al cambiamento climatico non è facile dirsi. Della singola radice e dell'intero apparato radicale si conosce ancora poco, nonostante il ruolo e le funzioni siano particolarmente rilevanti. È noto come la mecatronica (=meccanica + elettronica) e la robotica si siano inserite prepotentemente nell'odierna agricoltura (*precision farming*) proprio nella fase di transizione verso la digitalizzazione.

Quanto più a fondo si indagherà sulla radice, nonostante le difficoltà emerse durante la sperimentazione, tanto migliori saranno i successi raggiungibili, ad esempio, nell'applicazione del "*precision farming*", nel corretto dosaggio di acqua e nutrienti, nel controllo delle malerbe e dei parassiti. Ma anche nell'ambito di temi

## PREMESSA

di indagine più specifici quali: radice e sviluppo del sistema radicale, approccio alla fenotipizzazione radicale, fisiologia dello stress, interfaccia suolo-radice e comunicazione sotterranea, interazioni “radice-microrganismi”, relazioni con acqua e nutrienti, tecnologie di analisi d’immagine per le funzioni radicali, modellazione dei processi radicali e rizosfera, sistemi di radici innestate e comunicazione intra-impianto, servizi ecosistemici/sistemi radicali perennanti vengono sempre più acquisite ulteriori innovazioni. Sono i temi più discussi dalla *International Society of Root Research* (ISRR) in occasione dell’ultimo convegno (2024).

Per tutte queste argomentazioni gli Autori hanno scelto di discutere il tema degli invisibili nel terreno agrario intimamente correlati alla radice che si ritiene essere chiarificatore di tanti aspetti pregnanti e migliorativi in termini di sostenibilità reale e resilienza, tra transizione ecologica e transizione digitale nell’ambito della agricoltura rigenerativa.

Charles Darwin and Francis Darwin (1880) – *The Power of Movement in Plants*, John Murray (London), pp. 592

Marco Nuti, *La biodiversità nel terreno agrario*.

ISRR 12 Symposium 2–7 June 2024 in Leipzig, Germany, “Roots, Resilience, and Global Challenges” <https://www.12-isrr-2024.de/assets/isrr2024---book-of-abstracts-2024-06-13.pdf>

# Gli Autori

**Mariana Amato**

Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari ed Ambientali (DAFE)  
Università degli Studi della Basilicata

**Chiara Amitrano**

Dipartimento di Agraria  
Università degli Studi di Napoli Federico II

**Stefania Astolfi**

Laboratorio di Biochimica e Fisiologia delle Piante  
Università degli Studi della Toscana

**Elena Baldi**

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

**Luigimaria Borruso**

Facoltà di Scienze agrarie, ambientali e alimentari  
Libera Università degli Studi di Bolzano

**Stefano Cesco**

Facoltà di Agricoltura, Ambiente e Alimenti  
Libera Università degli Studi di Bolzano

**Rosario Di Lorenzo**

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

**Donato Chiatante**

Facoltà di Scienze MM.FF.NN.  
Università dell'Insubria sede di Como

## GLI AUTORI

### **Luigi Gennaro Izzo**

Dipartimento di Agraria

Università degli Studi di Napoli Federico II

### **Stefano Macolino**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente

Università degli Studi di Padova

### **Tanja Mimmo**

Facoltà di Scienze agrarie, ambientali e alimentari

Libera Università degli Studi di Bolzano

### **Antonio Antonello Montagnoli**

Dipartimento di Biotecnologie e Scienze della Vita

Università degli Studi dell'Insubria

### **Francesco Morari**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente

Università degli Studi di Padova

### **Giuliano Mosca**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente

Università degli Studi di Padova

### **Marco Nuti**

Istituto di Produzioni Vegetali

Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa

### **Anna Panozzo**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente

Università degli Studi di Padova

### **Ilaria Piccoli**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente

Università degli Studi di Padova

### **Youry Pii**

Facoltà di Scienze agrarie, ambientali e alimentari

Libera Università degli Studi di Bolzano

## GLI AUTORI

### **Stefano Puccio**

Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali  
Università degli Studi di Palermo

### **Roberta Rossi**

CREA - Consiglio Per La Ricerca In Agricoltura e l'Analisi Dell'Economia Agraria, Napoli

### **Gabriella Stefania Scippa**

Dipartimento di Bioscienze e Territorio  
Università degli Studi del Molise

### **Andrea Squartini**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente  
Università degli Studi di Padova

### **Massimo Tagliavini**

Facoltà di Scienze agrarie, ambientali e alimentari  
Libera Università degli Studi di Bolzano

### **Roberto Tuberosa**

Dipartimento di Scienze e tecnologie Agro-Alimentari  
Alma Mater Studiorum-Università di Bologna

### **Teofilo Vamerli**

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente  
Università degli Studi di Padova

### **Monica Yorlady Alzate Zuluaga**

Facoltà di Scienze agrarie, ambientali e alimentari  
Libera Università degli Studi di Bolzano

# Indice

**Presentazione (A. Alpi)..... III**

**Premessa ..... V**

**Gli Autori .....IX**

**1 La biodiversità microbica nel terreno agrario  
e l’agricoltura rigenerativa ..... 1**

1.1 Una “società” di esseri invisibili ..... 1

1.2 Lingue o dialetti per comunicare?..... 3

1.3 Il ruolo dei microrganismi nella moderna agricoltura, per la salute  
di piante ed animali e tutela dell’ambiente ..... 5

Bibliografia..... 7

**2 Là dove non c’era l’erba. Gli invisibili prima della vista ..... 11**

2.1 Fare il mondo ..... 11

2.2 I *micro*-organismi sono veramente piccoli?..... 12

2.3 La visibilità è nell’occhio di chi guarda ..... 14

2.4 Viva la evolución? ..... 14

2.5 Generazione spontanea come erronea credenza  
(con un solo piccolo problema) ..... 16

2.6 *In vitro* versus *in vita*..... 18

2.7 Lo spettro dell’invisibile..... 21

Bibliografia..... 23

**3 Gli organi ipogei e l’ambiente..... 25**

3.1 Una relazione a doppio senso ..... 25

3.2 I servizi eco-sistemici degli organi ipogei delle piante ..... 27

3.2.1 Radici, carbonio e cambiamenti climatici ..... 27

3.2.2 Riduzione dell’inquinamento ..... 29

3.2.3 Bio-lavorazione..... 30

3.2.4 Stabilizzazione dei versanti..... 30

3.2.5 Produzione di materiali innovativi ..... 35

INDICE

3.3 Le relazioni fra piante nel mondo ipogeo: competizione o facilitazione?..... 35

Bibliografia..... 44

**4 I rapporti con la rizosfera: rapporti di associazione e simbiosi microbiche ..... 47**

4.1 La radice e la fissazione simbiotica dell’azoto ..... 47

4.1.1 Azotofissazione simbiotica: un processo fondamentale per la vita sulla terra, per l’ecologia e per l’agricoltura ..... 47

4.1.2 Principali organismi coinvolti ..... 50

4.1.3 Il processo di formazione dei noduli radicali ..... 52

4.1.4 Conclusioni e prospettive..... 53

4.2 Rizobatteri e micorrize ..... 55

4.2.1 I biostimolanti microbici nella moderna agricoltura ..... 55

4.2.2 Le associazioni micorriziche..... 56

4.2.3 I consorzi microbici ..... 57

4.2.4 Considerazioni conclusive ..... 59

Bibliografia..... 60

**5 L’agricoltura rigenerativa: un modello per il futuro della Terra..... 63**

5.1 L’agricoltura rigenerativa: un approccio sostenibile e innovativo..... 63

5.2 Pratiche e principi dell’agricoltura rigenerativa ..... 64

5.3 Benefici ambientali, sociali ed economici ..... 65

5.4 Sfide e prospettive future ..... 67

Bibliografia..... 67

**6 Le Radici della Resilienza: chiave per un’agricoltura rigenerativa di fronte ai cambiamenti climatici e alla sostenibilità del suolo ..... 69**

