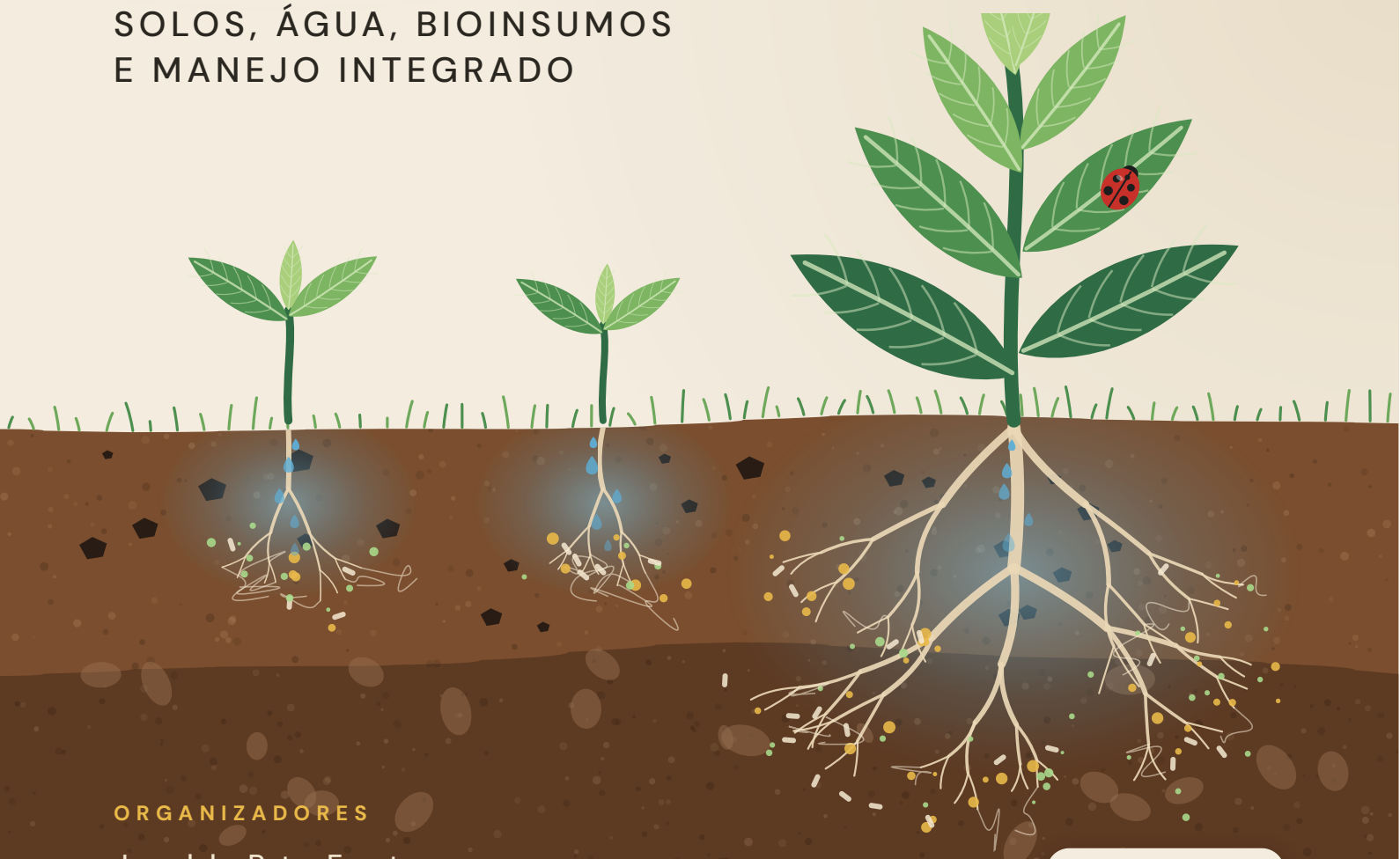
COLETÂNEA · CIÊNCIAS AGRÁRIAS

# Agricultura Sustentável *e* Sanidade Vegetal

## SOLOS, ÁGUA, BIOINSUMOS E MANEJO INTEGRADO




ORGANIZADORES

Jozadake Petry Fausto
Giselle Silva de Souza
José Vitor da Silva Nunes
Mariana Cabral do Nascimento Santos
Josilene Pereira Silva



EDITORA MANUAL

# AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E SANIDADE VEGETAL

## SOLOS, ÁGUA, BIOINSUMOS E MANEJO INTEGRADO

**ORGANIZADORES**

**JOZADAKE PETRY FAUSTO**
**GISELLE SILVA DE SOUZA**
**JOSÉ VITOR DA SILVA NUNES**
**MARIANA CABRAL DO NASCIMENTO SANTOS**
**JOSILENE PEREIRA SILVA**

# AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E SANIDADE VEGETAL

## SOLOS, ÁGUA, BIOINSUMOS E MANEJO INTEGRADO

1ª Edição

Editora Manual
2026

Copyright © dos autores e autoras. Todos os direitos reservados.

Esta obra é publicada em acesso aberto. O conteúdo dos capítulos, os dados apresentados, bem como a revisão ortográfica e gramatical são de responsabilidade de seus autores, detentores de todos os Direitos Autorais, que permitem o download e o compartilhamento, com a devida atribuição de crédito, mas sem que seja possível alterar a obra, de nenhuma forma, ou utilizá-la para fins comerciais.

**Catalogação na publicação**
**Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166**

A278

Agricultura sustentável e sanidade vegetal: solos, água, bioinsumos e manejo integrado / Organização de Jozadake Petry Fausto, Giselle Silva de Souza, José Vitor da Silva Nunes, et al. – Cariacica/ES: Manual, 2026.

Outras organizadoras: Mariana Cabral do Nascimento Santos, Josilene Pereira Silva.

Livro em PDF

ISBN 978-65-83121-34-9

1. Agricultura sustentável. 2. Bioinsumos. I. Fausto, Jozadake Petry (Organizador). II. Souza, Giselle Silva de (Organizadora). III. Nunes, José Vitor da Silva (Organizador). IV. Título.

CDD 630.72

Índice para catálogo sistemático

I. Agricultura sustentável

© 2026. Todos os direitos reservados.
Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida, armazenada ou transmitida por qualquer meio sem observância da legislação aplicável e dos direitos autorais, ressalvadas as hipóteses legalmente permitidas.

**EXPEDIENTE EDITORIAL**

**TÍTULO**
AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E SANIDADE VEGETAL - SOLOS, ÁGUA, BIOINSUMOS E MANEJO INTEGRADO

**REGISTROS**
ISBN: 978-65-83121-34-9
DOI: 10.29327/5963730

**EDITORA**
EDITORA MANUAL CNPJ: 12.072.139/0001-20
(27) 99750-4756 www.editoramanual.com.br editoramanualoficial@gmail.com
Rua Costa Brandão,785, Loja A, São Benedito, Cariacica, Espírito Santo – ES, CEP: 29145-340

**EDIÇÃO**
1ª edição, 2026

**ORGANIZAÇÃO**
JOZADAKE PETRY FAUSTO
GISELLE SILVA DE SOUZA
JOSÉ VITOR DA SILVA NUNES
MARIANA CABRAL DO NASCIMENTO SANTOS
JOSILENE PEREIRA SILVA

**EDITOR-CHEFE**
Afonso Henrique Souza de Assis

**PRODUTOR EDITORIAL**
Matheus Sales

**REVISÃO**
Organizador

**CAPA**
Claude

**REVISÃO DE TEXTO E CAPA**
Organizador

**DIAGRAMAÇÃO**
Cintia Campos

Obra publicada em Setembro de 2026.

## SUMÁRIO

**CAPÍTULO 1**

**MANEJO DA ÁGUA E SANIDADE VEGETAL: COMO A IRRIGAÇÃO MODULA A EPIDEMIOLOGIA DE DOENÇAS DE PLANTAS ..... 08**

João Vitor Trindade de Souza
Jozadake Petry Fausto
Gabrielle Ferreira de Lira
José Vitor da Silva Nunes
Giselle Silva de Souza
Josilene Pereira Silva

**CAPÍTULO 2**

**BIOCHAR COMO INDUTOR DE SOLOS SUPRESSIVOS ..... 27**

Moisés Silva de Mendonça Júnior
Jozadake Petry Fausto
Marcos Vinícius Cordeiro Conceição
Maria Laiane da Silva
Reverson da Silva
José Vitor da Silva Nunes
Giselle Silva de Souza
Josilene Pereira Silva

**CAPÍTULO 3**

**POTENCIAL DOS BIOINSUMOS NO CONTROLE BIOLÓGICO DE FITOPATÓGENOS AGRÍCOLAS: DO MODO DE AÇÃO ÀS NOVAS ESTRATÉGIAS DE MANEJO ..... 47**

Jozadake Petry Fausto
William Acioly de Gouveia
Moisés Silva de Mendonça Júnior
Giselle Silva de Souza
José Vitor da Silva Nunes
Josilene Pereira Silva

**CAPÍTULO 4**

**O PAPEL DO MANEJO HÍDRICO NA MODULAÇÃO DA MICROBIOTA E NA CONSTRUÇÃO DA SUPRESSIVIDADE A FITOPATÓGENOS DE SOLO ..... 67**

Gabrielle Ferreira de Lira
Jozadake Petry Fausto
João Pedro Silva Oliveira
Maria Laiane da Silva

Giselle Silva de Souza
José Vitor da Silva Nunes
Josilene Pereira Silva

**CAPÍTULO 5**

**ALHO ( Allium sativum L .) COMO FERRAMENTA BIOHERBICIDA: EVIDÊNCIAS ALELOPÁTICAS E USOS NO MANEJO SUSTENTÁVEL DE PLANTAS ESPONTÂNEAS ..... 86**

Hyago Magno Ramos
Jozadake Petry Fausto
Maria Laiane da Silva
Giselle Silva de Souza
José Vitor da Silva Nunes
Bruna Oliveira Alves

**CAPÍTULO 6**

**COMPATIBILIDADE DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS COM INSETICIDAS ORGANOSSINTÉTICOS NO CONTROLE DE PRAGAS AGRÍCOLAS ..... 103**

Samuel Farias Santana

**CAPÍTULO 7**

**POTENCIAL ALELOPÁTICO DE ESPÉCIES DO GÊNERO Turnera E SUAS IMPLICAÇÕES ECOLÓGICAS E AGRÍCOLAS ..... 122**

Hygor Maikon Ramos
Jozadake Petry Fausto
Xênia Luana Santos Silva
Giselle Silva de Souza
José Vitor da Silva Nunes

# CAPÍTULO 1

## MANEJO DA ÁGUA E SANIDADE VEGETAL: COMO A IRRIGAÇÃO MODULA A EPIDEMIOLOGIA DE DOENÇAS DE PLANTAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-1

João Vitor Trindade de Souza, e-mail: vitor.trindade0406@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/3617110704213189
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Gabrielle Ferreira de Lira, e-mail: gabrielle.lira@ceca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/1312682876827043
Jsé Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

**RESUMO**

A irrigação influencia a epidemiologia das doenças de plantas ao modificar a umidade do solo, o molhamento foliar, o microclima do dossel e a dispersão de inóculo. Este capítulo objetivou discutir como o manejo da água interfere na ocorrência e no progresso das doenças, considerando a qualidade da água, os métodos de irrigação e as decisões operacionais. Foi realizada uma revisão narrativa, qualitativa e descritivo-analítica da literatura, com ênfase em estudos publicados entre 2005 e 2024, além de referências clássicas relevantes. As evidências demonstram que a aspersão pode prolongar o molhamento dos tecidos e favorecer a dispersão de propágulos por respingos, enquanto o gotejamento reduz o contato da água com a parte aérea, embora possa aumentar a umidade localizada na rizosfera. Verificou-se também que rios, reservatórios, canais e sistemas de recirculação podem transportar fungos, oomicetos e bactérias fitopatogênicas. A frequência, a duração e o horário das aplicações determinam a formação de condições favoráveis à infecção, especialmente quando coincidem com temperaturas adequadas ao patógeno. Sensores, informações meteorológicas e modelos de previsão podem auxiliar na definição das lâminas e dos momentos de irrigação. Conclui-se que o manejo hídrico deve integrar as estratégias de manejo de doenças, associando monitoramento, manutenção da rede, qualidade da água e adequação das aplicações para reduzir a disseminação de patógenos e o progresso das epidemias.

**PALAVRAS-CHAVE:** fitopatógenos; molhamento foliar; microclima do dossel; dispersão de inóculo; irrigação de precisão.

## 1. INTRODUÇÃO

A água ocupa posição estratégica na agricultura, pois influencia tanto o desenvolvimento das culturas quanto às interações entre plantas e microrganismos. A irrigação reduz os efeitos da irregularidade das chuvas e do déficit hídrico, contribuindo para a estabilidade produtiva (Aung *et al*., 2018). Entretanto, também modifica a umidade do solo, o molhamento dos tecidos vegetais e o microclima do dossel, fatores diretamente relacionados à ocorrência de doenças (Agrios, 2005). Portanto, seus efeitos sobre a sanidade vegetal dependem da cultura, do patógeno, do método de aplicação e das condições meteorológicas (Swett *et al*., 2020).

O desenvolvimento das doenças resulta da interação entre hospedeiro suscetível, patógeno virulento e ambiente favorável ao longo do tempo. Nesse processo, a água interfere na sobrevivência, germinação, dispersão e penetração dos propágulos infectivos. Huber e Gillespie (1992) destacam que a duração da disponibilidade hídrica pode determinar a ocorrência da infecção e a velocidade das epidemias. Além disso, a presença de água na superfície vegetal favorece a sobrevivência e a multiplicação de microrganismos (Beattie, 2011), enquanto seu deslocamento pode transportar inóculo dentro da área cultivada ou entre diferentes unidades de produção (González-Domínguez *et al*., 2020).

Esses efeitos são mais evidentes quando a água alcança a parte aérea das plantas. A irrigação por aspersão forma filmes de água sobre folhas, flores e frutos, aumenta a umidade no interior do dossel e produz respingos capazes de transportar células bacterianas, esporos e tecidos infectados. O horário e a duração da aplicação determinam o período de molhamento foliar (Montazar *et al*., 2019), que, quando associado a temperaturas favoráveis, possibilita a germinação, a penetração e a colonização dos tecidos por diferentes fitopatógenos (Kim *et al*., 2019; Swett *et al*., 2020).

Em contraste, sistemas localizados, como o gotejamento, reduzem o contato da água com a parte aérea e podem limitar doenças dependentes do molhamento foliar e da dispersão por respingos (Montazar *et al*., 2019). Contudo, irrigações frequentes, volumes excessivos ou drenagem insuficiente mantêm o solo úmido, reduzem sua aeração e favorecem patógenos associados às raízes e ao colo. Dessa forma, nenhum método pode ser considerado universalmente favorável ou desfavorável à sanidade vegetal, pois seus efeitos variam conforme o patossistema e as condições de manejo (Swett *et al*., 2020; Wilson *et al*., 2024).

A qualidade fitossanitária da água também representa um componente relevante. Rios, canais, açudes, reservatórios e sistemas de recirculação podem abrigar propágulos de fungos, oomicetos e bactérias (Baroudy *et al*., 2018; Redekar *et al*., 2019). Quando essas fontes são utilizadas, a rede de irrigação pode transportar e distribuir o inóculo para áreas ainda não afetadas, especialmente em sistemas com recirculação (Rodríguez-Padrón *et al*., 2019). Assim, a irrigação pode conectar fontes de inóculo a hospedeiros suscetíveis e ampliar a disseminação dos fitopatógenos (Calderon *et al*., 2023).

Diante disso, o manejo da irrigação deve considerar a quantidade, a origem, a qualidade, a frequência, o horário e a forma de aplicação da água. O monitoramento da umidade do solo e do molhamento foliar, a adequação dos turnos de rega, a inspeção das fontes hídricas e o uso de tecnologias de precisão podem reduzir condições favoráveis às doenças (Montazar *et al*., 2019; Wilson *et al*., 2024). Assim, este capítulo objetiva discutir como o manejo da água

modula a epidemiologia das doenças de plantas, com ênfase no microclima, no molhamento foliar, na umidade do solo, na dispersão do inóculo, na qualidade da água e nos métodos de irrigação, destacando sua importância para o manejo integrado de doenças.

## 2. METODOLOGIA

O presente capítulo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre as relações entre o manejo da água e a epidemiologia das doenças de plantas. A revisão concentrou-se nos mecanismos pelos quais a irrigação interfere no microclima dos cultivos, no estado fisiológico das plantas e nas diferentes etapas do ciclo dos fitopatógenos, bem como nas implicações dessas relações para o manejo integrado de doenças.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que modo as decisões relacionadas à irrigação podem atender às necessidades hídricas das culturas e, simultaneamente, reduzir as condições favoráveis à ocorrência e ao progresso de doenças de plantas? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à irrigação agrícola, às relações hídricas na interação planta–microrganismo, ao molhamento foliar, à umidade do solo, à dispersão de propágulos, à qualidade fitossanitária da água e ao manejo integrado de doenças.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2005 e 2024, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de epidemiologia vegetal, infecção, dispersão de inóculo e modelagem do período de molhamento foliar. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *irrigation*, *plant disease*, *plant disease epidemiology*, *water management*, *leaf wetness*, *soil moisture*, *pathogen dispersal*, *irrigation water quality*, *waterborne plant pathogens*, *precision irrigation* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos, revisões, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta com a influência da irrigação sobre a sobrevivência, disseminação, germinação, infecção ou reprodução de fitopatógenos. Também foram considerados estudos que avaliassem os efeitos dos métodos, horários, frequências e volumes de irrigação sobre o microclima, o molhamento da parte aérea, a umidade do solo e a ocorrência de doenças. Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos voltados exclusivamente à produtividade ou à fisiologia vegetal sem

avaliação fitossanitária e documentos que não apresentassem informações suficientes para a interpretação dos resultados.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e a contribuição para a compreensão das relações entre irrigação e epidemiologia. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica e aplicada dos mecanismos descritos em diferentes culturas, sistemas de irrigação e patossistemas.

As informações extraídas dos estudos foram organizadas considerando autor e ano de publicação, cultura avaliada, agente causal, método de irrigação, origem e qualidade da água, compartimento vegetal afetado, condições ambientais e etapa do ciclo da doença influenciada. Também foram examinados o horário, a frequência e a duração da irrigação, quando essas informações estavam disponíveis. A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que os efeitos observados em determinada combinação entre hospedeiro, patógeno e ambiente não podem ser automaticamente extrapolados para outros sistemas produtivos.

A síntese das evidências foi estruturada em seis eixos temáticos: água como reguladora do processo epidemiológico; microclima, molhamento e infecção; influência da arquitetura e do método de irrigação; transporte e disseminação de inóculo pela água; decisões operacionais voltadas à supressão de epidemias; e irrigação de precisão, limitações e perspectivas. Essa organização permitiu integrar conhecimentos epidemiológicos e agronômicos, convertendo os resultados da literatura em fundamentos aplicáveis ao planejamento conjunto do manejo hídrico e da sanidade vegetal.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 A água como reguladora do processo epidemiológico

A disponibilidade de água regula diferentes etapas do processo epidemiológico, desde a sobrevivência e a disseminação do inóculo até a infecção, a colonização e a expressão dos sintomas. Na superfície vegetal, a água livre reidrata estruturas dormentes, favorece a germinação de esporos e facilita o deslocamento de células bacterianas até estômatos, hidatódios e ferimentos (Beattie, 2011). No solo, o conteúdo hídrico interfere na aeração, na difusão de nutrientes, na atividade microbiana e na mobilidade de propágulos, especialmente

dos zoósporos produzidos por oomicetos (Agrios, 2005; Hossain *et al*., 2024). A hidratação também altera as condições físicas e nutricionais dos espaços intercelulares da planta, podendo favorecer a multiplicação de determinados patógenos. Dessa forma, a água atua como elemento integrador entre as condições ambientais, a fisiologia do hospedeiro e a atividade do agente causal (Aung *et al*., 2018).

O efeito epidemiológico da água depende não apenas da quantidade disponível, mas também da duração e da frequência do molhamento e do compartimento vegetal atingido. Eventos breves podem não proporcionar o tempo necessário à germinação e à penetração, enquanto aplicações repetidas renovam a água livre e prolongam as condições favoráveis à infecção. Para muitos patógenos foliares, a duração do molhamento determina o período disponível para ativação do inóculo e estabelecimento da doença (Huber; Gillespie, 1992). Por essa razão, modelos epidemiológicos combinam frequentemente a temperatura com o número de horas de molhamento para estimar o risco de infecção. Embora muitos fungos necessitem de várias horas contínuas de umidade, o intervalo crítico varia conforme a espécie do patógeno, o isolado, o hospedeiro e as condições ambientais (Agrios, 2005; Hossain *et al*., 2024).

**Figura 1.** Participação da água nas principais etapas do processo epidemiológico das doenças de plantas, considerando seus efeitos na superfície vegetal, no solo, na rizosfera e no interior dos tecidos.




**Fonte:** Elaborada pelos autores com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT, da OpenAI, com base em Beattie (2011), Aung *et al.* (2018), Ekanayake *et al.* (2022), Gentzel *et al.* (2022) e Nomura *et al.* (2023).

No solo, os efeitos da água dependem da intensidade e da duração da condição hídrica. A saturação prolongada reduz a aeração, prejudica as raízes e aumenta a predisposição das plantas a podridões radiculares e vasculares (Swett *et al*., 2020). Em contrapartida, o déficit hídrico compromete o crescimento e as respostas de defesa vegetal (Aung *et al*., 2018). O manejo deve, portanto, atender à demanda da cultura sem prolongar a saturação do solo ou o molhamento dos órgãos suscetíveis (Agrios, 2005; Hossain *et al*., 2024).

A água também participa das estratégias de virulência de alguns fitopatógenos. Efetores de *Pseudomonas syringae* promovem a hidratação do apoplasto e formam microambientes favoráveis à multiplicação bacteriana e ao aparecimento de sintomas encharcados (Ekanayake *et al*., 2022). Em milho, esse processo também favorece a obtenção de compostos do hospedeiro por *Pantoea stewartii* (Gentzel *et al*., 2022). Nomura *et al*. (2023) demonstraram que efetores da família AvrE formam canais permeáveis à água e a pequenos solutos, promovendo o acúmulo de água e nutrientes no apoplasto e reduzindo respostas de defesa, como a deposição de calose. A planta, por sua vez, pode restringir a disponibilidade de água para limitar o crescimento microbiano (Beattie, 2011). A luminosidade também interfere nesse processo, pois intensifica a sinalização mediada pelo ácido salicílico e dificulta a formação de microambientes aquosos induzidos por *P. syringae* (Lajeunesse *et al*., 2023).

Essas relações apresentam implicações diretas para o manejo da irrigação. Aplicações no final da tarde ou à noite podem prolongar o molhamento do dossel e ampliar o período favorável à infecção, embora esse efeito dependa da cultura, do patógeno e das condições meteorológicas (Huber; Gillespie, 1992; Hossain *et al*., 2024). O horário da irrigação também pode influenciar a transpiração, o funcionamento estomático e a hidratação dos tecidos (Lajeunesse *et al*., 2023). Portanto, o princípio epidemiológico central consiste em fornecer água suficiente à cultura, reduzindo a coincidência entre inóculo viável, tecido suscetível e ambiente hídrico favorável à infecção (Beattie, 2011; Nomura *et al*., 2023).

## 3.2 Microclima do dossel, molhamento foliar e janelas de infecção

O microclima no interior do dossel pode diferir das condições registradas por estações meteorológicas externas. Densidade de plantas, área foliar, sombreamento e circulação do ar determinam a interceptação das gotas e a velocidade de secagem dos tecidos, produzindo variações na temperatura, na umidade e na duração do molhamento foliar (Rowlandson *et al*., 2015). A irrigação por aspersão modifica temporariamente esse ambiente ao depositar água sobre folhas, flores e frutos. Como diversos fitopatógenos dependem de períodos específicos

de molhamento, pequenas alterações na permanência da água livre podem modificar o risco de infecção (Huber; Gillespie, 1992; Hossain *et al*., 2024).

A duração do molhamento deve ser analisada em conjunto com a temperatura, pois a infecção ocorre quando ambas coincidem com as exigências do patógeno (Huber; Gillespie, 1992). Essa relação fundamenta modelos de previsão e sistemas de alerta fitossanitário. Entretanto, a precisão das estimativas depende da instalação e da representatividade dos sensores. Equipamentos posicionados em locais muito ventilados ou expostos ao sol podem indicar a secagem antes que ela ocorra nas camadas internas do dossel (Rowlandson *et al*., 2015). Por isso, o monitoramento deve reproduzir as condições dos órgãos mais suscetíveis (González-Domínguez *et al*., 2023).

Na aspersão, a pressão, a altura dos emissores, o tamanho das gotas e a interceptação pelo dossel influenciam a distribuição da água e o tempo de molhamento. O impacto das gotas também pode liberar e transportar propágulos presentes em lesões, resíduos culturais e superfícies contaminadas (Kim *et al*., 2019). O horário da aplicação interfere nesse processo, pois irrigações noturnas ou no final da tarde tendem a prolongar a umidade do dossel. Embora não exista um horário universalmente seguro, deve-se priorizar períodos que favoreçam a secagem e evitar que a irrigação prolongue o molhamento iniciado por chuva, orvalho ou condensação (Rowlandson *et al*., 2015; Belo *et al*., 2023; Hossain *et al*., 2024).

A sequência dos eventos meteorológicos também precisa ser incorporada ao planejamento. Uma irrigação realizada após chuva ou durante a formação de orvalho pode unir períodos inicialmente descontínuos de umidade, originando uma janela suficientemente longa para completar a infecção. Da mesma forma, irrigar antes de uma precipitação prevista pode ser agronomicamente redundante e ampliar a favorabilidade ambiental. González-Domínguez *et al.* (2023) destacam que a integração entre dados meteorológicos e modelos de risco melhora a oportunidade das intervenções fitossanitárias.

Nesse contexto, o acompanhamento da umidade do solo, da evapotranspiração e da previsão de chuva permite antecipar, adiar, reduzir ou fracionar a lâmina de irrigação (Belo *et al*., 2023). Essa abordagem mantém a cultura fora do estresse hídrico e, ao mesmo tempo, reduz a coincidência entre inóculo viável, tecidos suscetíveis e períodos prolongados de molhamento favoráveis ao patógeno (Hossain *et al*., 2024).

**Figura 2.** Influência do microclima do dossel, do horário da irrigação e das condições meteorológicas sobre a duração do molhamento foliar e a janela de infecção dos fitopatógenos.




**Fonte:** Elaborada pelos autores com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT, da OpenAI, com base em Huber e Gillespie (1992), Rowlandson *et al.* (2015), Kim *et al.* (2019), González-Domínguez *et al.* (2023) e Hossain *et al.* (2024).

