

O IMPACTO DOS FUNGICIDAS SOBRE A MICROBIOTA DO SOLO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

THE IMPACT OF FUNGICIDES ON SOIL MICROBIOTA: A LITERATURE REVIEW

IMPACTO DE LOS FUNGICIDAS EN LA MICROBIOTA DEL SUELO: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-064>

Data de submissão: 10/10/2025

Data de publicação: 10/11/2025

Karen Danielle Pinheiro

Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

E-mail: karen.pinheiro@unemat.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5256871091861274>

Quésia do Nascimento Pereira

Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

E-mail: quesia.pereira@unemat.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8994542337196033>

Daniela Padilha Macedo

Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

E-mail: daniela.padilha@unemat.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7625253287070422>

Miriam Hiroko Inoue

Doutora em Agronomia (Produção Vegetal)

Instituição: Universidade Estadual de Mato Grosso (UNEMAT)

E-mail: miriam@unemat.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5603582678388704>

RESUMO

A intensificação da agricultura moderna tem elevado o uso de fungicidas para o controle de doenças fúngicas e a garantia da produtividade agrícola. No entanto, seu uso extensivo tem gerado preocupações quanto aos impactos ecológicos sobre a microbiota do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, os efeitos dos fungicidas sobre a composição, diversidade e funcionalidade microbiana em ecossistemas edáficos. A pesquisa foi conduzida nas bases Google Scholar, ScienceDirect e Periódicos CAPES, abrangendo o período de 2020 a 2025, com o uso dos descritores “fungicide, microorganisms, soil e microbiome”. Foram selecionados 54 artigos científicos que atenderam aos critérios de inclusão, contemplando experimentos de campo e de laboratório. Os resultados indicam que os fungicidas atuam como importantes estressores ecológicos, afetando a estrutura, a diversidade e as funções metabólicas da microbiota do solo. Comunidades fúngicas mostraram-se mais sensíveis que as bacterianas, apresentando reduções significativas na diversidade e biomassa após a exposição a compostos triazóis

e estrobilurinas. Houve também uma diminuição da atividade enzimática (desidrogenase, fosfatase e urease) e interferência na ciclagem de nutrientes, especialmente nos ciclos do carbono e do nitrogênio. Embora o uso de fungicidas seja indispensável para a proteção das culturas, esta revisão evidencia seus efeitos sobre a funcionalidade do solo. Observou-se que alguns gêneros bacterianos, como *Pseudomonas* e *Arthrobacter*, apresentam capacidade de degradação e adaptação a esses compostos. Apesar de existirem indícios de resiliência microbiana e possíveis efeitos benéficos, ainda persistem lacunas quanto aos impactos de longo prazo, o que reforça a importância do manejo sustentável e do uso racional de fungicidas.

Palavras-chave: Fitopatógenos. Manejo. Fungos. Bactérias. Microrganismos.

ABSTRACT

The intensification of modern agriculture has increased the use of fungicides to control fungal diseases and ensure agricultural productivity. However, their extensive use has raised concerns about the ecological impacts on soil microbiota. This study aimed to evaluate, through a systematic literature review, the effects of fungicides on the composition, diversity, and microbial functionality in soil ecosystems. The research was conducted using the Google Scholar, ScienceDirect, and CAPES Journals databases, covering the period from 2020 to 2025, using the descriptors "fungicide, microorganisms, soil, and microbiome". Fifty-four scientific articles that met the inclusion criteria were selected, encompassing field and laboratory experiments. The results indicate that fungicides act as important ecological stressors, affecting the structure, diversity, and metabolic functions of the soil microbiota. Fungal communities were more sensitive than bacterial communities, showing significant reductions in diversity and biomass after exposure to triazole and strobilurin compounds. There was also a decrease in enzymatic activity (dehydrogenase, phosphatase, and urease) and interference in nutrient cycling, especially in the carbon and nitrogen cycles. Although the use of fungicides is indispensable for crop protection, this review highlights their effects on soil functionality. It was observed that some bacterial genera, such as *Pseudomonas* and *Arthrobacter*, have the capacity for degradation and adaptation to these compounds. Despite evidence of microbial resilience and possible beneficial effects, gaps still remain regarding long-term impacts, which reinforces the importance of sustainable management and rational use of fungicides.

Keywords: Phytopathogens. Management. Fungi. Bacteria. Microorganisms.

RESUMEN

La intensificación de la agricultura moderna ha incrementado el uso de fungicidas para controlar las enfermedades fúngicas y garantizar la productividad agrícola. Sin embargo, su uso extensivo ha generado preocupación por sus impactos ecológicos en la microbiota del suelo. Este estudio tuvo como objetivo evaluar, mediante una revisión sistemática de la literatura, los efectos de los fungicidas en la composición, diversidad y funcionalidad microbiana de los ecosistemas del suelo. La investigación se realizó en las bases de datos Google Scholar, ScienceDirect y CAPES Journals, abarcando el período 2020-2025, utilizando los descriptores "fungicida, microorganismos, suelo y microbioma". Se seleccionaron 54 artículos científicos que cumplían con los criterios de inclusión, incluyendo experimentos de campo y de laboratorio. Los resultados indican que los fungicidas actúan como importantes factores de estrés ecológico, afectando la estructura, la diversidad y las funciones metabólicas de la microbiota del suelo. Las comunidades fúngicas resultaron ser más sensibles que las bacterianas, mostrando reducciones significativas en diversidad y biomasa tras la exposición a compuestos de triazol y estrobilurina. También se observó una disminución en la actividad enzimática (deshidrogenasa, fosfatasa y ureasa) e interferencia en el ciclo de nutrientes, especialmente en los ciclos del carbono y del nitrógeno. Si bien el uso de fungicidas es indispensable para la protección de

cultivos, esta revisión destaca sus efectos sobre la funcionalidad del suelo. Se observó que algunos géneros bacterianos, como *Pseudomonas* y *Arthrobacter*, presentan capacidad de degradación y adaptación a estos compuestos. A pesar de la evidencia de resiliencia microbiana y posibles efectos beneficiosos, aún existen lagunas de conocimiento respecto a los impactos a largo plazo, lo que refuerza la importancia del manejo sostenible y el uso racional de fungicidas.

Palabras clave: Fitopatógenos. Manejo. Hongos. Bacterias. Microorganismos.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da agricultura mundial tem sido impulsionada pela necessidade urgente de garantir a segurança alimentar de uma população em constante crescimento (Roman *et al.*, 2021). Nesse contexto, a proteção das culturas representa um componente essencial da produção agrícola (Baibakova *et al.*, 2019; Kenarova; Boteva, 2023), uma vez que as infecções fúngicas podem reduzir a produtividade global em até 20% (Baibakova *et al.*, 2019). Como resultado, os fungicidas, que são substâncias químicas destinadas ao controle de doenças fúngicas em plantas, tornaram-se amplamente empregados devido à sua eficácia, facilidade de aplicação e custo relativamente acessível (Baibakova *et al.*, 2019).