6.1 Introduzione: La vita sottoterra – L’importanza delle radici nell’agricoltura rigenerativa ..... 69

6.2 Le radici e gli effetti dei cambiamenti climatici sulla produttività agricola ..... 70

6.3 Il ruolo delle radici nell’assorbimento e nell’efficacia dei fertilizzanti azotati ..... 72

6.4 La formazione e il flusso di carbonio nel sistema suolo-radice-pianta.... 75

6.5 L’interazione tra radici e salute del suolo: impatti sull’ecosistema agricolo ..... 79

6.6 Potenziale delle radici per un’agricoltura più sostenibile ..... 82

Bibliografia..... 84

|                                                                                                                                                                      |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>7 La metà nascosta delle piante erbacee .....</b>                                                                                                                 | <b>87</b>      |
| 7.1 Struttura della radice .....                                                                                                                                     | 87             |
| 7.1.1 La radice delle Monocotiledoni .....                                                                                                                           | 88             |
| 7.1.2 La radice delle Dicotiledoni .....                                                                                                                             | 89             |
| 7.2 Anatomia della radice.....                                                                                                                                       | 90             |
| 7.2.1 Monocotiledoni .....                                                                                                                                           | 90             |
| 7.2.2 Dicotiledoni.....                                                                                                                                              | 92             |
| 7.3 Accrescimento e sviluppo radicali .....                                                                                                                          | 93             |
| 7.4 Architettura del sistema radicale .....                                                                                                                          | 95             |
| 7.5 Un mondo liscio o rugoso?.....                                                                                                                                   | 98             |
| 7.5.1 La dimensione frattale della radice.....                                                                                                                       | 99             |
| 7.6 Quando la radice invecchia: il turnover.....                                                                                                                     | 100            |
| 7.7 Parametri di accrescimento radicale e metodi di indagine .....                                                                                                   | 102            |
| 7.8 Radici: stress ambientali e tecnica agronomica.....                                                                                                              | 103            |
| 7.8.1 Risposta radicale agli stress ambientali.....                                                                                                                  | 104            |
| 7.9 Altre applicazioni agronomiche.....                                                                                                                              | 110            |
| 7.9.1 Impiego di fitormoni .....                                                                                                                                     | 110            |
| 7.9.2 Uso di ammendanti .....                                                                                                                                        | 110            |
| Bibliografia.....                                                                                                                                                    | 113            |
| <br><b>8 Le radici delle piante foraggere e per inerbimenti tecnici .....</b>                                                                                        | <br><b>115</b> |
| 8.1 Introduzione.....                                                                                                                                                | 115            |
| 8.2 Fabaceae da prato .....                                                                                                                                          | 119            |
| 8.2.1 Erba medica ( <i>Medicago sativa</i> L.) .....                                                                                                                 | 119            |
| 8.2.2 Trifoglio violetto ( <i>Trifolium pratense</i> L.) .....                                                                                                       | 120            |
| 8.2.3 Trifoglio bianco ( <i>Trifolium repens</i> L.) .....                                                                                                           | 120            |
| 8.2.4 Sulla ( <i>Hedysarum coronarium</i> L.) e Lupinella<br>( <i>Onobrychis viciifolia</i> Scop.). .....                                                            | 121            |
| 8.3 Fabaceae da erbaio.....                                                                                                                                          | 122            |
| 8.4 Poaceae da prato .....                                                                                                                                           | 122            |
| 8.5 Inerbimenti tecnici, il ruolo delle radici per la prevenzione<br>dell'erosione e degli smottamenti del terreno: conoscenze<br>consolidate e nuove pratiche ..... | 123            |
| 8.5.1 Generalità .....                                                                                                                                               | 123            |
| 8.5.2 Contributo dell'inerbimento alla riduzione dei processi erosivi<br>e al consolidamento del suolo .....                                                         | 124            |
| 8.5.3 Nuove tipologie di coperture vegetali per il consolidamento<br>dei terreni instabili.....                                                                      | 126            |
| Bibliografia.....                                                                                                                                                    | 127            |

|                                                                                                                                              |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>9 Gli apparati radicali delle specie arboree da frutto .....</b>                                                                          | <b>131</b>     |
| 9.1 Introduzione.....                                                                                                                        | 131            |
| 9.2 Morfologia dell'apparato radicale degli alberi da frutto .....                                                                           | 133            |
| 9.3 Effetto delle pratiche agronomiche .....                                                                                                 | 137            |
| 9.3.1 Effetto dell'acqua: eccessi e stress .....                                                                                             | 138            |
| 9.3.2 Effetto della gestione superficiale del terreno .....                                                                                  | 139            |
| 9.3.3 Effetto della disponibilità dei nutrienti.....                                                                                         | 140            |
| 9.4. Gli apparati radicali di alcune specie arboree da frutto.....                                                                           | 140            |
| 9.4.1 Actinidia .....                                                                                                                        | 140            |
| 9.4.2 Drupacee.....                                                                                                                          | 142            |
| 9.4.3 Melo .....                                                                                                                             | 143            |
| Bibliografia .....                                                                                                                           | 147            |
| <br><b>10 Apparato radicale della vite: morfologia, fisiologia e gestione ...</b>                                                            | <br><b>149</b> |
| 10.1 L'evoluzione dell'apparato radicale nella vite coltivata:<br>dal piede franco al portinnesto .....                                      | 149            |
| 10.2 Sviluppo e funzione dell'apparato radicale della vite:<br>aspetti fenologici e ambientali .....                                         | 153            |
| 10.3 Il ruolo delle tecniche colturali .....                                                                                                 | 156            |
| 10.4 L'effetto del portinnesto .....                                                                                                         | 157            |
| 10.5 Ruolo agronomico dei microrganismi.....                                                                                                 | 160            |
| Bibliografia .....                                                                                                                           | 161            |
| <br><b>11 La radice di piante forestali: lo sviluppo naturale, le risposte<br/>    al tipo di gestione ed ai cambiamenti climatici .....</b> | <br><b>165</b> |
| 11.1 Dalle alghe agli alberi .....                                                                                                           | 165            |
| 11.2 Gli alberi: la crescita continua, la formazione degli organi aerei<br>e sotterranei, e l'organizzazione metamerica.....                 | 166            |
| 11.3 L'apparato radicale in struttura primaria.....                                                                                          | 169            |
| 11.4 La struttura secondaria responsabile della forma e dimensione<br>dell'apparato radicale di un albero .....                              | 176            |
| 11.5 La plasticità dell'apparato radicale degli alberi .....                                                                                 | 179            |
| 11.6 L'importanza del monitoraggio della crescita e sviluppo<br>della radice negli interventi di restauro forestale.....                     | 181            |
| 11.7 Effetti del tipo di gestione forestale e dei cambiamenti climatici<br>sullo sviluppo delle radici.....                                  | 183            |
| 11.7.1 Il passaggio del bosco da ceduo ad alto-fusto .....                                                                                   | 183            |
| 11.7.2 Biodiversità forestale e radici .....                                                                                                 | 184            |
| 11.7.3 Fattori ambientali (siccità, incendi, alluvioni, tempeste<br>di vento, pendenze elevate) e le radici.....                             | 186            |

## INDICE

|                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.8 Il contributo delle radici fini nel calcolo della quantità di carbonio sequestrabile dall'albero .....           | 190        |
| Bibliografia.....                                                                                                     | 191        |
| <b>12 Genomica delle radici e della rizosfera nei cereali per una agricoltura rigenerativa e più resiliente .....</b> | <b>195</b> |
| 12.1 Alla radice del problema .....                                                                                   | 197        |
| 12.1.1 Importanza dell'azoto per la produttività delle piante .....                                                   | 197        |
| 12.1.2 Micro Rivoluzione verde.....                                                                                   | 199        |
| 12.1.3 Il microbioma del suolo .....                                                                                  | 200        |
| 12.2 Ciclo dell'azoto ed inibizione biologica della nitrificazione (BNI) .....                                        | 201        |
| 12.2.1 Geni per lo sviluppo della radice e produzione di essudati radicali .....                                      | 201        |
| 12.2.2 Inibizione biologica della nitrificazione (BNI) .....                                                          | 202        |
| 12.2.3 Nitrificazione del suolo.....                                                                                  | 204        |
| 12.3 Studi sulla BNI e sugli essudati radicali.....                                                                   | 205        |
| 12.3.1 Olobionte e QTL per essudati radicali.....                                                                     | 208        |
| 12.4 Conclusioni .....                                                                                                | 209        |
| Bibliografia.....                                                                                                     | 210        |
| <b>13 Le piante coltivate e la microgravità .....</b>                                                                 | <b>215</b> |
| 13.1 Introduzione.....                                                                                                | 215        |
| 13.2 Informazioni dallo spazio .....                                                                                  | 218        |
| 13.2.1 Influenza della gravità sul comportamento vegetale (da Scienze 26 Gennaio 2015).....                           | 218        |
| 13.2.2 I sistemi terrestri per gli ecosistemi in microgravità .....                                                   | 218        |
| 13.3 La scelta delle specie più adatte .....                                                                          | 219        |
| 13.4 L'atmosfera in un "modulo serra" posto in orbita .....                                                           | 221        |
| Bibliografia.....                                                                                                     | 222        |
| <b>Appendice al Capitolo 3</b>                                                                                        |            |
| <b>I metodi di studio della radice nelle consociazioni .....</b>                                                      | <b>223</b> |
| Bibliografia.....                                                                                                     | 226        |
| <b>Appendice al Capitolo 7</b>                                                                                        |            |
| <b>Tecnologie e metodi di studio dell'apparato radicale .....</b>                                                     | <b>229</b> |
| <b>Postfazione.....</b>                                                                                               | <b>251</b> |