### 3.3 Arquitetura da irrigação e perfis de risco fitossanitário

Os métodos de irrigação distribuem a água em diferentes compartimentos do agroecossistema e, consequentemente, apresentam perfis epidemiológicos distintos. A aspersão amplia o contato da água com a parte aérea, prolonga o molhamento e pode favorecer doenças foliares, sobretudo aquelas causadas por patógenos disseminados por respingos (Agrios, 2005). O gotejamento concentra a aplicação na zona radicular e tende a manter folhas, flores e frutos secos, reduzindo condições favoráveis à infecção da parte aérea. Entretanto, pulsos excessivos ou drenagem deficiente podem formar zonas de solo permanentemente úmidas ao redor das raízes (Redekar *et al*., 2019). A microaspersão apresenta condição intermediária, pois aumenta a umidade próxima ao solo e pode molhar folhas inferiores, frutos e o colo das plantas. Nos sistemas por sulcos ou inundação, o escoamento superficial também pode transportar solo contaminado e propágulos entre diferentes pontos do cultivo (Belo *et al*., 2023).

Os benefícios fitossanitários da irrigação localizada foram demonstrados em cultivos de espinafre orgânico. Montazar *et al.* (2019) observaram menor incidência de míldio nos tratamentos irrigados por gotejamento após a emergência, em comparação com aqueles submetidos à aspersão. A redução esteve associada principalmente à menor duração do

molhamento foliar, condição essencial para a infecção e a esporulação do agente causal. Além do efeito sobre a doença, o sistema localizado favoreceu o uso mais eficiente da água e apresentou viabilidade para a produção comercial da cultura (Montazar *et al*., 2019). Nesse caso, a substituição do método de irrigação interferiu diretamente em uma etapa crítica do ciclo epidemiológico, demonstrando que o manejo da água pode atuar como medida complementar de controle.

Resultados semelhantes foram obtidos no cultivo da cebola. Wilson *et al.* (2024) verificaram menor incidência e severidade de doença bacteriana nas parcelas irrigadas por gotejamento. Em contraste, a aspersão prolongou o molhamento do dossel e criou condições favoráveis à disseminação por respingos e ao desenvolvimento da bacteriose. Essas evidências não indicam que o gotejamento seja universalmente superior, mas demonstram sua importância quando a água livre sobre a parte aérea constitui requisito para a infecção. Em espinafre e cebola, por exemplo, a irrigação localizada limitou o contato da água com os tecidos suscetíveis e reduziu a favorabilidade do ambiente (Montazar *et al*., 2019; Wilson *et al*., 2024). Assim, a escolha do sistema deve partir do conhecimento do ciclo da doença e da identificação da etapa epidemiológica que se pretende interromper.

Para patógenos radiculares, o desempenho sanitário do gotejamento depende da extensão e da permanência do bulbo molhado. Em solos pouco permeáveis, irrigações prolongadas ou frequentes podem reduzir a aeração, prejudicar as raízes e favorecer organismos adaptados à elevada umidade (Redekar *et al*., 2019). A distribuição da água também pode alterar a mobilidade de propágulos no solo e, quando a fonte hídrica está contaminada, conduzir o inóculo diretamente à rizosfera, favorecendo sua introdução e dispersão na área cultivada (Pérez-Rodríguez *et al*., 2016; Rushford *et al*., 2022). Assim, o manejo deve considerar as características do solo, a drenagem, o sistema radicular, a qualidade da água e a distribuição do patógeno.

A avaliação fitossanitária também deve considerar as condições econômicas e operacionais da propriedade. Sistemas localizados, quando bem dimensionados e manejados, podem economizar água, reduzir o molhamento da parte aérea e permitir maior controle da zona umedecida (Belo *et al*., 2023). Entretanto, falhas como vazamentos, entupimentos, pressão inadequada e irrigação excessiva podem aumentar a heterogeneidade hídrica e favorecer patógenos radiculares, sobretudo quando a rizosfera permanece saturada (Redekar *et al*., 2019). Portanto, a adequação do método depende da cultura, do solo, do patógeno, da qualidade da água e da capacidade de manejo do produtor.

**Tabela 1.** Métodos de irrigação, riscos epidemiológicos e medidas de manejo.

| Método | Alteração ambiental e risco | Evidência científica | Medidas de manejo |
|---|---|---|---|
| Aspersão | Molha a parte aérea, prolonga a umidade e dispersa o inóculo pelo impacto das gotas. | O impacto das gotas pode suspender e dispersar esporos (Kim *et al*., 2019). A aspersão também favoreceu maior bacteriose da cebola em comparação com o gotejamento (Wilson *et al*., 2024). | Ajustar horário e duração; evitar prolongar o molhamento causado por chuva ou orvalho; melhorar a uniformidade e a ventilação. |
| Gotejamento | Mantém a parte aérea seca, mas pode causar saturação localizada e conduzir inóculo à rizosfera. | O método reduziu o míldio do espinafre (Montazar *et al*., 2019) e a bacteriose da cebola (Wilson *et al*., 2024). | Monitorar o bulbo molhado, ajustar os pulsos, garantir drenagem e avaliar a qualidade da água. |
| Microaspersão | Eleva a umidade próxima ao solo e pode molhar o colo, folhas inferiores e frutos. | O risco depende do alcance das gotas e da duração do molhamento nos tecidos suscetíveis (Huber; Gillespie, 1992; Agrios, 2005). | Regular pressão, raio, altura e posição dos emissores, evitando atingir órgãos suscetíveis. |
| Sulcos ou inundação | Promove escoamento superficial, encharcamento e transporte de solo contaminado. | Estruturas viáveis de *Verticillium dahliae* podem ser transportadas pela água de rios e redes de irrigação (Baroudy *et al*., 2018). | Controlar o fluxo, impedir o retorno de água contaminada, nivelar a área e favorecer a drenagem. |
| Recirculação | Reutiliza a água e pode acumular e redistribuir continuamente os patógenos. | Oomicetos dos gêneros *Phytophthora*, *Pythium* e *Phytopythium* foram mais abundantes na água recirculada de viveiro (Redekar *et al*., 2019). | Monitorar, filtrar e desinfetar a água; evitar a mistura entre lotes com condições sanitárias distintas. |

Fonte: Elaborada pelos autores com base na literatura citada (2026).

## 3.4 A água de irrigação como reservatório e corredor de inóculo

A avaliação da água de irrigação costuma priorizar atributos como salinidade, sodicidade, turbidez e risco de entupimento dos emissores. Entretanto, sua qualidade fitossanitária também deve ser considerada, principalmente quando o abastecimento provém de rios, canais, açudes, reservatórios ou sistemas de recirculação. Essas fontes podem transportar estruturas de sobrevivência, esporos, zoósporos e outros propágulos capazes de introduzir patógenos em áreas cultivadas (Redekar *et al*., 2019). A detecção de um microrganismo na água, porém, não comprova a ocorrência da doença, pois o propágulo precisa permanecer viável, atingir o hospedeiro em quantidade suficiente e encontrar condições favoráveis à infecção. Ainda assim, fontes contaminadas podem aumentar a pressão de inóculo e abastecer continuamente a área com agentes potencialmente patogênicos (Calderon *et al*., 2023).

Os oomicetos merecem atenção devido à produção de zoósporos móveis e à associação com ambientes aquáticos. Em viveiro comercial, Redekar *et al.* (2019) identificaram elevada diversidade de *Phytophthora*, *Pythium* e *Phytopythium* em sistemas de recirculação, com maior abundância na água reciclada, indicando acúmulo e redistribuição do inóculo. Embora a cloração possa reduzir a viabilidade dos propágulos, sua eficiência depende da concentração, do tempo de contato e das características da água. Assim, reservatórios, canais, tubulações e estruturas de retorno devem ser considerados componentes interligados de uma mesma unidade epidemiológica (Redekar *et al*., 2019).

Em pomares de abacateiro nas Ilhas Canárias, Rodríguez-Padrón *et al.* (2019) também recuperaram espécies de *Phytophthora* e *Phytopythium* em água, substratos e plantas provenientes de viveiros e reservatórios. A ocorrência de espécies comuns aos viveiros e pomares sugeriu a participação da água e das mudas na dispersão dos patógenos. Após melhorias sanitárias nos viveiros, observou-se menor incidência nas avaliações posteriores, reforçando a importância da vigilância preventiva em ambientes com circulação contínua de água e material propagativo (Rodríguez-Padrón *et al*., 2019).

A água pode transportar estruturas resistentes de fungos habitantes do solo. Baroudy *et al.* (2018) detectaram microescleródios viáveis de *Verticillium dahliae* em rios, canais e resíduos retidos em filtros de irrigação de pomares comerciais. Esse achado demonstra que os filtros, além de evitarem entupimentos, podem atuar como pontos de monitoramento da carga biológica transportada pela água. Sua inspeção e a análise dos resíduos acumulados podem auxiliar na identificação precoce de patógenos e orientar medidas de tratamento e higienização do sistema (Baroudy *et al*., 2018).

**Figura 3.** Rede de irrigação como corredor epidemiológico, destacando os pontos potenciais de entrada, sobrevivência, acúmulo, detecção, tratamento e redistribuição de propágulos fitopatogênicos entre a fonte hídrica e a área cultivada.




**Fonte:** Elaborada pelos autores com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT, da OpenAI, com base em Baroudy *et al.* (2018), Redekar *et al.* (2019), Rodríguez-Padrón *et al.* (2019), Rushford *et al.* (2022) e Calderon *et al.* (2023).

Ferramentas moleculares também ampliaram a detecção de microrganismos presentes em baixas concentrações. Calderon *et al.* (2023), utilizando sequenciamento da região ITS2, identificaram táxons fúngicos potencialmente fitopatogênicos em água do Rio Grande, com diferenças na composição entre o reservatório e a válvula de irrigação. Contudo, a detecção de DNA não comprova, isoladamente, a viabilidade ou infectividade dos organismos, sendo recomendada sua associação a métodos de cultivo, testes de patogenicidade ou outras técnicas confirmatórias (Calderon *et al*., 2023).

A vigilância fitossanitária deve abranger toda a rede de irrigação e considerar variações temporais. Rushford *et al.* (2022) detectaram diferentes espécies de *Pythium* em fontes e componentes de sistemas de irrigação, com variação conforme o ponto e o método de amostragem. Assim, o monitoramento deve incluir captação, reservatórios, filtros, tubulações e emissores, combinando técnicas de cultivo, iscas biológicas e métodos moleculares (Rushford *et al*., 2022). Avaliações periódicas reduzem o risco de subestimação dos patógenos e permitem a adoção de medidas corretivas antes de sua disseminação pela área irrigada.

## 3.5 Decisões de manejo que podem interromper epidemias

O manejo sanitário da irrigação deve começar pela identificação da etapa do ciclo da doença que pode ser modificada. Quando o fator crítico é o molhamento foliar, as medidas devem reduzir o contato da água com os tecidos e acelerar a secagem. Para patógenos radiculares, o foco recai sobre saturação, aeração, drenagem e frequência de aplicação. Se a água constitui a fonte de inóculo, monitoramento, filtração, tratamento e separação de setores tornam-se prioritários. Essa lógica evita recomendações baseadas apenas na preferência por determinado equipamento e direciona a intervenção ao mecanismo epidemiológico predominante (Agrios, 2005; Redekar *et al*., 2019; Belo *et al*., 2023).

A frequência das aplicações determina a alternância entre umedecimento e secagem e pode modificar a intensidade das doenças. Gao *et al.* (2018), em experimento de campo com *Apocynum venetum*, verificaram que intervalos de sete, nove e onze dias reduziram o índice máximo de ferrugem e a área abaixo da curva de progresso da doença em comparação com irrigações a cada três dias. Em oliveiras suscetíveis da cultivar 'Picual', Pérez-Rodríguez *et al.* (2016) observaram que irrigações curtas e frequentes favoreceram o desenvolvimento da murcha de *Verticillium*. Esses estudos convergem quanto à influência do regime hídrico, embora os intervalos adequados não possam ser transferidos diretamente entre culturas, solos e patógenos.

O momento de encerramento da irrigação também pode interferir nas doenças próximas à colheita. Belo *et al.* (2023) verificaram que suspender a aspersão aproximadamente duas semanas mais cedo, quando somente 5–10% das plantas de cebola apresentavam tombamento das folhas, reduziu as perdas por podridão bacteriana em comparação com a manutenção da irrigação até 90% de tombamento. A antecipação não reduziu a produtividade comercial nem alterou a distribuição do tamanho dos bulbos nas condições avaliadas. Em contrapartida, duplicar a frequência com eventos mais curtos não aumentou a doença, mostrando que o efeito do calendário depende do estádio fenológico e da forma como a água modifica os tecidos suscetíveis.

A manutenção hidráulica integra o manejo epidemiológico. Baixa uniformidade cria simultaneamente zonas excessivamente úmidas e pontos de déficit, aumentando a variabilidade fisiológica e sanitária do cultivo. Vazamentos, emissores desalinhados e alterações de pressão podem molhar partes da planta que deveriam permanecer secas. A inspeção de filtros, linhas laterais, conexões e dispositivos de drenagem deve ser acompanhada por registros de vazão, pressão e ocorrência de sintomas. Dessa maneira, falhas hidráulicas podem ser relacionadas

espacialmente aos focos da doença e corrigidas antes que contribuam para novos ciclos de infecção.

Nenhum ajuste hídrico substitui as demais medidas de controle. Cultivares resistentes, material propagativo sadio, rotação de culturas, eliminação de resíduos, nutrição equilibrada, controle biológico e uso criterioso de produtos fitossanitários permanecem indispensáveis. A contribuição da irrigação consiste em reduzir a favorabilidade ambiental, limitar a entrada ou o deslocamento do inóculo e diminuir a taxa de progresso da epidemia. Quando integrada às demais táticas, essa redução pode aumentar a eficiência do manejo e diminuir a dependência de intervenções curativas (Agrios, 2005; González-Domínguez *et al*., 2023; Hossain *et al*., 2024).

**Tabela 2.** Pontos críticos para integrar irrigação e manejo de doenças.

| Ponto crítico | Indicadores | Evidência científica | Ajuste recomendado e efeito esperado |
|---|---|---|---|
| Molhamento foliar prolongado | Chuva, umidade do dossel, temperatura e tempo de secagem | Temperatura e duração do molhamento determinam o risco de infecção (Huber; Gillespie, 1992), enquanto o método de medição influencia sua estimativa (Rowlandson *et al*., 2015). | Ajustar o horário ou reduzir a duração da aplicação, diminuindo as condições para germinação e infecção. |
| Molhamento de órgãos suscetíveis | Alcance do jato e deposição em folhas, flores e frutos | O gotejamento reduziu o míldio do espinafre (Montazar *et al*., 2019) e a bacteriose da cebola (Wilson *et al*., 2024) em comparação com a aspersão. | Reposicionar emissores ou adotar irrigação localizada, reduzindo água livre e dispersão por respingos. |
| Excesso de umidade no solo | Umidade, drenagem, frequência dos pulsos e condição radicular | Irrigações curtas e frequentes favoreceram a murcha de *Verticillium* em oliveiras 'Picual' (Pérez-Rodríguez *et al*., 2016). | Aumentar o intervalo entre aplicações e corrigir a drenagem, favorecendo a aeração do solo. |
| Água contaminada | Origem da água, turbidez, análises microbiológicas e resíduos dos filtros | Propágulos de oomicetos e fungos foram detectados em fontes, reservatórios e filtros de irrigação (Baroudy *et al*., 2018; Redekar *et al*., 2019; Calderon *et al*., 2023). | Filtrar, desinfetar ou substituir a fonte, reduzindo a introdução e a redistribuição do inóculo. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Irrigação em fase sensível | Estádio da cultura, previsão meteorológica e histórico da doença | A antecipação da última aspersão reduziu podridões bacterianas da cebola sem comprometer a produção comercial (Belo *et al*., 2023). | Reprogramar ou encerrar a irrigação quando houver segurança agronômica, reduzindo a exposição dos tecidos. |
| Baixa uniformidade | Pressão, vazão, vazamentos e distribuição da umidade | A heterogeneidade da aplicação produz zonas de excesso e déficit hídrico, dificultando o manejo de doenças (Agrios, 2005; González-Domínguez *et al*., 2023). | Realizar manutenção e redimensionar os setores, reduzindo áreas saturadas e plantas sob estresse. |

**Fonte:** Elaborada pelos autores com base na literatura citada (2026).

## 3.6 Irrigação de precisão, previsão de risco e manejo adaptativo

A irrigação de precisão amplia a possibilidade de conciliar a demanda hídrica das culturas com a redução do risco fitossanitário. Em vez de aplicar água segundo calendários fixos, o manejo pode combinar umidade ou tensão da água no solo, evapotranspiração, estádio fenológico, previsão de chuva e capacidade de armazenamento do solo. Quando a duração do molhamento foliar e modelos epidemiológicos são incorporados, a decisão deixa de responder apenas a quanto irrigar e passa a considerar quando e como aplicar água com menor probabilidade de favorecer a infecção (Huber; Gillespie, 1992; González-Domínguez *et al*., 2023).

Sensores instalados no solo auxiliam na prevenção do déficit e da saturação, mas precisam representar a profundidade explorada pelas raízes e a geometria do volume molhado. Em sistemas localizados, medições realizadas fora do bulbo podem indicar falsamente a necessidade de irrigar, enquanto sensores muito próximos ao emissor podem superestimar a disponibilidade de água. O número, a profundidade e a distribuição dos dispositivos devem considerar a variabilidade de solo, relevo e vazão. Os dados precisam ser avaliados juntamente com inspeções das raízes e do funcionamento do sistema.

No dossel, sensores de molhamento fornecem informações relevantes para modelos de risco, mas não reproduzem perfeitamente todas as superfícies vegetais. Rowlandson *et al.* (2015) destacaram que propriedades como rugosidade, orientação e capacidade de retenção modificam o período úmido. Sensores biomiméticos desenvolvidos por Yeon *et al.* (2023), produzidos a partir da replicação de superfícies foliares, apresentaram estimativas mais representativas do molhamento em espécies com características contrastantes. Esses avanços

demonstram que a precisão não depende somente da automação, mas da correspondência entre o sensor e o tecido que se pretende representar.

Modelos de previsão integram temperatura, umidade, chuva, molhamento e desenvolvimento do hospedeiro para identificar condições compatíveis com infecção. González-Domínguez *et al.* (2023) ressaltaram que os modelos evoluíram de regras empíricas simples para sistemas mecanísticos e dinâmicos, capazes de incorporar diferentes estádios do patógeno e da cultura. Aplicados à irrigação, esses sistemas podem indicar quando uma aspersão prolongaria uma janela de risco ou quando a chuva prevista torna a aplicação desnecessária. Sua utilidade, contudo, depende de validação regional, dados confiáveis e existência de uma decisão de manejo capaz de alterar o resultado.

A adoção enfrenta limitações relacionadas ao custo, à conectividade, à manutenção, à calibração e à capacitação dos usuários. Instrumentos simples, como tensiômetros, pluviômetros, inspeção do molhamento e registros conjuntos de irrigação e doença, podem gerar benefícios expressivos quando utilizados de forma consistente. O manejo adaptativo deve seguir um ciclo contínuo: observar o sistema, estimar o risco, executar uma decisão, registrar o resultado e ajustar a estratégia. Automatizar uma regra inadequada apenas aumenta a velocidade de repetição do erro; por isso, a sofisticação tecnológica deve ser acompanhada por conhecimento agronômico e fitopatológico.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A irrigação interfere diretamente na epidemiologia das doenças de plantas ao modificar o molhamento foliar, a umidade do solo, o microclima do dossel e a dispersão de inóculo. Seus efeitos dependem do método, da lâmina, da frequência e do horário de aplicação, bem como das características da cultura, do patógeno e do ambiente. Portanto, nenhum sistema de irrigação é universalmente favorável ou desfavorável à sanidade vegetal.

A qualidade da água e as condições da rede também devem ser monitoradas, pois fontes, reservatórios, filtros, tubulações e emissores podem favorecer o transporte e a distribuição de fitopatógenos. A integração de sensores, dados meteorológicos e modelos de previsão pode orientar aplicações mais eficientes e reduzir condições favoráveis à infecção.

Conclui-se que o manejo da irrigação deve fazer parte do manejo integrado de doenças. A escolha adequada do sistema, o ajuste das aplicações, o monitoramento da água e a manutenção da rede podem limitar a disseminação de patógenos e reduzir o progresso das epidemias, contribuindo para uma produção mais eficiente e sustentável.

## REFERÊNCIAS


AGRIOS, G. N. Plant pathology. 5. ed. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005.

ASSEFA, T. et al. Experimental evaluation of conservation agriculture with drip irrigation for water productivity in Sub-Saharan Africa. Water, v. 11, n. 3, art. 530, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w11030530.

AUNG, K.; JIANG, Y.; HE, S. Y. The role of water in plant–microbe interactions. The Plant Journal, v. 93, n. 4, p. 771–780, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/tpj.13795.

BAROUDY, F. et al. Long-distance spread of Verticillium dahliae through rivers and irrigation systems. Plant Disease, v. 102, n. 8, p. 1559–1565, 2018. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-08-17-1189-RE.

BEATTIE, G. A. Water relations in the interaction of foliar bacterial pathogens with plants. Annual Review of Phytopathology, v. 49, p. 533–555, 2011. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114436.

BELO, T. R. et al. Reducing the risk of onion bacterial diseases through managing irrigation frequency and final irrigation timing. Agricultural Water Management, v. 288, art. 108476, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108476.

CALDERON, M.; YANG, C.; ANCONA, V. Assessing fungal plant pathogen presence in irrigation water from the Rio Grande River in South Texas, USA. Agriculture, v. 13, n. 7, art. 1401, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13071401.

ÇETIN, Ö.; KARA, A. Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. Agricultural Water Management, v. 223, art. 105693, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105693.

CHOROLQUE, A. et al. Incidence of bacterial diseases associated with irrigation methods on onions (Allium cepa). Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 98, n. 14, p. 5534–5540, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.9101.

EKANAYAKE, G.; GOHMANN, R.; MACKEY, D. A method for quantitation of apoplast hydration in Arabidopsis leaves reveals water-soaking activity of effectors of Pseudomonas syringae during biotrophy. Scientific Reports, v. 12, art. 18363, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-22472-x.

GAO, P. et al. The influence of irrigation frequency on the occurrence of rust disease (Melampsora apocyni) and determination of the optimum irrigation regime in organic Apocynum venetum production. Agricultural Water Management, v. 205, p. 81–89, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.026.

GENTZEL, I. et al. Dynamic nutrient acquisition from a hydrated apoplast supports biotrophic proliferation of a bacterial pathogen of maize. Cell Host & Microbe, v. 30, n. 4, p. 502–517.e4, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chom.2022.03.017.

GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, E. et al. A general model for the effect of crop management on plant disease epidemics at different scales of complexity. Agronomy, v. 10, n. 4, art. 462, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10040462.

GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, E. et al. Plant disease models and forecasting: changes in principles and applications over the last 50 years. Phytopathology, v. 113, n. 4, p. 678–693, 2023. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0362-KD.

GUNDIM, A. S. et al. Precision irrigation trends and perspectives: a review. Ciência Rural, v. 53, n. 8, e20220155, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220155.

HOSSAIN, M. M. et al. Plant disease dynamics in a changing climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management. Discover Agriculture, v. 2, art. 132, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44279-024-00144-w.

HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. Annual Review of Phytopathology, v. 30, p. 553–577, 1992. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.py.30.090192.003005.

JHA, A. K. et al. Impact of irrigation method on water use efficiency and productivity of fodder crops in Nepal. Climate, v. 4, n. 1, art. 4, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/cli4010004.

KIM, S.; PARK, H.; GRIGORIEV, R. O.; HONG, J. Vortex-induced dispersal of a plant pathogen by raindrop impact. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 116, n. 11, p. 4917–4922, 2019. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1820318116.

LAJEUNESSE, G. et al. Light prevents pathogen-induced aqueous microenvironments via potentiation of salicylic acid signaling. Nature Communications, v. 14, art. 713, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-023-36382-7.

MONTAZAR, A.; CAHN, M.; PUTMAN, A. Research advances in adopting drip irrigation for California organic spinach: preliminary findings. Agriculture, v. 9, n. 8, art. 177, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture9080177.

NGUYEN, B. H.; GILBERT, G. S.; ROLANDI, M. A bio-mimetic leaf wetness sensor from replica molding of leaves. Advanced Sensor Research, v. 2, art. 2200033, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/adsr.202200033.

NOMURA, K. et al. Bacterial pathogens deliver water- and solute-permeable channels to plant cells. Nature, v. 621, p. 586–591, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-023-06531-5.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, M. et al. The effect of short irrigation frequencies on the development of Verticillium wilt in the susceptible olive cultivar 'Picual' under field conditions. Plant Disease, v. 100, n. 9, p. 1880–1888, 2016. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-09-15-1018-RE.

REDEKAR, N. R.; EBERHART, J. L.; PARKE, J. L. Diversity of Phytophthora, Pythium, and Phytopythium species in recycled irrigation water in a container nursery. Phytobiomes Journal, v. 3, n. 1, p. 31–45, 2019. DOI: https://doi.org/10.1094/PBIOMES-10-18-0043-R.

RODRÍGUEZ-PADRÓN, C.; RODRÍGUEZ, A.; SIVERIO, F. Survey in nurseries and irrigation water reservoirs as sources of oomycetes found in avocado orchards in the Canary

Islands. Plant Disease, v. 103, n. 6, p. 1264–1274, 2019. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-08-18-1412-RE.

ROWLANDSON, T. et al. Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. Plant Disease, v. 99, n. 3, p. 310–319, 2015. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE.

RUSHFORD, C. A.; NORTH, R. L.; MILLER, G. L. Detection of Pythium spp. in golf course irrigation systems. Plant Disease, v. 106, n. 1, p. 46–56, 2022. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-02-21-0399-RE.

SWETT, C. L.; LOWE, A.; UYEDA, J. Managing crop diseases under water scarcity. Annual Review of Phytopathology, v. 58, p. 387–406, 2020. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-030320-041421.

WILSON, R. G.; AEGERTER, B. J.; LAHUE, G. T. The influence of sprinkler and drip irrigation on the incidence and severity of bacterial disease in onions grown in northeast California. Plant Health Progress, v. 25, n. 3, p. 293–298, 2024. DOI: https://doi.org/10.1094/PHP-01-24-0002-RS.

# CAPÍTULO 2

## BIOCHAR COMO INDUTOR DE SOLOS SUPRESSIVOS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-2

Moisés Silva de Mendonça Júnior, e-mail: moises.agro2025@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/6303760195972174
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Marcos Vinícius Cordeiro Conceição, e-mail: marcos.conceicao@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/0171271025018760
Maria Laiane da Silva, e-mail: maria.laiane@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5197880533423893
Reverson da Silva, e-mail: reverson.silva@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/8990903516954211
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

**RESUMO**

As doenças causadas por fitopatógenos habitantes do solo representam importante limitação à produção agrícola, devido à persistência desses organismos no ambiente e à dificuldade de seu manejo. Nesse contexto, o biochar tem sido apontado como uma alternativa capaz de contribuir para a indução de solos supressivos por meio de modificações nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo. Este capítulo teve como objetivo analisar o potencial do biochar na supressão de doenças de plantas, considerando seus efeitos sobre os atributos edáficos, o microbioma rizosférico, os mecanismos de antagonismo aos fitopatógenos e a ativação das defesas vegetais. Para isso, foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, com ênfase em estudos publicados entre 2010 e 2026. As evidências analisadas demonstram que a aplicação de biochar pode reduzir a densidade do solo, aumentar a porosidade e a retenção de água, modificar o pH e a capacidade de troca catiônica, além de favorecer a disponibilidade de nutrientes e proporcionar micro-hábitats para microrganismos benéficos. Essas alterações podem promover a reestruturação do microbioma, o recrutamento de grupos antagonistas, a competição por recursos e sítios de colonização, a produção de compostos antimicrobianos e a indução de respostas sistêmicas de defesa nas plantas. Estudos em diferentes patossistemas demonstram redução da severidade de doenças causadas por fungos, oomicetos e bactérias; entretanto, a resposta ao biochar apresenta elevada variabilidade e depende da matéria-prima, das condições de pirólise, da dose aplicada, das características do solo, da cultura e do agente etiológico. Conclui-se que o biochar apresenta potencial para contribuir para a formação de solos supressivos, mas sua utilização deve ser baseada na caracterização prévia do material e na validação em condições específicas de cultivo, sendo recomendado como componente complementar do manejo integrado de doenças de plantas.