O uso de pesticidas em geral aumentou de forma expressiva na segunda metade do século passado (Carvalho; Pivoto, 2011). Apesar dos benefícios econômicos e de produtividade, o uso extensivo e, por vezes, indiscriminado desses compostos tem levantado preocupações ambientais, especialmente no que se refere à contaminação de compartimentos não-alvos. Nesse sentido, a ecotoxicologia busca compreender os riscos associados a essas substâncias e propor medidas regulatórias e técnicas para mitigar seus impactos (Baibakova *et al.*, 2019).

Estudos indicam que mais de 98% dos pesticidas aplicados atingem destinos diferentes de seus alvos (Roman *et al.*, 2021). Entre os compartimentos ambientais, o solo é considerado o mais complexo e o mais suscetível à contaminação por agrotóxicos (Carvalho; Pivoto, 2011; Wang *et al.*, 2025), sendo que cerca de 50% dos fungicidas utilizados acabam se acumulando nesse meio, transportados pela água da chuva ou pelo ar (Wang *et al.*, 2025).

Uma vez incorporados ao ambiente edáfico, os fungicidas podem afetar diretamente a microbiota do solo, que abriga uma comunidade diversa e dinâmica de bactérias, fungos e outros microrganismos fundamentais para a fertilidade, produtividade e sustentabilidade agrícola (Roman *et al.*, 2021). Embora seu objetivo primário seja o controle de fitopatógenos, os efeitos não alvos incluem a redução de antagonistas naturais, de organismos responsáveis pela mineralização da matéria orgânica e de microrganismos simbiontes (Ghini, 1993).

Esses impactos são geralmente avaliados por meio da atividade de enzimas do solo, como desidrogenase, fosfatase e urease, consideradas indicadores sensíveis da qualidade e saúde do solo (Roman *et al.*, 2021; Kenarova; Boteva, 2023). A toxicidade e persistência dos fungicidas são determinadas tanto por suas propriedades físico-químicas (como o coeficiente de partição ($\log P$) e a meia-vida (DT50)) quanto por fatores ambientais, incluindo dose aplicada, tempo de exposição e características intrínsecas do solo (Kenarova; Boteva, 2023).

Diante da crescente dependência de fungicidas e da complexidade das interações que regulam o ecossistema edáfico, torna-se fundamental consolidar e analisar criticamente o conhecimento recente sobre suas consequências nos microrganismos do solo. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar, com base em uma revisão bibliográfica sistematizada, os impactos do uso de fungicidas sobre a microbiota do solo, considerando as possíveis alterações em sua estrutura e funcionalidade.

2 METODOLOGIA

A revisão foi conduzida a partir de uma metodologia sistemática adaptada de Galvão e Pereira (2014). A primeira etapa diz respeito à definição da questão de pesquisa, sendo: quais são os principais impactos do uso de fungicidas sobre a composição, diversidade e funcionalidade da microbiota do solo?

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados científicas Google Scholar, ScienceDirect e Periódicos CAPES, abrangendo o período de 2020 a 2025. Foram utilizados os descritores em inglês: “fungicide”, “microorganisms”, “soil” e “microbiome”, de forma isolada e combinada, a fim de abranger o maior número possível de estudos pertinentes ao tema.

Na triagem inicial, os artigos foram selecionados com base na análise dos títulos e resumos, priorizando a relevância temática em relação à questão central da revisão. Em seguida, os trabalhos pré-selecionados foram avaliados integralmente, considerando metodologia, objetivos, resultados e conclusões.

Foram incluídos exclusivamente artigos científicos originais, sendo excluídas publicações que abordassem outros tipos de pesticidas (como herbicidas ou inseticidas) ou estudos sobre fungicidas sem relação com a microbiota do solo. A etapa de extração de dados consistiu na organização dos artigos em uma planilha de análise categorizadas por autor e ano de publicação, fungicida utilizado, microrganismo estudado e principais resultados encontrados. Essa sistematização possibilitou uma análise quantitativa e qualitativa dos trabalhos selecionados, bem como a visualização dos resultados em formato tabular, favorecendo a interpretação dos achados.

3 RESULTADOS

A revisão sistemática resultou na seleção de 54 estudos publicados entre 2020 e 2025, os quais atenderam aos critérios de inclusão previamente estabelecidos. Esses trabalhos foram conduzidos em diferentes contextos agrícolas e ecossistemas de solo, abrangendo tanto experimentos de campo quanto estudos de laboratório. A maioria das pesquisas avaliou os efeitos de fungicidas triazóis e estrobilurinas, refletindo seu uso predominante na agricultura moderna. Verificou-se que a abordagem

experimental mais comum envolveu a análise da atividade enzimática (desidrogenase, fosfatase e urease) e da diversidade microbiana por meio de técnicas de biologia molecular, como sequenciamento de DNA e análise de comunidades microbianas.

A Tabela 1 apresenta a síntese desses estudos, destacando os fungicidas avaliados, os principais métodos empregados e os efeitos observados sobre a microbiota do solo. De modo geral, os resultados evidenciam ampla variação nos impactos relatados, dependendo do tipo de fungicida, das condições edáficas e do tempo de exposição.

Tabela 1 - Estudos Selecionados: Impacto de Fungicidas na Microbiota do Solo (2020–2025)