## 6

# Le Radici della Resilienza: chiave per un'agricoltura rigenerativa di fronte ai cambiamenti climatici e alla sostenibilità del suolo

Stefano Cesco, Stefania Astolfi, Mónica Yorlady Alzate Zuluaga, Luigimaria Borruso, Tanja Mimmo, Youry Pii

### 6.1 Introduzione: La vita sottoterra – L'importanza delle radici nell'agricoltura rigenerativa

Le radici rappresentano il fulcro nascosto della vita vegetale, essenziali non solo per l'ancoraggio e il nutrimento delle piante, ma anche per il mantenimento della salute degli ecosistemi agricoli. In un mondo in rapido cambiamento, dove le sfide del riscaldamento globale, della scarsità idrica e della degradazione del suolo si intensificano, l'agricoltura rigenerativa pone le radici al centro di una nuova visione produttiva, resiliente e sostenibile. Questo approccio riconosce che le radici non sono semplici organi di assorbimento, ma entità dinamiche e complesse, capaci di interagire profondamente con il suolo e i suoi microrganismi, come batteri e funghi micorrizici, creando reti simbiotiche/associative vitali che favoriscono l'assorbimento di nutrienti, la resistenza agli *stress* ambientali e il sequestro del carbonio. In collaborazione con questi microrganismi, le radici agiscono come una sorta di *intelligenza sotterranea*, rispondendo ai segnali ambientali e bilanciando nutrizione, crescita e protezione.

È interessante sottolineare che l'agricoltura rigenerativa mira a potenziare queste interazioni naturali, promuovendo pratiche come la rotazione delle colture, l'uso di colture di copertura e l'uso limitato di input chimici, creando un ambiente favorevole alla biodiversità microbica e alla vitalità radicale. Queste tecniche non solo possono migliorare la resa agricola, ma anche incrementare la resilienza delle colture di fronte ai cambiamenti climatici. Le radici, infatti, esplorando il suolo, creano nuovi spazi e immagazzinano risorse, incarnando la capacità di adattamento e rigenerazione delle piante. Lo studio quindi delle loro interazioni con il

microbioma del suolo e una loro più approfondita comprensione possono aprire nuove strade a un'agricoltura più sostenibile, dove produttività e tutela ambientale si intrecciano in modo indissolubile. In questa visione, la salute delle radici è la base di un ecosistema agricolo rigenerativo, capace di affrontare le sfide globali con soluzioni radicate nella natura. In un tale contesto, il presente contributo si propone di esplorare come le radici, interagendo con il suolo e i microrganismi, siano cruciali per la nutrizione minerale delle specie vegetali coltivate, la gestione dell'acqua, il sequestro del carbonio e la resistenza agli *stress* ambientali. Ogni paragrafo che segue analizza un aspetto specifico di queste interazioni, dall'adattamento alle condizioni climatiche (Par. 6.2), all'assorbimento dei nutrienti con particolare riguardo all'azoto (Par. 6.3), al ciclo del carbonio (Par. 6.4), fino al miglioramento della resilienza grazie a pratiche agricole sostenibili (Par. 6.5). Con questo approccio, è possibile far emergere una visione integrata in cui il benessere delle radici è la chiave per un'agricoltura sostenibile e produttiva a lungo termine.

## 6.2 Le radici e gli effetti dei cambiamenti climatici sulla produttività agricola

Il cambiamento climatico pone sfide senza precedenti all'agricoltura globale, influenzando profondamente la produttività agricola e la stabilità degli ecosistemi. Le radici delle piante sono un elemento centrale per la resilienza delle colture agrarie, dato il loro ruolo nell'acquisizione di acqua e nutrienti e nelle interazioni con il suolo nelle sue diverse componenti (solida, liquida e gassosa). La scarsità idrica, temperature estreme e *stress* ambientali crescenti mettono a dura prova la funzionalità radicale, rendendo indispensabile comprendere i meccanismi fisiologici, biochimici e molecolari alla base della loro capacità di adattamento.

La scarsità idrica è uno degli effetti più evidenti del cambiamento climatico, con periodi di siccità più frequenti e intensi. Le radici rispondono a queste condizioni attraverso meccanismi di adattamento fisiologico e morfologico. Un esempio lampante è l'approfondimento dell'apparato radicale per accedere a riserve idriche più profonde nel suolo. Questo comportamento adattativo è guidato dalla produzione di ormoni come l'acido abscissico (ABA), che ha un ruolo cruciale nel regolare la crescita radicale in risposta a segnali di *stress* idrico. Inoltre, a livello molecolare, l'espressione differenziale di geni coinvolti nella sintesi di proteine legate all'espansione cellulare e alla permeabilità delle membrane gioca un ruolo fondamentale nell'assorbimento dell'acqua. In condizioni di *stress* idrico cronico, però, si osserva una riduzione dell'efficienza fotosintetica, con effetti negativi sul flusso di carbonio verso le radici. Questo limita la produzione di essudati radicali, molecole organiche rilasciate alla rizosfera (la zona del suolo che è influenzata dall'attività radicale), che favoriscono l'interazione con microrganismi benefici e con la frazione solida del

## 6.2 LE RADICI E GLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA PRODUTTIVITÀ AGRICOLA

suolo, sia organica che minerale. La diminuzione del rilascio degli essudati può influire negativamente sul reclutamento microbico alla rizosfera e sulla formazione di simbiosi micorriziche, cruciali per migliorare l'acquisizione di nutrienti e acqua. Inoltre, può limitare i processi di alterazione della componente minerale e organica del suolo, necessari per solubilizzare le frazioni meno disponibili dei nutrienti. Non va poi trascurato che la riduzione dell'essudazione radicale può compromettere la formazione e la stabilità degli aggregati del suolo, danneggiando la struttura del terreno agrario, con un calo della capacità di trattenere acqua e nutrienti e un aumento del rischio di erosione, innescando così un pericoloso circolo vizioso.

Le temperature elevate sono in grado di influenzare direttamente i processi biochimici e fisiologici delle radici. Una delle conseguenze principali è la riduzione dell'attività enzimatica nelle cellule radicali, compromettendo l'acquisizione di nutrienti essenziali come l'azoto, il fosforo e lo zolfo. Inoltre, il calore eccessivo può alterare la composizione lipidica delle membrane cellulari, riducendo la loro integrità e aumentando la perdita di acqua per traspirazione. Infine, l'accumulo di specie reattive dell'ossigeno (ROS) in condizioni di *stress* termico è un ulteriore fattore che compromette la funzionalità radicale. Per mitigare questi effetti, le piante attivano sistemi antiossidanti, che includono enzimi chiave, come la superossido dismutasi (SOD) e la catalasi, che contrastano lo *stress* ossidativo. Questi fenomeni risultano particolarmente evidenti in specie coltivate in sistemi idroponici, dove le soluzioni nutritive sono intrinsecamente più suscettibili a variazioni estreme di temperatura. Questa vulnerabilità è legata alle proprietà fisiche dell'acqua, che ha una maggiore capacità termica specifica e una conducibilità termica superiore rispetto al suolo, consentendo un rapido assorbimento e diffusione del calore. Di conseguenza, gli impatti negativi dello *stress* termico sulle radici, sia in termini di resilienza sia di produttività, sono significativamente amplificati. Al contrario, in pieno campo, il suolo funge da regolatore termico grazie alla sua capacità di immagazzinare e rilasciare calore gradualmente, riducendo le escursioni termiche estreme, soprattutto negli strati al di sotto dell'orizzonte superficiale. Questo offre alle radici un ambiente relativamente più stabile rispetto a quello vissuto dalla chioma della pianta. Di conseguenza, i risultati di studi sugli effetti delle temperature su piante intere coltivate in vaso, completamente esposte alle escursioni termiche artificialmente imposte, pur nella loro rilevanza devono però essere interpretati con estrema cautela, soprattutto quando si intende estenderli alle situazioni del sistema suolo-pianta reale in campo.