**PALAVRAS-CHAVE:** biochar; solos supressivos; fitopatógenos; microbioma do solo; controle biológico; manejo integrado de doenças.

## 1. INTRODUÇÃO

As doenças causadas por fitopatógenos habitantes do solo constituem uma limitação persistente à produção agrícola, especialmente porque muitos desses organismos formam

estruturas de resistência, apresentam ampla gama de hospedeiros e sobrevivem por longos períodos no ambiente. O manejo dessas doenças é dificultado pela distribuição irregular dos patógenos no solo e pela influência simultânea da umidade, temperatura, fertilidade e atividade microbiana sobre o processo infeccioso (Weller *et al*., 2002).

Embora fungicidas, fumigantes e outros produtos químicos possam reduzir temporariamente o inóculo, sua eficiência nem sempre é estável, além de existirem preocupações relacionadas à seleção de populações resistentes, aos resíduos e aos impactos sobre organismos não alvo (De Corato, 2020). Nesse contexto, estratégias capazes de fortalecer os mecanismos naturais de regulação biológica vêm recebendo maior atenção, principalmente aquelas fundamentadas no manejo do microbioma e na melhoria da qualidade do solo (Berendsen *et al*., 2012). Entre essas estratégias, destaca-se a indução da supressividade, propriedade pela qual determinados solos limitam o estabelecimento do patógeno ou reduzem a intensidade da doença, mesmo na presença de hospedeiro suscetível e condições ambientais favoráveis (Schlatter *et al*., 2017).

A supressividade resulta da integração entre atributos físicos, químicos e biológicos do solo e pode ser classificada como geral ou específica. A supressividade geral está relacionada à atividade coletiva da comunidade microbiana, que restringe os patógenos por meio da competição por nutrientes, energia e espaços de colonização (Weller *et al*., 2002). A supressividade específica, por sua vez, decorre da ação de determinados microrganismos ou grupos funcionais capazes de produzir antibióticos, sideróforos, enzimas hidrolíticas e outros compostos antagonistas. Evidências metagenômicas demonstram que plantas submetidas ao ataque de patógenos podem favorecer o recrutamento de comunidades bacterianas protetoras, enriquecidas em genes envolvidos na síntese de metabólitos antimicrobianos (Mendes *et al*., 2011).

Além da composição taxonômica, a organização das redes de interação e a diversidade funcional do microbioma são determinantes para a estabilidade da supressão ao longo do tempo (Schlatter *et al*., 2017). Dessa maneira, o desenvolvimento de solos supressivos pode ser estimulado por práticas que melhorem as condições edáficas e favoreçam a permanência de microrganismos benéficos na rizosfera (De Corato, 2020).

O biochar apresenta-se como uma alternativa promissora para essa finalidade. Esse material carbonáceo é produzido pela conversão termoquímica de biomassa em ambiente com disponibilidade limitada de oxigênio e apresenta características que variam conforme a matéria-prima e as condições de pirólise. Sua estrutura porosa, elevada área superficial e presença de grupos funcionais permitem modificar a densidade, a agregação, a retenção de água e a

disponibilidade de nutrientes no solo (Blanco-Canqui, 2017). A incorporação do biochar também pode elevar o pH e a capacidade de troca catiônica, particularmente em solos tropicais ácidos, além de reduzir determinadas perdas de nutrientes por lixiviação (Dai *et al*., 2020). Seus poros e superfícies funcionam como micro-hábitats para bactérias e fungos, protegendo-os contra dessecação, predação e oscilações ambientais (Lehmann *et al*., 2011). Entretanto, essas propriedades não são uniformes, pois dependem da origem da biomassa, da temperatura de produção, do tamanho das partículas, do envelhecimento do material e das características do solo receptor (Dai *et al*., 2021).

Além dos efeitos sobre a qualidade do solo e o crescimento vegetal, o biochar pode interferir diretamente nas relações entre hospedeiro, patógeno e microbioma. Sua aplicação tem sido associada à reestruturação das comunidades microbianas, ao aumento de populações antagonistas, à modificação dos exsudatos radiculares e à indução de respostas sistêmicas de defesa nas plantas (Elad *et al*., 2010). Em diferentes patossistemas, esses mecanismos contribuíram para reduzir doenças causadas por *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Ralstonia solanacearum*, *Botrytis cinerea* e outros agentes fitopatogênicos (Jaiswal *et al*., 2017).

Uma avaliação quantitativa global indicou redução média de 47,46% na severidade das doenças após a aplicação de biochar, acompanhada por incremento médio de 44,05% na biomassa vegetal (Yang *et al*., 2022). Esses resultados evidenciam que o material pode atuar não apenas como condicionador físico-químico, mas também como modulador das interações biológicas responsáveis pela sanidade do solo e das plantas (Poveda *et al*., 2021).

Apesar do potencial demonstrado, os efeitos fitossanitários do biochar permanecem inconsistentes entre estudos. Enquanto determinados materiais reduzem a incidência e a severidade das doenças, outros apresentam efeito neutro ou podem favorecer o desenvolvimento do patógeno (Bonanomi *et al*., 2015). Essa variabilidade está relacionada à composição do biochar, à temperatura de pirólise, à dose aplicada, ao tipo de solo, à espécie vegetal e à estratégia de infecção do agente etiológico (Frenkel *et al*., 2017).

Além disso, grande parte das evidências foi obtida em condições controladas, dificultando a extrapolação dos resultados para sistemas agrícolas submetidos às variações ambientais e à complexidade das comunidades microbianas nativas (Liu *et al*., 2023). A ausência de critérios padronizados para caracterização e aplicação também limita a definição de recomendações agronômicas seguras e reproduzíveis (Iacomino *et al*., 2022).

Diante disso, torna-se necessário compreender de forma integrada como as modificações físico-químicas e biológicas promovidas pelo biochar podem contribuir para a

construção de solos supressivos. Assim, este artigo tem como objetivo analisar o potencial do biochar como indutor da supressividade a doenças de plantas, abordando seus efeitos sobre os atributos do solo, a reestruturação do microbioma, os mecanismos de antagonismo aos fitopatógenos e a ativação das defesas vegetais. Também são discutidas as evidências disponíveis em diferentes patossistemas, as limitações responsáveis pela variabilidade dos resultados e as perspectivas para o uso do biochar como componente complementar do manejo integrado de doenças.

## 2. METODOLOGIA

O presente capítulo de livro caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o potencial do biochar na indução de solos supressivos a doenças de plantas. A revisão concentrou-se nas modificações físico-químicas e biológicas promovidas pelo material, em seus efeitos sobre o microbioma do solo e da rizosfera e nos mecanismos envolvidos na redução da sobrevivência, colonização e atividade de fitopatógenos.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira a aplicação de biochar pode modificar as propriedades do solo, reorganizar as comunidades microbianas e contribuir para a supressão de doenças de plantas? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à supressividade do solo, à produção e caracterização do biochar, às interações entre solo, planta e microrganismos, ao controle de fitopatógenos habitantes do solo, à indução de resistência vegetal e ao manejo integrado de doenças.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2010 e 2026, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de solos supressivos, microbioma rizosférico, antagonismo microbiano e sanidade vegetal. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *biochar*, *disease-suppressive soil*, *soil suppressiveness*, *plant disease suppression*, *soilborne pathogens*, *soil microbiome*, *rhizosphere microbiome*, *biological control*, *induced systemic resistance*, *plant pathogens*, *soil physicochemical properties* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos originais, revisões, meta-análises, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta com os efeitos do biochar sobre a ocorrência ou a severidade de doenças de plantas. Também foram considerados estudos que avaliassem alterações no pH, na porosidade, na densidade, na retenção de água, na capacidade de troca catiônica e na disponibilidade de nutrientes, desde que essas modificações fossem relacionadas à atividade microbiana, à sanidade do solo ou às interações entre plantas e fitopatógenos. Foram incluídas pesquisas sobre mudanças na composição e na diversidade do microbioma, recrutamento de microrganismos antagonistas, modificação dos exsudatos radiculares, indução de resistência e utilização do biochar como suporte para agentes de controle biológico.

Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos voltados exclusivamente ao sequestro de carbono, à remediação ambiental ou à produtividade vegetal sem avaliação microbiológica ou fitossanitária, bem como trabalhos que não apresentassem informações suficientes sobre o tipo de biochar, a dose aplicada, o solo, a cultura ou o patógeno investigado. Estudos duplicados, documentos sem acesso às informações essenciais e publicações cuja abordagem não permitisse interpretar os efeitos do biochar sobre a supressividade também não foram considerados na síntese.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do artigo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e a contribuição para a compreensão dos mecanismos de supressão. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica dos mecanismos, das evidências experimentais e dos fatores responsáveis pela variabilidade das respostas observadas em diferentes patossistemas.

As informações extraídas dos estudos foram organizadas considerando autor e ano de publicação, matéria-prima empregada na produção do biochar, temperatura e condições de pirólise, dose aplicada, características do solo, espécie vegetal, agente causal, condições experimentais e efeito sobre a incidência ou a severidade da doença. Quando disponíveis, também foram examinadas informações sobre alterações físico-químicas do solo, composição do microbioma, abundância do patógeno, recrutamento de microrganismos benéficos, expressão de genes de defesa e desempenho agronômico das plantas.

A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que os efeitos observados em

determinada combinação entre biochar, solo, planta, microbioma e patógeno não podem ser automaticamente extrapolados para outros sistemas produtivos. Também foram analisadas possíveis respostas neutras ou desfavoráveis, especialmente aquelas relacionadas a doses excessivas, materiais com elevada salinidade ou alcalinidade, presença de compostos fitotóxicos e alterações ambientais capazes de favorecer o desenvolvimento do patógeno.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: solos supressivos e o papel do biochar na sanidade vegetal; modificações físico-químicas do solo promovidas pelo biochar; reestruturação do microbioma e mecanismos biológicos de supressão; e evidências de supressão de doenças, limitações e perspectivas de aplicação. Essa organização permitiu integrar conhecimentos de fitopatologia, microbiologia e ciência do solo, proporcionando uma compreensão abrangente do potencial do biochar como componente complementar do manejo integrado de doenças de plantas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Solos supressivos e o papel do biochar na sanidade vegetal

Solos supressivos são aqueles nos quais a ocorrência ou a severidade de determinada doença permanece reduzida, mesmo na presença de patógeno virulento, hospedeiro suscetível e condições ambientais favoráveis. Essa propriedade resulta da interação entre fatores físicos, químicos e biológicos, podendo apresentar caráter geral, relacionado à atividade global da microbiota, ou específico, associado à ação de determinados grupos antagonistas (Weller *et al*., 2002).

Estudos metagenômicos demonstram que a supressividade pode decorrer do enriquecimento de bactérias produtoras de compostos antimicrobianos e competidoras por nutrientes e sítios de colonização (Mendes *et al*., 2011). Além da composição microbiana, a diversidade funcional e as redes de interação entre os microrganismos determinam a estabilidade desse processo (Schlatter *et al*., 2017). Assim, práticas que reorganizam o microbioma e melhoram as condições edáficas podem contribuir para transformar solos condutivos em ambientes menos favoráveis às doenças (De Corato, 2020).

Nesse contexto, o biochar apresenta potencial para participar da construção da supressividade por modificar simultaneamente diferentes componentes do solo. Sua estrutura porosa e elevada área superficial oferecem microssítios para a colonização microbiana, além de favorecerem a retenção de água, nutrientes e compostos orgânicos (Lehmann *et al*., 2011). Esses poros podem proteger microrganismos benéficos contra oscilações de umidade, temperatura e disponibilidade de substratos, aumentando sua permanência na rizosfera

(Quilliam *et al*., 2013). O biochar também modifica o pH, a capacidade de troca de cátions e a disponibilidade de nutrientes, alterando as interações entre planta, microbiota e patógeno (Graber *et al*., 2014). Entretanto, a intensidade dessas respostas depende da matéria-prima, da temperatura de pirólise, da porosidade, do conteúdo de carbono lábil e das propriedades eletroquímicas do material (Dai *et al*., 2021).

A reestruturação do microbioma rizosférico constitui um dos principais mecanismos relacionados à supressão de doenças pelo biochar. Em pepino, diferentes materiais carbonizados reduziram o tombamento causado por *Rhizoctonia solani*, embora a resposta tenha variado conforme a matéria-prima, a temperatura de produção e a concentração aplicada (Jaiswal *et al*., 2014). Em tomateiro, a incorporação de biochar suprimiu a podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, reduziu a colonização radicular e modificou a comunidade bacteriana da rizosfera (Jaiswal *et al*., 2017).

O aumento da biomassa microbiana associado à redução da murcha de Fusarium, mesmo sem forte inibição do crescimento micelial, reforça a importância dos mecanismos indiretos de controle (Silva *et al*., 2020). Além disso, raízes de tomateiro cultivadas com biochar recrutaram bactérias promotoras de crescimento e antagonistas, incluindo representantes de *Pseudomonas*, ampliando a capacidade supressiva do microbioma rizosférico (Jin *et al*., 2022).

Outros mecanismos incluem a adsorção de compostos produzidos pelos patógenos, a alteração dos exsudatos radiculares e a ativação das defesas vegetais. A aplicação de biochar produzido de madeira de citros induziu resistência sistêmica em tomateiro e pimentão contra *Botrytis cinerea* e *Leveillula taurica*, demonstrando que alterações no solo podem reduzir doenças da parte aérea (Elad *et al*., 2010). Em morangueiro, a redução da podridão-cinzenta esteve associada a mudanças na expressão de genes relacionados às vias do ácido salicílico, ácido jasmônico e etileno (Meller Harel *et al*., 2012).

Em solos infestados por *Ralstonia solanacearum*, o biochar de palha de trigo reduziu a murcha bacteriana do tomateiro, melhorou atributos químicos do solo e favoreceu grupos bacterianos associados à sanidade da rizosfera (Gao *et al*., 2019). Em tabaco, o biochar de casca de arroz também diminuiu a abundância do patógeno e alterou a composição da comunidade bacteriana, contribuindo para a supressão da doença (Chen *et al*., 2020).

Apesar desses resultados, o biochar não deve ser considerado universalmente supressivo. Uma análise de diferentes patossistemas identificou predominância de respostas positivas, mas também situações em que o material apresentou efeito neutro ou aumentou a severidade das doenças (Bonanomi *et al*., 2015). Essa variação pode estar relacionada à dose, pois concentrações reduzidas podem estimular microrganismos antagonistas e respostas de

defesa, enquanto quantidades elevadas podem provocar desequilíbrios nutricionais, fitotoxicidade ou condições favoráveis ao patógeno (Frenkel *et al*., 2017). Portanto, sua utilização deve considerar as características do produto, do solo, da cultura e do agente etiológico envolvido (Poveda *et al*., 2021). Embora uma meta-análise tenha indicado redução média de 47,46% na severidade das doenças, a eficiência variou conforme a matéria-prima, a temperatura de pirólise, a dose e o patossistema avaliado (Yang *et al*., 2022). Assim, o biochar deve ser integrado a outras práticas de manejo e validado em condições de campo para que sua contribuição à supressividade e à sanidade vegetal seja estável e previsível.

## 3.2 Modificações físico-químicas do solo promovidas pelo biochar

A incorporação de biochar modifica a estrutura física do solo em razão de sua baixa densidade, elevada porosidade e grande superfície específica. Sua mistura com a matriz mineral tende a reduzir a densidade aparente e a resistência à penetração, favorecendo a aeração e o desenvolvimento radicular, sobretudo em solos compactados ou de textura arenosa (Blanco-Canqui, 2017). Em uma meta-análise, Omondi *et al.* (2016) observaram redução média de 7,6% na densidade do solo, acompanhada por aumentos de 8,4% na porosidade total e de 8,2% na estabilidade dos agregados. A reorganização do espaço poroso também altera a infiltração, a condutividade hidráulica e a distribuição da água entre macro e microporos.

De acordo com Razzaghi *et al.* (2020), o biochar reduziu, em média, 9% da densidade aparente e aumentou a água disponível principalmente em solos de textura grossa, nos quais sua estrutura porosa exerce maior influência. Em solos argilosos, também podem ocorrer maior coesão entre partículas, resistência à desagregação e retenção de água, embora a intensidade desses efeitos dependa da matéria-prima e do tamanho das partículas do material aplicado (Sun; Lu, 2014).

As alterações químicas estão relacionadas à composição mineral, à alcalinidade e aos grupos funcionais presentes na superfície do biochar. Materiais ricos em cinzas e cátions básicos podem elevar o pH e reduzir a acidez trocável, efeito particularmente relevante em solos tropicais ácidos. Singh *et al.* (2022) verificaram, por meio de meta-análise, aumentos médios de 46% no pH, 20% na capacidade de troca catiônica e 27% no carbono orgânico após a aplicação de biochar. Essa elevação do pH decorre tanto do aporte de carbonatos, óxidos e bases quanto do consumo de prótons durante as reações entre o material e o solo. Entretanto, Sun *et al.* (2022) demonstraram que a magnitude das modificações depende principalmente da dose aplicada, do pH inicial e do teor de areia do solo. A elevada superfície específica e o

desenvolvimento de cargas negativas favorecem a adsorção de $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^{+}$ e $NH_4^{+}$, ampliando a capacidade de retenção de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação (Dai *et al.*, 2020). Em solos altamente intemperizados, biochars alcalinos e com elevada capacidade de troca catiônica podem complementar a baixa atividade das argilas, contribuindo para maior disponibilidade e eficiência de utilização dos nutrientes (Domingues *et al.*, 2020).

Os efeitos físico-químicos do biochar, contudo, não são estáticos nem uniformes. Após sua incorporação, o material passa por fragmentação, oxidação e interação com minerais, matéria orgânica dissolvida e microrganismos, processos que alteram sua porosidade, polaridade e reatividade superficial ao longo do tempo (Wang *et al.*, 2020). A oxidação introduz grupos carboxílicos e fenólicos, elevando a densidade de cargas negativas e, consequentemente, a capacidade de troca catiônica do material envelhecido (Mia *et al.*, 2017).

Esse comportamento pode aumentar a retenção de nutrientes; entretanto, a resposta varia conforme a matéria-prima, a temperatura de pirólise, a dose e as propriedades iniciais do solo. Laird *et al.* (2010) constataram redução da lixiviação de nutrientes em solo agrícola tratado com biochar, mas destacaram que a retenção de ânions e cátions não ocorre com a mesma intensidade. Resultados semelhantes foram observados por Dissanayake *et al.* (2023), que identificaram respostas distintas entre solos quanto à retenção de macronutrientes. Portanto, o biochar deve ser caracterizado previamente e sua aplicação ajustada às condições edáficas, pois doses excessivas ou materiais muito alcalinos podem aumentar a condutividade elétrica, provocar desequilíbrios nutricionais ou diminuir a disponibilidade de determinados elementos.

### 3.3 Reestruturação do microbioma e mecanismos biológicos de supressão

A incorporação do biochar ao solo pode reestruturar o microbioma rizosférico ao modificar simultaneamente a disponibilidade de nutrientes, o pH, a retenção de água e a oferta de micro-hábitats para colonização microbiana. Sua estrutura porosa fornece superfícies protegidas contra dessecação e predação, enquanto os grupos funcionais presentes nas partículas favorecem a retenção de compostos orgânicos utilizados como substratos metabólicos pelos microrganismos (Lehmann *et al*., 2011). Em tomateiro, alterações na composição, diversidade funcional e atividade da comunidade microbiana estiveram associadas à redução da podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (Jaiswal *et al*., 2017).

A aplicação de biochar de palha de trigo também aumentou a diversidade bacteriana e favoreceu grupos pertencentes a Firmicutes, demonstrando que a reorganização da microbiota depende das características do material aplicado e do compartimento edáfico analisado (Yan *et*

*al*., 2022). Em solos submetidos ao cultivo contínuo, verificou-se que a comunidade bacteriana respondeu mais intensamente à aplicação do biochar do que a comunidade fúngica, indicando que diferentes grupos taxonômicos apresentam sensibilidades distintas às alterações ambientais promovidas pelo condicionador (Wang *et al*., 2020).

A supressão biológica decorrente dessa reestruturação não depende apenas do aumento geral da diversidade, mas sobretudo do recrutamento de microrganismos com funções antagônicas. Em tomateiro, o biochar modificou a composição dos exsudatos radiculares e intensificou sua atividade quimiotática, permitindo que as raízes recrutassem uma comunidade bacteriana supressiva enriquecida em táxons relacionados a *Pseudomonas* (Jin *et al*., 2022).

Posteriormente, doses de 1 e 2% reduziram a severidade da murcha de Fusarium e a abundância de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, ao mesmo tempo que elevaram a ocorrência de microrganismos potencialmente benéficos na rizosfera (Jin *et al*., 2023). Em algodoeiro, o biochar diminuiu a colonização e a sobrevivência de *F. oxysporum* f. sp. *vasinfectum* e aumentou as populações de *Pseudomonas*, actinomicetos e *Trichoderma*, grupos reconhecidos por sua capacidade de restringir fitopatógenos (Asif *et al*., 2023). Resultados obtidos em condições de campo com ginseng também indicaram que a redução de doenças radiculares esteve mais relacionada à manipulação da microbiota e à ativação das defesas vegetais do que ao simples aumento da fertilidade do solo (Liu *et al*., 2022).

Os microrganismos favorecidos pelo biochar podem atuar por competição por carbono, nitrogênio, ferro e sítios de colonização, limitando os recursos necessários à germinação e ao estabelecimento dos patógenos. Além disso, bactérias e fungos antagonistas produzem sideróforos, antibióticos, compostos orgânicos voláteis e enzimas hidrolíticas capazes de inibir estruturas infectivas ou degradar componentes da parede celular dos fitopatógenos. A redução de doenças foliares em plantas cultivadas em substratos contendo biochar demonstrou que seus efeitos não se restringem ao contato direto com o patógeno, envolvendo também respostas sistêmicas mediadas pela interação solo–raiz–microbioma (Elad *et al*., 2010). Em morangueiro, a aplicação do condicionador alterou a expressão de genes relacionados à defesa e reduziu doenças provocadas por patógenos com diferentes estratégias de infecção (Meller Harel *et al*., 2012).

Em tomateiro, análises transcriptômicas confirmaram o envolvimento das rotas hormonais do ácido jasmônico e do ácido salicílico na resistência sistêmica ao *Fusarium* induzida pelo biochar (Jaiswal *et al*., 2020). Em morangueiro, a maior resistência dos frutos a *Botrytis cinerea* também esteve associada a mudanças específicas no microbioma rizosférico,

embora o mesmo efeito não tenha sido observado nas folhas, evidenciando a especificidade da resposta entre órgãos vegetais (De Tender *et al*., 2021).

O biochar ainda pode favorecer associações mutualísticas e aumentar a eficiência de agentes de controle biológico introduzidos no solo. Em áreas de replantio de aspargo, sua aplicação intensificou associações micorrízicas e reduziu a podridão da coroa e das raízes provocada por *Fusarium*, sugerindo que a melhoria das relações entre raízes e fungos simbiontes contribui para a proteção vegetal (Elmer; Pignatello, 2011). Entretanto, a resposta depende da matéria-prima utilizada na produção do biochar, uma vez que materiais distintos modificaram de forma diferenciada a micorrização, os exsudatos radiculares e o crescimento micelial de *F. oxysporum* em tomateiro (Akhter *et al*., 2015).

A aplicação combinada de biochar, composto orgânico e rizobactérias promotoras de crescimento também reduziu doenças e melhorou o desenvolvimento das plantas, demonstrando que o material pode funcionar como suporte para o estabelecimento de microrganismos benéficos (Rasool *et al*., 2021). Em cana-de-açúcar, a aplicação conjunta de biochar e corretivo modulou o microbioma rizosférico, reduziu a ocorrência de grupos patogênicos e favoreceu funções microbianas relacionadas à resistência da planta (Ahmad *et al*., 2025). De modo geral, as evidências demonstram que os efeitos do biochar sobre a supressividade estão associados à reestruturação da microbiota, ao favorecimento de microrganismos benéficos e à ativação de mecanismos de defesa das plantas. Os principais resultados experimentais que relacionam a aplicação de biochar às alterações no microbioma e à supressão de fitopatógenos estão sintetizados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Efeitos do biochar sobre o microbioma, a supressividade e a resposta de plantas a fitopatógenos

| **Cultura/sistema** | **Efeito do biochar sobre microbiota/planta** | **Efeito fitossanitário ou mecanismo associado** | **Referência** |
|---|---|---|---|
| Tomateiro | Alteração da composição, diversidade funcional e atividade da comunidade microbiana | Redução da podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* | Jaiswal *et al.* (2017) |
| Solo com biochar de palha de trigo | Aumento da diversidade bacteriana e favorecimento de grupos de Firmicutes | Reestruturação da comunidade bacteriana em função das características do biochar e do compartimento edáfico | Yan *et al.* (2022) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Solo sob cultivo contínuo | Comunidade bacteriana apresentou resposta mais intensa que a comunidade fúngica | Evidência de respostas diferenciadas dos grupos microbianos às alterações promovidas pelo biochar | Wang *et al.* (2020) |
| Tomateiro | Modificação dos exsudatos radiculares e recrutamento de comunidade bacteriana enriquecida em táxons relacionados a *Pseudomonas* | Formação de microbiota rizosférica com características supressivas | Jin *et al.* (2022) |
| Tomateiro | Doses de 1 e 2% aumentaram microrganismos potencialmente benéficos na rizosfera | Redução da severidade da murcha de Fusarium e da abundância de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* | Jin *et al.* (2023) |
| Algodoeiro | Aumento de *Pseudomonas*, actinomicetos e *Trichoderma* | Redução da colonização e sobrevivência de *F. oxysporum* f. sp. *vasinfectum* | Asif *et al.* (2023) |
| Ginseng | Manipulação da microbiota associada à ativação das defesas vegetais | Redução de doenças radiculares, com efeito relacionado à microbiota e às defesas, e não apenas à fertilidade | Liu *et al.* (2022) |
| Morangueiro | Alterações na expressão de genes relacionados à defesa | Redução de doenças provocadas por patógenos com diferentes estratégias de infecção | Meller Harel *et al.* (2012) |
| Tomateiro | Ativação de respostas envolvendo as rotas do ácido jasmônico e ácido salicílico | Resistência sistêmica ao *Fusarium* induzida pelo biochar | Jaiswal *et al.* (2020) |
| Morangueiro | Alterações específicas no microbioma rizosférico | Maior resistência dos frutos a *Botrytis cinerea*, sem resposta equivalente nas folhas | De Tender *et al.* (2021) |
| Aspargo | Intensificação das associações micorrízicas | Redução da podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium* | Elmer; Pignatello (2011) |
| Tomateiro | Diferentes matérias-primas modificaram a micorrização, os exsudatos radiculares e o crescimento micelial do patógeno | Evidência de que a resposta depende das características do biochar utilizado | Akhter *et al.* (2015) |
| Biochar + composto + rizobactérias | Favorecimento do estabelecimento e da atuação de microrganismos benéficos | Redução de doenças e melhoria do desenvolvimento vegetal | Rasool *et al.* (2021) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cana-de-açúcar | Modulação do microbioma rizosférico, redução de grupos patogênicos e favorecimento de funções associadas à resistência | Potencialização da proteção vegetal pela aplicação conjunta de biochar e corretivo | Ahmad *et al.* (2025) |
| Diferentes patossistemas | Resposta dependente da dose; concentrações reduzidas frequentemente apresentaram maior efeito supressivo | Doses elevadas podem apresentar ausência de efeito ou aumento da suscetibilidade | Frenkel *et al.* (2017) |
| Meta-análise/diferentes sistemas | Resposta variável conforme matéria-prima, solo e sistema de cultivo | Redução média de 47,46% na severidade das doenças | Yang *et al.* (2022) |
| Diferentes patógenos | Respostas distintas entre fungos, bactérias, oomicetos, vírus e nematoides | Grau de supressão dependente do grupo de fitopatógeno | Iacomino *et al.* (2022) |
| Feijão-fava sob cultivo contínuo | Biochar a 1% aumentou *Bacillus* e *Sphingomonas*, reduziu *Fusarium commune* e estimulou proteínas relacionadas à patogênese | A dose de 1% apresentou maior eficiência na indução da supressividade | Zhang *et al.* (2026) |

Fonte: Autores, 2026

Apesar desses resultados, a formação de um microbioma supressivo não constitui uma resposta universal, pois depende da dose, da biomassa de origem, da temperatura de pirólise, do tipo de solo, da cultura e do patógeno envolvido. Concentrações reduzidas de biochar frequentemente diminuem a severidade das doenças, enquanto doses elevadas podem não apresentar efeito ou até aumentar a suscetibilidade, caracterizando respostas não lineares (Frenkel *et al*., 2017). Em avaliação quantitativa global, a aplicação do material reduziu, em média, 47,46% da severidade das doenças, mas a magnitude da resposta variou amplamente entre matérias-primas, condições edáficas e sistemas de cultivo (Yang *et al*., 2022).