Referência	Fungicida	Foco Principal na Microbiota e Principais Resultados
Adesemoye <i>et al.</i> (2021)	Metalaxil, Tiabendazol e Azoxistrobina	Interação com rizobactérias promotoras de crescimento (PGPR) na soja; fungicidas alteraram teores minerais (S, Zn, P, K, Fe, Ca, Mn).
Andreolli <i>et al.</i> (2023)	Dedalus® (Tebuconazol), Lidal® (Tetraconazol), Topas® (Penconazol), Switch® (Ciprodinil + Fludioxonil), Folpan® (Folpet)	Triazóis afetaram principalmente bactérias Gram+ (Firmicutes, Actinobacteria); Folpan® inibiu o maior número de isolados; impacto menor em Gram- (Proteobacteria).
Astaykina <i>et al.</i> (2020)	Benomyl (mistura)	Efeito de curto prazo; estimulou carbono da biomassa microbiana e aumentou <i>Sphingomonas parvus</i> .
Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski (2021)	Tebuconazole	Reduziu <i>Thermoleophilia</i> e <i>Acidobacteria-6</i> ; menor diversidade em nível de filo, mas maior em gênero, com <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> e <i>Sphingomonas</i> predominantes em solo contaminado.
Baćmaga <i>et al.</i> (2022)	Tebuconazole	Diminuiu Firmicutes e Proteobacteria em altas doses; estimulou <i>Sphingomonadaceae</i> , resistente ao fungicida.
Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski (2024)	Azoxystrobin	Doses elevadas inibiram bactérias organotróficas e actinobactérias, e reduziram fungos (até 4×); identificados <i>Prestia megaterium</i> , <i>Bacillus mycoides</i> e <i>Keratinophyton terreum</i> como degradadores potenciais.
Bardelli <i>et al.</i> (2024)	Tebuconazole	Reduziu biomassa e atividade microbiana total do solo.
Becker, Klueken; Knief (2023)	Fosetyl de alumínio	Alterou significativamente a composição bacteriana na raiz e rizosfera, indicando efeitos sistêmicos.
Bonanomi <i>et al.</i> (2025)	Pyrimethanil	Impactou temporariamente o microbioma da vinha; efeitos reversíveis sobre a função biológica do solo.
Boteva <i>et al.</i> (2022)	Quadris® (Azoxistrobina)	Modificou o perfil funcional bacteriano e a atividade enzimática em solo arenoso-argiloso.
Chou <i>et al.</i> (2025)	Fluazinam (uso repetido)	Reduziu abundância fúngica e aumentou diversidade bacteriana a curto prazo em solos supressores.
Cui <i>et al.</i> (2024)	KR, MT, JD (Pyraclostrobine, Difenoconazole, Fludioxonil etc.)	Alterou estrutura microbiana; reduziu <i>Sphingomonas</i> spp. e <i>Fusarium</i> spp., mas aumentou <i>Bacillus</i> spp. (tratamento JD).
Dela Cruz; Camenzind; Rillig (2022)	Prothioconazole e Isopyrazam	Afetaram fungos não-alvo; Basidiomycota mostrou alta sensibilidade, indicando impacto em ciclagem de carbono.
Dela Cruz <i>et al.</i> (2024)	Isopyrazam e Protoconazol	Reduciram diversidade fúngica e alteraram processos biogeoquímicos em solos de pastagem.
Douillard <i>et al.</i> (2025)	Pyraclostrobine + Epoxiconazol	Efeitos transitórios sobre o microbioma foliar; acúmulo de microrganismos resistentes (<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i>) sugere necessidade de manejo integrado.

Feng <i>et al.</i> (2025)	Fungicida químico (D)	Diminuiu Basidiomycota (~77,6%) e aumentou Ascomycota; alterações bacterianas persistiram mais que as fúngicas.
Fournier <i>et al.</i> (2020)	Fosetyl-Al e Propamocarb-hidrocloreto	Modificou comunidades bacterianas, fúngicas e de protistas do solo.
Jia <i>et al.</i> (2022)	Difenoconazole	Aumentou Acidobacteria e Actinobacteria; reduziu Chloroflexi e Patescibacteria conforme dose.
Katsoula <i>et al.</i> (2020)	Iprodione (uso repetido)	Aumentou Dothideomycetes e Sordariomycetes (Fusarium, Clonostachys); mudanças marcantes na β -diversidade fúngica.
Kholostiakov <i>et al.</i> (2025)	Piráculo + Tebuconazol	Isolados bacterianos (Priestia, Paenibacillus, Bacillus) e fúngicos (Penicillium, Aureobasidium) exibiram alta tolerância.
Knuth <i>et al.</i> (N/A)	Metalaxyl-M, Boscalid, Difenoconazole, Epoxiconazole, Fluopyram (mistura)	Difenoconazole, Metalaxyl-M e Boscalid afetaram fortemente bactérias; Fluopyram impactou fungos; fungicidas > herbicidas em efeito sobre microbioma.
Lane <i>et al.</i> (2025)	Azoxistrobina + Propiconazol	Alterou discretamente a estrutura microbiana da rizosfera; não reduziu diversidade; possível mediação via metabolismo vegetal.
Leitão; Pinto; Henriques (2024)	Fosfito	Alterou a abundância de OTUs bacterianas no rizobioma, indicando efeito indireto sobre estrutura microbiana.
Liao <i>et al.</i> (2022)	Carbendazim, Fluazinam, Metalaxyl-Mancozeb	Carbendazim reduziu mais fortemente a α -diversidade bacteriana (~25 espécies); Fluazinam alterou composição da rizosfera.
Liu <i>et al.</i> (2025)	Tetramycin	Diminuiu diversidade fúngica alfa; aumentou Gemmatimonadota e Ascomycota em solo não esterilizado.
Lloyd; Percival; Yurgel (2021)	Prothioconazole e Chlorothalonil	Reduziram diversidade fúngica (índice Shannon), sem afetar significativamente bactérias; pequenas variações em vias metabólicas bacterianas.
Lloyd <i>et al.</i> (2022)	Luna Tranquility (Fluopyram + Pirimetanil)	Único tratamento com variação significativa nas comunidades; aumento da família Clavicipitaceae.
Meyer <i>et al.</i> (2024)	Hymexazol	Aumentou abundância bacteriana (até +227%) em comunidades fragmentadas; dose alta reduziu fungos em até 92%.
Meyer <i>et al.</i> (2025)	Fenhexamid, Cyprodinil e Fludioxonil	Reduciu respiração basal e mudou relação F:B, com predomínio bacteriano sobre fúngico.
Mochalska-Smith <i>et al.</i> (2024)	Cloropicrina	Controlou patógenos e modulou o microbioma sem perdas duradouras de diversidade.
Neilson <i>et al.</i> (2020)	Azoxystrobin + Benzovindiflupyr	Diminuiu Ascomycota e aumentou Basidiomycota no solo.
Palberg; Emery (2025)	Metalaxyl-M e Fludioxonil	Fludioxonil apresentou degradação lenta; algumas bactérias incapazes de metabolizá-lo, mas tolerantes à sua presença.
Peng <i>et al.</i> (2024)	Sulfato de Cal (Lime Sulfur)	Aumentou diversidade fúngica (índice Shannon) e reduziu diversidade bacteriana.
Przemieniecki <i>et al.</i> (2022)	Azoxystrobin (convencional e nanoformulada)	Nanoformulação reduziu toxicidade e manteve diversidade; formulação tradicional reduziu Bacillus e Pseudomonas, enquanto a nano estimulou microrganismos degradadores.
Qin <i>et al.</i> (2023)	Difenoconazole	Alterou o microbioma funcional do solo, com mudanças em rotas metabólicas.
Ren <i>et al.</i> (2022)	Prochloraz	Aumentou riqueza e diversidade bacteriana (Burkholderia +141%), mas reduziu Trichoderma.
Riedo <i>et al.</i> (2025)	Boscalid e Epoxiconazole (mistura)	Fungos mais sensíveis que bactérias; aplicações graduais favoreceram táxons fúngicos raros.
Sabra <i>et al.</i> (2022)	Azoxystrobin (nanoparticulada)	Formulação nanoparticulada reduziu impacto negativo e aumentou crescimento do trigo.
Schnurr <i>et al.</i> (2025)	Mistura de fungicidas (doses crescentes)	Maior influência sobre diversidade fúngica (redução da α -diversidade) que sobre comunidades bacterianas.
Streletsckii <i>et al.</i> (2023)	Benomyl (mistura)	Efeito mais forte em fungos; Benomyl 10x reduziu Paenisporesarcina em até 300 vezes.
Sun <i>et al.</i> (2020)	Cycloheximide	Alterou fortemente comunidades fúngicas, modificando perfis funcionais.
Tagele; Gachomo (2025)	Mefenoxam	Aumentou atividade bacteriana ao fornecer substrato de fungos mortos; efeito indireto de fungicidas como Carbendazim e Ridomil.