L'aumento della salinità, spesso correlato all'uso di acque irrigue saline e alla desertificazione, rappresenta una sfida crescente. Lo *stress* salino altera l'equilibrio osmotico e ionico nelle radici, riducendo la capacità delle piante di assorbire acqua. A livello biochimico, la competizione tra ioni sodio ( $\text{Na}^+$ ) e potassio ( $\text{K}^+$ ) nei trasportatori di membrana riduce l'acquisizione di  $\text{K}^+$ , essenziale per numerosi processi cellulari. L'accumulo di  $\text{Na}^+$  nelle radici può inoltre indurre citotossicità,

compromettendo la divisione e la distensione cellulare e, di conseguenza, l'allungamento della radice.

Una delle caratteristiche più significative delle radici è la loro plasticità fenotipica, ovvero la capacità di adattare la propria struttura e funzione alle condizioni ambientali. Questa adattabilità è evidente in diverse specie e contesti, evidenziando l'importanza delle caratteristiche delle radici nella sopravvivenza e nelle prestazioni delle piante. In risposta a *stress* idrici, ad esempio, molte piante sviluppano radici più profonde, mentre in presenza di abbondanza di nutrienti intensificano la ramificazione laterale. Questo adattamento è mediato da complessi network di segnalazione ormonale, in cui auxine, citochinine e gibberelline svolgono ruoli chiave. L'interazione tra questi ormoni e fattori ambientali regola l'espressione di geni coinvolti nella morfogenesi radicale.

In questo contesto è utile evidenziare come l'agricoltura rigenerativa possa offrire strumenti efficaci per potenziare la resilienza delle radici di fronte agli effetti del cambiamento climatico. Ad esempio, l'uso di colture di copertura riduce l'erosione del suolo, modera le temperature e conserva l'umidità, creando un ambiente più favorevole per lo sviluppo radicale. Compost e bio-fertilizzanti (prodotti/fertilizzanti contenenti microrganismi vivi che promuovono la crescita delle piante aumentando la disponibilità o l'apporto di nutrienti naturali) migliorano la biodiversità microbica del suolo, potenziando le interazioni simbiotiche/associative tra radici e microrganismi benefici. La riduzione del disturbo meccanico poi preserva la struttura del suolo e favorisce una migliore distribuzione delle radici. Le radici giocano inoltre un ruolo cruciale nel ciclo del carbonio, sequestrando carbonio organico nel suolo attraverso due meccanismi principali: l'accumulo di biomassa radicale e la sintesi di composti organici stabili. Questa capacità di immagazzinare carbonio le rende un elemento chiave per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici. Una comprensione più approfondita dei loro meccanismi di adattamento fisiologico, biochimico e molecolare è essenziale per sviluppare strategie agronomiche e genetiche innovative. L'integrazione di pratiche rigenerative si dimostra quindi essere una strada promettente per migliorare la resilienza delle colture agrarie e garantire una produzione agricola sostenibile a lungo termine.

### 6.3 Il ruolo delle radici nell'assorbimento e nell'efficacia dei fertilizzanti azotati

Le radici svolgono un ruolo centrale nell'assorbimento di nutrienti, con particolare riferimento all'azoto, elemento essenziale per lo sviluppo vegetale. Il processo di acquisizione dell'azoto minerale nelle radici avviene attraverso due forme: nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e ammonio ( $\text{NH}_4^+$ ), che vengono trasferiti attraverso le membrane cellulari

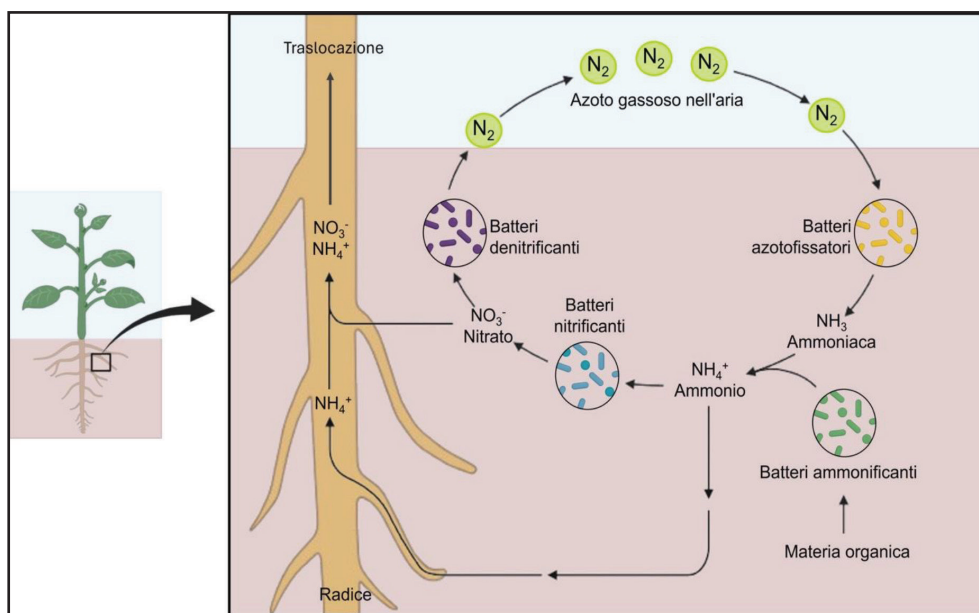
## 6.3 IL RUOLO DELLE RADICI NELL'ASSORBIMENTO E NELL'EFFICACIA DEI FERTILIZZANTI AZOTATI

delle cellule epidermiche radicali mediante trasportatori specifici. Questo processo è altamente regolato da segnali biochimici e ormonali che rispondono alle esigenze nutritive della pianta e alle condizioni di disponibilità del nutriente nel suolo.

Tuttavia, il ricorso massiccio in agricoltura ai fertilizzanti azotati di sintesi ha sollevato e solleva preoccupazioni crescenti riguardo agli impatti sull'ambiente, sulla qualità del suolo e, a lungo termine, sulla funzionalità delle stesse radici. Infatti, elevate disponibilità al suolo di nitrati possono facilmente portare a fenomeni di lisciviazione con impatti significativi a carico delle falde acquifere. Diversi studi hanno evidenziato che circa il 30% dei fertilizzanti azotati applicati nei terreni agricoli è disperso nell'ambiente, causando danni significativi alla biodiversità acquatica e contribuendo alla formazione di zone morte nei mari. Inoltre, una disponibilità elevata di azoto altera l'ecosistema del suolo in termini di biodiversità riducendo la necessità delle radici stesse di interagire con/reclutare microrganismi benefici, in particolare con i batteri azotofissatori (come *Rhizobium* e *Azospirillum*) e i funghi micorrizici. Questi ultimi formano una simbiosi critica con le radici, favorendo l'assorbimento di nutrienti in cambio di carboidrati. L'alterazione di queste simbiosi diminuisce la capacità naturale del suolo di restituire azoto alle piante, riducendo l'efficacia dell'uso del fertilizzante e aumentando la dipendenza da input di sintesi.

Le radici, tuttavia, possiedono una capacità intrinseca di adattamento e ottimizzazione nell'acquisizione dei nutrienti, che può essere potenziata tramite pratiche rigenerative e tecnologie innovative. L'agricoltura rigenerativa promuove un uso più consapevole ed equilibrato dei fertilizzanti, in particolare attraverso l'introduzione di colture di copertura leguminose, come il trifoglio, che fissano l'azoto atmosferico nel suolo grazie all'attività dei batteri simbiotici nelle loro radici. Studi hanno dimostrato che l'uso di leguminose come colture di copertura o in successione può ridurre fino al 40% il fabbisogno di fertilizzanti azotati di sintesi, aumentando al contempo la fertilità del suolo. L'impiego di compost arricchito con microrganismi benefici migliora ulteriormente l'attività microbica e il ciclo dell'azoto, riducendo la dipendenza da input esterni. In parallelo, le pratiche di agricoltura di precisione si stanno dimostrando strumenti fondamentali per ottimizzare l'efficienza dei fertilizzanti. Tecnologie come i sensori di umidità del suolo, le mappe di variabilità dei nutrienti e le applicazioni di fertilizzanti tramite droni o sistemi GPS avanzati permettono di ridurre gli sprechi di azoto, applicando fertilizzanti solo dove e quando necessario. Queste tecniche consentono alle radici di assorbire i nutrienti in modo più efficace, migliorando sia la resa agricola che la sostenibilità complessiva. Nel caso del mais, ad esempio, l'utilizzo di tecnologie di *precision farming* ha permesso di ridurre l'applicazione di fertilizzanti azotati fino al 20%, con un incremento della resa del 15%.

