

A MICROBIOTA DO SOLO E SUA IMPORTÂNCIA NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Acceptance date: 01/07/2024

Marcos Roberto Ribeiro-Junior

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu

Daniele Maria do Nascimento

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu

Francisco José Domingues Neto

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu

Pedro Henrique Ribeiro

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu

Adriana Zanin Kronka

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu

RESUMO: Este capítulo discute o papel vital da microbiota do solo na promoção da saúde das plantas e na sustentabilidade agrícola. Os microrganismos do solo, incluindo bactérias, fungos e actinobactérias, são essenciais para processos como a

ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, fixação de nitrogênio e controle biológico de patógenos. A ciclagem de nutrientes é destacada como um processo crítico para a fertilidade do solo e a produtividade das culturas, com microrganismos específicos que desempenham papéis na decomposição de matéria orgânica e na solubilização de minerais essenciais, como fósforo e enxofre. O capítulo também enfatiza a importância da fixação biológica de nitrogênio (FBN) em plantas leguminosas, mediada por bactérias do gênero *Rhizobium*, que formam associações simbióticas benéficas com as raízes das plantas, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados. Além disso, aborda o controle biológico de patógenos, onde microrganismos benéficos suprimem a atividade de patógenos através de competição, produção de antibióticos e indução de resistência sistêmica nas plantas. As práticas agrícolas que promovem a diversidade e atividade da microbiota do solo são fundamentais para a saúde do solo, produtividade sustentável das culturas e mitigação de impactos ambientais adversos, apontando para a necessidade de integrar técnicas de manejo sustentável que favoreçam esses microrganismos.

PALAVRAS-CHAVE: biodiversidade microbiana; ciclagem de nutrientes; controle biológico de patógenos; fixação biológica de nitrogênio; práticas de manejo sustentável.

INTRODUÇÃO

Muitas vezes, em lavouras lado a lado, o produtor percebe uma diferença significativa no desenvolvimento das culturas. Mesmo quando a análise físico-química do solo revela características semelhantes, a explicação para essa variação frequentemente reside na microbiota do solo. A diversidade e a atividade dos microrganismos do solo podem influenciar diretamente a saúde das plantas e a eficiência na ciclagem de nutrientes, resultando em diferentes níveis de produtividade entre áreas adjacentes.

A microbiota do solo, composta por uma vasta diversidade de microrganismos como bactérias, fungos, actinobactérias e arqueias, desempenha um papel crucial na manutenção da saúde do solo e na produtividade agrícola (CHAUAN et al., 2023; SUMAN et al., 2022; VINCE et al., 2024). Esses microrganismos são responsáveis por uma série de processos essenciais que sustentam a fertilidade do solo e a saúde das plantas, incluindo a ciclagem de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica, a fixação de nitrogênio e o controle biológico de patógenos. Entender essas interações e funções é fundamental para a promoção de práticas agrícolas sustentáveis e para a maximização da produtividade das culturas.

CICLAGEM DE NUTRIENTES

A ciclagem de nutrientes é essencial para a manutenção da fertilidade do solo e a produtividade das culturas. A microbiota do solo desempenha um papel central nesse processo, facilitando a decomposição da matéria orgânica e a mineralização de nutrientes essenciais (LIU et al., 2023; SUN et al., 2024).

A decomposição da matéria orgânica, mediada por microrganismos decompositores como bactérias, fungos e actinobactérias, transforma resíduos vegetais e animais em compostos mais simples, liberando nutrientes vitais para o crescimento das plantas (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024; LIU et al., 2023).

Bactérias heterotróficas dos gêneros *Pseudomonas* e *Bacillus* são particularmente eficazes na decomposição de compostos orgânicos complexos, produzindo enzimas extracelulares que degradam lignina, celulose e hemicelulose em açúcares simples, que são posteriormente mineralizados (GRGAS et al., 2023; XU et al., 2022). Além disso, fungos saprófitas, como *Trichoderma* e *Penicillium*, desempenham um papel crucial na decomposição de materiais lignocelulósicos, contribuindo significativamente para a formação de húmus no solo (SAROJ; P; NARASIMHULU, 2018).