A variabilidade também é demonstrada pelo fato de diferentes grupos de fungos, bactérias, oomicetos, vírus e nematoides apresentarem níveis distintos de supressão após a aplicação do condicionador (Iacomino *et al*., 2022). Em feijão-fava cultivado continuamente, a dose de 1% mostrou-se mais eficiente, aumentando as abundâncias de *Bacillus* e *Sphingomonas*, reduzindo *Fusarium commune* e estimulando a expressão de proteínas relacionadas à patogênese nas raízes (Zhang *et al*., 2026). Portanto, a capacidade do biochar de induzir solos supressivos resulta da integração entre mudanças ambientais, reorganização das redes microbianas, antagonismo ao patógeno e ativação das defesas vegetais, sendo necessária a adequação do material e da dose a cada patossistema.

## 3.4 Evidências de supressão de doenças, limitações e perspectivas de aplicação

As evidências disponíveis demonstram que o biochar pode reduzir a severidade de diferentes doenças de plantas, embora a magnitude da resposta depende das características do produto e do patossistema. Em uma meta-análise global, Yang *et al.* (2022) verificaram redução média de 47,46% na severidade das doenças e aumento de 44,05% na biomassa vegetal, com maior eficiência para biochars produzidos entre 350 e 600 °C e aplicados em concentrações de 3 a 5%. Em tomateiro e pimentão, a incorporação de biochar ao substrato reduziu o mofo-cinzento causado por *Botrytis cinerea* e o oídio provocado por *Leveillula taurica*, mesmo sem contato direto entre o material e os patógenos foliares, indicando a ativação de respostas sistêmicas de defesa (Elad *et al.*, 2010).

Resultados semelhantes foram encontrados em morangueiros, no qual doses de 1 e 3% diminuíram doenças causadas por patógenos com diferentes estratégias de infecção e alteraram a expressão de genes relacionados às vias de defesa vegetal (Meller Harel *et al.*, 2012). Em espécies florestais, a aplicação de biochar também reduziu o desenvolvimento de lesões provocadas por *Phytophthora cinnamomi* e *P. cactorum*, demonstrando que seu potencial não se limita às culturas anuais e hortícolas (Zwart; Kim, 2012). Em conjunto, esses resultados mostram que a supressão pode envolver simultaneamente modificações no ambiente edáfico, fortalecimento fisiológico do hospedeiro e indução de resistência sistêmica.

A ação supressiva é particularmente relevante contra patógenos habitantes do solo. Em Tomateiro, a incorporação de biochar reduziu a murcha bacteriana por meio da alteração das propriedades químicas do solo, do aumento da diversidade bacteriana e da diminuição da abundância de *Ralstonia solanacearum* (Chen *et al.*, 2020). Alterações na disponibilidade de nutrientes, no conteúdo de carbono orgânico e na estrutura da comunidade microbiana também foram associadas à redução da murcha bacteriana e à melhoria do crescimento das plantas (Gao *et al.*, 2019). No patossistema tomateiro–*Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, o biochar aumentou a diversidade taxonômica e funcional do microbioma rizosférico, favorecendo grupos capazes de competir por recursos e restringir o estabelecimento do patógeno (Jaiswal *et al.*, 2017).

Mais recentemente, doses de 1 e 2% reduziram a severidade da murcha de Fusarium e a abundância de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, enquanto estimularam microrganismos potencialmente benéficos, incluindo representantes de *Pseudomonas* (Jin *et al.*, 2023). Portanto, o efeito do biochar não deve ser interpretado apenas como toxicidade direta ao patógeno, mas

como consequência da reorganização das interações entre solo, microbiota, hospedeiro e agente causal.

Apesar dos resultados promissores, a aplicação do biochar não produz supressão de maneira universal. Biochar de casca de bordo produzido a 700 °C aumentou progressivamente o tombamento causado por *Rhizoctonia solani* em 11 espécies vegetais, possivelmente porque determinados compostos orgânicos presentes no material estimularam o crescimento e o metabolismo do fungo (Copley *et al.*, 2015). Em soja, o mesmo tipo de biochar modificou a expressão gênica da planta e de *R. solani*, aumentando a severidade da queima foliar e demonstrando que alterações fisiológicas induzidas pelo material podem favorecer o patógeno em determinadas combinações (Copley *et al.*, 2017).

Ao examinarem diferentes sistemas solo–planta–patógeno, De Medeiros *et al.* (2021) observaram que aproximadamente 70% dos estudos apresentaram respostas supressivas, enquanto os demais registraram efeitos dependentes da matéria-prima, ausência de controle ou aumento da doença. Outra limitação é que os resultados obtidos em laboratório e casa de vegetação nem sempre se reproduzem no campo, onde textura, matéria orgânica, umidade, fertilização, clima e microbiota nativa aumentam a variabilidade das respostas (Liu *et al.*, 2023). Doses excessivas também podem elevar o pH e a salinidade, causar desequilíbrios nutricionais, introduzir compostos potencialmente tóxicos ou disponibilizar nichos e fontes de carbono favoráveis aos próprios patógenos. Consequentemente, a indicação agronômica do biochar exige sua caracterização prévia e validação específica para cada condição edafoclimática e fitossanitária.

As perspectivas de aplicação dependem da substituição de recomendações generalizadas por biochars projetados para finalidades fitossanitárias específicas. A seleção da matéria-prima e das condições de pirólise pode direcionar atributos como porosidade, pH, composição mineral e presença de compostos orgânicos bioativos, aumentando a previsibilidade da supressão (Bonanomi *et al.*, 2015). Abordagens transcriptômicas mostraram que o biochar pode modular genes associados às vias do ácido salicílico, ácido jasmônico e etileno, oferecendo marcadores para identificar materiais capazes de induzir resistência sem comprometer o crescimento vegetal (Jaiswal *et al.*, 2020).

Outra possibilidade é utilizar o biochar como veículo para microrganismos antagonistas, uma vez que sua estrutura porosa pode favorecer a colonização e a persistência de bactérias promotoras do crescimento e agentes de controle biológico na rizosfera (Jin *et al.*, 2022). O emprego de metagenômica, metatranscriptômica e metabolômica deverá permitir a identificação das funções microbianas e dos metabólitos diretamente relacionados à

supressividade, superando análises baseadas somente na abundância taxonômica (Bhatt *et al.*, 2024). Para viabilizar a adoção em escala comercial, contudo, ainda são necessários experimentos de longa duração e em diferentes solos, definição de doses economicamente viáveis, avaliação de possíveis contaminantes e estabelecimento de padrões de qualidade. Assim, o biochar deve ser considerado um componente complementar do manejo integrado, associado a cultivares resistentes, controle biológico, rotação de culturas e práticas que conservem a diversidade microbiana do solo.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biochar apresenta potencial para contribuir com a formação de solos supressivos ao melhorar atributos físico-químicos, favorecer microrganismos antagonistas e estimular mecanismos de defesa das plantas. Entretanto, sua eficiência varia conforme a matéria-prima, as condições de pirólise, a dose aplicada, o tipo de solo, a cultura e o fitopatógeno.

Assim, o biochar não deve ser considerado uma solução isolada ou universal, mas um componente complementar do manejo integrado de doenças. Sua aplicação exige caracterização prévia do material e validação em condições de campo. Estudos de longa duração ainda são necessários para definir doses seguras, padronizar produtos e aumentar a previsibilidade dos efeitos fitossanitários.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, S. et al. Synergistic application of biochar and lime modulates rhizosphere microbiome, suppresses pathogens, and enhances disease resistance in sugarcane. BMC Microbiology, v. 25, e622, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s12866-025-04355-z.

AKHTER, A. et al. Compost and biochar alter mycorrhization, tomato root exudation, and development of Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici. Frontiers in Plant Science, v. 6, e529, 2015. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00529.

ASIF, M.; HAIDER, M. S.; AKHTER, A. Impact of biochar on Fusarium wilt of cotton and the dynamics of soil microbial community. Sustainability, v. 15, n. 17, e12936, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su151712936.

BHATT, B. et al. A comprehensive review on biochar against plant pathogens: production, mechanisms and applications. Journal of Pure and Applied Microbiology, v. 18, n. 1, p. 1–20, 2024. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11419905/. Acesso em: 9 set. 2026.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, v. 81, n. 4, p. 687–711, 2017. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017.

BONANOMI, G.; IAGOPO, F.; SCALA, F. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. Journal of Plant Pathology, v. 97, n. 2, p. 223–234, 2015.

BONANOMI, G. et al. Biochar chemistry and physical properties determine the phytotoxicity and potential for plant disease suppression. Phytopathology, v. 105, n. 5, p. 606–616, 2015.

CHEN, S.; QI, G.; MA, G.; ZHAO, X. Biochar amendment controlled bacterial wilt through changing soil chemical properties and microbial community. Microbiological Research, v. 231, e126373, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126373.

COPLEY, T. R.; ALIFERIS, K. A.; JABAJI, S. Maple bark biochar affects Rhizoctonia solani metabolism and increases damping-off severity. Phytopathology, v. 105, n. 10, p. 1334–1346, 2015. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-14-0231-R.

COPLEY, T.; BAYEN, S.; JABAJI, S. Biochar amendment modifies expression of soybean and Rhizoctonia solani genes leading to increased severity of Rhizoctonia foliar blight. Frontiers in Plant Science, v. 8, e221, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00221.

DAI, Y. et al. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: a meta-analysis. Science of the Total Environment, v. 713, e136635, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635.

DAI, Z. et al. Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes. Biochar, v. 3, p. 239–254, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-021-00099-x.

DE CORATO, U. Soil microbiota manipulation and its role in suppressing soil-borne plant pathogens in organic farming systems under the light of microbiome-assisted strategies. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 7, e17, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s40538-020-00183-7.

DE MEDEIROS, E. V. et al. Biochar as a strategy to manage plant diseases caused by pathogens inhabiting the soil: a critical review. Phytoparasitica, v. 49, n. 4, p. 713–726, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12600-021-00887-y.

DE TENDER, C. et al. Biochar-enhanced resistance to Botrytis cinerea in strawberry fruits (but not leaves) is associated with changes in the rhizosphere microbiome. Frontiers in Plant Science, v. 12, e700479, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.700479.

DISSANAYAKE, D. K. R. P. L. et al. Effect of biochar application rate on macronutrient retention and leaching in two coconut-growing soils. Technology in Agronomy, v. 3, e5, 2023. DOI: https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0005.

DOMINGUES, R. R. et al. Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate. Agronomy, v. 10, n. 6, e824, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10060824.

ELAD, Y. et al. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. Phytopathology, v. 100, n. 9, p. 913–921, 2010. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-9-0913.

ELMER, W. H.; PIGNATELLO, J. J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. Plant Disease, v. 95, n. 8, p. 960–966, 2011. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741.

FRENKEL, O. et al. The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates? Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, v. 25, n. 2, p. 105–113, 2017. DOI: https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1307202.

GAO, Y. et al. Biochar suppresses bacterial wilt of tomato by improving soil chemical properties and shifting soil microbial community. Microorganisms, v. 7, n. 12, e676, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms7120676.

GRABER, E. R. et al. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? Carbon Management, v. 5, n. 2, p. 169–183, 2014. DOI: https://doi.org/10.1080/17583004.2014.913360.

IACOMINO, G. et al. The suppressive effects of biochar on above- and belowground plant pathogens and pests: a review. Plants, v. 11, n. 22, e3144, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11223144.

JAISWAL, A. K. et al. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. Soil Biology and Biochemistry, v. 69, p. 110–118, 2014.

JAISWAL, A. K. et al. Linking the belowground microbial composition, diversity and activity to soilborne disease suppression and growth promotion of tomato amended with biochar. Scientific Reports, v. 7, e44382, 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/srep44382.

JAISWAL, A. K. et al. Molecular insights into biochar-mediated plant growth promotion and systemic resistance in tomato against Fusarium crown and root rot disease. Scientific Reports, v. 10, e13934, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-70882-6.

JIN, X. et al. Biochar stimulates tomato roots to recruit a bacterial assemblage contributing to disease resistance against Fusarium wilt. iMeta, v. 1, e37, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/imt2.37.

JIN, X. et al. Biochar amendment suppressed Fusarium wilt and altered the rhizosphere microbial composition of tomatoes. Agronomy, v. 13, n. 7, e1811, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13071811.

LAIRD, D. et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma, v. 158, n. 3–4, p. 436–442, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota: a review. Soil Biology and Biochemistry, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

LIU, C. et al. More microbial manipulation and plant defense than soil fertility for biochar in food production: a field experiment of replanted ginseng with different biochars. Frontiers in Microbiology, v. 13, e1065313, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1065313.

LIU, Z. et al. Biochar and its coupling with microbial inoculants for suppression of soil-borne plant diseases. Applied Soil Ecology, 2023.

MELLER HAREL, Y. et al. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. Plant and Soil, v. 357, n. 1–2, p. 245–257, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3.

MENDES, R. et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. Science, v. 332, n. 6033, p. 1097–1100, 2011.

MIA, S. et al. Aging-induced changes in biochar's functionality and adsorption behavior for phosphate and ammonium. Environmental Science & Technology, v. 51, n. 15, p. 8359–8367, 2017. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00647.

OMONDI, M. O. et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. Geoderma, v. 274, p. 28–34, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029.

POVEDA, J. et al. The use of biochar for plant pathogen control. Phytopathology, v. 111, n. 9, p. 1490–1499, 2021. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0248-RVW.

QUILLIAM, R. S. et al. Biochar and its use as a carrier for microbial inoculants. Soil Biology and Biochemistry, v. 65, p. 287–293, 2013.

RASOOL, M. et al. Role of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria in the management of tomato early blight disease. Scientific Reports, v. 11, e6092, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-85633-4.

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. Geoderma, v. 361, e114055, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055.

SCHLATTER, D. et al. Disease suppressive soils: new insights from the soil microbiome. Phytopathology, v. 107, n. 11, p. 1284–1297, 2017.

SILVA, L. G. et al. Biochar amendment increases soil microbial biomass and plant growth and suppresses Fusarium wilt in tomato. Tropical Plant Pathology, v. 45, p. 73–83, 2020.

SINGH, H. et al. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. Biochar, v. 4, e8, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1.

SUN, F.; LU, S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 177, n. 1, p. 26–33, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/jpln.201200639.

SUN, Z. et al. Effects of biochar on soil chemical properties: a global meta-analysis of agricultural soil. Plant, Soil and Environment, v. 68, n. 6, p. 272–289, 2022. DOI: https://doi.org/10.17221/522/2021-PSE.

WANG, L. et al. Biochar aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications. Environmental Science & Technology, v. 54, n. 23, p. 14797–14814, 2020. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04033.

WANG, W. et al. Biochar application alleviated negative plant-soil feedback by modifying soil microbiome. Frontiers in Microbiology, v. 11, e799, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00799.

WELLER, D. M. et al. Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. Annual Review of Phytopathology, v. 40, p. 309–348, 2002.

YAN, H. et al. Biochar-mediated changes in the microbial communities of rhizosphere soil alter the architecture of maize roots. Frontiers in Microbiology, v. 13, e1023444, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1023444.

YANG, Y. et al. A quantitative evaluation of biochar's influence on plant disease suppression: a global meta-analysis. Biochar, v. 4, e43, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-022-00164-z.

ZHANG, Z. et al. Biochar mitigates Fusarium wilt by regulating the rhizosphere microbial community structure. Pest Management Science, v. 82, n. 9, p. 8936–8949, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/ps.70940.

ZWART, D. C.; KIM, S. H. Biochar amendment increases resistance to stem lesions caused by Phytophthora spp. in tree seedlings. HortScience, v. 47, n. 12, p. 1736–1740, 2012. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.12.1736.

# CAPÍTULO 3

## POTENCIAL DOS BIOINSUMOS NO CONTROLE BIOLÓGICO DE FITOPATÓGENOS AGRÍCOLAS: DO MODO DE AÇÃO ÀS NOVAS ESTRATÉGIAS DE MANEJO

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-3

Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
William Acioly de Gouveia, e-mail: william.gouveia@ceca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/4335981219213690
Moisés Silva de mendonça Júnior, e-mail: moises.agro2025@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/6303760195972174
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

## RESUMO

As doenças causadas por fitopatógenos representam importante limitação à produção agrícola, tornando necessária a adoção de estratégias de manejo mais sustentáveis e integradas. Nesse contexto, os bioinsumos constituem ferramentas promissoras para o controle biológico, por utilizarem microrganismos, metabólitos e outras substâncias de origem biológica capazes de interferir nas relações entre plantas, patógenos e ambiente. Este capítulo teve como objetivo discutir o potencial dos bioinsumos no controle biológico de fitopatógenos agrícolas, abordando os principais agentes utilizados, seus mecanismos de ação, os fatores que condicionam sua eficiência em campo e as novas estratégias de manejo. Para isso, foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, contemplando principalmente estudos publicados entre 2014 e 2025. As evidências analisadas demonstram que fungos, bactérias, leveduras, bacteriófagos, metabólitos naturais e consórcios microbianos podem reduzir o desenvolvimento de fitopatógenos por diferentes mecanismos, incluindo antibiose, competição por nutrientes e sítios de colonização, micoparasitismo, produção de enzimas hidrolíticas, formação de biofilmes e indução de resistência sistêmica nas plantas. Entretanto, a eficiência dos bioinsumos em condições agrícolas depende da interação entre o agente biológico, a cultura, o patógeno, as condições edafoclimáticas, a formulação e o método de aplicação. Estratégias emergentes, como comunidades microbianas sintéticas, micro e nanoencapsulação, bacteriófagos, moléculas de RNA e ferramentas ômicas, apresentam potencial para aumentar a especificidade, a persistência e a estabilidade do controle biológico. Conclui-se que os bioinsumos constituem importantes componentes do manejo integrado de doenças, porém sua utilização eficiente requer seleção de agentes adaptados, padronização da qualidade, validação em condições de campo e integração com outras práticas de manejo, contribuindo para sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** controle biológico; bioinsumos; fitopatógenos; microrganismos antagonistas; resistência induzida; manejo integrado de doenças.

## 1. INTRODUÇÃO

As doenças de plantas constituem um dos principais entraves à produção agrícola, pois reduzem a produtividade, comprometem a qualidade dos produtos e aumentam os custos

associados ao manejo das culturas. Durante décadas, o controle desses problemas esteve fundamentado principalmente no uso de defensivos químicos, os quais apresentam elevada importância fitossanitária, mas podem favorecer a seleção de populações resistentes quando empregados de maneira repetitiva e inadequada. Além disso, preocupações relacionadas à presença de resíduos nos alimentos, à contaminação ambiental e aos efeitos sobre organismos não alvo têm estimulado a busca por métodos mais sustentáveis de proteção vegetal (Köhl *et al.*, 2019). Nesse cenário, o controle biológico destaca-se como componente estratégico do manejo integrado de doenças, por explorar organismos benéficos e seus produtos para limitar a sobrevivência, a multiplicação e a capacidade infectiva dos fitopatógenos (Lahlali *et al.*, 2022).

Os bioinsumos destinados à proteção de plantas compreendem produtos formulados com microrganismos vivos, metabólitos microbianos, extratos vegetais e outras substâncias de origem biológica capazes de interferir nas relações estabelecidas entre plantas, patógenos e ambiente. Entre os principais agentes utilizados encontram-se fungos dos gêneros *Trichoderma* e *Clonostachys*, bactérias pertencentes a *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Streptomyces*, além de leveduras, bacteriófagos e consórcios microbianos (El-Saadony *et al.*, 2022). Esses componentes podem atuar diretamente sobre os fitopatógenos ou modificar a resposta fisiológica e imunológica das plantas, resultando em efeitos que ultrapassam a simples substituição dos produtos químicos convencionais (Pandit *et al.*, 2022). A diversidade dos agentes e de suas funções amplia as possibilidades de aplicação dos bioinsumos em diferentes culturas e etapas do sistema produtivo.

A ação dos bioinsumos envolve mecanismos como competição por nutrientes e sítios de colonização, antibiose, produção de enzimas hidrolíticas, micoparasitismo, formação de biofilmes e interferência na comunicação celular dos patógenos. Paralelamente, microrganismos benéficos podem induzir resistência sistêmica, estimular o estado de *priming*, favorecer a absorção de nutrientes e promover o crescimento e a tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos (Yu *et al.*, 2022). Fungos do gênero *Trichoderma*, por exemplo, podem associar micoparasitismo, produção de metabólitos antifúngicos e ativação das defesas vegetais (Yao *et al.*, 2023). Da mesma forma, espécies de *Bacillus* produzem lipopeptídeos, enzimas e compostos voláteis com atividade antimicrobiana, enquanto bactérias do gênero *Pseudomonas* apresentam elevada competência rizosférica e capacidade de produzir sideróforos e diferentes metabólitos antagonistas (Mehmood *et al.*, 2023).

Apesar do potencial demonstrado em condições controladas, a eficiência dos bioinsumos no campo permanece variável. O estabelecimento e a atividade dos agentes biológicos são influenciados pela temperatura, disponibilidade hídrica, pH, textura e fertilidade

do solo, bem como pelo genótipo vegetal e pelas interações com a microbiota residente (O'Callaghan *et al.*, 2022). A formulação, a concentração do inóculo, o período de armazenamento e o método de aplicação também determinam a quantidade de células ou propágulos viáveis que alcança o local de ação (Mitter *et al.*, 2021). Consequentemente, um microrganismo que apresenta elevada atividade antagonista em laboratório pode não reproduzir o mesmo desempenho em ambientes agrícolas, especialmente quando não possui adaptação às condições edafoclimáticas ou compatibilidade com os demais componentes do manejo.

A superação dessas limitações tem impulsionado novas estratégias baseadas no conhecimento da ecologia microbiana, na seleção de linhagens adaptadas e no desenvolvimento de formulações mais estáveis. Ferramentas metagenômicas e outras abordagens ômicas têm permitido identificar grupos microbianos associados à supressão de doenças e compreender suas funções nos microbiomas da rizosfera e da filosfera (Trivedi *et al.*, 2020). Simultaneamente, consórcios microbianos e comunidades sintéticas vêm sendo planejados para reunir mecanismos complementares e aumentar a estabilidade funcional dos inoculantes (Martins *et al.*, 2023). Tecnologias de micro e nanoencapsulação, sistemas de liberação controlada, bacteriófagos e moléculas de RNA de fita dupla também representam alternativas promissoras para aumentar a especificidade, a persistência e a eficiência do controle biológico (Saberi-Riseh *et al.*, 2022).

Entretanto, a consolidação dessas tecnologias requer padronização da qualidade, validação em diferentes ambientes, compreensão dos possíveis efeitos ecológicos e integração com práticas culturais, genéticas, físicas e químicas. Os bioinsumos não devem ser compreendidos como soluções isoladas ou universalmente eficazes, mas como ferramentas que precisam ser selecionadas de acordo com a cultura, o patógeno, o nível de pressão da doença e as características do agroecossistema (Collinge *et al.*, 2022). Nesse sentido, este capítulo tem como objetivo discutir o potencial dos bioinsumos no controle biológico de fitopatógenos agrícolas, abordando os principais agentes utilizados, seus mecanismos de ação sobre patógenos e plantas, os fatores que determinam sua eficiência em condições de campo e as novas estratégias destinadas a ampliar sua estabilidade e integração ao manejo sustentável de doenças.

## 2. METODOLOGIA

O presente capítulo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o potencial dos bioinsumos no controle biológico de fitopatógenos agrícolas. A revisão concentrou-se nos principais agentes biológicos

empregados na proteção de plantas, nos mecanismos de ação exercidos diretamente sobre os patógenos e indiretamente sobre os hospedeiros, nos fatores responsáveis pela variabilidade de sua eficiência em condições agrícolas e nas novas estratégias destinadas ao aprimoramento do controle biológico.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira os bioinsumos podem atuar sobre fitopatógenos e plantas e quais fatores determinam sua eficiência e integração aos programas de manejo de doenças agrícolas? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas ao controle biológico de doenças, aos inoculantes microbianos, à interação planta–microrganismo, à indução de resistência vegetal, à formulação de produtos biológicos e às tecnologias emergentes aplicadas à proteção de culturas.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2014 e 2025, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de controle biológico, antagonismo microbiano, promoção do crescimento vegetal, silenciamento gênico e formulação de inoculantes. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *bioinputs*, *biological control*, *plant pathogens*, *microbial inoculants*, *biocontrol agents*, *plant growth-promoting microorganisms*, *induced systemic resistance*, *microbial consortia*, *synthetic microbial communities*, *bacteriophages*, *RNA interference*, *microencapsulation* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos, revisões, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta com a utilização de fungos, bactérias, actinobactérias, leveduras, bacteriófagos, extratos vegetais, metabólitos microbianos e consórcios no controle de fitopatógenos. Também foram considerados estudos que avaliassem mecanismos como antibiose, competição por nutrientes e sítios de colonização, micoparasitismo, produção de enzimas hidrolíticas, formação de biofilmes, indução de resistência e promoção do crescimento vegetal. Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, trabalhos voltados exclusivamente à biofertilização sem avaliação de efeitos fitossanitários e documentos que não apresentassem informações suficientes para a interpretação dos resultados.