**Fig. 6.1 – Ciclo dell'azoto nel suolo e il suo assorbimento da parte delle radici delle piante.** L'azoto atmosferico ( $N_2$ ) viene fissato dai batteri azotofissatori, che lo convertono in ammoniaca ( $NH_3$ ) o ione ammonio ( $NH_4^+$ ). Lo ione ammonio ( $NH_4^+$ ) viene ulteriormente prodotto dai batteri ammonificanti, attraverso la decomposizione della materia organica. L' $NH_4^+$  può essere direttamente assorbito dalle radici delle piante o ossidato a nitrato ( $NO_3^-$ ) dai batteri nitrificanti. Il nitrato può essere assorbito dalle radici o ridotto nuovamente a gas  $N_2$  attraverso la denitrificazione, mediata dai batteri denitrificanti, che rilasciano azoto molecolare nell'atmosfera. L'azoto assorbito (come  $NH_4^+$  e/o  $NO_3^-$ ) viene traslocato attraverso il sistema vascolare della pianta e utilizzato nella sintesi di biomolecole essenziali. (Figura modificata da *Samara Ona* e generata con Biorender – <https://biorender.com>).



Un ulteriore sviluppo promettente è il miglioramento genetico delle colture per creare varietà più efficienti nell'uso dei nutrienti (NUE, *Nutrient Use Efficiency*). Radici con una maggiore capacità di assorbimento dell'azoto o una più profonda penetrazione nel suolo, come nel caso di alcune varietà di riso e grano, possono garantire una produttività ottimale anche in condizioni di minore disponibilità di fertilizzanti migliorando la resistenza alle condizioni di *stress* idrico e nutrizionale. La NUE di una pianta può essere migliorata significativamente attraverso l'ingegneria genetica, come dimostrato nel grano con aumenti fino al 120-130%. Ciò consente di ridurre la quantità di fertilizzante azotato necessario per raggiungere rese elevate, contribuendo alla riduzione dell'impronta ecologica dell'agricoltura. Non va trascurato, tuttavia, che l'efficienza nell'uso dei nu-

## 9

# Gli apparati radicali delle specie arboree da frutto

**Elena Baldi e Massimo Tagliavini**

### 9.1 Introduzione

Le caratteristiche dell'apparato radicale di un albero da frutto determinano la sua attitudine a colonizzare il terreno, e ne influenzano il potenziale di crescita e quello produttivo, nonché la sua longevità. In tutte le piante le radici svolgono compiti essenziali quali l'assorbimento ed il trasporto alla parte aerea di acqua e nutrienti e la produzione di sostanze ormonali. A livello di ecosistema, le radici contribuiscono a mantenere e migliorare la struttura del suolo e, grazie alla rizodeposizione, che include un flusso attivo di carbonio (C) dalle radici al suolo ed il suo trasferimento attraverso la morte di molte radici fini durante il loro turnover, esse rivestono un ruolo fondamentale nei cicli del C e dei nutrienti, favorendo la presenza e l'attività dei microrganismi nella rizosfera inclusi quelli simbiotici. Negli alberi, piante che si sviluppano in altezza e raggiungono chiome di considerevoli dimensioni, le radici sono inoltre particolarmente importanti per assicurare il loro ancoraggio al suolo, al punto che quando un albero è innestato su un portinnesto debole, esso necessita di un sistema di pali e fili per sostenere il peso della parte aerea. In quanto piante perenni, gli alberi posseggono radici capaci di accumulare riserve per supportare la crescita nell'anno successivo. Le radici degli alberi si differenziano da quelle di molte colture annuali anche per l'eterogeneità della loro presenza nel suolo, che non si riscontra nelle colture erbacee da pieno campo a semina fitta: il volume di suolo complessivo esplorato dall'apparato radicale di un albero presenta infatti porzioni a densità più elevata ed altre a bassa densità, con scarso grado di prevedibilità (Fig. 9.1). In generale, le radici degli alberi da frutto esplorano un volume maggiore di suolo ma presentano densità medie inferiori (Tab. 9.1) a molte colture erbacee.

L'apparato radicale di un albero, inoltre, non è sempre lo stesso nel corso della vita del frutteto: soprattutto nei primi anni dopo l'impianto, esso è in continuo



**Fig. 9.1 – Struttura dell'apparato radicale di alberi di pesco in uno studio condotto dall'Università di Bologna sugli effetti dell'irrigazione sulla distribuzione delle radici (responsabile scientifico B. Marangoni, foto D. Scudellari).**

**Tab. 9.1 – Esempi di densità delle radici fini di alcune specie arboree da frutto.**

| Specie    | Varietà/portinnesto    | Età alberi (anni) | Unità di misura     | Densità radicale                             | FONTE                           |
|-----------|------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| Melo      | Fuji/MM106             | 5                 | cm cm <sup>-3</sup> | 0,48 - 0,74                                  | De Silva <i>et al.</i> , 1999   |
|           | Fuji/M26               |                   | cm cm <sup>-3</sup> | 0,73                                         |                                 |
|           | Fuji/Mark              |                   | cm cm <sup>-3</sup> | 0,62 - 0,82                                  |                                 |
|           | Pinova/M9              | 16                | mg cm <sup>-3</sup> | 3-13 (radici < 2 mm)<br>1-11 (radici > 2 mm) | Penna <i>et al.</i> , 2021      |
| Pesco     | Red Haven/Golden Queen | 4                 | cm cm <sup>-3</sup> | 0,930                                        | Hughes <i>et al.</i> , 1995     |
|           | Nemaguard              | -                 | cm cm <sup>-3</sup> | 0,10 - 0,19                                  | Basile <i>et al.</i> , 2007     |
|           | Vega/Mrs2/5            | 4                 | cm cm <sup>-3</sup> | 0,02                                         | Xiloyannis <i>et al.</i> , 1993 |
| Actinidia | Hayward/Hayward        | 7                 | cm cm <sup>-3</sup> | 0,97 – 7,58 *                                | Hughes <i>et al.</i> , 1991     |
|           | Hayward/Hayward        | 15                | cm cm <sup>-3</sup> | 0,80 - 1,00                                  | Gandar e Hughes, 1988           |
|           | Hayward/Hayward        | 4                 | cm cm <sup>-3</sup> | 0,61-0,90 **                                 | Xiloyannis <i>et al.</i> , 1993 |
|           |                        |                   |                     | 0,56-0,77 ***                                |                                 |

\* valore minimo e massimo riscontrati nell'orizzonte compreso fra 10 e 70 cm di profondità e fino a 65 cm di distanza dal fusto;  
\*\* densità di impianto di 1481 alberi ha<sup>-1</sup>;  
\*\*\* densità di impianto di 740 alberi ha<sup>-1</sup>.

## 9.2 MORFOLOGIA DELL'APPARATO RADICALE DEGLI ALBERI DA FRUTTO

accrescimento ed esplora nuovi volumi di suolo fino a raggiungere un volume finale nella fase adulta. Ogni anno, le radici degli alberi nascono da porzioni di radici preesistenti, formatesi negli anni precedenti. La profondità a cui si sviluppano le radici degli alberi, il loro svilupparsi in modo eterogeneo nel suolo e la frequente presenza di radici di essenze erbacee presenti nello stesso volume rendono difficile lo studio degli apparati radicali dell'albero.

In questo capitolo, dopo una trattazione generale incentrata su aspetti di morfologia e fisiologia dell'apparato radicale degli alberi da frutto, ci si concentrerà sulle caratteristiche delle radici di alcune specie arboree da frutto di tipo deciduo.

## 9.2 Morfologia dell'apparato radicale degli alberi da frutto

Lo sviluppo delle radici di un albero dipende dal genotipo e dalle caratteristiche chimiche e fisiche del terreno, modificabili grazie alle pratiche agronomiche. In generale, nei frutteti le radici esplorano un orizzonte compreso tra i 10 e 180 cm con una maggiore densità radicale fra i 25 e i 70 cm di profondità. L'espansione orizzontale delle radici è generalmente superiore alla proiezione della chioma.

Gli alberi da frutto sono in genere innestati e presentano pertanto un portinnesto, sul quale viene innestata la varietà. In alcune specie, si procede all'autoradicazione della varietà stessa. Il portinnesto è spesso propagato in modo agamico, ma talvolta deriva da seme e, in questo caso, la radichetta originata dall'embrione produce una radice che si sviluppa lungo un singolo asse e penetra verticalmente nel terreno. Questa radice, chiamata fittone, rappresenta la radice primaria. Da questo asse principale si sviluppano radici secondarie, di tipo avventizio, che possiamo definire radici laterali. Quando il portinnesto proveniente da seme ("portinnesto franco" se appartiene alla stessa specie poi innestata) viene trapiantato dal vivaio e messo a dimora nel campo oggetto dell'impianto arboreo, il fittone, viene danneggiato e cessa di crescere. Chiaramente, nei portinnesti propagati in modo vegetativo (talea, margotta di ceppaia, propaggine di trincea, micropropagazione) il fittone non è presente e tutte le radici sono radici avventizie.