Da mesma forma, o fósforo é essencial para a formação de DNA, RNA e ATP. No solo, o fósforo pode estar presente em formas orgânicas ou minerais, muitas das quais não estão diretamente disponíveis para as plantas. Bactérias solubilizadoras de fósforo, como *Pseudomonas* e *Bacillus*, liberam ácidos orgânicos que dissolvem compostos de fósforo insolúveis, convertendo-os em formas solúveis que as plantas podem absorver (RAWAT et al., 2021). Além disso, fungos micorrízicos arbusculares formam associações simbióticas com as raízes das plantas, auxiliando na mineralização e absorção de fósforo orgânico (WANG et al., 2021).

O enxofre é necessário para a síntese de aminoácidos, como cisteína e metionina, e vitaminas, como a tiamina. A ciclagem de enxofre no solo envolve a conversão de formas orgânicas e inorgânicas de enxofre. Bactérias quimioautotróficas, como *Thiobacillus*, oxidam sulfeto (S^{2-}) a sulfato (SO_4^{2-}), que é a forma absorvível pelas plantas. Em condições anaeróbicas, bactérias redutoras de sulfato, como *Desulfovibrio*, reduzem sulfato a sulfeto, que pode ser novamente incorporado na matéria orgânica (OVERMANN; VAN GEMERDEN, 2000).

A ciclagem de nutrientes mediada pela microbiota do solo é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A manutenção de uma microbiota do solo saudável promove a eficiência do uso de nutrientes, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e mitigando os impactos ambientais associados ao seu uso excessivo (WANG; CHI; SONG, 2024). Práticas como a rotação de culturas, a adubação verde e a aplicação de compostos orgânicos podem melhorar a diversidade e a atividade da microbiota do solo, promovendo uma ciclagem de nutrientes mais eficiente (TAHAT et al., 2020; WANG; CHI; SONG, 2024).

Além disso, a microbiota do solo desempenha um papel importante na biorremediação de poluentes, decompondo compostos tóxicos e contribuindo para a saúde ambiental (SAR et al., 2023). Este processo é essencial para manter a qualidade do solo e da água, garantindo um ambiente saudável para o crescimento das plantas e a sustentabilidade agrícola a longo prazo.

FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo essencial para a agricultura sustentável, pois permite que as plantas adquiram nitrogênio, um nutriente vital, diretamente da atmosfera. Este processo é mediado por bactérias fixadoras de nitrogênio, como as do gênero *Rhizobium*, que formam associações simbióticas com plantas leguminosas (ABD-ALLA; AL-AMRI; EL-ENANY, 2023).

Dentro desse contexto, as bactérias *Rhizobium* colonizam as raízes das plantas leguminosas e formam estruturas especializadas chamadas nódulos radiculares. Dentro desses nódulos, as bactérias convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3) através da ação da enzima nitrogenase. A amônia é então incorporada em aminoácidos

e outros compostos nitrogenados, que são utilizados pela planta para crescimento e desenvolvimento. Em troca, a planta fornece às bactérias carboidratos e outros nutrientes, formando uma relação mutuamente benéfica (SHEN; FENG, 2024; SINHAROY; TIAN; MONTIEL, 2024).

A importância da FBN vai além da nutrição direta das plantas. Este processo é fundamental para a fertilidade do solo e a produtividade agrícola. Plantas leguminosas que formam associações simbióticas com *Rhizobium* podem crescer em solos com baixos níveis de nitrogênio disponível, reduzindo assim a necessidade de fertilizantes nitrogenados. Esta redução não só diminui os custos de produção para os agricultores, mas também reduz os impactos ambientais negativos associados ao uso excessivo de fertilizantes químicos, como a lixiviação de nitratos e a eutrofização de corpos d'água (ABD-ALLA; AL-AMRI; EL-ENANY, 2023; KEBEDE, 2021).

A integração de leguminosas fixadoras de nitrogênio em sistemas agrícolas é, portanto, uma estratégia eficaz para promover a sustentabilidade, melhorando a saúde do solo e mitigando os efeitos ambientais adversos.