Após a identificação das publicações, realizou-se a leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os estudos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e sua contribuição para a compreensão da atuação e da eficiência dos bioinsumos. Por se tratar

de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas elaborar uma síntese crítica e aplicada das evidências disponíveis em diferentes culturas, condições ambientais, sistemas produtivos e patossistemas.

As informações extraídas foram organizadas considerando autor e ano de publicação, cultura avaliada, fitopatógeno-alvo, agente de controle biológico, tipo de formulação, método de aplicação, mecanismo de ação e resultados fitossanitários observados. Quando disponíveis, também foram examinadas informações relacionadas à concentração do inóculo, viabilidade durante o armazenamento, capacidade de colonização, persistência no ambiente, condições edafoclimáticas e compatibilidade com outros componentes do manejo. A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que a eficiência de determinado bioinsumo não pode ser automaticamente extrapolada entre culturas, patógenos, genótipos vegetais e ambientes de produção.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: principais bioinsumos utilizados no controle biológico de fitopatógenos; mecanismos de ação dos bioinsumos sobre patógenos e plantas; fatores que determinam sua eficiência em condições agrícolas; e novas estratégias de manejo e perspectivas para o controle biológico. Essa organização permitiu integrar conhecimentos microbiológicos, fitopatológicos, ecológicos e agronômicos, convertendo os resultados da literatura em fundamentos aplicáveis à seleção, à formulação e à utilização dos bioinsumos em programas de manejo integrado e sustentável de doenças de plantas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Principais bioinsumos utilizados no controle biológico de fitopatógenos

Os bioinsumos empregados no controle biológico de fitopatógenos compreendem formulações constituídas por microrganismos vivos, seus metabólitos ou substâncias naturais capazes de reduzir a sobrevivência, a multiplicação ou a capacidade infectiva dos agentes causadores de doenças. Entre os produtos microbianos, destacam-se aqueles formulados com fungos, bactérias, leveduras e bacteriófagos, cuja ação pode ocorrer diretamente sobre o patógeno ou indiretamente por meio da ativação das defesas vegetais (Lahlali *et al.*, 2022). Esses agentes atuam mediante mecanismos como competição por nutrientes e sítios de colonização, antibiose, produção de enzimas hidrolíticas, parasitismo e indução de resistência sistêmica (Pandit *et al.*, 2022).

Além da supressão de doenças, algumas rizobactérias e alguns fungos benéficos favorecem a absorção de nutrientes, o desenvolvimento radicular e a tolerância das plantas a estresses, ampliando a funcionalidade agronômica dos produtos (El-Saadony *et al.*, 2022). Entretanto, a eficácia desses bioinsumos depende da capacidade de estabelecimento do agente no ambiente de aplicação, da compatibilidade com a cultura e da interação com as condições edafoclimáticas, aspectos determinantes para que o desempenho observado em laboratório seja mantido em campo (Collinge *et al.*, 2022).

Entre os fungos utilizados como bioinsumos, espécies de *Trichoderma* ocupam posição de destaque devido à capacidade de controlar patógenos habitantes do solo e agentes associados às raízes, às sementes e à parte aérea. Espécies como *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. virens* e *T. atroviride* apresentam rápido crescimento, elevada capacidade de colonização e versatilidade metabólica, características que favorecem a competição com espécies de *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Macrophomina*, *Botrytis* e oomicetos fitopatogênicos (Yao *et al.*, 2023). O micoparasitismo constitui um dos seus principais mecanismos, envolvendo reconhecimento do hospedeiro, enrolamento das hifas e secreção de quitinases, glucanases e proteases capazes de degradar a parede celular do fitopatógeno (Asad *et al.*, 2022).

Paralelamente, metabólitos secundários e compostos orgânicos voláteis produzidos por esses fungos inibem a germinação de esporos e o crescimento micelial, enquanto a colonização das raízes pode estimular respostas defensivas mediadas por ácido jasmônico, etileno e ácido salicílico (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2023). Outros fungos e leveduras, incluindo espécies de *Clonostachys*, *Ampelomyces*, *Aureobasidium*, *Metschnikowia* e *Pichia*, também vêm sendo explorados, especialmente contra patógenos foliares e agentes de podridões pós-colheita, por apresentarem intensa competição por espaço e nutrientes, produção de compostos antifúngicos e capacidade de formar biofilmes sobre frutos e tecidos vegetais (Fenta *et al.*, 2023).

Entre os bioinsumos bacterianos, produtos à base de *Bacillus* spp. são amplamente empregados em razão da formação de endósporos resistentes, que aumentam a estabilidade das formulações, facilitam o armazenamento e favorecem a sobrevivência após a aplicação. Espécies como *B. subtilis*, *B. velezensis*, *B. amyloliquefaciens* e *B. pumilus* produzem lipopeptídeos das famílias das iturinas, fengicinas e surfactinas, além de enzimas líticas, bacteriocinas e compostos voláteis que comprometem membranas celulares e inibem diferentes fungos, bactérias e oomicetos fitopatogênicos (Zhang *et al.*, 2023). A atuação dessas bactérias não se restringe à antibiose, pois sua colonização na rizosfera pode intensificar a competição por recursos, formar biofilmes protetores e ativar mecanismos de resistência sistêmica induzida na planta (Saiyam *et al.*, 2024).

Espécies de *Pseudomonas*, principalmente aquelas pertencentes ao grupo fluorescente, também apresentam elevado potencial por produzir sideróforos, fenazinas, pirrolnitrina, 2,4-diacetilfloroglucinol, enzimas hidrolíticas e compostos orgânicos voláteis, restringindo o desenvolvimento do patógeno e a disponibilidade de ferro na rizosfera (Mehmood *et al.*, 2023). Adicionalmente, actinobactérias do gênero *Streptomyces* constituem fontes importantes de antibióticos, enzimas extracelulares e metabólitos especializados, podendo controlar patógenos fúngicos e bacterianos e, simultaneamente, favorecer o crescimento e a ativação das respostas defensivas vegetais (Dow *et al.*, 2023).

Outras categorias de bioinsumos ampliam as possibilidades de manejo, sobretudo quando os produtos microbianos convencionais apresentam espectro de ação limitado. Extratos vegetais e óleos essenciais obtidos de plantas aromáticas e medicinais possuem terpenos, compostos fenólicos, alcalóides e outras moléculas capazes de alterar a permeabilidade das membranas, inibir enzimas e reduzir a germinação ou a esporulação dos fitopatógenos (Greff *et al.*, 2023). Os bacteriófagos, por sua vez, são vírus que infectam seletivamente células bacterianas, apresentando potencial para o controle de doenças causadas por *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Ralstonia*, *Pectobacterium* e *Erwinia*; sua elevada especificidade reduz efeitos sobre microrganismos não alvo, embora também possa restringir o espectro de ação do produto (Liu *et al.*, 2024).

Nesse contexto, combinações de bacteriófagos podem ampliar o número de estirpes bacterianas controladas e diminuir a probabilidade de seleção de resistência, tendo apresentado desempenho superior ao uso de fagos isolados em alguns patossistemas (Jiang *et al.*, 2023). Da mesma forma, consórcios formados por microrganismos funcionalmente complementares vêm sendo desenvolvidos para reunir antibiose, competição, colonização radicular e indução de resistência em uma única formulação; contudo, sua elaboração exige comprovação de compatibilidade entre as estirpes e estabilidade durante a produção e o armazenamento (Nunes *et al.*, 2024). Assim, a escolha do bioinsumo deve considerar o patógeno-alvo, a cultura, o ambiente de aplicação, a formulação e a integração com outras práticas, pois o sucesso do controle biológico depende não apenas do potencial antagonista do agente, mas também de sua adaptação ao sistema produtivo. Os principais bioinsumos empregados no controle biológico de fitopatógenos, bem como seus mecanismos de ação e respectivos grupos-alvo, estão sintetizados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Principais bioinsumos utilizados no controle biológico de fitopatógenos e seus mecanismos de ação

| Tipo de bioinsumo | Principais exemplos | Principais mecanismos de ação | Fitopatógenos/grupos-alvo | Referências |
|---|---|---|---|---|
| Fungos – *Trichoderma* spp. | *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. virens*, *T. atroviride* | Micoparasitismo; competição por espaço e nutrientes; produção de quitinases, glucanases e proteases; metabólitos secundários e compostos voláteis; indução de resistência | *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Macrophomina*, *Botrytis* e oomicetos | Yao *et al.* (2023); Asad *et al.* (2022); Guzmán-Guzmán *et al.* (2023) |
| Outros fungos e leveduras | *Clonostachys*, *Ampelomyces*, *Aureobasidium*, *Metschnikowia*, *Pichia* | Competição por espaço e nutrientes; produção de compostos antifúngicos; formação de biofilmes | Patógenos foliares e agentes de podridões pós-colheita | Fenta *et al.* (2023) |
| Bactérias – *Bacillus* spp. | *B. subtilis*, *B. velezensis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. pumilus* | Produção de iturinas, fengicinas e surfactinas; enzimas líticas; bacteriocinas; compostos voláteis; competição; formação de biofilmes; resistência sistêmica induzida | Fungos, bactérias e oomicetos fitopatogênicos | Zhang *et al.* (2023); Saiyam *et al.* (2024) |
| Bactérias – *Pseudomonas* spp. | Principalmente espécies do grupo fluorescente | Produção de sideróforos, fenazinas, pirrolnitrina e 2,4-diacetilfloroglucinol; enzimas hidrolíticas; compostos voláteis; competição por ferro | Diferentes fitopatógenos, especialmente na rizosfera | Mehmood *et al.* (2023) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Actinobactérias | *Streptomyces* spp. | Produção de antibióticos, enzimas extracelulares e metabólitos especializados; promoção de crescimento; ativação das defesas vegetais | Patógenos fúngicos e bacterianos | Dow *et al.* (2023) |
| Extratos vegetais e óleos essenciais | Produtos derivados de plantas aromáticas e medicinais | Terpenos, compostos fenólicos e alcaloides; alteração da permeabilidade de membranas; inibição enzimática; redução da germinação e esporulação | Diversos fitopatógenos | Greff *et al.* (2023) |
| Bacteriófagos | Fagos específicos e combinações de fagos | Infecção e lise seletiva de células bacterianas; alta especificidade ao hospedeiro | *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Ralstonia*, *Pectobacterium* e *Erwinia* | Liu *et al.* (2024); Jiang *et al.* (2023) |
| Consórcios microbianos | Combinações de microrganismos funcionalmente complementares | Associação de antibiose, competição, colonização radicular e indução de resistência | Variável conforme as estirpes utilizadas | Nunes *et al.* (2024) |

Fonte: Autores (2026).

### 3.2 Mecanismos de ação dos bioinsumos sobre fitopatógenos e plantas

Os bioinsumos microbianos atuam no controle de fitopatógenos por mecanismos diretos e indiretos, que podem ocorrer simultaneamente. Entre os mecanismos diretos destacam-se antibiose, competição por nutrientes e sítios de colonização, produção de enzimas hidrolíticas, parasitismo e interferência na comunicação celular dos patógenos (El-Saadony *et al*., 2022). Paralelamente, microrganismos benéficos podem melhorar a nutrição e estimular as defesas vegetais, reduzindo a suscetibilidade à infecção (Minchev *et al*., 2021). A predominância desses mecanismos depende da linhagem microbiana, do patossistema e das condições ambientais (Villavicencio-Vásquez *et al*., 2025), evidenciando que a eficiência do biocontrole resulta de múltiplas interações funcionais (Zehra *et al*., 2021).

A antibiose constitui importante mecanismo de supressão, envolvendo metabólitos capazes de interferir em processos celulares essenciais dos patógenos. Espécies de *Trichoderma* produzem peptaibóis, policetídeos, terpenos e compostos voláteis, além de exercerem micoparasitismo por meio do reconhecimento, contato e degradação das hifas (Yao *et al*., 2023; Mukherjee *et al*., 2022). Nesse processo, quitinases, β-1,3-glucanases e proteases contribuem para a lise da parede celular fúngica. Actinobactérias e espécies de *Streptomyces* também produzem antibióticos, sideróforos e enzimas extracelulares, ampliando seu potencial contra diferentes fitopatógenos (Kaur *et al*., 2023; Kovaleski *et al*., 2025).

A competição por espaço e nutrientes também é relevante, sobretudo na rizosfera. *Pseudomonas* apresenta elevada capacidade de colonização e formação de biofilmes, ocupando sítios que poderiam ser utilizados pelos patógenos (Mehmood *et al*., 2023). A produção de sideróforos reduz a disponibilidade de ferro, enquanto espécies de *Bacillus* produzem lipopeptídeos como surfactina, iturina e fengicina, capazes de comprometer membranas celulares dos fitopatógenos (Nihorimbere *et al*., 2024). Em *Bacillus velezensis* e *Streptomyces*, a produção de diferentes metabólitos antimicrobianos contribui para inibir germinação, crescimento e esporulação, reduzindo a pressão de inóculo (Kenfaoui *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024).

Além da supressão direta, os bioinsumos podem induzir resistência sistêmica na planta por meio da ativação de vias relacionadas principalmente ao ácido jasmônico e ao etileno (Yu *et al*., 2022). Esse processo pode estabelecer um estado de *priming*, favorecendo respostas mais rápidas após a infecção, incluindo produção de espécies reativas de oxigênio, fitoalexinas, compostos fenólicos, proteínas relacionadas à patogênese e reforço da parede celular (Salwan *et al*., 2023; Wilson *et al*., 2023). Microrganismos benéficos também podem promover crescimento e nutrição, como ocorre com fungos micorrízicos, *Bacillus* e *Trichoderma*, que favorecem a absorção de nutrientes e o desenvolvimento radicular (Wang *et al*., 2022; Santoyo *et al*., 2024). Endófitos ainda podem ocupar nichos internos e formar barreiras biológicas contra patógenos (Rabbee *et al*., 2024), reforçando a importância de selecionar linhagens capazes de colonizar a planta e expressar múltiplos mecanismos de forma persistente (Xiao *et al*., 2023).

### 3.3 Fatores que determinam a eficiência dos bioinsumos em condições agrícolas

A eficiência dos bioinsumos em campo depende da interação entre produto, ambiente, genótipo vegetal e manejo. Embora microrganismos benéficos apresentem bom desempenho em laboratório, sua resposta agrícola pode variar devido à competição, predação e oscilações de temperatura e umidade. Essa inconsistência está relacionada à dificuldade de selecionar

microrganismos capazes de permanecer funcionalmente ativos em diferentes solos e sistemas produtivos (Kaminsky *et al*., 2019). Além da cepa, concentração do inóculo, formulação, método de aplicação e adaptação às condições locais influenciam a sobrevivência e a colonização do agente (Mitter *et al*., 2021; O'Callaghan *et al*., 2022). Assim, a eficiência deve ser compreendida como resultado da interação microrganismo–planta–ambiente (Díaz-Rodríguez *et al*., 2025).

Temperatura, disponibilidade hídrica, pH, textura, salinidade, matéria orgânica e fertilidade condicionam a sobrevivência e a atividade dos agentes biológicos. A persistência dos inoculantes depende da tolerância às condições ambientais e da capacidade de competir com a microbiota residente (Benmrid *et al*., 2023). A baixa adaptação às condições bióticas e abióticas locais constitui importante causa de perda de eficiência no campo (Ayaz *et al*., 2023), enquanto a composição do microbioma do solo pode modificar a resposta à inoculação (Lutz *et al*., 2023). Metanálises confirmam ainda que os efeitos variam conforme o grupo microbiano, a cultura e o ambiente avaliado (Azarbad *et al*., 2024).

A formulação e a qualidade microbiológica também são determinantes. O produto deve preservar identidade, pureza, concentração e viabilidade durante produção, armazenamento e aplicação. Carreadores adequados protegem as células e favorecem sua sobrevivência e estabelecimento no ambiente (Bashan *et al*., 2014; Vassilev *et al*., 2020). A dose deve garantir população suficiente para colonização do nicho-alvo (Khan *et al*., 2023), enquanto a microencapsulação pode prolongar a vida útil e promover liberação gradual, desde que exista compatibilidade entre polímero, cepa e ambiente (Kaur *et al*., 2023).

O momento, o local e o método de aplicação também influenciam o desempenho. Radiação intensa, baixa umidade e temperaturas extremas podem reduzir a viabilidade de microrganismos aplicados às folhas (Quesada-Moraga, 2024). No solo, aplicações em sementes, mudas, sulcos ou fertirrigação podem favorecer o estabelecimento próximo às raízes, desde que as condições sejam adequadas. A distribuição do organismo-alvo e sua ecologia também devem ser consideradas (Abd-Elgawad, 2020), assim como a compatibilidade com fertilizantes, defensivos e adjuvantes, que podem afetar a atividade dos agentes biológicos (Tut *et al*., 2021). Por isso, sua utilização tende a ser mais eficiente quando integrada a outras práticas de manejo (Galli *et al*., 2024).

As interações entre inoculante, planta e microbioma residente explicam parte da variabilidade observada, pois exsudatos radiculares e comunidades nativas podem favorecer, restringir ou modificar a colonização. A introdução de microrganismos pode alterar a estrutura da microbiota do solo, dependendo do contexto ecológico (Mawarda *et al*., 2020). Consórcios

microbianos podem aumentar a complementaridade funcional, embora combinações inadequadas também possam gerar antagonismo (Shayanthan *et al*., 2022). Apesar de inoculantes apresentarem potencial para elevar a produtividade, as respostas variam entre culturas e sistemas de manejo (Li *et al*., 2022), reforçando a necessidade de validação em diferentes safras e condições produtivas (Bansal *et al*., 2025).

Portanto, respostas consistentes dependem de cepas adaptadas, formulações estáveis, controle de qualidade e recomendações específicas para cada ambiente. A caracterização do solo, o monitoramento das condições de aplicação, a pressão do organismo-alvo e a compatibilidade com outros insumos devem integrar o planejamento. Ensaios em diferentes locais e safras também são essenciais para definir doses e métodos de aplicação, reduzindo a distância entre o desempenho experimental e a eficiência comercial dos bioinsumos.

### 3.4 Novas estratégias de manejo e perspectivas para o controle biológico

O controle biológico de fitopatógenos tem avançado da seleção empírica de antagonistas para estratégias baseadas na ecologia do microbioma vegetal. A metagenômica permite identificar grupos microbianos associados à supressão de doenças e compreender interações na rizosfera e na filosfera (Trivedi *et al*., 2020). Com base nessas informações, comunidades microbianas sintéticas (SynComs) podem reunir isolados com mecanismos complementares de antagonismo (Martins *et al*., 2023). Em tomateiro, SynComs aumentaram a estabilidade do microbioma radicular e reduziram a murcha causada por *Fusarium oxysporum* (Zhou *et al*., 2022), enquanto consórcios de *Bacillus subtilis* e *Pseudomonas fluorescens* diminuíram a incidência da pinta-preta e favoreceram microrganismos benéficos (Jia *et al*., 2023). Esses resultados reforçam a importância da compatibilidade, colonização e estabilidade funcional dos microrganismos na formulação de bioinsumos.

O aprimoramento das formulações também é essencial para aumentar a sobrevivência dos agentes biológicos. Tecnologias de nano e microencapsulação podem protegê-los contra dessecação, radiação e variações térmicas, além de permitir liberação gradual (Saberi-Riseh *et al*., 2022). Matrizes biodegradáveis à base de amido também têm demonstrado potencial para preservar bactérias antagonistas (Saberi-Riseh *et al*., 2023). No tratamento de sementes, *Bacillus velezensis* encapsulado aumentou a sobrevivência bacteriana e a proteção contra *Plasmodiophora brassicae* (Abdukerim *et al*., 2023), enquanto sistemas de carragenana e trealose favoreceram a liberação controlada de bactérias utilizadas contra podridões-moles (Sason *et al*., 2023).

Os bacteriófagos constituem alternativa promissora para o controle de doenças bacterianas devido à elevada especificidade pelo hospedeiro (Jaglan *et al*., 2024). Coquetéis de fagos reduziram populações de *Ralstonia solanacearum* e a intensidade da murcha bacteriana em tomateiro (Wang *et al*., 2024), além de apresentarem eficiência contra *Pectobacterium carotovorum* (Vu *et al*., 2024). Entretanto, a seleção de bactérias resistentes pode comprometer sua eficácia, exigindo seleção de fagos líticos, formulações protetoras e monitoramento da sensibilidade das populações bacterianas (Rabiey *et al*., 2024).

Tecnologias baseadas em RNA também possibilitam o controle seletivo de fitopatógenos. O silenciamento gênico induzido por pulverização utiliza RNA de fita dupla para inativar genes essenciais à sobrevivência ou virulência do patógeno (Koch *et al*., 2016). Vesículas extracelulares vegetais podem participar do transporte de pequenos RNAs para células fúngicas (He *et al*., 2021), enquanto nanocarreadores podem aumentar a estabilidade dessas moléculas na superfície vegetal (Mitter *et al*., 2017). Contudo, diferenças na absorção do RNA entre espécies podem limitar sua eficiência, exigindo ajustes do gene-alvo, concentração e sistema de aplicação (Qiao *et al*., 2021).

A consolidação dessas tecnologias dependerá de sua integração ao manejo da cultura, pois solo, clima, genótipo vegetal e microbiota residente influenciam o desempenho dos agentes biológicos (Köhl *et al*., 2019). A associação com cultivares resistentes, rotação de culturas, matéria orgânica, manejo hídrico e uso racional de defensivos tende a proporcionar maior estabilidade no campo (Lahlali *et al*., 2022). Ferramentas ômicas e modelos computacionais podem auxiliar na seleção de isolados e combinações adaptadas a diferentes ambientes (Massart *et al*., 2015), enquanto ensaios multilocais, padronização da qualidade e regulamentação adequada serão necessários para ampliar sua aplicação comercial (Collinge *et al*., 2022).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os bioinsumos apresentam elevado potencial para o controle sustentável de fitopatógenos agrícolas, atuando por mecanismos como antibiose, competição, micoparasitismo, produção de enzimas e indução de resistência nas plantas. Fungos, bactérias, leveduras, bacteriófagos, metabólitos naturais e consórcios microbianos ampliam as possibilidades de manejo e podem contribuir simultaneamente para a redução das doenças, a promoção do crescimento e o fortalecimento da tolerância vegetal aos estresses.

Entretanto, a eficiência desses produtos em campo depende da interação entre o agente biológico, a cultura, o patógeno, o ambiente, a formulação e o método de aplicação. A seleção

de linhagens adaptadas, o controle de qualidade, a manutenção da viabilidade e a validação em diferentes safras e condições edafoclimáticas são fundamentais para reduzir a variabilidade dos resultados.

As novas estratégias baseadas em comunidades microbianas sintéticas, encapsulação, bacteriófagos, moléculas de RNA e ferramentas ômicas poderão aumentar a especificidade, a persistência e a estabilidade dos bioinsumos. Contudo, sua consolidação exige pesquisas em condições agrícolas, regulamentação adequada e integração com práticas culturais, genéticas, físicas e químicas. Dessa forma, os bioinsumos devem ser compreendidos como componentes do manejo integrado de doenças, e não como soluções isoladas, contribuindo para sistemas produtivos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

## REFERÊNCIAS


ABD-ELGAWAD, M. M. M.; ASKARY, T. H. Factors affecting success of biological agents used in controlling the plant-parasitic nematodes. Egyptian Journal of Biological Pest Control, v. 30, art. 17, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s41938-020-00215-2.

ABDUKERIM, R.; LI, X.; WANG, X.; ZHANG, Y.; LIU, B.; ZHANG, Z. Seed pelleting with gum Arabic-encapsulated biocontrol bacteria for the management of clubroot disease. Frontiers in Microbiology, v. 14, 2023.

ASAD, S. A. Mechanisms of action and biocontrol potential of Trichoderma against fungal plant diseases: a review. Ecological Complexity, v. 49, art. 100978, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2021.100978.

AYAZ, M.; LI, C.-H.; ALI, Q.; ZHAO, W.; CHI, Y.-K.; SHAFIQ, M.; ALI, F.; YU, X.-Y.; YU, Q.; ZHAO, J.-T.; YU, J.-W.; QI, R.; HUANG, W. Bacterial and fungal biocontrol agents for plant disease protection: journey from lab to field, current status, challenges, and global perspectives. Molecules, v. 28, n. 18, art. 6735, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28186735.

AZARBAD, H.; JUNKER, R. R. Biological and experimental factors that define the effectiveness of microbial inoculation on plant traits: a meta-analysis. ISME Communications, v. 4, n. 1, art. ycae122, 2024. DOI: https://doi.org/10.1093/ismeco/ycae122.

BANSAL, R.; VYAS, P.; SHARMA, S. Formulation and field performance of liquid phosphate-solubilizing bacterial biofertilizer for improved growth, yield, and nutrient content of potato. Frontiers in Microbiology, v. 16, art. 1734471, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1734471.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E.; PRABHU, S. R.; HERNANDEZ, J.-P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). Plant and Soil, v. 378, n. 1–2, p. 1–33, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x.

BENMRID, B.; GHOULAM, C.; ZEROUAL, Y.; KOUISNI, L.; BARGAZ, A. Bioinoculants as a means of increasing crop tolerance to drought and phosphorus deficiency in legume–cereal intercropping systems. Communications Biology, v. 6, art. 1016, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-023-05399-5.

COLLINGE, D. B.; JENSEN, D. F.; RABIEY, M.; SARROCCO, S.; SHAW, M. W.; SHAW, R. H. Biological control of plant diseases: what has been achieved and what is the direction? Plant Pathology, v. 71, n. 5, p. 1024–1047, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/ppa.13555.

DÍAZ-RODRÍGUEZ, A. M.; PARRA COTA, F. I.; CIRA CHÁVEZ, L. A.; GARCÍA ORTEGA, L. F.; ESTRADA ALVARADO, M. I.; SANTOYO, G.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S. Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions. Plants, v. 14, n. 2, art. 191, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/plants14020191.

DOW, L.; GALLART, M.; RAMARAJAN, M.; LAW, S. R.; THATCHER, L. F. Streptomyces and their specialised metabolites for phytopathogen control: comparative in vitro and in planta metabolic approaches. Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1151912, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1151912.

EL-SAADONY, M. T.; SAAD, A. M.; SOLIMAN, S. M.; SALEM, H. M.; AHMED, A. I.; MAHMOOD, M.; EL-TAHAN, A. M.; EBRAHIM, A. A. M.; ABD EL-MAGEED, T. A.; NEGM, S. H.; SELIM, S.; BABALGHITH, A. O.; ELRYS, A. S.; EL-TARABILY, K. A.; ABUQAMAR, S. F. Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: mechanisms, challenges and future perspectives. Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 923880, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880.

FENTA, L.; MEKONNEN, H.; KABTIMER, N. The exploitation of microbial antagonists against postharvest plant pathogens. Microorganisms, v. 11, n. 4, art. 1044, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11041044.