La frequenza con cui si sviluppano le radici avventizie (di primo ordine) a partire da quelle preesistenti – di secondo ordine secondo la classificazione riportata in figura 9.2 – il loro angolo geotropico (angolo tra l'asse della radice e quello verticale), e la loro lunghezza determinano il livello di ramificazione dell'apparato radicale e in ultima istanza, la loro morfologia.

Come detto sopra, le radici degli alberi da frutto sono in pratica tutte avventizie: esse si formano a partire da cellule presenti nel periciclo di radici preesistenti, ad una certa distanza dell'apice, in zone caratterizzate da una struttura secondaria. Le radici avventizie inizialmente presentano una struttura primaria e in seguito

possono assumere una struttura secondaria ed ispessire; tuttavia, solo una piccola percentuale di radici neoformate diventerà poi parte permanente dell'apparato e continuerà ad aumentare in spessore. La formazione di radici avventizie avviene rapidamente, nel giro di poche ore o giorni, in risposta a stimoli esterni, come può accadere se l'apice radicale è danneggiato.

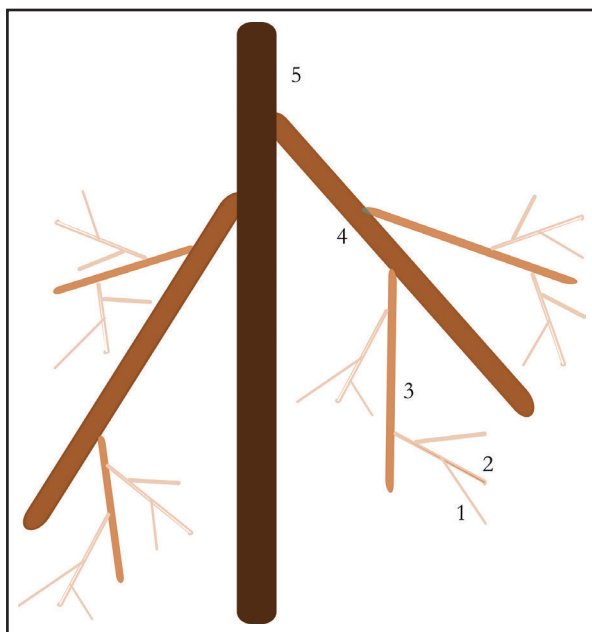
La classificazione più utilizzata per la definizione dei tipi di radice è basata sulle caratteristiche morfologiche e sulla loro funzione. Vengono principalmente definiti quattro tipi di radice.

- 1. Radici di allungamento:** hanno lunghezza maggiore di 20-25 cm e sono un prolungamento delle radici preesistenti. In genere hanno età inferiore all'anno e sono caratterizzate da struttura secondaria. Sono di colore marrone chiaro e spesso sottili. Sono scarsamente ramificate e presentano una spessa zona meristemica all'apice. Hanno principalmente una funzione di esplorazione del terreno, prendono anche il nome di radici pioniere (*pioneer roots*) e rappresentano solo una piccola parte dell'intero apparato radicale.
- 2. Radici assorbenti:** caratterizzate da struttura primaria, sono bianche traslucide, turgide e molto fragili. Sono spesso ricoperte da peli radicali che aumentano la superficie a contatto con il suolo ottimizzandone la capacità assorbente. Hanno in genere vita breve, sono corte (1-4 mm) e rappresentano, negli alberi adulti, una porzione dell'apparato radicale variabile indicativamente fra il 5 ed il 10%. Vengono anche chiamate radici attive o fibrose. Queste radici raramente acquisiscono la capacità di crescita in spessore; in genere, dopo un tempo variabile imbruniscono, muoiono ed entrano a far parte della sostanza organica del terreno. Queste radici, inoltre, sono circondate da una microflora che loro stesse supportano, prima attraverso la rizodeposizione e, poi, grazie alla loro decomposizione. Esse sono inoltre spesso colonizzate da funghi micorrizici e possono essere bersaglio di patogeni radicali ed erbivori.
- 3. Radici di transizione:** sono le radici assorbenti che non muoiono; hanno funzione principalmente di trasporto e assumono colorazione scura a seguito dell'accumulo graduale di suberina.
- 4. Radici di conduzione e di accumulo:** si tratta di radici spesse, da 5 mm ad alcuni centimetri di diametro. Esse hanno soprattutto la funzione di trasporto e ancoraggio al suolo e sono di colore scuro in quanto completamente suberificate. Queste radici sono caratterizzate da una struttura anatomica che presenta forti analogie con il fusto, con una notevole porzione di tessuto vascolare. La presenza di tessuto di riserva e di conduzione varia nel tempo, diminuendo il primo e aumentando il secondo con l'età della radice. La suberificazione determina una diminuzione dell'attività fisiologica e della capacità assorbente della radice e la formazione di nuovi tessuti con funzioni prevalentemente di conduzione e riserva.

## 9.2 MORFOLOGIA DELL'APPARATO RADICALE DEGLI ALBERI DA FRUTTO

Un altro tipo di classificazione prevede la suddivisione dell'apparato radicale in radici fini (diametro  $<2$  mm), radici sottili (diametro 2-5 mm) e radici spesse (diametro  $>5$  mm). Il complesso delle radici fini di un albero realizza un'ampia superficie di contatto con il terreno, e permette loro di assorbire la maggior parte dell'acqua necessaria all'albero, mentre le radici spesse rappresentano la maggior parte della biomassa dell'apparato radicale. La suberificazione delle radici fini ed il loro passaggio ad una struttura secondaria le rende meno abili ad assorbire e traslocare i nutrienti alla chioma. Questo fenomeno è particolarmente evidente nel caso del calcio, che, essendo dotato di scarsa mobilità nel simplasto, non riesce ad attraversare l'endoderma delle radici meno giovani e a penetrare nel cilindro centrale. È comunque evidente che il termine "radici fini" è assai generico e molti alberi posseggono radici fini con un diametro che può variare anche di oltre 20 volte (es. da 0,05 a 2 mm).

Le radici fini possono anche essere classificate in base ad un approccio basato sul concetto di ordine delle radici: le radici più distali e non ramificate sono classificate di 1° ordine, e sono inserite su radici di 2° ordine e così via (Fig. 9.2). Le radici di ordine inferiore non sono ispessite, sono efficienti nell'assorbire acqua e nutrienti e sono spesso colonizzate da micorrize, mentre quelle di ordine superiore al 3° (fino al 5°) sono spesso di transizione, combinando le funzioni assorbenti (presenza di micorrize) e di trasporto (sviluppo vascolare secondario). Le radici con ordine superiore al 5°, in genere, svolgono le funzioni di trasporto. In tutte le specie studiate (melo, pesco, mandorlo e mandarancio) da Lavelly e co-autori (2020), il diametro medio delle radici di 4° e 5° ordine era inferiore a 2 mm.