Telmosse <i>et al.</i> (2025)	Tebuconazol	Aumentou biomassa de hifas (+40%) e causou leve alteração na estrutura fúngica.
Vasilchenko <i>et al.</i> (2023)	Mistura de Triazóis (Difenoconazole, Epoxiconazole) e Estrobilurina (Kresoxim-Metil)	Reduziu diversidade (índice Shannon) e aumentou vias bacterianas de degradação; elevação de <i>Rhizopus</i> e <i>Chaetomium</i> .
Wang X. <i>et al.</i> (2020)	Azoxystrobin	Alterou significativamente a estrutura do microbioma do solo.
Wang Y. <i>et al.</i> (2021)	Fenaminosulf e Dazomet	Fenaminosulf afetou apenas fungos; Dazomet alterou comunidades fúngicas e bacterianas.
Wei <i>et al.</i> (2024)	Fungicidas microbianos (<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma harzianum</i>)	Aumentaram atividade enzimática e melhoraram estrutura microbiana em solos de berinjela.
Whittington <i>et al.</i> (2021)	Ametoctradin	Proteobacteria dominante; reduziu Oomycetes (alvo) sem afetar principais bactérias.
Wydro <i>et al.</i> (2024)	Isofetamid	Investigou decomposição do fungicida por <i>Pseudomonas fluorescens</i> e efeito positivo na atividade biológica.
Yang <i>et al.</i> (2022)	Fludioxonil e Metalaxyl-M (revestimento de sementes)	Alterou microbioma da soja; Metalaxyl-M teve maior impacto na comunidade rizosférica.
You <i>et al.</i> (2021)	Metalaxil (R- e S-enantiômeros)	Biochar reduziu toxicidade e estimulou degradadores (<i>Luteimonas</i> , <i>Methylophilus</i> , <i>Hydrogenophaga</i>).
Zhai <i>et al.</i> (2024)	Prothioconazol	Causou estresse oxidativo na rizosfera da soja; <i>Sphingomonadaceae</i> auxiliou na mitigação e manutenção do crescimento.
Zhang H. <i>et al.</i> (2021)	Difenoconazole	Reduziu diversidade bacteriana e a complexidade da rede microbiana do solo.
Zhou <i>et al.</i> (2025)	Azoxystrobin + Dazomet	Coaplicação reduziu diversidade bacteriana (índice Shannon) e causou variações temporais na diversidade fúngica.
Zhu <i>et al.</i> (2024)	Azoxistrobina + Oxitetraciclina	Interação antagônica reduziu danos à microbiota; aumento de <i>Cellvibrio</i> e <i>Panacagrimonas</i> associados à degradação e resistência ao estresse químico.

Fonte: Autoras (2025)

4 DISCUSSÃO

Os estudos revisados, publicados entre 2020 e 2025, indicam que os fungicidas atuam como importantes estressores do ecossistema edáfico, afetando tanto a composição e diversidade microbiana quanto processos ecológicos essenciais à manutenção da saúde do solo.

4.1 IMPACTOS NA ESTRUTURA E DIVERSIDADE MICROBIANA

O acúmulo de fungicidas nos sistemas agrícolas tem se mostrado um fator determinante na redução da biodiversidade microbiana, tanto em áreas de cultivo quanto em ecossistemas adjacentes (Andreolli *et al.*, 2023). O uso inadequado e prolongado desses compostos pode alterar a abundância, a atividade e o funcionamento da microbiota do solo, comprometendo sua estabilidade ecológica (Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski, 2024).

De modo geral, as comunidades fúngicas apresentam maior sensibilidade à exposição a fungicidas do que as comunidades bacterianas (Riedo *et al.*, 2025; Schnurr *et al.*, 2025). O aumento

da concentração desses produtos tende a afetar mais fortemente a diversidade dos fungos, reduzindo a riqueza e a diversidade fúngica (Astaykina *et al.*, 2020; Lloyd; Percival; Yurgel, 2021; Andreolli *et al.*, 2023). Por exemplo, misturas contendo difenoconazol, epoxiconazol e crecoxim-metil resultaram em declínio significativo da diversidade fúngica (índices de Shannon) (Vasilchenko *et al.*, 2023). Além disso, a exposição ao difenoconazol também reduziu a diversidade bacteriana e a complexidade das redes de coocorrência (Andreolli *et al.*, 2023; Cui *et al.*, 2024; Meyer *et al.*, 2024).

Embora as comunidades bacterianas demonstrem maior resiliência, elas não permanecem imunes aos efeitos dos fungicidas. Mudanças estruturais transitórias, como reduções temporárias na densidade populacional, são frequentemente observadas, seguidas de recuperação parcial (Palberg; Emery, 2025). Assim, mesmo que as bactérias exibem estabilidade relativa, alterações significativas na estrutura e funcionalidade podem ocorrer (Riedo *et al.*, 2025; Schnurr *et al.*, 2025).

4.2 ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO TAXONÔMICA

Os efeitos sobre a composição taxonômica variam conforme o grupo microbiano e o tipo de fungicida. Compostos como carbendazim, mancozeb e benomil inibem o crescimento e a esporulação de fungos micorrízicos arbusculares (AMF), essenciais ao desenvolvimento das plantas (Astaykina *et al.*, 2020). Estudos *in vitro* indicam que fungos do filo Basidiomycota são especialmente sensíveis a protoiconazol e isopirazam, enquanto os Mucoromycota se mostraram mais tolerantes (Dela Cruz; Camenzind; Rillig, 2022). Em solos tratados com estrobilurinas e triazóis, observou-se aumento da abundância relativa de *Rhizopus* e do gênero benéfico *Chaetomium*, enquanto o gênero fitopatogênico *Fusarium* apresentou redução de 50% em sua abundância (Vasilchenko *et al.*, 2023).