GALLI, M.; FELDMANN, F.; VOGLER, U. K.; KOGEL, K.-H. Can biocontrol be the game-changer in integrated pest management? A review of definitions, methods and strategies. Journal of Plant Diseases and Protection, v. 131, p. 265–291, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s41348-024-00878-1.

GREFF, B.; SÁHÓ, A.; LAKATOS, E.; VARGA, L. Biocontrol activity of aromatic and medicinal plants and their bioactive components against soil-borne pathogens. Plants, v. 12, n. 4, art. 706, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12040706.

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; SANTOS-VILLALOBOS, S. de los; PARRA-COTA, F. I.; OROZCO-MOSQUEDA, M. del C.; FADIJI, A. E.; HYDER, S.; BABALOLA, O. O.; SANTOYO, G. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—a review. Plants, v. 12, n. 3, art. 432, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12030432.

HE, B.; CAI, Q.; QIAO, L.; HUANG, C. Y.; WANG, S.; MIAO, W.; HAUSSECKER, M.; JIN, H. RNA-binding proteins contribute to small RNA loading in plant extracellular vesicles. Nature Plants, v. 7, p. 342–352, 2021.

JAGLAN, A. B.; KUMAR, S.; BANSAL, K.; CHHIBBER, S. Phage-mediated biocontrol: a promising green solution for plant disease management. Viruses, v. 16, 2024.

JIA, Y.; NIU, H.; ZHAO, P.; LI, X.; YAN, F.; WANG, C.; QIU, Z. Synergistic biocontrol of Bacillus subtilis and Pseudomonas fluorescens against early blight disease in tomato. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 107, p. 5719–5734, 2023.

JIANG, H.; LI, C.; HUANG, X.; AHMED, T.; OGUNYEMI, S. O.; YU, S.; WANG, X.; ALI, H. M.; KHAN, F.; YAN, C.; CHEN, J.; LI, B. Phage combination alleviates bacterial leaf blight of rice (Oryza sativa L.). Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1147351, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1147351.

JUNG, J.; AHN, S.; KIM, D.-H.; RIU, M. Triple interactions for induced systemic resistance in plants. Frontiers in Plant Science, v. 15, art. 1464710, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1464710.

KAMINSKY, L. M.; TREXLER, R. V.; MALIK, R. J.; HOCKETT, K. L.; BELL, T. H. The inherent conflicts in developing soil microbial inoculants. Trends in Biotechnology, v. 37, n. 2, p. 140–151, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.11.011.

KAUR, R.; KAUR, S.; DWIBEDI, V.; KAUR, C.; AKHTAR, N.; ALZAHRANI, A. Development and characterization of rice bran–gum Arabic based encapsulated biofertilizer for enhanced shelf life and controlled bacterial release. Frontiers in Microbiology, v. 14, art. 1267730, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1267730.

KAUR, T.; RANI, R.; MANHAS, R. K. Mechanistic insights into the role of actinobacteria as potential biocontrol candidates against fungal phytopathogens. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023.

KENFAOUI, J.; DUTILLOY, E.; BENCHLIH, S.; LAHLALI, R.; AIT-BARKA, E.; ESMAEEL, Q. Bacillus velezensis: a versatile ally in the battle against phytopathogens—insights and prospects. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 108, art. 439, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-024-13255-7.

KHAN, A.; SINGH, A. V.; GAUTAM, S. S.; AGARWAL, A.; PUNETHA, A.; UPADHYAYAY, V. K.; KUKRETI, B.; BUNDELA, V.; JUGRAN, A. K.; GOEL, R. Microbial bioformulation: a microbial assisted biostimulating fertilization technique for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1270039, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1270039.

KOCH, A.; BIEDENKOPF, D.; FURCH, A.; WEBER, L.; ROSSMANN, T.; ABDALLAHI, S.; LIN, J.; JUDASCHKE, K.; VON TIEDEMANN, A.; KOGEL, K. H. An RNAi-based control of Fusarium graminearum infections through spraying of long dsRNAs involves a plant passage and is controlled by the fungal silencing machinery. PLoS Pathogens, v. 12, n. 10, e1005901, 2016.

KÖHL, J.; KOLNAAR, R.; RAVENSBERG, W. J. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. Frontiers in Plant Science, v. 10, art. 845, 2019.

KOVALESKI, M.; MAURER, T. R.; BANFI, M.; REMOR, M.; RESTELATTO, M.; RIEDER, R.; DEUNER, C. C.; COLLA, L. M. Biocontrol of plant pathogens by actinomycetes: a bibliometric analysis and systematic review. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 41, n. 7, art. 243, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-025-04422-7.

LAHLALI, R.; EZRARI, S.; RADOUANE, N.; KENFAOUI, J.; ESMAEEL, Q.; EL HAMSS, H.; BELABESS, Z.; BARKA, E. A. Biological control of plant pathogens: a global perspective. Microorganisms, v. 10, n. 3, art. 596, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596.

LI, J.; WANG, J.; LIU, H.; MACDONALD, C. A.; SINGH, B. K. Application of microbial inoculants significantly enhances crop productivity: a meta-analysis of studies from 2010 to 2020. Journal of Sustainable Agriculture and Environment, v. 1, n. 3, p. 216–225, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/sae2.12028.

LIU, L.; WANG, B.; HUANG, A.; ZHANG, H.; LI, Y.; WANG, L. Biological characteristics of the bacteriophage LDT325 and its potential application against the plant pathogen Pseudomonas syringae. Frontiers in Microbiology, v. 15, art. 1370332, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1370332.

LUTZ, S.; BODENHAUSEN, N.; HESS, J.; VALZANO-HELD, A.; WAELCHLI, J.; DESLANDES-HÉROLD, G.; SCHLAEPPI, K.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. Nature Microbiology, v. 8, p. 2277–2289, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41564-023-01520-w.

MARTINS, S. J.; ROCHA, G. A.; GEHMAN, L. O. M.; SALLES, J. F. The use of synthetic microbial communities to improve plant health. Phytopathology, v. 113, n. 8, p. 1369–1379, 2023.

MASSART, S.; MARTINEZ-MEDINA, M.; JIJAKLI, M. H. Biological control in the microbiome era: challenges and opportunities. Biological Control, v. 89, p. 98–108, 2015.

MAWARDA, P. C.; LE ROUX, X.; VAN ELSAS, J. D.; SALLES, J. F. Deliberate introduction of invisible invaders: a critical appraisal of the impact of microbial inoculants on soil microbial communities. Soil Biology and Biochemistry, v. 148, art. 107874, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107874.

MEHMOOD, N.; SAEED, M.; ZAFARULLAH, S.; HYDER, S.; RIZVI, Z. F.; GONDAL, A. S.; JAMIL, N.; IQBAL, R.; ALI, B.; ERCISLI, S.; KUPE, M. Multifaceted impacts of plant-beneficial Pseudomonas spp. in managing various plant diseases and crop yield improvement. ACS Omega, v. 8, n. 25, p. 22296–22315, 2023. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00870.

MINCHEV, Z.; KOSTENKO, O.; SOLER, R.; POZO, M. J. Microbial consortia for effective biocontrol of root and foliar diseases in tomato. Frontiers in Plant Science, v. 12, art. 756368, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.756368.

MITTER, E. K.; TOSI, M.; OBREGÓN, D.; DUNFIELD, K. E.; GERMIDA, J. J. Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 5, art. 606815, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815.

MITTER, N.; WORRALL, E. A.; ROBINSON, K. E.; LI, P.; JAIN, R. G.; TAOCHY, C.; FLETCHER, S. J.; CARROLL, B. J.; LU, G. Q.; XU, Z. P. Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses. Nature Plants, v. 3, art. 16207, 2017.

MUKHERJEE, P. K.; MENDOZA-MENDOZA, A.; ZEILINGER, S.; HORWITZ, B. A. Mycoparasitism as a mechanism of Trichoderma-mediated suppression of plant diseases. Fungal Biology Reviews, v. 39, p. 15–33, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004.

NUNES, P. S. O.; LACERDA-JÚNIOR, G. V.; MASCARIN, G. M.; GUIMARÃES, R. A.; MEDEIROS, F. H. V.; ARTHURS, S.; BETTIOL, W. Microbial consortia of biological products: do they have a future? Biological Control, v. 188, art. 105439, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105439.

O'CALLAGHAN, M.; BALLARD, R. A.; WRIGHT, D. Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: limitations and opportunities. Soil Use and Management, v. 38, n. 3, p. 1340–1369, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12811.

PANDIT, M. A.; KUMAR, J.; GULATI, S.; BHANDARI, N.; MEHTA, P.; KATYAL, R.; RAWAT, C. D.; MISHRA, V.; KAUR, J. Major biological control strategies for plant pathogens. Pathogens, v. 11, n. 2, art. 273, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/pathogens11020273.

QIAO, L.; LAN, C.; CAPPELLOZZA, S.; AHN, S.; JORDAN, M. H.; GONG, L.; HETHERINGTON, P. R.; ZHAO, H.; XU, H.; PENG, W.; SHI, J.; HAO, Y.; CAO, X.; DENG, Y.; ZHAO, Y.; CHAI, J.; JIN, H. Spray-induced gene silencing for disease control is dependent on the efficiency of pathogen RNA uptake. Plant Biotechnology Journal, v. 19, n. 9, p. 1756–1768, 2021.

QUESADA-MORAGA, E.; GONZÁLEZ-MAS, N.; YOUSEF-YOUSEF, M.; GARRIDO-JURADO, I.; FERNÁNDEZ-BRAVO, M. Key role of environmental competence in successful use of entomopathogenic fungi in microbial pest control. Journal of Pest Science, v. 97, p. 1–15, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10340-023-01622-8.

RABBEE, M. F.; ALI, M. S.; ISLAM, M. N.; RAHMAN, M. M.; HASAN, M. M.; BAEK, K.-H. Endophyte mediated biocontrol mechanisms of phytopathogens in agriculture. Research in Microbiology, v. 175, n. 8, art. 104229, 2024.

RABIEY, M.; ROYLE, M.; COOK, R.; CARVALHO, G.; JACKSON, R. W. Coevolutionary analysis of Pseudomonas syringae–phage interactions informs the development of bacteriophage biocontrol. Microbial Biotechnology, 2024.

SABERI-RISEH, R.; MORADI-POUR, M.; MOHAMMADINEJAD, R.; THAKUR, V. K. Nano/microencapsulation of plant biocontrol agents by polysaccharides: a review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 220, p. 1237–1256, 2022.

SABERI-RISEH, R.; SKORIK, Y. A.; THAKUR, V. K.; MORADI-POUR, M. Encapsulating biocontrol bacteria with starch as a safe and green technology for plant disease management. Carbohydrate Polymers, v. 302, art. 120384, 2023.

SAIYAM, D.; DUBEY, A.; MALLA, M. A.; KUMAR, A. Lipopeptides from Bacillus: unveiling biotechnological prospects—sources, properties, and diverse applications. Brazilian Journal of Microbiology, v. 55, n. 1, p. 281–295, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42770-023-01228-3.

SALWAN, R.; SHARMA, M.; SHARMA, A.; SHARMA, V. Insights into plant beneficial microorganism-triggered induced systemic resistance. Plant Stress, v. 7, art. 100140, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100140.

SANTOYO, G.; OROZCO-MOSQUEDA, M. del C.; AFRIDI, M. S.; MITRA, D.; VALENCIA-CANTERO, E.; MACÍAS-RODRÍGUEZ, L. Trichoderma and Bacillus multifunctional allies for plant growth and health in saline soils: recent advances and future challenges. Frontiers in Microbiology, v. 15, art. 1423980, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1423980.

SASON, G.; OPPENHEIMER-SHAANAN, Y.; OFEK-LALZAR, M.; PASTERNAK, Z.; JURKEVITCH, E. Biological control of soft rot in potato by carrageenan–trehalose-encapsulated bacterial predators. Biological Control, v. 176, 2023.

SHAYANTHAN, A.; ORDOÑEZ, P. A. C.; ORESNIK, I. J. The role of synthetic microbial communities (SynCom) in sustainable agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 4, art. 896307, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2022.896307.

TRIVEDI, P.; LEACH, J. E.; TRINGE, S. G.; SA, T.; SINGH, B. K. Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. Nature Reviews Microbiology, v. 18, p. 607–621, 2020.

TUT, G.; MAGAN, N.; BRAIN, P.; XU, X. Critical evaluation of two commercial biocontrol agents for their efficacy against Botrytis cinerea under in vitro and in vivo conditions in relation to different abiotic factors. Agronomy, v. 11, n. 9, art. 1868, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy11091868.

VASSILEV, N.; VASSILEVA, M.; MARTOS, V.; GARCIA DEL MORAL, L. F.; KOWALSKA, J.; TYLKOWSKI, B.; MALUSÁ, E. Formulation of microbial inoculants by encapsulation in natural polysaccharides: focus on beneficial properties of carrier additives and derivatives. Frontiers in Plant Science, v. 11, art. 270, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00270.

VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ, M.; ESPINOZA-LOZANO, F.; ESPINOZA-LOZANO, L.; CORONEL-LEÓN, J. Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 7, art. 1578915, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915.

VU, N. T.; OH, C. S.; LEE, D. H.; PARK, D. H. Bacteriophage cocktail for biocontrol of soft rot disease caused by Pectobacterium carotovorum. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 108, art. 11, 2024.

WANG, H.; HAO, Z.; ZHANG, X.; XIE, W.; CHEN, B. Arbuscular mycorrhizal fungi induced plant resistance against Fusarium wilt in jasmonate biosynthesis defective mutant and wild type of tomato. Journal of Fungi, v. 8, n. 5, art. 422, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/jof8050422.

WANG, M.; LI, H.; LI, J.; ZHANG, W.; ZHANG, J. Streptomyces strains and their metabolites for biocontrol of phytopathogens in agriculture. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 72, n. 4, p. 2077–2088, 2024. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08265.

WANG, X.; WEI, Z.; YANG, K.; WANG, J.; JOUSSET, A.; XU, Y.; FRIMAN, V. P. Phages enhance both phytopathogen density control and resident microbiota-mediated disease suppression. mBio, v. 15, 2024.

WILSON, S. K.; PRETORIUS, T.; NAIDOO, S. Mechanisms of systemic resistance to pathogen infection in plants and their potential application in forestry. BMC Plant Biology, v. 23, art. 404, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-023-04391-9.

XIAO, Z.; ZHAO, Q.; LI, W.; GAO, L.; LIU, G. Strain improvement of Trichoderma harzianum for enhanced biocontrol capacity: strategies and prospects. Frontiers in Microbiology, v. 14, art. 1146210, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1146210.

YAO, X.; GUO, H.; ZHANG, K.; ZHAO, M.; RUAN, J.; CHEN, J. Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. Frontiers in Microbiology, v. 14, art. 1160551, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551.

YU, Y.; GUI, Y.; LI, Z.; JIANG, C.; GUO, J.; NIU, D. Induced systemic resistance for improving plant immunity by beneficial microbes. Plants, v. 11, n. 3, art. 386, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11030386.

ZEHRA, A.; RAYTEKAR, N. A.; MEENA, M.; SWAPNIL, P. Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: a review. Current Research in Microbial Sciences, v. 2, art. 100054, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100054.

ZHANG, N.; WANG, Z.; SHAO, J.; XU, Z.; LIU, Y.; XUN, W.; MIAO, Y.; SHEN, Q.; ZHANG, R. Biocontrol mechanisms of Bacillus: improving the efficiency of green agriculture. Microbial Biotechnology, v. 16, n. 12, p. 2250–2263, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/1751-7915.14348.

ZHOU, X.; WANG, J.; LIU, F.; LIANG, J.; ZHAO, P.; TSAUI, C. K. M.; CAI, L. Cross-kingdom synthetic microbiota supports tomato suppression of Fusarium wilt disease. Nature Communications, v. 13, art. 7890, 2022.

# CAPÍTULO 4

## O PAPEL DO MANEJO HÍDRICO NA MODULAÇÃO DA MICROBIOTA E NA CONSTRUÇÃO DA SUPRESSIVIDADE A FITOPATÓGENOS DE SOLO

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-4

Gabrielle Ferreira de Lira, e-mail: gabrielle.lira@ceca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/1312682876827043
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
João Pedro Silva Oliveira, e-mail: jpoliveira875@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/1145217569751642
Maria Laiane da Silva, e-mail: maria.laiane@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5197880533423893
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

## RESUMO

A disponibilidade de água constitui um dos principais fatores reguladores das interações entre plantas, microrganismos e fitopatógenos no solo, podendo influenciar diretamente a composição e a atividade do microbioma e, consequentemente, a ocorrência de doenças. Este capítulo teve como objetivo discutir o papel do manejo hídrico na modulação da microbiota e na construção da supressividade a fitopatógenos habitantes do solo, considerando as relações entre disponibilidade de água, comunidades microbianas e patógenos, os mecanismos microbiológicos de supressão e as estratégias de manejo capazes de favorecer solos biologicamente equilibrados. Foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, abrangendo principalmente estudos publicados entre 2010 e 2026. As evidências analisadas demonstram que a umidade do solo regula a difusão de nutrientes, a disponibilidade de oxigênio, a mobilidade microbiana e as interações estabelecidas na rizosfera. Déficits hídricos severos podem reduzir a biomassa e desestruturar redes microbianas, enquanto a saturação prolongada limita a oxigenação e pode favorecer fitopatógenos adaptados a ambientes úmidos. Em contrapartida, regimes hídricos adequadamente manejados podem favorecer comunidades microbianas benéficas e mecanismos de supressão relacionados à competição por recursos e sítios de colonização, produção de sideróforos, compostos antimicrobianos e enzimas, além da ativação das defesas vegetais. Estratégias como irrigação localizada, monitoramento da umidade, déficits controlados, boa drenagem e integração com cobertura do solo, matéria orgânica, rotação de culturas e bioinsumos podem contribuir para maior estabilidade do microbioma e redução dos riscos de doenças. Conclui-se que o manejo hídrico pode atuar como ferramenta ecológica complementar na construção e manutenção de solos supressivos, desde que seja ajustado às características do solo, da cultura, da microbiota e do patossistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** manejo hídrico; microbiota do solo; solos supressivos; fitopatógenos; irrigação; controle biológico.

## 1. INTRODUÇÃO

O solo constitui um ambiente biologicamente complexo, no qual raízes, microrganismos e componentes físico-químicos interagem continuamente, influenciando a nutrição, o crescimento e a sanidade das plantas. Entre os fatores que regulam essas interações, a

disponibilidade de água ocupa posição central, pois determina a conectividade dos poros, a difusão de nutrientes, as trocas gasosas e a mobilidade dos organismos no ambiente edáfico (Schimel, 2018). Alterações no conteúdo hídrico podem modificar a biomassa, a composição e a atividade metabólica da microbiota, selecionando grupos com diferentes níveis de tolerância à dessecação ou à baixa disponibilidade de oxigênio (Naylor; Coleman-Derr, 2018). Eventos de seca, reumedecimento ou saturação também interferem na decomposição da matéria orgânica e nos ciclos do carbono e do nitrogênio (Meisner *et al*., 2021), enquanto mudanças prolongadas no regime de umidade podem reorganizar as redes de interação responsáveis pela estabilidade funcional do microbioma do solo (de Vries *et al*., 2018).

Nos sistemas agrícolas, a irrigação não atua somente no suprimento das necessidades hídricas das culturas, mas também como um importante filtro ecológico das comunidades microbianas associadas ao solo e às raízes. A quantidade, a frequência e a distribuição da água modificam o crescimento radicular e a liberação de exsudatos, alterando os recursos disponíveis para bactérias, fungos e arqueias na rizosfera (Naylor *et al*., 2017). Regimes hídricos moderadamente restritivos podem favorecer a aeração, a diversidade bacteriana e determinadas atividades enzimáticas (Muhammad *et al*., 2022), enquanto déficits intensos tendem a reduzir a biomassa microbiana e a abundância de fungos micorrízicos arbusculares (Flynn *et al*., 2021). Por sua vez, o excesso de água preenche os espaços porosos, limita a difusão de oxigênio e pode criar condições favoráveis à multiplicação e à dispersão de fitopatógenos adaptados a ambientes saturados, sobretudo espécies dos gêneros *Pythium* e *Phytophthora* (Judelson, 2018).

A influência da água sobre as doenças radiculares, entretanto, não depende apenas da resposta direta dos patógenos, mas do equilíbrio estabelecido entre o hospedeiro, o agente infeccioso e a microbiota residente. Comunidades microbianas diversificadas e funcionalmente organizadas podem restringir a invasão dos fitopatógenos por meio da competição por nutrientes e sítios de colonização, da produção de sideróforos e compostos antimicrobianos e da degradação de estruturas do patógeno (Schlatter *et al*., 2017).

Além disso, microrganismos benéficos podem estimular as vias de defesa das plantas e ampliar a resistência contra infecções subsequentes (Pieterse *et al*., 2021). A atuação integrada desses mecanismos está associada à supressividade do solo, propriedade pela qual o desenvolvimento de uma doença permanece limitado mesmo na presença do patógeno, do hospedeiro suscetível e de condições potencialmente favoráveis à infecção (Gómez Expósito *et al*., 2017). Essa proteção pode resultar tanto da atividade coletiva da comunidade microbiana quanto da atuação de grupos específicos e de suas redes de interação (Todorović *et al*., 2023).

Compreender a participação do regime hídrico na construção e na manutenção da supressividade representa, portanto, uma abordagem promissora para integrar o manejo da irrigação ao controle biológico de doenças. A irrigação localizada, o monitoramento da umidade, a prevenção do encharcamento e a adoção de déficits controlados podem direcionar o microbioma da rizosfera e favorecer grupos potencialmente antagonistas (Gao *et al*., 2019). Entretanto, esses efeitos dependem da textura e da fertilidade do solo, da qualidade da água, do genótipo vegetal, das condições climáticas e do patossistema considerado (Martins *et al*., 2023).

A integração da irrigação com cobertura do solo, matéria orgânica, rotação de culturas e bioinsumos pode ampliar a estabilidade das comunidades protetoras, desde que sejam evitadas oscilações hídricas capazes de desestruturar suas interações (Keating *et al*., 2024). Nesse contexto, este capítulo objetiva discutir o papel do manejo hídrico na modulação da microbiota e na construção da supressividade a fitopatógenos de solo, abordando as relações entre disponibilidade de água, comunidades microbianas e patógenos, os mecanismos microbiológicos de supressão e as estratégias de manejo capazes de favorecer solos biologicamente mais equilibrados e resistentes às doenças.

## 2. METODOLOGIA

O presente capítulo de livro caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o papel do manejo hídrico na modulação da microbiota do solo e na construção da supressividade a fitopatógenos habitantes do solo. A revisão concentrou-se nos efeitos da disponibilidade de água sobre a composição, a diversidade e a atividade das comunidades microbianas, nas relações estabelecidas entre microbiota, plantas e patógenos e nas práticas de irrigação capazes de favorecer a estabilidade biológica e fitossanitária do ambiente edáfico.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira o manejo da água pode modificar a estrutura e o funcionamento da microbiota do solo e contribuir para a construção e a manutenção da supressividade a fitopatógenos? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à disponibilidade hídrica do solo, à irrigação agrícola, ao microbioma edáfico e rizosférico, aos solos supressivos, às interações entre plantas e microrganismos, aos fitopatógenos habitantes do solo, ao controle biológico e ao manejo integrado de doenças.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2010 e 2026, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos

conceitos de microbiota do solo, rizosfera, supressividade, antagonismo microbiano e epidemiologia de doenças radiculares. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *water management*, *irrigation management*, *soil moisture*, *water availability*, *soil microbiome*, *rhizosphere microbiome*, *disease-suppressive soil*, *soil suppressiveness*, *soilborne pathogens*, *microbial antagonism*, *biological control*, *root diseases*, *drought stress*, *waterlogging* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos originais, revisões, meta-análises, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta entre o regime hídrico, a microbiota do solo e a ocorrência ou severidade de doenças causadas por fitopatógenos habitantes do solo. Também foram considerados estudos que avaliassem os efeitos da quantidade, da frequência e da distribuição da água sobre a biomassa, a diversidade, a composição taxonômica, as redes de interação e a atividade metabólica das comunidades microbianas. Foram incluídas pesquisas sobre irrigação deficitária, secagem e reumedecimento, saturação hídrica, drenagem, qualidade da água, exsudação radicular, recrutamento de microrganismos benéficos, indução de resistência e integração da irrigação com práticas biológicas e culturais.

Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos voltados exclusivamente à produtividade, à nutrição ou à eficiência do uso da água sem avaliação microbiológica ou fitossanitária, bem como trabalhos que não apresentassem informações suficientes sobre o regime hídrico, o tipo de solo, a cultura, a comunidade microbiana ou o patógeno investigado. Estudos duplicados, documentos sem acesso às informações essenciais e publicações cuja abordagem não permitisse interpretar os efeitos do manejo hídrico sobre a microbiota ou a supressividade do solo também não foram considerados na síntese.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e sua contribuição para a compreensão das relações entre água, microbiota, plantas e fitopatógenos. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica dos mecanismos, das evidências experimentais e dos fatores responsáveis pela variabilidade das respostas observadas em diferentes solos, culturas e patossistemas.

As informações extraídas dos estudos foram organizadas considerando autor e ano de publicação, tipo e textura do solo, cultura avaliada, fitopatógeno investigado, método de irrigação, quantidade e frequência de aplicação da água, nível de umidade ou potencial hídrico, duração do experimento e condições de cultivo. Quando disponíveis, também foram examinadas informações sobre biomassa e diversidade microbiana, composição taxonômica e funcional do microbioma, abundância do patógeno, atividade enzimática, disponibilidade de nutrientes, oxigenação do solo, composição dos exsudatos radiculares, recrutamento de microrganismos antagonistas e efeitos sobre a incidência ou a severidade das doenças.

A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que os efeitos de determinado regime hídrico não podem ser automaticamente extrapolados entre diferentes combinações de solo, planta, microbiota e patógeno. Também foram analisadas possíveis respostas neutras ou desfavoráveis, especialmente aquelas relacionadas a déficits hídricos severos, ciclos abruptos de secagem e reumedecimento, saturação prolongada, baixa oxigenação, salinidade da água e alterações ambientais capazes de desestruturar comunidades microbianas protetoras ou favorecer a sobrevivência, a dispersão e a atividade infectiva dos fitopatógenos.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: o manejo hídrico como regulador da microbiota do solo; relações entre disponibilidade de água, microbiota e fitopatógenos de solo; mecanismos microbiológicos envolvidos na construção da supressividade; e estratégias de manejo hídrico para favorecer solos supressivos. Essa organização permitiu integrar conhecimentos de microbiologia do solo, fitopatologia, irrigação e manejo agrícola, proporcionando uma compreensão abrangente do manejo da água como ferramenta ecológica complementar para direcionar o microbioma, fortalecer os mecanismos naturais de supressão e reduzir os riscos de doenças de plantas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 O manejo hídrico como regulador da microbiota do solo

A disponibilidade de água constitui um dos principais filtros ambientais da microbiota do solo, pois controla a difusão de substratos, a mobilidade celular, as trocas gasosas e o contato entre microrganismos e recursos orgânicos. Quando o conteúdo hídrico diminui, a redução da espessura dos filmes de água ao redor das partículas restringe o deslocamento de nutrientes e aumenta o estresse osmótico, reduzindo a respiração, o crescimento e a atividade enzimática microbiana (Schimel, 2018). A seca também seleciona organismos capazes de produzir

osmólitos, formar estruturas de resistência ou permanecer metabolicamente dormentes, modificando a composição e o potencial funcional da comunidade (Naylor *et al*., 2017).