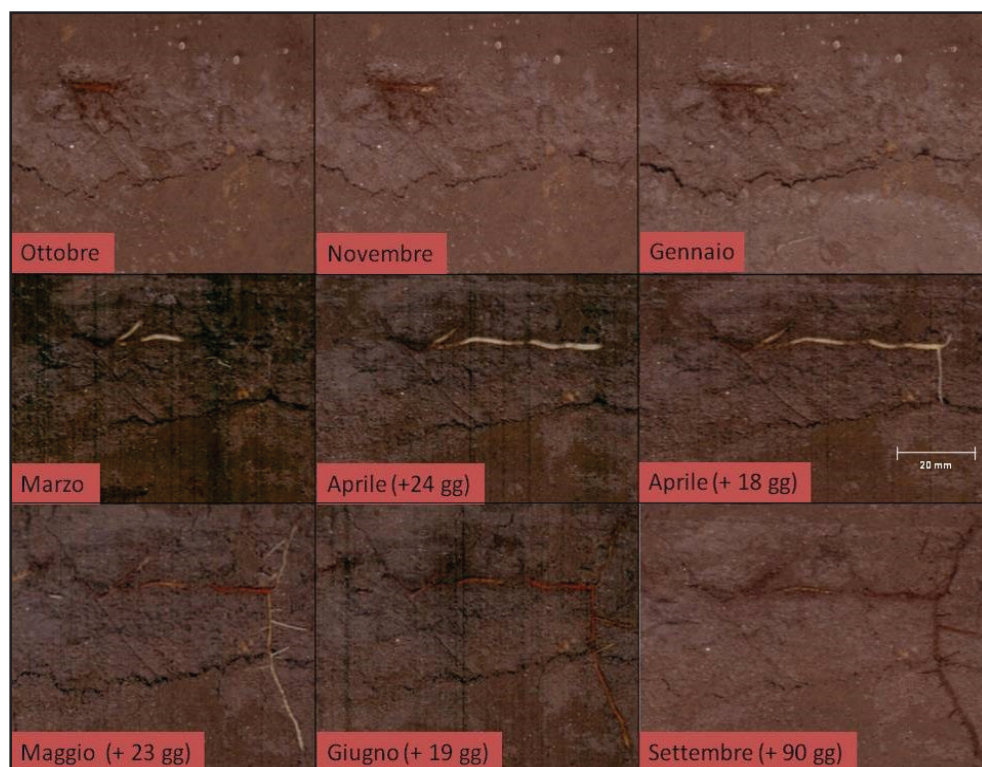


**Fig. 9.2 – Rappresentazione schematica della ramificazione di una radice che comprende 5 ordini.**

Nell'apparato radicale di un albero convivono radici di diversa età, spessore, suberificazione e ordine. Appena formate, le radici sono di colore bianco, non suberificate e ricche di peli radicali. Inizialmente esse crescono molto velocemente e nel giro di 1-4 settimane cominciano a suberificare acquisendo una colorazione marrone (Fig. 9.3). Alcune di queste radici muoiono nell'arco di alcune settimane o mesi dalla loro formazione, altre vanno incontro ad un accrescimento secondario, inspessiscono e diventano parte della porzione di radici strutturali, perenni.

La mortalità di molte radici di neoformazione sembra collegata ad una diminuzione della loro funzionalità di assorbimento; esse, pertanto, diverrebbero un costo eccessivo per l'economia dell'albero in quanto continuano a respirare, ma non sono più efficienti nell'assorbire i nutrienti. La mortalità e la neoformazione delle radici ne determinano un rapido turnover, essenziale per l'albero per continuare ad esplorare nuovi volumi di suolo. Nelle specie decidue la mortalità delle radici viene riscontrata soprattutto durante il riposo

**Fig. 9.3 – Comparsa, suberificazione e morte di radici di melo provenienti da minirizotroni (dati non pubblicati del laboratorio "Tree Ecophysiology and Ecosystems" - Libera Università di Bolzano).**



## 9.3 EFFETTO DELLE PRATICHE AGRONOMICHE

vegetativo: solo alcune radici fini presenti in autunno riprendono infatti la loro vitalità nella primavera successiva.

La longevità media delle radici, in media variabile fra 30 e 100 giorni nella vite, nel melo e nel pesco, dipende anche dal diametro delle radici stesse, come è emerso da un confronto tra melo, con radici in generale più sottili e meno longeve, e arancio, con radici in generale più spesse e più longeve (Eissenstat *et al.*, 2000). Nel melo, le radici con diametro superiore a 0,5 mm tendono a sopravvivere meglio durante l'inverno, diversamente da quelle con diametro minore di 0,3 mm, che mostrano una vita media inferiore ai due mesi (Wells e Eissenstat, 2001).

La dinamica della formazione delle radici nel corso della stagione dipende da fattori ambientali e da fattori interni all'albero, tra cui il genotipo. La disponibilità di carboidrati per la radice, che varia in funzione dalla quantità totale di prodotti della fotosintesi e dalla loro ripartizione nell'albero, influenza la longevità delle radici: in genere, un aumento della quantità di frutti sull'albero è correlato negativamente con la produzione di radici.

Il rapporto tra la biomassa secca della parte aerea dello scheletro e quella radicale cambia con l'età della pianta e con la fertilità del terreno: in generale, i valori maggiori si riscontrano nelle piante adulte e nei terreni più fertili.

**SCHEDA 9.1**

A titolo esemplificativo, in un impianto di melo di 10 anni della cv. "Fuji" innestata su "M9", è stata misurata, in inverno, una biomassa aerea di 18 t ha<sup>-1</sup> a fronte di una biomassa delle radici spesse di 4,2 t ha<sup>-1</sup> e di radici fini di 2,9 t ha<sup>-1</sup> (Zanotelli *et al.*, 2013). Rapporti inferiori ad uno (sempre durante il riposo invernale e considerando il solo peso secco) sono invece stati riscontrati in pesco (cv. "Star-RedGold" innestata su "GF677"), la cui biomassa dello scheletro (rami, branche e tronco) era variabile fra 11,6 e 13,6 t ha<sup>-1</sup> a fronte di un apparato radicale con pesi tra 21,2 e 28,6 t ha<sup>-1</sup> (Baldi *et al.*, 2018). In piante di actinidia della cultivar "Hayward" la biomassa secca della parte aerea pesava 5,96 t ha<sup>-1</sup>, a fronte di una biomassa radicale di 5,84 t ha<sup>-1</sup>, mentre nella varietà più vigorosa "Hort16" la parte aerea e quella radicale erano 10,9 t ha<sup>-1</sup> e 8,56 t ha<sup>-1</sup>, rispettivamente (Boyd *et al.*, 2008).

## 9.3 Effetto delle pratiche agronomiche

L'apparato radicale è dotato di plasticità che gli consente di adattarsi, almeno in parte, alle caratteristiche del terreno e di far fronte alle sue modifiche derivate da cause naturali o dalle tecniche colturali. I cambiamenti nelle caratteristiche fisico-chimiche del terreno possono infatti modificare lo sviluppo delle radici

nello spazio, la loro ramificazione e densità. La conoscenza della risposta dell'apparato radicale alle modifiche del suolo può quindi aiutare nella scelta delle pratiche agronomiche da adottare per ottimizzare il risultato produttivo.

### 9.3.1 Effetto dell'acqua: eccessi e stress

La distribuzione dell'apparato radicale nel terreno dipende in primo luogo dalla dotazione di acqua ed elementi nutritivi. Quando lo stato idrico del suolo è carente, le piogge e le irrigazioni, anche quelle localizzate, stimolano la formazione di nuovi apici radicali, che ne consentono un migliore assorbimento. In generale, la carenza idrica, come dimostrato in diverse specie di alberi da frutto, induce una ridotta ramificazione dell'apparato radicale, e può causare una riduzione della densità fino al 70%. Come logica conseguenza di questo fenomeno, soprattutto negli aerali di produzione dove la piovosità è scarsa e quando si utilizza l'irrigazione localizzata, le radici tendono a concentrarsi nei volumi di suolo bagnati, a differenza di quanto accade nelle zone più piovose o quando si utilizzano sistemi irrigui ad aspersione. Questo fenomeno è visibile nella figura 9.4, che mostra come il tipo di irrigazione (a goccia o micro-aspersione) influenzi lo sviluppo in senso orizzontale delle radici di alberi di mirabolano e la loro densità, man mano che ci si allontana dal tronco sia lungo il filare che nell'interfila.

La carenza idrica negli strati superficiali del terreno stimola l'albero ad investire risorse nella formazione di radici di allungamento per accedere all'acqua immagazzinata in profondità, mentre se l'acqua è disponibile in quantità adeguata, la produzione di radici è principalmente concentrata nelle zone umide più superficiali che normalmente posseggono anche una maggiore fertilità chimica. Se la tolleranza alla siccità è favorita dalla presenza di apparati radicali che esplorano un ampio volume di terreno, questo vantaggio può essere vanificato se l'utilizzo di un portinnesto vigoroso si traduce in un aumento della chioma e dell'area fogliare e quindi delle richieste traspirative dell'albero.

Gli eccessi idrici, causati da piogge o irrigazioni, soprattutto nei suoli a tessitura fine, deprimono la crescita radicale e sono a volte causa della morte per anossia delle radici già presenti. In alcune specie particolarmente sensibili, come il pesco, l'eccesso idrico causa lo sviluppo di patogeni radicali e del colletto dell'albero tra cui la *Phytophthora* spp. La tolleranza all'anossia radicale è determinata dalle caratteristiche del portinnesto e la risposta comune alla base della tolleranza di alcuni genotipi è la presenza di tessuti (aerenchima) che facilitano, da un lato, la diffusione dell'ossigeno dall'atmosfera alle radici e verso la rizosfera e, dall'altro, la diffusione verso l'esterno di composti potenzialmente tossici come etanolo, acetaldeide e CO<sub>2</sub>, così come l'aumento della presenza di lenticelle.