CONTROLE BIOLÓGICO DE PATÓGENOS

O controle biológico de patógenos é uma estratégia sustentável e eficaz que utiliza microrganismos benéficos do solo para suprimir a atividade de patógenos de plantas. Esses microrganismos empregam diversos mecanismos para proteger as plantas, incluindo a competição por nutrientes e espaço, a produção de antibióticos e a indução de resistência sistêmica nas plantas.

Microrganismos benéficos, como *Pseudomonas* e *Bacillus*, competem diretamente com patógenos por nutrientes e espaço na rizosfera. Esta competição pode limitar a disponibilidade de recursos necessários para a sobrevivência e proliferação dos patógenos. Por exemplo, *Pseudomonas fluorescens* compete eficazmente com patógenos ao colonizar rapidamente as raízes das plantas e consumir nutrientes essenciais, como ferro, através da produção de sideróforos (AL-KARABLIEH et al., 2022; GAMALERO et al., 2004).

Além da competição, muitos microrganismos benéficos produzem compostos antimicrobianos que inibem ou matam patógenos de plantas. *Streptomyces* spp., por exemplo, são actinobactérias conhecidas por produzir uma vasta gama de antibióticos que podem suprimir a atividade de fungos fitopatogênicos e bactérias (SHEN et al., 2024). De maneira semelhante, *Bacillus subtilis* produz lipopeptídeos, como surfactina e iturina, que têm efeitos antifúngicos potentes (DUNLAP; BOWMAN; ROONEY, 2019; WANG et al., 2020).

Outro mecanismo importante é a indução de resistência sistêmica nas plantas, um fenômeno conhecido como resistência sistêmica induzida (RSI). Este mecanismo envolve a ativação das defesas naturais da planta, tornando-a mais resistente a ataques

de patógenos subsequentes (XU et al., 2022). Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP), como *Pseudomonas* e *Bacillus*, são frequentemente associadas à RSI. Elas podem induzir a produção de fitoalexinas e outras proteínas relacionadas à defesa nas plantas (WANG et al., 2021).

O uso de microrganismos benéficos para o controle biológico de patógenos oferece uma alternativa ecológica aos defensivos químicos, que podem ter efeitos adversos no meio ambiente e na saúde humana. Além disso, promove a biodiversidade microbiana do solo, melhorando a saúde do solo e a resiliência das culturas.

A integração de práticas de controle biológico no manejo agrícola pode reduzir a dependência de produtos químicos, promover a sustentabilidade e aumentar a produtividade agrícola de maneira ecológica e segura. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de produtos biológicos eficazes são essenciais para expandir o uso desta estratégia e maximizar seus benefícios na agricultura moderna.

CONCLUSÕES

A microbiota do solo é um componente essencial para a saúde do solo e a sustentabilidade agrícola. Esses microrganismos desempenham funções críticas, como a ciclagem de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica, a fixação de nitrogênio e o controle biológico de patógenos, todos fundamentais para manter a fertilidade do solo e a produtividade das culturas.

Práticas agrícolas que promovem a diversidade e a atividade microbiana são essenciais para garantir a produtividade agrícola a longo prazo. Técnicas como a rotação de culturas, a adubação verde e a aplicação de compostos orgânicos não apenas melhoram a estrutura e a fertilidade do solo, mas também incentivam a proliferação de microrganismos benéficos. Essas práticas ajudam a criar um ambiente mais resiliente e saudável, capaz de sustentar altas produtividades agrícolas sem depender excessivamente de fertilizantes químicos e defensivos.

A integração de práticas de manejo sustentável que favorecem a microbiota do solo não só melhora a saúde do solo e a produtividade das culturas, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais adversos associados à agricultura intensiva. Promover a biodiversidade microbiana e entender suas funções no ecossistema do solo são passos cruciais para alcançar uma agricultura verdadeiramente sustentável e produtiva a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABD-ALLA, M. H.; AL-AMRI, S. M.; EL-ENANY, A.-W. E. Enhancing Rhizobium–Legume Symbiosis and Reducing Nitrogen Fertilizer Use Are Potential Options for Mitigating Climate Change. **Agriculture**, v. 13, n. 11, p. 2092, 3 nov. 2023.