Em sentido oposto, o excesso de água preenche os poros do solo, limita a difusão de oxigênio e favorece processos anaeróbios, como desnitrificação e metanogênese. Por isso, alterações na umidade podem modificar simultaneamente bactérias, fungos e arqueias, bem como os ciclos do carbono e do nitrogênio (Meisner *et al*., 2021). Evidências experimentais demonstram ainda que eventos de secagem e reumedecimento provocam mudanças mais intensas na estrutura microbiana do que reduções moderadas e contínuas da precipitação (Wang *et al*., 2022).

Nos sistemas agrícolas, a irrigação atua sobre a microbiota tanto diretamente, pela alteração do conteúdo e da distribuição da água no perfil, quanto indiretamente, ao modificar a disponibilidade de nutrientes, o crescimento radicular e a liberação de exsudatos. Em cultivo de milho, a irrigação deficitária prolongada reduziu a biomassa microbiana e a abundância de marcadores de fungos micorrízicos arbusculares, embora tenha estimulado o aprofundamento das raízes (Flynn *et al*., 2021). Entretanto, o fornecimento elevado de água nem sempre resulta em maior diversidade, pois condições moderadamente restritivas podem favorecer a aeração e criar maior heterogeneidade de micro-habitats. Muhammad *et al*. (2022) verificaram que a manutenção do solo a 60% da capacidade de campo, associada ao manejo adequado do nitrogênio, promoveu maior diversidade bacteriana, atividade enzimática e disponibilidade de nutrientes que a condição de 80%.

A conversão de áreas semiáridas para agricultura irrigada também pode aumentar a riqueza bacteriana e alterar os perfis lipídicos e as funções relacionadas à incorporação de carbono, embora reduções na diversidade de fungos possam ocorrer (Frene *et al*., 2022). Além disso, a irrigação localizada reorganiza as comunidades por meio dos gradientes de umidade e fertilidade formados ao redor dos emissores, sendo o nitrogênio disponível particularmente determinante para as bactérias e o conjunto de nutrientes mais relevante para os fungos (Wang *et al*., 2024).

A frequência e a intensidade da irrigação são tão importantes quanto o volume total aplicado. Ciclos acentuados de secagem e reumedecimento podem provocar lise celular, liberação de compostos intracelulares e rápida mineralização da matéria orgânica após a reposição da água, produzindo pulsos de emissão de $CO_2$ e de disponibilização de nutrientes (Meisner *et al*., 2021). Wang *et al*. (2022) observaram que o reumedecimento de solos secos alterou intensamente a diversidade e a estrutura da microbiota, incluindo aumento relativo de arqueias oxidantes de amônia, com possíveis consequências para o ciclo do nitrogênio. Esses

efeitos não se limitam ao momento da irrigação, pois exposições anteriores podem deixar "legados" ecológicos que condicionam a resposta da comunidade a eventos hídricos posteriores (Schimel, 2018).

Na rizosfera, a redução da água também interage com a seleção promovida pela planta, favorecendo grupos tolerantes à dessecação, como diferentes representantes de Actinobacteria, embora a intensidade dessa seleção varie entre espécies vegetais (Naylor *et al*., 2017). Dessa forma, irrigações muito espaçadas podem selecionar comunidades resistentes, mas também reduzir a biomassa e comprometer temporariamente funções relacionadas à decomposição, à ciclagem de nutrientes e às associações micorrízicas.

O manejo hídrico deve, portanto, buscar uma faixa de umidade que preserve a atividade microbiana sem provocar saturação prolongada ou sucessivos choques de reumedecimento. O monitoramento da umidade e a aplicação de água conforme a demanda da cultura podem estabilizar os micro-habitats do solo e favorecer comunidades envolvidas na mineralização de nutrientes e na manutenção da estrutura edáfica (Muhammad *et al*., 2022). Sistemas localizados, como o gotejamento, permitem maior controle espacial da água, mas criam zonas contrastantes de umidade e nutrientes que precisam ser consideradas na amostragem e na interpretação da microbiota (Wang *et al*., 2024).

A irrigação deficitária moderada pode contribuir para a economia de água e para a manutenção de condições aeróbias, enquanto déficits severos ou prolongados tendem a reduzir a biomassa microbiana e os fungos micorrízicos (Flynn *et al*., 2021). Os efeitos também dependem da textura, da matéria orgânica, da salinidade, da fertilização e do histórico de uso do solo, razão pela qual não existe um regime hídrico universalmente favorável à diversidade microbiana (Frene *et al*., 2022). Assim, a irrigação deve ser compreendida não apenas como fornecimento de água às plantas, mas como ferramenta ecológica capaz de direcionar a composição, a atividade e a resiliência funcional da microbiota do solo.

## 3.2 Relações entre disponibilidade de água, microbiota e fitopatógenos de solo

A disponibilidade de água constitui um dos principais filtros ambientais da microbiota do solo, pois controla a difusão de nutrientes, a mobilidade celular, as trocas gasosas e o contato entre os microrganismos. Sob déficit hídrico, a redução dos filmes de água ao redor dos agregados limita a dispersão microbiana e diminui a atividade de grupos sensíveis à dessecação, enquanto favorece organismos dotados de paredes celulares espessas, esporulação e mecanismos de osmorregulação (Naylor; Coleman-Derr, 2018).

Em arroz, a seca reestruturou de maneira distinta os microbiomas da rizosfera e do interior das raízes, com enriquecimento de Actinobacteria e redução de grupos bacterianos sensíveis à baixa umidade (Santos-Medellín *et al*., 2017). Resposta semelhante foi registrada no sorgo, no qual o déficit hídrico retardou a sucessão do microbioma radicular e aumentou a participação de bactérias monodérmicas adaptadas à dessecação (Xu *et al*., 2018). Além das alterações taxonômicas, a seca pode desestabilizar redes de interação bacterianas e comprometer processos como decomposição, ciclagem de nutrientes e competição por recursos (de Vries *et al*., 2018).

As respostas microbianas à umidade, entretanto, não resultam apenas do contato direto com a água. O déficit hídrico modifica o crescimento das raízes, a fotossíntese e a quantidade e composição dos exsudatos liberados na rizosfera, alterando indiretamente a seleção microbiana (Naylor; Coleman-Derr, 2018). Microrganismos capazes de produzir exopolissacarídeos, osmólitos, enzimas antioxidantes ou ACC desaminase podem ser favorecidos nessas condições e contribuir para a manutenção do crescimento vegetal durante períodos secos (Gebauer *et al*., 2022).

Em trigo cultivado em ambiente semiárido, a irrigação modificou a abundância de diferentes grupos bacterianos e reduziu as populações de rizobactérias produtoras de fenazina, bem como a concentração desse metabólito associado à supressão de patógenos radiculares (Mavrodi *et al*., 2018). Esses resultados demonstram que o aumento da umidade não promove necessariamente maior proteção biológica, pois pode reduzir microrganismos antagonistas selecionados historicamente em ambientes secos e modificar o equilíbrio entre estratégias oligotróficas e copiotróficas (Meisner; de Boer, 2018).

Para os fitopatógenos, a influência da água varia conforme suas características ecológicas. O aumento da umidade e a saturação dos poros reduzem a disponibilidade de oxigênio, prejudicam a respiração das raízes e favorecem a formação de tecidos debilitados e suscetíveis à infecção (Meisner; de Boer, 2018). Oomicetos dos gêneros *Phytophthora* e *Pythium* são particularmente favorecidos por solos úmidos ou encharcados, uma vez que dependem da água para a liberação, dispersão e quimiotaxia de zoósporos em direção às raízes (Judelson, 2018).

A água de irrigação também pode atuar como veículo de propágulos, especialmente em sistemas recirculantes, viveiros e áreas com drenagem deficiente, ampliando a disseminação espacial desses patógenos (Wakeham; Pettitt, 2017). Em contraste, fungos como *Fusarium* e *Verticillium* apresentam estruturas de resistência e maior tolerância à dessecação, podendo

manter ou elevar sua importância relativa durante períodos secos, sobretudo quando o estresse hídrico reduz as defesas da planta hospedeira (Meisner; de Boer, 2018).

A relação entre água e doença deve, portanto, ser compreendida como resultado da interação entre patógeno, hospedeiro e microbiota residente. Solos supressivos limitam o estabelecimento dos fitopatógenos por meio da competição por carbono e nutrientes, produção de antibióticos, sideróforos, enzimas líticas e ativação das defesas vegetais (Schlatter *et al*., 2017). A infecção também pode estimular o recrutamento de grupos microbianos protetores, como demonstrado pelo enriquecimento de bactérias com genes relacionados à degradação de quitina e à síntese de metabólitos antimicrobianos em raízes atacadas por fungos (Carrión *et al*., 2019).

Contudo, secas intensas, encharcamento e ciclos abruptos de secagem e reumedecimento podem romper essas redes antagonistas, reduzir temporariamente a supressividade e abrir nichos ecológicos para a proliferação dos patógenos (Meisner; de Boer, 2018). A capacidade de reorganização da comunidade após o estresse torna-se, assim, determinante para a resistência do solo à doença, visto que microbiomas funcionalmente equilibrados podem dificultar a invasão simultânea de *Ralstonia solanacearum* e *Fusarium oxysporum* (Deng *et al*., 2021). Desse modo, o manejo hídrico deve evitar tanto o déficit prolongado quanto a saturação persistente, mantendo condições que preservem a atividade das raízes, a diversidade microbiana e os mecanismos naturais de supressão.

## 3.3 Mecanismos microbiológicos envolvidos na construção da supressividade

A supressividade do solo resulta da capacidade da microbiota residente de restringir o estabelecimento, o crescimento ou a atividade infectiva dos fitopatógenos, mesmo quando o hospedeiro suscetível e as condições ambientais favoráveis estão presentes. Na supressividade geral, a elevada biomassa, diversidade funcional e atividade metabólica da comunidade microbiana ampliam a ocupação dos nichos ecológicos e dificultam a invasão do patógeno (Schlatter *et al*., 2017). Esse efeito decorre, principalmente, da competição por fontes de carbono, nitrogênio e micronutrientes, além da rápida colonização dos sítios de infecção nas raízes (Gómez Expósito *et al*., 2017).

Comunidades com maior complementaridade no uso de recursos exploram mais eficientemente os substratos liberados pela planta, reduzindo a quantidade de nutrientes acessível aos organismos invasores (Yang *et al*., 2019). Consequentemente, a supressividade deve ser compreendida como uma propriedade emergente da comunidade, condicionada não

apenas pela riqueza microbiana, mas também pela abundância, atividade e organização das interações entre seus membros (Todorović *et al*., 2023).

A competição por ferro constitui um dos mecanismos mais bem demonstrados de exclusão de fitopatógenos na rizosfera. Bactérias dos gêneros *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Streptomyces* produzem sideróforos com elevada afinidade pelo $Fe^{3+}$, tornando esse elemento menos disponível para patógenos incapazes de utilizar os complexos formados (Gu *et al*., 2020). A supressão, entretanto, depende da compatibilidade entre o sideróforo e os sistemas de captação presentes no invasor, pois determinados compostos podem ser aproveitados pelo próprio patógeno e favorecer seu crescimento (Gu *et al*., 2020).

Paralelamente, microrganismos antagonistas sintetizam antibióticos, lipopeptídeos, compostos voláteis e enzimas hidrolíticas capazes de inibir a germinação de esporos, romper paredes celulares ou comprometer o metabolismo dos patógenos (Schlatter *et al*., 2017). Em microbiomas endofíticos de beterraba, por exemplo, a atuação complementar de *Chitinophaga* e *Flavobacterium*, associada à degradação de quitina e à produção de metabólitos codificados por um agrupamento gênico NRPS–PKS, foi determinante para a proteção contra *Rhizoctonia solani* (Carrión *et al*., 2019).

Além das interações antagônicas diretas, a supressividade é construída pela organização de redes microbianas cooperativas, nas quais diferentes populações compartilham metabólitos e exercem funções complementares. A combinação de bactérias e fungos benéficos pode oferecer proteção superior àquela proporcionada por isolados individuais, porque reúne competição, antibiose e modulação da imunidade vegetal em uma mesma comunidade (Zhou *et al*., 2022). Microrganismos-chave, ainda que pouco abundantes, podem sustentar a estabilidade dessas redes mediante interações com vários táxons e manutenção de funções essenciais à exclusão do patógeno (Todorović *et al*., 2023).

A perda seletiva de Firmicutes e Actinobacteria pode desestruturar essa proteção e transformar uma microbiota equilibrada em uma comunidade disbiótica e favorável ao desenvolvimento da doença (Lee *et al*., 2021). Dessa forma, a redundância funcional e a conectividade entre os microrganismos tornam a barreira biológica mais estável diante de oscilações ambientais e dificultam que o fitopatógeno ocupe nichos vagos ou explore recursos temporariamente disponíveis (Zhou *et al*., 2022).

A planta também participa ativamente desse processo ao modificar seus exsudatos radiculares e selecionar microrganismos protetores após reconhecer o ataque do patógeno. Alterações na liberação de açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, fenólicos e outros metabólitos podem favorecer grupos antagonistas e reorganizar funcionalmente o microbioma

da rizosfera (Yuan *et al*., 2018). Essa resposta, conhecida como “pedido de ajuda”, possibilita o recrutamento de microrganismos capazes de produzir compostos antimicrobianos ou estimular a resistência sistêmica da planta (Spooren *et al*., 2024).

A microbiota recrutada pode permanecer no solo e beneficiar cultivos subsequentes, originando uma memória ou legado microbiológico associado à supressividade (Gao *et al*., 2021). Simultaneamente, rizobactérias e fungos benéficos sensibilizam as vias de sinalização mediadas por ácido jasmônico, etileno e, dependendo da interação, ácido salicílico, preparando a planta para responder mais rapidamente à infecção (Pieterse *et al*., 2021). Portanto, a construção da supressividade envolve a integração entre exclusão competitiva, antagonismo químico, parasitismo, redes microbianas complementares e ativação das defesas vegetais, e não a atuação isolada de um único grupo de microrganismos.

### 3.4 Estratégias de manejo hídrico para favorecer solos supressivos

A construção de solos supressivos depende da manutenção de condições hídricas que favoreçam uma microbiota diversa, metabolicamente ativa e capaz de competir com os fitopatógenos. Como a umidade controla a difusão de nutrientes, a disponibilidade de oxigênio e a conectividade dos poros, variações excessivas podem desorganizar as redes microbianas associadas às raízes (Tan *et al*., 2021). Déficits hídricos intensos reduzem a conectividade entre bactérias e fungos, comprometendo interações potencialmente relacionadas à estabilidade funcional da rizosfera (Bazany *et al*., 2022).

Por outro lado, o excesso prolongado de água diminui a aeração e cria condições favoráveis a patógenos adaptados a ambientes saturados. Nesse contexto, sistemas capazes de manter a umidade relativamente estável podem favorecer microrganismos como *Bacillus* e *Streptomyces*, gêneros que incluem espécies antagonistas e foram enriquecidos sob irrigação por pressão negativa (Gao *et al*., 2019). Entretanto, como a resposta do microbioma varia conforme o solo, a cultura e a carga inicial de patógenos, o manejo hídrico deve ser ajustado localmente, com base em indicadores físicos, microbiológicos e fitossanitários (Keating *et al*., 2024).

A irrigação localizada, especialmente por gotejamento, constitui uma estratégia relevante porque permite fornecer água diretamente à zona radicular, reduzir a saturação generalizada do perfil e limitar oscilações bruscas de umidade. A manutenção de um suprimento hídrico mais uniforme aumentou a diversidade bacteriana da rizosfera e a abundância de grupos potencialmente benéficos em tomateiro (Gao *et al*., 2019). Além disso, a lâmina deve ser determinada por sensores de umidade, tensiômetros ou estimativas da evapotranspiração,

evitando tanto o ressecamento severo quanto períodos prolongados de anoxia. Isso é importante porque a redução da disponibilidade de água modifica a diversidade, a composição e o recrutamento microbiano de maneira dependente do genótipo vegetal (Martins *et al*., 2023).

Em condições de irrigação deficitária moderada, cultivares de batata apresentaram alterações nos exsudatos radiculares e enriquecimento de *Streptomyces*, *Nocardioides*, *Nitrosospira* e *Nitrobacter*, demonstrando que déficits controlados podem selecionar comunidades funcionais específicas (Qin *et al*., 2025). Contudo, déficits intensos devem ser evitados, pois podem reduzir entre 30 e 63% a umidade e alterar profundamente as conexões entre os diferentes grupos microbianos da rizosfera (Bazany *et al*., 2022).

Em cultivos sujeitos ao alagamento, a alternância controlada entre períodos úmidos e secos pode ser utilizada para modular o potencial redox e impedir a dominância prolongada de grupos adaptados à anaerobiose. No arroz, o manejo com umedecimento e secagem alternados modificou a abundância de Bacillota e Actinomycetota e intensificou determinadas interações bacterianas, evidenciando que o regime hídrico pode direcionar a organização do microbioma (Yakubu *et al*., 2025). Todavia, essa estratégia precisa respeitar limites que preservem a atividade microbiana e evitem o estresse severo das plantas, pois a magnitude das alterações depende do tipo de solo e da comunidade originalmente presente (Bazany *et al*., 2022).

A escolha do método também deve considerar a qualidade da água: salinidade, sodicidade e contaminantes podem selecionar comunidades menos diversas e prejudicar o estabelecimento de antagonistas. Em solos irrigados com água salobra, tratamentos combinando magnetização e oxigenação reduziram a colonização por patógenos de solo e favoreceram bactérias relacionadas à transformação de nutrientes (Sun *et al*., 2022). Assim, o monitoramento simultâneo da umidade, condutividade elétrica, oxigenação e qualidade microbiológica da água constitui uma medida indispensável para favorecer uma supressividade estável (Keating *et al*., 2024). As principais estratégias de manejo hídrico e seus efeitos sobre o microbioma do solo e a supressividade a fitopatógenos estão sintetizados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Estratégias de manejo hídrico e seus efeitos potenciais sobre o microbioma e a supressividade de solos a fitopatógenos.

| Estratégia de manejo hídrico | Efeito no ambiente do solo | Resposta microbiana associada | Implicação para a supressividade | Referências |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Manutenção de umidade relativamente estável** | Reduz oscilações hídricas, preserva a conectividade dos poros e mantém condições mais equilibradas de oxigenação e difusão de nutrientes | Favorece maior estabilidade das redes microbianas e a atividade de grupos benéficos | Pode aumentar a competição microbiana e dificultar o estabelecimento de fitopatógenos | Tan *et al.* (2021); Bazany *et al.* (2022) |
| **Irrigação localizada/gotejamento** | Direciona a água à zona radicular e reduz a saturação generalizada do perfil | Pode aumentar a diversidade bacteriana e favorecer grupos potencialmente benéficos na rizosfera | Contribui para a formação de condições mais favoráveis a comunidades antagonistas | Gao *et al.* (2019) |
| **Irrigação baseada em sensores, tensiômetros ou evapotranspiração** | Permite ajustar a lâmina à demanda da cultura e evitar déficit severo ou excesso de água | Mantém condições mais adequadas para atividade e recrutamento microbiano | Reduz extremos hídricos capazes de desestruturar o microbioma ou favorecer patógenos | Martins *et al.* (2023); Keating *et al.* (2024) |
| **Déficit hídrico moderado e controlado** | Promove alterações específicas na disponibilidade de água e nos exsudatos radiculares | Pode enriquecer grupos como *Streptomyces*, *Nocardioides*, *Nitrosospira* e *Nitrobacter* | Pode selecionar comunidades funcionais específicas, dependendo da cultura e do solo | Qin *et al.* (2025) |
| **Prevenção de déficit hídrico intenso** | Evita redução acentuada da umidade e perda de conectividade entre os poros | Preserva interações entre bactérias e fungos e a organização das redes microbianas | Evita perda de estabilidade funcional potencialmente relacionada à supressividade | Bazany *et al.* (2022) |
| **Umedecimento e secagem alternados** | Modifica periodicamente a disponibilidade de água, oxigênio e o potencial redox | Altera a abundância de grupos como Bacillota e Actinomycetota e suas interações | Pode direcionar a organização do microbioma, especialmente em sistemas sujeitos ao alagamento | Yakubu *et al.* (2025) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Boa drenagem e prevenção do encharcamento** | Evita anoxia prolongada e condições excessivamente redutoras | Impede a seleção prolongada de comunidades adaptadas à anaerobiose | Reduz condições favoráveis a determinados patógenos associados a ambientes saturados | Tan *et al.* (2021); Keating *et al.* (2024) |
| **Controle da qualidade da água de irrigação** | Reduz efeitos de salinidade, sodicidade, baixa oxigenação e contaminantes | Favorece maior equilíbrio da comunidade e o estabelecimento de grupos benéficos | Evita condições que possam reduzir a diversidade microbiana e comprometer antagonistas | Sun *et al.* (2022); Keating *et al.* (2024) |
| **Integração da irrigação com cobertura e matéria orgânica** | Reduz evaporação e oscilações hídricas e aumenta a disponibilidade de carbono | Favorece a sobrevivência e atividade de populações microbianas associadas à rizosfera | Pode potencializar antagonistas, desde que o excesso de água e a formação de zonas anaeróbias sejam evitados | Martins *et al.* (2023) |
| **Monitoramento integrado do sistema** | Acompanha umidade, condutividade elétrica, oxigenação e condições fitossanitárias | Permite identificar respostas do microbioma às práticas de irrigação | Possibilita ajustes locais do manejo visando maior estabilidade da supressividade | Keating *et al.* (2024) |

Fonte: Autores (2026)

O manejo hídrico deve ser integrado à cobertura do solo, à incorporação de matéria orgânica, à rotação de culturas e à aplicação de bioinsumos, pois a água determina a sobrevivência e a atividade dos microrganismos introduzidos. Coberturas vegetais e resíduos orgânicos reduzem a evaporação, amortecem oscilações térmicas e hídricas e disponibilizam carbono para populações antagonistas; entretanto, o excesso de irrigação após sua aplicação pode gerar zonas anaeróbias e favorecer patógenos. A estabilidade da umidade também melhora o crescimento radicular e modifica a liberação de exsudatos que selecionam microrganismos benéficos (Martins *et al*., 2023).

Essa interação entre genótipo, exsudação e regime hídrico indica que não existe uma lâmina universalmente supressiva, devendo-se validar os manejos para cada patossistema (Qin *et al*., 2025). Portanto, favorecer solos supressivos exige irrigação de precisão, boa drenagem, água de qualidade e acompanhamento da microbiota e da incidência de doenças, uma vez que

a irrigação pode alterar simultaneamente o microbioma, o desenvolvimento vegetal e a expressão dos sintomas (Keating *et al*., 2024). Nessa perspectiva, o manejo da água deixa de ser apenas uma prática destinada a suprir a demanda da cultura e passa a funcionar como ferramenta ecológica de direcionamento do microbioma e de prevenção de doenças do solo (Tan *et al*., 2021).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de água exerce papel determinante na organização e no funcionamento da microbiota do solo, influenciando a difusão de nutrientes, a oxigenação, a atividade metabólica e as interações estabelecidas na rizosfera. Nesse sentido, o manejo hídrico ultrapassa sua função tradicional de suprir a demanda de água das culturas e assume importância ecológica, uma vez que pode modificar a composição e a atividade das comunidades microbianas e, consequentemente, interferir na capacidade do solo de restringir o estabelecimento e a atividade de fitopatógenos.

As evidências reunidas neste capítulo demonstram que tanto o déficit hídrico severo quanto a saturação prolongada podem comprometer o equilíbrio microbiológico do solo. Enquanto a restrição intensa de água reduz a atividade microbiana e pode desestruturar redes de interação, o excesso de umidade limita a oxigenação e pode criar condições favoráveis a patógenos adaptados a ambientes saturados. Em contrapartida, regimes hídricos adequadamente manejados podem contribuir para a manutenção de comunidades microbianas diversificadas e funcionalmente organizadas, favorecendo mecanismos de supressão relacionados à competição por recursos e sítios de colonização, à produção de sideróforos e compostos antimicrobianos, à ação de enzimas e à ativação das defesas vegetais.

Nesse contexto, estratégias como irrigação localizada, monitoramento da umidade, adoção criteriosa de déficits hídricos controlados, prevenção do encharcamento, boa drenagem e controle da qualidade da água apresentam potencial para favorecer condições compatíveis com a manutenção da supressividade. A integração dessas práticas com cobertura do solo, incorporação de matéria orgânica, rotação de culturas e aplicação de bioinsumos pode ampliar seus efeitos, contribuindo para maior estabilidade do microbioma e fortalecimento das interações benéficas na rizosfera.

Entretanto, não existe um regime hídrico universalmente capaz de promover a supressividade, uma vez que as respostas dependem das características físicas e químicas do solo, da cultura e do genótipo vegetal, da composição inicial da microbiota, do fitopatógeno envolvido, da qualidade da água e das condições ambientais. Assim, o manejo deve ser definido

de forma específica para cada patossistema e fundamentado no acompanhamento conjunto de indicadores hídricos, microbiológicos e fitossanitários.

Dessa forma, o manejo da água apresenta potencial para integrar estratégias sustentáveis de manejo de doenças do solo, atuando como ferramenta ecológica complementar para direcionar o microbioma e favorecer os mecanismos naturais de supressão. Avanços nessa abordagem dependem de estudos que estabeleçam relações mais consistentes entre regimes de irrigação, respostas funcionais do microbioma e redução da incidência ou severidade de doenças em condições de campo. A integração desses conhecimentos poderá subsidiar sistemas de irrigação mais precisos, capazes de conciliar eficiência no uso da água, equilíbrio microbiológico do solo e maior estabilidade fitossanitária dos sistemas agrícolas.

## REFERÊNCIAS


BAZANY, K. E. et al. Water deficit affects inter-kingdom microbial connections in plant rhizosphere. Environmental Microbiology, v. 24, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/1462-2920.16031.

CARRIÓN, V. J. et al. Pathogen-induced activation of disease-suppressive functions in the endophytic root microbiome. Science, v. 366, n. 6465, p. 606–612, 2019. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aaw9285.

DE VRIES, F. T. et al. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. Nature Communications, v. 9, art. 3033, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-018-05516-7.

DENG, X. et al. Soil microbiome manipulation triggers direct and possible indirect suppression against Ralstonia solanacearum and Fusarium oxysporum. npj Biofilms and Microbiomes, v. 7, art. 33, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41522-021-00204-9.

FLYNN, N. E.; COMAS, L. H.; STEWART, C. E.; FONTE, S. J. Deficit irrigation drives maize root distribution and soil microbial communities with implications for soil carbon dynamics. Soil Science Society of America Journal, v. 85, p. 412–422, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/saj2.20201.

FRENE, J. P. et al. Agriculture by irrigation modifies microbial communities and soil functions associated with enhancing C uptake of a steppe semi-arid soil in Northern Patagonia. Frontiers in Soil Science, v. 2, art. 835849, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.835849.

GAO, M. et al. Disease-induced changes in plant microbiome assembly and functional adaptation. Microbiome, v. 9, art. 187, 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s40168-021-01138-2.