## 9.3 EFFETTO DELLE PRATICHE AGRONOMICHE

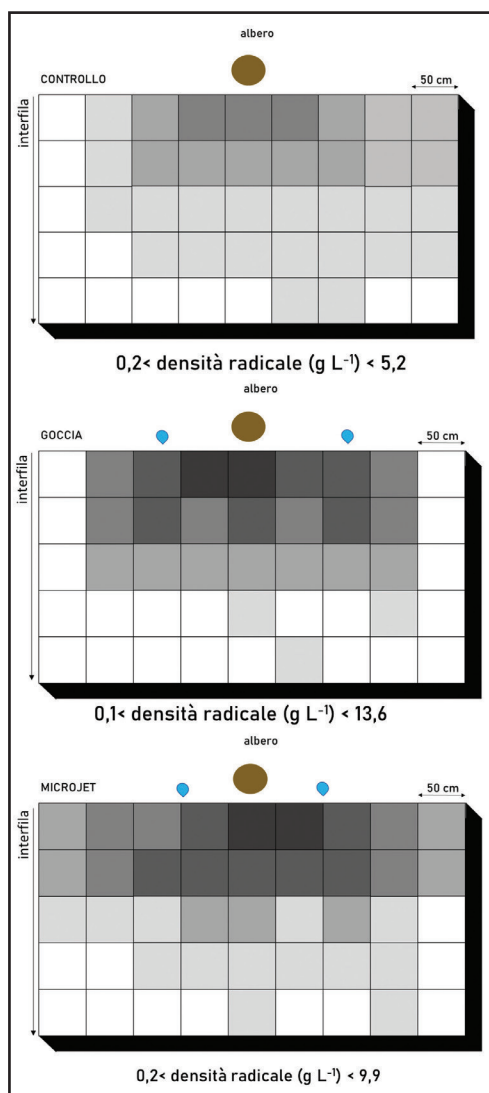


Fig. 9.4 – Effetto dell'irrigazione sulla distribuzione orizzontale delle radici di Mirabolano lungo il filare e nell'interfilare. Ogni maglia rappresentata in figura si riferisce ad un quadrato di 50 cm di lato, la cui densità radicale ( $\text{g L}^{-1}$ ) è proporzionale all'intensità del colore grigio. Il cerchio marrone rappresenta la pianta mentre la goccia azzurra indica la posizione dei gocciolatori o dei microjet (Marangoni *et al.*, 1995).

## 9.3.2 Effetto della gestione superficiale del terreno

Lo sviluppo dell'apparato radicale dell'albero dipende anche dal modo in cui viene gestita la superficie del suolo. In frutticoltura si può in genere distinguere una zona compresa tra le file utilizzata per il passaggio delle macchine agricole, spesso inerbita, almeno temporaneamente, o a volte lavorata, e una striscia di terreno centrata lungo la direzione del filare, che viene diserbata, oppure lavorata, inerbita o pacciamata. È soprattutto la gestione di quest'ultima a causare modifiche nello sviluppo radicale. Ad esempio, quando si opera la lavorazione del terreno si causa una più o meno temporanea riduzione dello sviluppo delle radici negli orizzonti superficiali interessati dall'intervento meccanico. L'adozione del diserbo

chimico non penalizza invece la crescita delle radici negli strati più superficiali, probabilmente a causa dell'assenza di competizione con le infestanti. La presenza di inerbimento nella striscia di terreno lungo il filare può ridurre lo sviluppo delle radici delle specie da frutto nei primi anni dall'impianto, a causa della competizione per acqua e nutrienti con le infestanti, ma una volta raggiunta la fase adulta, l'albero potrebbe avvantaggiarsi della presenza di un apparato radicale delle specie erbacee maggiormente esteso in profondità. La pacciamatura, pratica non molto diffusa in frutticoltura, induce un maggiore sviluppo delle radici in superficie rispetto all'inerbimento, probabilmente grazie alle condizioni favorevoli del suolo, ma l'albero potrebbe non sviluppare radici profonde ed essere meno adatto a sopportare periodi di siccità.

### 9.3.3 Effetto della disponibilità dei nutrienti

La disponibilità di elementi nutritivi e la loro forma può influenzare la morfologia dell'apparato radicale. In uno studio su pero, usando il metodo definito "split-root" (radici dello stesso albero obbligate a crescere in diversi compartimenti) è stato evidenziato come l'applicazione di biofertilizzante abbia indotto un aumento della ramificazione delle radici fini (diametro < 2 mm) di 2,1-3,5 volte rispetto alle piante non concimate o fertilizzate con concimi di sintesi (Kang *et al.*, 2022). Risultati simili sono stati ottenuti anche in pesco (cv. "Stark Red Gold" innestata su "GF677") dopo l'applicazione di un ammendante compostato misto (Baldi *et al.*, 2010). L'aumento della disponibilità di azoto (N) nitrico ha un effetto positivo sulla sopravvivenza delle radici di pesco (Baldi *et al.*, 2010) e promuove la crescita di radici fini (Tahir *et al.*, 2021), ma ne aumenta anche il tasso di mortalità (Artacho e Bonomelli, 2015). L'effetto positivo della disponibilità di N in forma nitrica sulla crescita delle radici fini non è stato confermato in tutti gli studi, e sembra dovuto all'aumento del contenuto endogeno di acido indolo-3-acetico e alla riduzione di altre classi di ormoni naturali, tra cui l'acido abscissico (Tahir *et al.*, 2021).

## 9.4 Gli apparati radicali di alcune specie arboree da frutto

### 9.4.1 Actinidia

Le piante di actinidia (*Actinidia chinensis* var. *chinensis* e *A. chinensis* var. *deliciosa*) vengono di solito innestate su semenzali o portinnesti clonali come Bruno (*A. chinensis* var. *deliciosa*), Hayward (*A. chinensis* var. *deliciosa*) e recentemente "Bounty" (semenzale di *A. macrosperma*).

Questa specie predilige terreni con pH compreso tra 5,5 e 7, con ridotto conte-

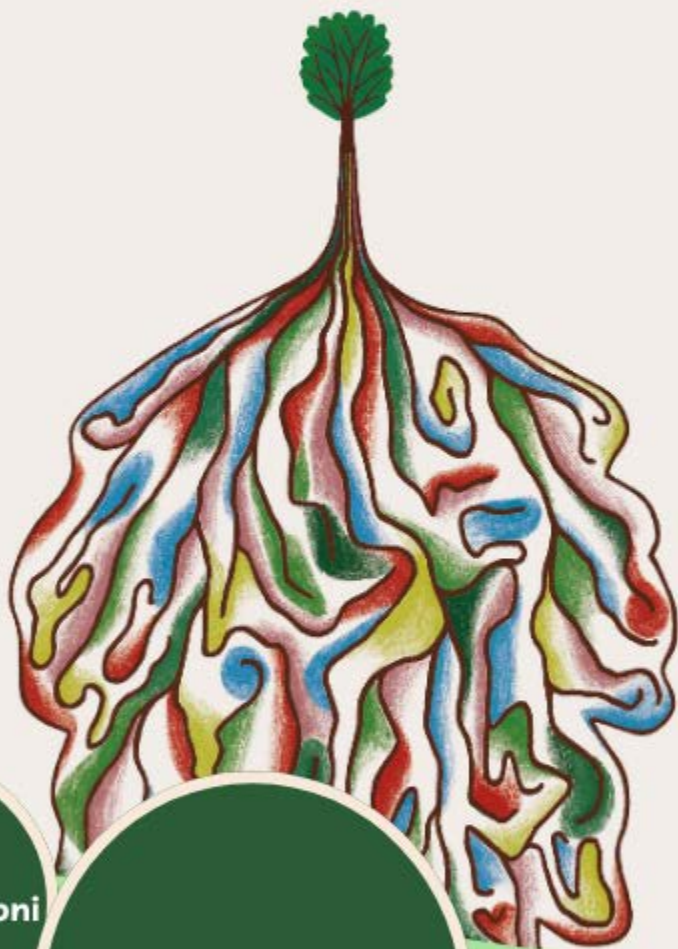


edagricole

# LA METÀ NASCOSTA DELLE PIANTE

Gli invisibili nel terreno agrario

*A cura di Giuliano Mosca e Marco Nuti*



Per informazioni

Scopri i libri  
del catalogo  
Edagricole

**Acquista**

**Contattaci**

Servizio clienti libri:  
[libri.edagricole@tecnichenuove.com](mailto:libri.edagricole@tecnichenuove.com)  
Tel. 051.6575833