Entre as bactérias, fungicidas podem modificar o equilíbrio entre frações bacterianas e fúngicas (Meyer *et al.*, 2025). Gêneros como *Arthrobacter* e *Sphingomonas* tendem a proliferar, devido à capacidade de metabolizar estrobilurinas e outros compostos tóxicos como fonte de carbono (Vasilchenko *et al.*, 2023). Espécies pertencentes a *Proteobacteria*, incluindo *Pseudomonas*, são frequentemente descritas como tolerantes (Andreolli *et al.*, 2023; Tagele; Gachomo, 2025).

4.3 IMPACTOS NA FUNCIONALIDADE MICROBIANA

A funcionalidade do solo, frequentemente avaliada por meio da atividade enzimática e da respiração microbiana, é diretamente afetada pelo uso de fungicidas (Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski, 2021). Enzimas essenciais, como urease, desidrogenases, proteases, fosfatases e β -glucosidase, têm sua atividade reduzida após a aplicação desses compostos (Wydro *et al.*, 2024). A atividade das desidrogenases (Dha) mostra-se particularmente sensível, com declínios proporcionais à

concentração e ao tempo de exposição. O fungicida Quadris® (azoxistrobina), por exemplo, afetou a respiração do solo mesmo em baixas concentrações, inibindo fungos não patogênicos (Boteva *et al.*, 2022).

Concentrações subletais de protioconazol e isopirazam também reduziram a respiração do solo e a hidrólise de FDA, indicando menor biomassa fúngica e redução geral das atividades microbianas (Dela Cruz *et al.*, 2024). Em termos de ciclagem de nutrientes, os fungicidas interferem nos ciclos do carbono e do nitrogênio, limitando a disponibilidade de nutrientes e a população de microrganismos envolvidos nesses processos (Lloyd; Percival; Yurgel, 2021; Meyer *et al.*, 2025). O fungicida isofetamida, por exemplo, reduziu a abundância de arqueias nitrificantes e de genes *amoA*, impactando a nitrificação (Wydro *et al.*, 2024; Meyer *et al.*, 2024).

Quanto à biomassa microbiana, resultados contrastantes foram relatados. O tebuconazol mostrou reduzir significativamente a biomassa microbiana (Boteva *et al.*, 2022; Bardelli *et al.*, 2024; Dela Cruz *et al.*, 2024), enquanto misturas de fungicidas como difenoconazol, epoxiconazol e crecoxim-metil promoveram aumento do carbono microbiano em comparação ao solo controle (Vasilchenko *et al.*, 2023). Essa variabilidade pode refletir diferenças nas condições edáficas, nas doses aplicadas e na resiliência da microbiota local.

4.4 RESPOSTA FUNCIONAL: TOLERÂNCIA E DEGRADAÇÃO

Com o tempo, observa-se uma redução da toxicidade dos fungicidas, associada à adaptação microbiana e à degradação enzimática dos compostos (Wydro *et al.*, 2024; Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski, 2024). Bactérias organotróficas podem proliferar após a adição de tebuconazol, utilizando o fungicida como fonte de carbono (Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski, 2021). Gêneros como *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Arthrobacter* demonstraram notável capacidade de degradação de fungicidas, contribuindo para a atenuação de seus efeitos ambientais (Baćmaga; Wyszkowska; Kucharski, 2024).

4.5 FUNGICIDAS ESPECÍFICOS E ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO

Os impactos variam conforme o modo de ação (MoA), a concentração e a estratégia de aplicação dos fungicidas. Os inibidores da desmetilação (DMIs), como triazóis (*tebuconazol*, *protioconazol*, *difenoconazol*), interferem na biossíntese de ergosterol, afetando a integridade das membranas fúngicas (Bardelli *et al.*, 2024; Kholostiakov *et al.*, 2025). Esses compostos estão entre os mais associados à redução da biomassa e da diversidade microbiana (Boteva *et al.*, 2022; Dela Cruz *et al.*, 2024). Já os inibidores da quinona externa (QoIs), como as estrobilurinas (*azoxistrobina*,

piraclostrobina), atuam bloqueando a respiração fúngica e também induzem mudanças no microbioma do solo (Lloyd *et al.*, 2022; Meyer *et al.*, 2024).

A aplicação simultânea de fungicidas com diferentes modos de ação — como proticonazol (DMI) e isopirazam (SDHI) — provoca efeitos mais intensos na atividade microbiana (respiração e hidrólise de FDA) do que aplicações individuais ou sequenciais (Dela Cruz *et al.*, 2024). Além disso, a diversidade fúngica do solo influencia diretamente a magnitude das alterações microbianas: solos mais diversos sofrem maiores desvios frente ao uso de fungicidas (Dela Cruz *et al.*, 2024). Aplicações graduais, por sua vez, tendem a reduzir a abundância de táxons dominantes, promovendo maior uniformidade da comunidade, o que sugere que exposições crônicas a baixas doses podem induzir mudanças estruturais profundas (Riedo *et al.*, 2025).

Por fim, os fungicidas podem afetar indiretamente microrganismos não alvo, alterando as interações bióticas entre táxons sensíveis e resistentes (Meyer *et al.*, 2024; Knuth *et al.*). Estima-se que mais de 75% das mudanças na abundância de OTUs dominantes após exposição a fungicidas, como o himexazol, resultem desses efeitos indiretos (Meyer *et al.*, 2024). Assim, a toxicidade e a persistência dos fungicidas são fortemente moduladas pela comunidade microbiana do solo, que pode tanto amplificar quanto atenuar seus efeitos (Dela Cruz *et al.*, 2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão dos artigos, concluiu-se que o uso de fungicidas permanece essencial para a proteção de culturas e a garantia da segurança alimentar; entretanto, esta revisão evidencia que tais compostos atuam como importantes estressores ecológicos, com efeitos notáveis sobre a estrutura e a funcionalidade da microbiota do solo.

De modo geral, os fungicidas, sobretudo os de amplo espectro, afetam organismos não-alvo, sendo as comunidades fúngicas as mais sensíveis, com reduções significativas na diversidade e na biomassa microbiana. Substâncias como tebuconazol e outros triazóis demonstraram comprometer a atividade enzimática e a ciclagem de nutrientes, alterando processos biogeoquímicos fundamentais. Além disso, a aplicação simultânea de misturas com diferentes modos de ação potencializa os efeitos negativos, enquanto regimes graduais de uso podem induzir modificações profundas na composição fúngica.

Apesar disso, alguns estudos apontam para a resiliência microbiana e para possíveis efeitos benéficos, como a supressão de fitopatógenos e o aumento de táxons degradadores de fungicidas. Persistem, contudo, lacunas significativas quanto aos impactos indiretos e de longo prazo sobre as interações bióticas e a funcionalidade do solo. Assim, torna-se indispensável o desenvolvimento de

estratégias de manejo integradas, que aliem o uso racional de fungicidas a práticas sustentáveis, como a aplicação de microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPR), visando à manutenção da saúde e da sustentabilidade dos ecossistemas edáficos.