AL-KARABLIEH, N. et al. *Pseudomonas fluorescens* NK4 siderophore promotes plant growth and biocontrol in cucumber. **Journal of Applied Microbiology**, v. 133, n. 3, p. 1414–1421, 1 set. 2022.

CHAUHAN, P. et al. Soil Microbiome: Diversity, Benefits and Interactions with Plants. **Sustainability**, v. 15, n. 19, p. 14643, jan. 2023.

DAUNORAS, J.; KAČERGIUS, A.; GUDIUKAITĖ, R. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem. **Biology**, v. 13, n. 2, p. 85, 29 jan. 2024.

DUNLAP, C. A.; BOWMAN, M. J.; ROONEY, A. P. Iturinic Lipopeptide Diversity in the *Bacillus subtilis* Species Group – Important Antifungals for Plant Disease Biocontrol Applications. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1794, 7 ago. 2019.

GAMALERO, E. et al. Colonization pattern of primary tomato roots by *Pseudomonas fluorescens* A6RI characterized by dilution plating, flow cytometry, fluorescence, confocal and scanning electron microscopy. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 48, n. 1, p. 79–87, abr. 2004.

GRGAS, D. et al. The Bacterial Degradation of Lignin—A Review. **Water**, v. 15, n. 7, p. 1272, 23 mar. 2023.

KEBEDE, E. Contribution, Utilization, and Improvement of Legumes-Driven Biological Nitrogen Fixation in Agricultural Systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 767998, 16 nov. 2021.

LIU, L. et al. The core microbiota as a predictor of soil functional traits promotes soil nutrient cycling and wheat production in dryland farming. **Functional Ecology**, v. 37, n. 9, p. 2325–2337, set. 2023.

OVERMANN, J.; VAN GEMERDEN, H. Microbial interactions involving sulfur bacteria: implications for the ecology and evolution of bacterial communities. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 24, n. 5, p. 591–599, dez. 2000.

RAWAT, P. et al. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 49–68, mar. 2021.

SAR, P. et al. Natural surfactant mediated bioremediation approaches for contaminated soil. **RSC Advances**, v. 13, n. 44, p. 30586–30605, 2023.

SAROJ, P.; P, M.; NARASIMHULU, K. Characterization of thermophilic fungi producing extracellular lignocellulolytic enzymes for lignocellulosic hydrolysis under solid-state fermentation. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 5, n. 1, p. 31, dez. 2018.

SHEN, L.; FENG, J. NIN—at the heart of Nitrogen-fixing Nodule symbiosis. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1284720, 12 jan. 2024.

SINHAROY, S.; TIAN, C.-F.; MONTIEL, J. Editorial: Plant-rhizobia symbiosis and nitrogen fixation in legumes. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1392006, 11 mar. 2024.

SUMAN, J. et al. Microbiome as a Key Player in Sustainable Agriculture and Human Health. **Frontiers in Soil Science**, v. 2, 11 abr. 2022.

SUN, L. et al. Core microbiota drive multi-functionality of the soil microbiome in the Cinnamomum camphora coppice planting. **BMC Microbiology**, v. 24, n. 1, p. 18, 10 jan. 2024.

TAHAT, M. et al. Soil Health and Sustainable Agriculture. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 4859, jan. 2020.

VINCZE, É.-B. et al. Beneficial Soil Microbiomes and Their Potential Role in Plant Growth and Soil Fertility. **Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 152, 20 jan. 2024.

WANG, H. et al. Pathogen Biocontrol Using Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR): Role of Bacterial Diversity. **Microorganisms**, v. 9, n. 9, p. 1988, 18 set. 2021.

WANG, X.; CHI, Y.; SONG, S. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1347745, 25 mar. 2024.

WANG, Y. et al. Iturin A Extracted From Bacillus subtilis WL-2 Affects Phytophthora infestans via Cell Structure Disruption, Oxidative Stress, and Energy Supply Dysfunction. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 536083, 9 set. 2020.

XU, Z. et al. Understanding of bacterial lignin extracellular degradation mechanisms by Pseudomonas putida KT2440 via secretomic analysis. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 15, n. 1, p. 117, 31 out. 2022.