REFERÊNCIAS

- ADESEMOYE, A.; PERVAIZ, Z. H.; PARikh, L.; KODATI, S.; ZHANG, Q.; STEPANOVIĆ, S.; SALEEM, M. Rhizobacterial, Fusarium complex, and fungicide seed treatments regulate shoot and root traits of soybean plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, n. 4, p. 3502-3513, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00623-9>.
- ANDREOLLI, M.; LAMPIS, S.; TOSI, L.; MARANO, V.; ZAPPAROLI, G. Fungicide sensitivity of grapevine bacteria with plant growth-promoting traits and antagonistic activity as non-target microorganisms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 39, n. 5, p. 121, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03569-5>.
- ASTAYKINA, A. A.; STRELETSKII, R. A.; MASLOV, M. N.; BELOV, A. A.; GORBATOV, V. S.; STEPANOV, A. L. The impact of pesticides on the microbial community of agrosoddy-podzolic soil. *Eurasian Soil Science*, v. 53, n. 5, p. 696-706, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320050038>.
- BAĆMAGA, M.; WYSZKOWSKA, J.; BOROWIK, A.; KUCHARSKI, J. Effects of tebuconazole application on soil microbiota and enzymes. *Molecules*, v. 27, n. 21, p. 7501, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27217501>.
- BAĆMAGA, M.; WYSZKOWSKA, J.; KUCHARSKI, J. Bacterial diversity and enzymatic activity in a soil recently treated with tebuconazole. *Ecological Indicators*, v. 123, p. 107373, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107373>.
- BAĆMAGA, M.; WYSZKOWSKA, J.; KUCHARSKI, J. Response of soil microbiota, enzymes, and plants to the fungicide azoxystrobin. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 15, p. 8104, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25158104>.
- BAIBAKOVA, E. V.; NEFEDJEVA, E. E.; SUSKA-MALAWSKA, M.; WILK, M.; SEVRIUKOVA, G. A.; ZHELTOBRIUKHOV, V. F. Modern fungicides: mechanisms of action, fungal resistance and phytotoxic effects. *Annual Research & Review in Biology*, v. 32, n. 3, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.9734/arrb/2019/v32i330083>.
- BARDELLI, T.; FORNASIER, F.; NOVARINA, E.; DONNIACUO, A.; ROMANO, E.; BIANCHI, P. G.; GIULINI, A. P. M. Changes in the Rhizosphere Biome Depending on the Variety of Wheat, Timing of Its Growing Season, and Agrochemical Components in the Soils of Italy. *Agronomy*, v. 14, n. 4, p. 832, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14040832>.
- BECKER, M. F.; KLUEKEN, A. M.; KNIEF, C. Effects of above ground pathogen infection and fungicide application on the root-associated microbiota of apple saplings. *Environmental Microbiome*, v. 18, n. 1, p. 43, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40793-023-00502-z>.
- BONANOMI, G.; IACOMINO, G.; IDBELLA, A.; AMOROSO, G.; STAROPOLI, A.; DE SIO, A.; SACCOCCI, F.; ABD-ELGAWAD, A. M.; MORENO, M.; IDBELLA, M. Compost Tea Combined with Fungicides Modulates Grapevine Bacteriome and Metabolome to Suppress Downy Mildew. *Journal of Fungi*, v. 11, n. 7, p. 527, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof11070527>.

BOTEVA, S. B.; KENAROVA, A. E.; PETKOVA, M. R.; GEORGIEVA, S. S.; CHANEV, C.; RADEVA, G. Soil enzyme activities after application of fungicide QuadrisR at increasing concentration rates. *Plant Soil Environ.*, v. 68, n. 8, p. 382-392, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17221/127/2022-PSE>.

CARVALHO, N. L.; PIVOTO, T. S. Ecotoxicologia: conceitos, abrangência e importância agronômica. *Revista Monografias Ambientais*, v. 2, n. 2, p. 176-192, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5902/223613082315>.

CHOU, M. Y.; PATIL, A. T.; HUO, D.; LEI, Q.; KAO-KNIFFIN, J.; KOCH, P. Fungicide use intensity influences the soil microbiome and links to fungal disease suppressiveness in amenity turfgrass. *Applied and environmental microbiology*, v. 91, n. 3, p. e01771-24, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.01771-24>.

CUI, K.; XIA, X.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; CAO, J.; XU, J.; DONG, F.; LIU, X.; PAN, X.; ZHENG, Y.; WU, X. Thiophanate-methyl and its major metabolite carbendazim weaken rhizobacteria-mediated defense responses in cucumbers against Fusarium wilt. *Abiotech*, v. 5, n. 4, p. 417-430, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42994-024-00181-5>.

DELA CRUZ, J. A.; CAMENZIND, T.; RILLIG, M. C. Sub-lethal fungicide concentrations both reduce and stimulate the growth rate of non-target soil fungi from a natural grassland. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, p. 1020465, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1020465>.

DELA CRUZ, J. A.; CAMENZIND, T.; XU, B.; RILLIG, M. C. Limited role of fungal diversity in maintaining soil processes in grassland soil under concurrent fungicide stress. *Environmental Sciences Europe*, v. 36, n. 1, p. 156, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00983-w>.

DOUILLARD, J.; WHALEN, J.; LAFOND, J.; PARÉ, M. C. Soil fertility response to pruning, fungicide, and fertilization in lowbush blueberry. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 105, p. 1-10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2024-0121>.

FENG, D.; CHEN, J.; LI, G.; YANG, X.; XIONG, Y.; LAO, A.; HUANG, S.; ZHENG, Z. Effects of Difenconazole and Imidacloprid Seed Coatings on Soil Microbial Community Diversity and Ecological Function. *Microorganisms*, v. 13, n. 4, p. 806, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13040806>.

FOURNIER, B.; DOS SANTOS, S. P.; GUSTAVSEN, J. A.; IMFELD, G.; LAMY, F.; MITCHELL, E. A.; MOTA, M.; NOLL, D.; PLANCHAMP, C.; HEGER, T. J. Impact of a synthetic fungicide (fosetyl-Al and propamocarb-hydrochloride) and a biopesticide (*Clonostachys rosea*) on soil bacterial, fungal, and protist communities. *Science of The Total Environment*, v. 738, p. 139635, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139635>.

GHINI, R. Efeito de fungicidas sobre microrganismos não alvo. *Sununa Phytopathologica*, v. 19, n. 1, p. 62-63, 1993.

JIA, H.; MUHAE-UD-DIN, G.; ZHANG, H.; ZONG, Q.; ZHAO, S.; GUO, Q.; CHEN, W.; GAO, L. Characterization of rhizosphere microbial communities for disease incidence and optimized concentration of difenoconazole fungicide for controlling of wheat dwarf bunt. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 853176, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.853176>.

KATSOULA, A.; VASILEIADIS, S.; SAPOUNTZI, M.; KARPOUZAS, D. G. The response of soil and phyllosphere microbial communities to repeated application of the fungicide iprodione: accelerated biodegradation or toxicity?. *FEMS microbiology ecology*, v. 96, n. 6, p. fiaa056, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa056>.

KENAROVA, A.; BOTEVA, S. Fungicides in agriculture and their side effects on soil enzyme activities: a review. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, v. 29, n. 1, 2023.

KHOLOSTIAKOV, V.; BURNS, B.; RIDGWAY, H.; PADAMSEE, M. Effects of fungicides on the beneficial seed-borne microbiome and seedling development of a long-lived myrtaceae tree species. *Symbiosis*, v. 96, n. 2, p. 133-154, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-025-01064-z>.

KNUTH, D.; MÄDER, P.; BOEKHORST, J.; POLL, C.; KANDELER, E.; ALAOUI, A.; HOFMAN, J.; PASKOVIĆ, I.; PASKOVIĆ, M. P.; BALDI, I.; BUREAU, M.; ALCON, F.; CONTRERAS, J.; GLAVAN, M.; ABRANTES, N.; CAMPOS, I.; NØRGAARD, T.; LWANGA, E. H.; GEISSEN, V.; HARKES, P. Beneath the Surface: Non-Target Effects of Multiple Pesticides on the Soil Microbiome in Organic and Conventional European Fields. 2025. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5279860>.

LANE, B. R.; KUHS, M. A.; ZARET, M. M.; SONG, Z.; BORER, E. T.; SEABLOOM, E. W.; SCHLATTER, D. C.; KINKEL, L. L. Foliar fungi-imposed costs to plant productivity moderate shifts in composition of the rhizosphere microbiome. *Frontiers in Plant Science*, v. 16, p. 1558191, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1558191>.

LEITÃO, F.; PINTO, G.; HENRIQUES, I. *Pinus radiata* seedlings rhizobiome shifts in response to foliar and root phosphite application. *European Journal of Soil Biology*, v. 123, p. 103688, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103688>.

LIAO, J.; LUO, L.; ZHANG, L.; WANG, L.; SHI, X.; YANG, H.; TAN, S.; TAN, L.; LIU, X.; WANG, D.; MAO, Z. Comparison of the effects of three fungicides on clubroot disease of tumorous stem mustard and soil bacterial community. *Journal of Soils and Sediments*, v. 22, n. 1, p. 256-271, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03073-z>.

LIU, L., WANG, Z., LUO, C., DENG, Y., WU, W., JIN, Y.; WANG, Y.; HUANG, H.; WEI, Z.; ZHU, Y.; HE, X.; GUO, L. Beneficial soil microbiome profiles assembled using tetracycline to alleviate root rot disease in *Panax notoginseng*. *Frontiers in Microbiology*, v. 16, p. 1571684, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1571684>.

LOYD, A. W.; PERCIVAL, D.; LANGILLE, M. G.; YURGEL, S. N. Changes to soil microbiome resulting from synergistic effects of fungistatic compounds pyrimethanil and fluopyram in lowbush blueberry agriculture, with nine fungicide products tested. *Microorganisms*, v. 11, n. 2, p. 410, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020410>.

LOYD, A. W.; PERCIVAL, D.; YURGEL, S. N. Effect of fungicide application on lowbush blueberries soil microbiome. *Microorganisms*, v. 9, n. 7, p. 1366, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071366>.

MEYER, C.; JEANBILLE, M.; BREUIL, M. C.; BRU, D.; HÖFER, K.; SCREPANTI, C.; PHILIPPOT, L. Soil microbial community fragmentation reveals indirect effects of fungicide exposure mediated by biotic interactions between microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, v. 470, p. 134231, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134231>.

MEYER, M.; STEINMETZ, Z.; BERENSTEIN, G.; SCHAUmann, G. E.; MUÑOZ, K. Agricultural Mulching and Fungicides—Impacts on Structure and Function of the Soil Microbial Community. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.70009>.

MICHALSKA-SMITH, M.; SCHLATTER, D. C.; POMBUBPA, N.; CASTLE, S. C.; GRANDY, A. S.; BORER, E. T.; SEABOLOOM, E. W.; KINKEL, L. L. Plant community richness and foliar fungicides impact soil Streptomyces inhibition, resistance, and resource use phenotypes. *Frontiers in Microbiology*, v. 15, p. 1452534, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1452534>.

NEILSON, J. A.; ROBERTSON, C. J.; SNOWDON, E. W.; YEVTSUSHENKO, D. P. Impact of fumigation on soil microbial communities under potato cultivation in southern Alberta. *American Journal of Potato Research*, v. 97, n. 2, p. 115-126, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09761-4>.

PALBERG, D.; EMERY, R. N. Compatibility of commercial fungicide formulations with plant-associated Methylobacterium. *Canadian Journal of Plant Science*, v. 105, p. 1-10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjps-2024-0169>.

PENG, N.; BI, Y.; JIAO, X.; ZHANG, X.; LI, J.; WANG, Y.; YANG, S.; LIU, Z.; GAO, W. A soil fumigant increases American ginseng (*Panax quinquefolius* L.) survival and growth under continuous cropping by affecting soil microbiome assembly: a 4-year *in situ* field experiment. *Microbiology Spectrum*, v. 12, n. 1, p. e01757-23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.01757-23>.

PEREIRA, M. G.; GALVÃO, T. F. Etapas de busca e seleção de artigos em revisões sistemáticas da literatura. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 23, p. 369-371, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5123/S1679-49742014000200019>.

PRZEMIENIECKI, S. W.; OĆWIEJA, M.; CIESIELSKI, S.; HALECKI, W.; MATRAS, E.; GORCZYCA, A. Chemical structure of stabilizing layers of negatively charged silver nanoparticles as an effector of shifts in soil bacterial microbiome under short-term exposure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 21, p. 14438, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192114438>.

QIN, G.; ZHANG, Q.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; ZHU, J.; YANG, Y.; PEIJNENBURG, W. J. G. M.; QIAN, H. Understanding the ecological effects of the fungicide difenoconazole on soil and *Enchytraeus crypticus* gut microbiome. *Environmental Pollution*, v. 326, p. 121518, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121518>.

REN, H.; WANG, H.; WANG, Q.; QI, X.; ZHANG, S.; YU, Z.; IJAZ, M.; ZHANG, M.; AHMED, T.; EL-SHARNOUBY, M.; HASSAN, M. M.; WANG, Z.; LI, B. Effect of fungicides on bayberry decline disease by modulating rhizosphere soil properties, microflora, and metabolites. *Agronomy*, v. 12, n. 3, p. 677, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030677>.

RIEDO, J.; DUEÑAS, J. F.; MBEDI, S.; SPARMANN, S.; RILLIG, M. C. Abrupt versus gradual application of pesticides: effects on soil bacterial and fungal communities. *bioRxiv*, p. 2025.03. 24.644867, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1101/j.envpol.2025.126859>.

ROMAN, D. L.; VOICULESCU, D. I.; FILIP, M.; OSTAFE, V.; ISVORAN, A. Effects of triazole fungicides on soil microbiota and on the activities of enzymes found in soil: A review. *Agriculture*, v. 11, n. 9, p. 893, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11090893>.

SABRA, M. A.; ALAIDAROS, B. A.; JASTANIAH, S. D.; HEFLISH, A. I.; GHAREEB, R. Y.; MACKLED, M. I.; EL-SAADONY, M. T.; ABDELSALAM, N. R.; CONTE-JUNIOR, C. A. Comparative effect of commercially available nanoparticles on soil bacterial community and “Botrytis fabae” caused brown spot: In vitro and in vivo experiment. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 934031, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.934031>.

SCHNURR, J.; FECKLER, A.; FILKER, S.; ZUBROD, J. P.; MAYER, J.; SCHÜTZENMEISTER, K.; JUNKUNST, H. F.; BUND SCHUH, M. Fungicides affect the structure and function of soil microorganisms and the physiology of four riparian tree species—evidence from a pot experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 302, p. 118641, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118641>.

STRELETSKII, R.; ASTAYKINA, A.; KRASNOV, G.; GORBATOV, V. Changes in bacterial and fungal community of soil under treatment of pesticides. *Agronomy*, v. 12, n. 1, p. 124, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010124>.

SUN, Y.; LIU, L.; ZENG, J.; WU, Y.; LIN, X. Enhanced cometabolism of benzo (a) anthracene by the lignin monomer vanillate is related to structural and functional responses of the soil microbiome. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 149, p. 107908, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107908>.

TAGELE, S. B.; GACHOMO, E. W. A comparative study: impact of chemical and biological fungicides on soil bacterial communities. *Environmental Microbiome*, v. 20, n. 1, p. 44, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00713-6>.

TELMOSSÉ, G.; CHAGNON, P. L.; LAFOND, J.; PARÉ, M. C. Soil fungal communities are primarily influenced by vegetation rather than fertilizers and fungicides in a lowbush blueberry production system. *Canadian Journal of Soil Science* 2025. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2025-0043>.

VASILCHENKO, A. V.; POSHVINA, D. V.; SEMENOV, M. V.; TIMOFEEV, V. N.; IASHNIKOV, A. V.; STEPANOV, A. A.; PERVUSHINA, A. N.; VASILCHENKO, A. S. Triazoles and strobilurin mixture affects soil microbial community and incidences of wheat diseases. *Plants*, v. 12, n. 3, p. 660, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030660>.

WANG, X.; LU, Z.; MILLER, H.; LIU, J.; HOU, Z.; LIANG, S.; ZHAO, X.; ZHANG, H.; BORCH, T. Fungicide azoxystrobin induced changes on the soil microbiome. *Applied Soil Ecology*, v. 145, p. 103343, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.005>.

WANG, Y.; JIN, Y.; HAN, P.; HAO, J.; PAN, H.; LIU, J. Impact of soil disinfection on fungal and bacterial communities in soil with cucumber cultivation. *Frontiers in microbiology*, v. 12, p. 685111, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.685111>.

WANG, Z.; YUN, S.; AN, Y.; SHU, L.; LI, S.; SUN, K.; ZHANG, W. Effect of fungicides on soil respiration, microbial community, and enzyme activity: A global meta-analysis (1975-2024). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 289, p. 117433, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117433>.

WEI, L.; ZHU, J.; ZHAO, D.; PEI, Y.; GUO, L.; GUO, J.; CUI, H.; LI, Y.; GAO, J. Microbial fungicides can positively affect aubergine photosynthetic properties, soil enzyme activity and microbial community structure. *PeerJ*, v. 12, p. e17620, 2024. DOI: <http://doi.org/10.7717/peerj.17620>.

WHITTINGTON, H. D.; SINGH, M.; TA, C.; AZCÁRATE-PERIL, M. A.; BRUNO-BÁRCENA, J. M. Accelerated biodegradation of the agrochemical ametoctradin by soil-derived microbial consortia. *Frontiers in Microbiology*, v. 11, p. 1898, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01898>.

WYDRO, U.; JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, A.; MEDO, J.; BOROWSKI, G.; KACZYŃSKI, P.; ŁOZOWICKA, B.; WOŁEJKO, E. Effect of *Pseudomonas Fluorescens* on Isofetamid Dissipation and Soil Microbial Activity. *Applied Sciences*, v. 14, n. 23, p. 10901, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142310901>.

YANG, Q.; YANG, X.; HUANG, X.; YE, W.; WANG, T.; CHENG, Z.; SHI, J.; LI, Y.; XU, J.; HE, Y. Seed coating with fungicide causes a beneficial shift in root-associated microbiomes of mature soybean. *oil Science Society of America Journal*, v. 87, n. 1, p. 43-62, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20482>.

YOU, X.; SUO, F.; YIN, S.; WANG, X.; ZHENG, H.; FANG, S.; ZHANG, C.; LI, F.; LI, Y. Biochar decreased enantioselective uptake of chiral pesticide metalaxyl by lettuce and shifted bacterial community in agricultural soil. *Journal of hazardous materials*, v. 417, p. 126047, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126047>.

ZHAI, R.; SHI, M.; CHEN, P.; WANG, Y. Prothioconazole stress reduces bacterial richness and alters enzyme activity in soybean rhizosphere. *Toxics*, v. 12, n. 10, p. 692, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12100692>.

ZHOU, W.; WANG, X.; JIANG, X.; LI, D.; ZHANG, M.; HUANG, D.; GUO, J.; YOU, J.; WANG, Q. Co-application of dazomet and azoxystrobin reconstructs soil microbial communities and suppresses the violet root rot of *Codonopsis tangshen* under a continuous cropping system. *Microbiology Spectrum*, v. 13, n. 9, p. e01088-25, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.01088-25>.

ZHU, Y.; KE, M.; YU, Z.; LEI, C.; LIU, M.; YANG, Y.; LU, T.; ZHOU, N.; PEIJNENBURG, W. J. G. M.; TANG, T.; QIAN, H. Combined effects of azoxystrobin and oxytetracycline on rhizosphere microbiota of *Arabidopsis thaliana*. *Environment International*, v. 186, p. 108655, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108655>