GAO, X.; ZHANG, S.; ZHAO, X.; LONG, H. Stable water and fertilizer supply by negative pressure irrigation improve tomato production and soil bacterial communities. SN Applied Sciences, v. 1, art. 718, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-019-0719-6.

GEBAUER, L. et al. Water deficit history selects plant beneficial soil bacteria for the development of plant drought resistance. Frontiers in Microbiology, v. 13, art. 824437, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.824437.

GÓMEZ EXPÓSITO, R.; DE BRUIJN, I.; POSTMA, J.; RAAIJMAKERS, J. M. Current insights into the role of rhizosphere bacteria in disease suppressive soils. Frontiers in Microbiology, v. 8, art. 2529, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02529.

GU, S. et al. Competition for iron drives phytopathogen control by natural rhizosphere microbiomes. Nature Microbiology, v. 5, p. 1002–1010, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41564-020-0719-8.

JUDELSON, H. S. Exchanges at the plant–oomycete interface that influence disease. Plant Physiology, v. 179, n. 4, p. 1198–1211, 2019. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.18.00979.

KEATING, C. et al. Balancing the scales: assessing the impact of irrigation and pathogen burden on potato blackleg disease and soil microbial communities. Microbiome, v. 12, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s40168-024-01918-6.

LEE, S. M. et al. The disease triangle in the context of the holobiont: complex interactions between host, microbiome and pathogen. Frontiers in Plant Science, v. 12, art. 627506, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.627506.

MARTINS, B. R. et al. Cultivar-specific dynamics: unravelling rhizosphere microbiome responses to water deficit stress in potato cultivars. BMC Microbiology, v. 23, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s12866-023-03120-4.

MAVRODI, D. V. et al. Long-term irrigation affects the dynamics and activity of the wheat rhizosphere microbiome. Frontiers in Plant Science, v. 9, art. 345, 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00345.

MEISNER, A.; DE BOER, W. Strategies to maintain natural biocontrol of soil-borne crop diseases during severe drought and rainfall events. Frontiers in Microbiology, v. 9, art. 2279, 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02279.

MEISNER, A. et al. Soil microbial legacies differ following drying–rewetting and freezing–thawing cycles. The ISME Journal, v. 15, p. 1207–1221, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41396-020-00844-3.

MUHAMMAD, I. et al. Irrigation and nitrogen fertilization alter soil bacterial communities, soil enzyme activities, and nutrient availability in maize crop. Frontiers in Microbiology, v. 13, art. 833758, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.833758.

NAYLOR, D.; COLEMAN-DERR, D. Drought stress and root-associated bacterial communities. Frontiers in Plant Science, v. 8, art. 2223, 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02223.

NAYLOR, D.; DEGRAAF, S.; PURDOM, E.; COLEMAN-DERR, D. Drought and host selection influence bacterial community dynamics in the grass root microbiome. The ISME Journal, v. 11, p. 2691–2704, 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/ismej.2017.118.

PIETERSE, C. M. J.; DE JONGE, R.; BERENDSEN, R. L. The soil-borne supremacy. Trends in Plant Science, v. 21, n. 3, p. 171–173, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.018.

QIN, J.; DODD, I. C.; BIAN, C.; LI, G.; JIN, L. Deficit irrigation differentially modulates rhizosphere microbial community and metabolites of two potato genotypes differing in drought tolerance. Journal of Environmental Management, v. 373, art. 123836, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123836.

SANTOS-MEDELLÍN, C. et al. Drought stress results in a compartment-specific restructuring of the rice root-associated microbiomes. mBio, v. 8, n. 4, e00764-17, 2017. DOI: https://doi.org/10.1128/mBio.00764-17.

SCHIMEL, J. P. Life in dry soils: effects of drought on soil microbial communities and processes. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, v. 49, p. 409–432, 2018. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062614.

SCHLATTER, D.; KINKEL, L.; THOMASHOW, L.; WELLER, D.; PAULITZ, T. Disease suppressive soils: new insights from the soil microbiome. Phytopathology, v. 107, n. 11, p. 1284–1297, 2017. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-17-0111-RVW.

SPOOREN, J. et al. Plant-driven assembly of disease-suppressive soil microbiomes. Annual Review of Phytopathology, v. 62, p. 145–169, 2024. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-100127.

SUN, Y. et al. Effects of irrigation using activated brackish water on the bacterial community structure of rhizosphere soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42729-022-01003-7.

TAN, B. et al. Response of plant rhizosphere microenvironment to water management in soil- and substrate-based systems. Frontiers in Plant Science, v. 12, 2021.

TODOROVIĆ, I. et al. Microbial diversity in soils suppressive to Fusarium diseases. Frontiers in Plant Science, v. 14, art. 1228749, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1228749.

WAKEHAM, A. J.; PETTITT, T. R. Diagnostic tests and their application in the management of soil- and water-borne oomycete pathogen species. Annals of Applied Biology, v. 170, n. 1, p. 45–67, 2017. DOI: https://doi.org/10.1111/aab.12315.

WANG, X. B. et al. A drying-rewetting cycle imposes more important shifts on soil microbial communities than does reduced precipitation. mSystems, v. 7, n. 4, e00247-22, 2022. DOI: https://doi.org/10.1128/msystems.00247-22.

WANG, X.; ZHANG, Y.; WANG, T.; WANG, L.; LIU, E. Drip irrigation affects soil bacteria primarily through available nitrogen and soil fungi mainly via available nutrients. Frontiers in Microbiology, v. 15, art. 1453054, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1453054.

XU, L. et al. Drought delays development of the sorghum root microbiome and enriches for monoderm bacteria. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 115, n. 18, p. E4284–E4293, 2018. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1717308115.

YAKUBU, I.; YEON, E.; KONG, H. G. Microbial community responses to alternate wetting and drying in the System of Rice Intensification. The Plant Pathology Journal, v. 41, n. 2, p. 231–239, 2025. DOI: https://doi.org/10.5423/PPJ.NT.01.2025.0001.

YANG, C. et al. Carbon resource richness shapes bacterial competitive interactions by alleviating growth–antibiosis trade-off. Functional Ecology, v. 33, n. 5, p. 868–875, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2435.13292.

YUAN, J. et al. Root exudates drive the soil-borne legacy of aboveground pathogen infection. Microbiome, v. 6, art. 156, 2018. DOI: https://doi.org/10.1186/s40168-018-0537-x.

ZHOU, X. et al. Cross-kingdom synthetic microbiota supports tomato suppression of Fusarium wilt disease. Nature Communications, v. 13, art. 7890, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-022-35452-6

# CAPÍTULO 5

## ALHO ( *Allium sativum* L .) COMO FERRAMENTA BIOHERBICIDA: EVIDÊNCIAS ALELOPÁTICAS E USOS NO MANEJO SUSTENTÁVEL DE PLANTAS ESPONTÂNEAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-5

Hyago Magno Ramos, e-mail: hyago.ramos@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/2398837423352555
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Maria Laiane da Silva, e-mail: maria.laiane@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5197880533423893
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Bruna Oliveira Alves, e-mail:oliveirabruna791@gmail.com, URL lattes:http://lattes.cnpq.br/6051040274673728

## RESUMO

As plantas espontâneas constituem importante fator de redução da produtividade agrícola, e a busca por alternativas ao uso intensivo de herbicidas sintéticos tem ampliado o interesse por produtos naturais com atividade alelopática. Nesse contexto, o alho (*Allium sativum* L.) apresenta potencial como ferramenta bioherbicida devido à presença de compostos organossulfurados biologicamente ativos, como aliina, alicina, ajoeno e sulfetos de dialila. Este capítulo teve como objetivo analisar o potencial do alho no manejo sustentável de plantas espontâneas, considerando sua composição fitoquímica, os mecanismos de ação alelopática, as evidências experimentais e as possibilidades e limitações de sua aplicação agrícola. Para isso, foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, abrangendo principalmente estudos publicados entre 2016 e 2026. As evidências demonstram que extratos, óleos essenciais, exsudatos e compostos derivados do alho podem interferir na germinação e no desenvolvimento das plantas por meio de alterações na divisão e no alongamento celular, no equilíbrio hormonal, na absorção de nutrientes, na atividade fotossintética e no metabolismo oxidativo. Os efeitos apresentam forte relação com a concentração e a sensibilidade da espécie receptora, podendo ocorrer estímulo em doses reduzidas e inibição em concentrações elevadas. Resultados experimentais indicam potencial para redução da germinação e do crescimento de plantas espontâneas, com destaque para *Echinochloa crus-galli*; entretanto, a ausência de seletividade, a volatilidade e a rápida degradação dos compostos ativos, além da escassez de estudos de campo, limitam sua aplicação prática. Tecnologias de formulação e encapsulamento podem contribuir para aumentar a estabilidade e a persistência desses compostos. Conclui-se que o alho apresenta potencial como fonte de moléculas e produtos de ação bioherbicida, porém são necessários estudos adicionais de campo, padronização das formulações, definição de doses seletivas e avaliações ambientais e econômicas antes de sua utilização em maior escala, devendo ser considerado como ferramenta complementar do manejo integrado de plantas espontâneas.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Allium sativum*; alelopatia; bioherbicida; plantas espontâneas; compostos organossulfurados; manejo integrado.

## 1. INTRODUÇÃO

As plantas espontâneas constituem um dos principais fatores de redução da produtividade agrícola, pois competem com as culturas por água, luz, nutrientes e espaço, além

de poderem atuar como hospedeiras de insetos-praga e fitopatógenos. O controle dessas espécies tem sido realizado predominantemente por herbicidas sintéticos, cuja utilização intensiva e repetitiva favorece a seleção de populações resistentes e aumenta os riscos de contaminação ambiental (Roberts *et al*., 2022).

Paralelamente, a presença de resíduos em alimentos, os possíveis efeitos sobre organismos não alvo e as restrições impostas a determinados princípios ativos têm estimulado a busca por métodos alternativos de manejo (Khamare *et al*., 2022). Nesse cenário, os produtos naturais de origem vegetal despertam interesse por apresentarem diversidade química e múltiplos mecanismos de ação (Scavo; Mauromicale, 2021), podendo contribuir para reduzir a dependência dos herbicidas convencionais quando associados a estratégias integradas de controle (Kostina-Bednarz *et al*., 2023).

Entre os fenômenos naturais com potencial para essa finalidade destaca-se a alelopatia, definida como a interferência positiva ou negativa exercida por uma planta sobre outros organismos mediante a liberação de metabólitos biologicamente ativos no ambiente. Essas substâncias podem alcançar as plantas receptoras por exsudação radicular, volatilização, lixiviação dos tecidos ou decomposição de resíduos vegetais (Cheng; Cheng, 2016). Quando presentes em concentrações biologicamente efetivas, os aleloquímicos podem interferir na germinação, na divisão e no alongamento celular, no equilíbrio hormonal e na absorção de nutrientes (Ren *et al*., 2018).

Também podem alterar o funcionamento do aparato fotossintético e estimular a produção de espécies reativas de oxigênio, comprometendo a integridade das membranas e o crescimento das plântulas (Ding *et al*., 2016). Por reunir diferentes sítios de ação, a alelopatia representa uma base relevante para a prospecção de moléculas naturais destinadas ao desenvolvimento de bioherbicidas (Radhakrishnan *et al*., 2018).

O alho (*Allium sativum* L.) apresenta particular interesse nessa área em razão de sua composição fitoquímica, caracterizada pela presença de aliina, alicina, ajoeno e diferentes sulfetos de dialila. Após o rompimento dos tecidos, a aliina entra em contato com a enzima aliinase e origina a alicina, composto instável e altamente reativo que pode ser convertido em outros derivados organossulfurados (Martins *et al*., 2016). A alicina é capaz de interagir com grupos tiol de proteínas, propriedade que ajuda a explicar seus efeitos sobre enzimas e processos metabólicos essenciais (Borlinghaus *et al*., 2021).

Além disso, compostos como o dissulfeto e o trissulfeto de dialila podem interferir no metabolismo oxidativo e no desenvolvimento radicular das plantas receptoras (Yang *et al*., 2019). A composição e a concentração dessas substâncias, entretanto, variam conforme o

genótipo, a parte vegetal utilizada, as condições de cultivo, o armazenamento e o método de extração (Batiha *et al*., 2020).

Estudos experimentais indicam que extratos, óleos essenciais, exsudatos e compostos isolados do alho podem reduzir a germinação e o crescimento de diferentes espécies vegetais. Em *Echinochloa crus-galli*, importante planta espontânea de áreas orizícolas, o óleo essencial de alho apresentou elevada atividade inibitória e provocou alterações no teor de clorofila e no sistema antioxidante das plântulas (Bai *et al*., 2023). Extratos aquosos também podem comprometer o crescimento da parte aérea, o desenvolvimento radicular e a nodulação de leguminosas, revelando que os efeitos não estão restritos às espécies espontâneas (Adeleke *et al*., 2016).

Além disso, exsudatos radiculares e compostos voláteis do alho produzem respostas fisiológicas dependentes da concentração e da sensibilidade da planta receptora (Ding *et al*., 2020). Essa relação dose–efeito pode apresentar comportamento hormético, com estímulo em baixas concentrações e inibição em doses elevadas, aspecto que exige atenção na definição de uma faixa de aplicação segura e eficiente (Hayat *et al*., 2020).

Apesar do potencial identificado, a utilização do alho como bioherbicida permanece majoritariamente em fase experimental. A volatilidade, a instabilidade e a rápida degradação dos compostos organossulfurados podem reduzir sua persistência e produzir resultados variáveis sob condições de campo (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). A ausência de seletividade também pode ocasionar fitotoxicidade às culturas e efeitos adversos sobre microrganismos benéficos, especialmente quando extratos ou resíduos são aplicados em concentrações elevadas (Adeleke *et al*., 2016).

Tecnologias de emulsificação e encapsulamento apresentam potencial para melhorar a estabilidade, a dispersão e a liberação controlada dos compostos ativos (Rodríguez-Mejías *et al*., 2023), mas ainda demandam avaliações agronômicas, econômicas e ecotoxicológicas antes de sua adoção em escala comercial (Jayasoorya *et al*., 2024). Assim, sua aplicação deve ser compreendida como uma ferramenta complementar, integrada à rotação de culturas, à cobertura do solo e aos controles mecânico e químico racional.

Diante desse contexto, este capítulo objetiva analisar o potencial do alho como ferramenta bioherbicida para o manejo sustentável de plantas espontâneas, abordando sua composição fitoquímica, os mecanismos de ação alelopática e as evidências experimentais relacionadas ao emprego de extratos, óleos essenciais e resíduos vegetais. Também são discutidas as possibilidades de aplicação agrícola, a seletividade para as culturas, a persistência dos compostos no ambiente, os possíveis efeitos sobre organismos não alvo e as limitações

relacionadas à padronização, à viabilidade econômica e à integração dessa alternativa com outras práticas de manejo.

## 2. METODOLOGIA

O presente capítulo de livro caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o potencial do alho (*Allium sativum* L.) como ferramenta bioherbicida no manejo sustentável de plantas espontâneas. A revisão concentrou-se na composição fitoquímica do alho, nos compostos associados à atividade alelopática, nos mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na fitotoxicidade e nas possibilidades de utilização de extratos, óleos essenciais, resíduos vegetais e formulações derivadas dessa espécie.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira os compostos bioativos presentes no alho podem interferir na germinação e no desenvolvimento de plantas espontâneas e ser utilizados como componentes de estratégias sustentáveis de manejo? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à alelopatia, aos bioherbicidas de origem vegetal, à composição fitoquímica do alho, aos compostos organossulfurados, à germinação de sementes, à fisiologia vegetal, ao estresse oxidativo, à seletividade para culturas agrícolas e ao manejo integrado de plantas espontâneas.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2016 e 2026, sem excluir referências anteriores consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de alelopatia, hormese, fitotoxicidade, produtos naturais e manejo sustentável de plantas espontâneas. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *Allium sativum*, *garlic extract*, *garlic essential oil*, *garlic residues*, *garlic allelopathy*, *allelopathic compounds*, *organosulfur compounds*, *allicin*, *diallyl sulfide*, *diallyl disulfide*, *natural herbicide*, *bioherbicide*, *weed germination*, *weed management*, *phytotoxicity*, *oxidative stress* e *sustainable weed management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos originais, revisões, dissertações, teses, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta entre o alho ou seus compostos e a germinação, o crescimento ou o metabolismo de plantas receptoras. Também foram considerados trabalhos sobre a caracterização química de bulbos, folhas, raízes, exsudatos e óleos essenciais, assim como pesquisas que avaliassem os efeitos de extratos aquosos, compostos voláteis, resíduos vegetais e substâncias organossulfuradas isoladas. Na

ausência de estudos diretamente realizados com plantas espontâneas, foram incorporadas pesquisas com espécies cultivadas quando seus resultados contribuíam para explicar os mecanismos alelopáticos, a relação entre dose e resposta ou os possíveis riscos de fitotoxicidade para culturas não alvo.

Foram incluídos estudos conduzidos em laboratório, casa de vegetação, sistemas hidropônicos, vasos e condições de campo que apresentassem informações sobre a espécie receptora, a parte do alho utilizada, o método de extração ou obtenção do composto, a concentração aplicada e as respostas avaliadas. Foram consideradas variáveis como porcentagem e velocidade de germinação, comprimento da raiz e da parte aérea, acúmulo de biomassa, índice mitótico, atividade enzimática, conteúdo de pigmentos fotossintéticos, absorção de nutrientes, concentração de espécies reativas de oxigênio, atividade antioxidante, integridade das membranas e sobrevivência das plantas.

Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos limitados às propriedades alimentares, medicinais, antimicrobianas ou inseticidas do alho sem avaliação de efeitos sobre plantas, bem como trabalhos que não apresentassem informações suficientes sobre o material vegetal, a forma de preparação, a concentração ou as espécies receptoras. Estudos duplicados, documentos sem acesso às informações essenciais e publicações cuja abordagem não permitisse distinguir atividade alelopática de outros fatores responsáveis pela redução do crescimento vegetal também não foram considerados na síntese.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do capítulo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e sua contribuição para a compreensão do potencial bioherbicida do alho. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica das evidências disponíveis, dos mecanismos propostos e das limitações relacionadas à aplicação agrícola dessa alternativa.

As informações extraídas foram organizadas considerando autor e ano de publicação, espécie vegetal avaliada, parte do alho utilizada, natureza do material testado, método de extração, composição química, concentração, forma e momento de aplicação, duração do experimento e condições de cultivo. Quando disponíveis, também foram examinadas informações sobre a relação dose–efeito, a seletividade para espécies cultivadas, a persistência dos compostos no ambiente, a estabilidade das formulações, os efeitos sobre organismos não

alvo e a integração dos derivados do alho com práticas culturais, mecânicas, físicas e químicas de manejo.

A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que a atividade alelopática pode variar conforme o genótipo e a origem do alho, a parte vegetal empregada, o armazenamento, o método de extração, a concentração, a formulação e a sensibilidade da espécie receptora. Também foram consideradas respostas neutras, estimulantes ou desfavoráveis, especialmente aquelas relacionadas à hormese, à ausência de seletividade, à fitotoxicidade para as culturas, à instabilidade e volatilidade dos compostos organossulfurados e à redução da eficácia em condições ambientais distintas das observadas em laboratório.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: composição fitoquímica do alho e compostos associados à atividade alelopática; mecanismos de ação alelopática sobre a germinação e o desenvolvimento de plantas espontâneas; evidências experimentais do potencial bioherbicida de extratos e resíduos de alho; e aplicação do alho no manejo sustentável de plantas espontâneas, incluindo suas possibilidades e limitações. Essa organização permitiu integrar conhecimentos de fitoquímica, fisiologia vegetal, alelopatia e manejo de plantas espontâneas, oferecendo uma análise abrangente das condições necessárias para que o alho possa ser empregado como ferramenta complementar em programas de manejo integrado.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Composição fitoquímica do alho e compostos associados à atividade alelopática

A busca por alternativas aos herbicidas sintéticos tem ampliado o interesse por espécies capazes de produzir metabólitos com atividade alelopática. Nesse contexto, o alho (*Allium sativum* L.) destaca-se pela elevada concentração de compostos organossulfurados biologicamente ativos, sobretudo alicina, sulfeto de dialila e dissulfeto de dialila. Esses compostos podem ser liberados por exsudação radicular, decomposição de resíduos, volatilização ou aplicação de extratos vegetais, interferindo na germinação e no desenvolvimento de plantas receptoras (Cheng; Cheng, 2016).

Ensaios com extrato aquoso de bulbos demonstraram redução do crescimento da parte aérea, do desenvolvimento radicular e da nodulação de leguminosas, com respostas mais intensas à medida que a concentração foi elevada (Adeleke *et al*., 2016). Os voláteis liberados pelo alho também alteram processos fisiológicos relacionados ao metabolismo de espécies

vizinhas, confirmando que sua ação não depende exclusivamente do contato direto entre os tecidos vegetais (Yang *et al*., 2019). Dessa forma, a atividade alelopática do alho o posiciona como fonte potencial de moléculas para o desenvolvimento de bioherbicidas vegetais (Khamare *et al*., 2022).

As evidências mais diretas dessa aplicação foram apresentadas para o capim-arroz (*Echinochloa crus-galli*), uma das principais plantas espontâneas de áreas orizícolas. Entre óleos essenciais de 12 espécies vegetais, o óleo essencial de alho apresentou a maior atividade inibitória, com $EC_{50}$ de 0,0126 g $mL^{-1}$ e aproximadamente 88% de inibição do crescimento do capim-arroz (Bai *et al*., 2023). A análise por cromatografia gasosa associada à espectrometria de massas identificou 20 constituintes, entre os quais o sulfeto de dialila e o dissulfeto de dialila demonstraram atividade herbicida individualmente (Bai *et al*., 2023).

A exposição ao óleo provocou elevação inicial das atividades de catalase, peroxidase e superóxido dismutase, seguida de redução acentuada dessas defesas antioxidantes, indicando desequilíbrio na homeostase das espécies reativas de oxigênio (Yang *et al*., 2019). Paralelamente, a diminuição do teor total de clorofila sugere comprometimento do aparato fotossintético, mecanismo frequentemente relacionado à ação de substâncias naturais fitotóxicas (Radhakrishnan *et al*., 2018).

A ação do alho, entretanto, apresenta caráter bifásico e dependente da dose. Em baixas concentrações, o dissulfeto de dialila pode estimular o crescimento radicular; em concentrações elevadas, reduz a germinação, a biomassa e a elongação das raízes (Cheng; Cheng, 2016). Esse comportamento está associado a alterações no índice mitótico, na concentração de auxinas e giberelinas e na expressão de genes envolvidos no transporte hormonal e na expansão da parede celular (Cheng; Cheng, 2016).

A elevada sensibilidade das raízes também decorre de seu contato direto com os aleloquímicos presentes na solução ou no solo, o que explica a redução acentuada do sistema radicular observada após a aplicação de extratos de alho (Adeleke *et al*., 2016). Além da dose, a resposta varia conforme a espécie receptora, o estádio de desenvolvimento, a parte do alho empregada e a forma de obtenção do extrato, evidenciando que resultados de laboratório não podem ser diretamente extrapolados para condições de campo (Scavo; Mauromicale, 2021).

No manejo sustentável, o potencial do alho pode ser explorado por meio de extratos aquosos, óleos essenciais, resíduos triturados ou formulações contendo seus compostos organossulfurados. Os extratos poderiam ser aplicados em pré-emergência para limitar a germinação e o estabelecimento inicial das plantas espontâneas, enquanto formulações concentradas do óleo essencial apresentam maior potencial para aplicações em pós-emergência

(Khamare *et al*., 2022). A seletividade observada entre o arroz e o capim-arroz indica uma possibilidade particularmente relevante para sistemas orizícolas, embora o óleo de alho também tenha reduzido parcialmente a biomassa de plântulas de arroz em determinadas doses (Bai *et al*., 2023). Consequentemente, sua utilização deve ser integrada a práticas como cobertura do solo, rotação de culturas, controle mecânico e aplicação localizada, evitando a exposição indiscriminada das culturas agrícolas (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Essa integração pode diminuir a pressão de seleção exercida pelos herbicidas convencionais e contribuir para o manejo de populações resistentes (Roberts *et al*., 2022).

Apesar dos resultados promissores, o emprego do alho como bioherbicida ainda se encontra predominantemente em fase experimental. A volatilidade e a rápida degradação dos compostos organossulfurados podem reduzir a persistência e produzir respostas inconsistentes sob variações de temperatura, radiação, umidade e propriedades do solo (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Também devem ser avaliados possíveis efeitos sobre culturas não alvo, microrganismos benéficos, germinação de espécies cultivadas e simbioses como a nodulação de leguminosas (Adeleke *et al*., 2016).

Tecnologias como nanoemulsões, encapsulamento e uso de adjuvantes podem aumentar a estabilidade e permitir a liberação controlada dos princípios ativos (Islam *et al*., 2024). Portanto, a consolidação do alho como ferramenta bioherbicida requer ensaios de campo, padronização química dos extratos, determinação de doses seletivas e estudos ecotoxicológicos; até que essas etapas sejam cumpridas, sua aplicação deve ser apresentada como componente potencial do manejo integrado, e não como substituto plenamente validado dos herbicidas sintéticos (Bai *et al*., 2023).

### 3.2 Mecanismos de ação alelopática sobre a germinação e o desenvolvimento de plantas espontâneas

O potencial alelopático do alho (*Allium sativum* L.) está relacionado principalmente à presença de compostos organossulfurados, como aliina, alicina, ajoeno, dissulfeto de dialila (DADS) e trissulfeto de dialila. Após o rompimento dos tecidos, a aliina entra em contato com a enzima aliinase, originando alicina, molécula instável que se converte rapidamente em outros sulfetos bioativos (Martins *et al.*, 2016). Esses compostos podem alcançar as sementes e plântulas por meio de extratos, resíduos vegetais, exsudatos radiculares ou compostos voláteis, interferindo em diferentes processos fisiológicos (Ding *et al.*, 2020).

Em bioensaios com capim-arroz (*Echinochloa crus-galli*), o óleo essencial de alho reduziu a germinação e o desenvolvimento inicial de maneira dependente da concentração,

demonstrando atividade fitotóxica sobre uma espécie espontânea de importância agrícola (Bai *et al.*, 2023). Entretanto, os efeitos não são necessariamente lineares, pois concentrações reduzidas podem estimular determinados processos, enquanto doses elevadas tendem a causar inibição acentuada, caracterizando uma resposta hormética (Cheng *et al.*, 2016).

Durante a germinação, os aleloquímicos podem comprometer a embebição, a integridade das membranas e a mobilização das reservas necessárias ao crescimento do embrião. A alicina apresenta elevada reatividade com grupos tiol de proteínas, podendo modificar enzimas que possuem resíduos de cisteína funcionalmente importantes e alterar processos metabólicos essenciais (Borlinghaus *et al.*, 2021). Essa propriedade sugere que concentrações fitotóxicas dos compostos do alho podem interferir na atuação de hidrolases, como α-amilase e proteases, reduzindo a conversão de amido e proteínas de reserva em açúcares e aminoácidos disponíveis ao eixo embrionário (Hayat *et al.*, 2020).

Alterações no metabolismo de carboidratos foram efetivamente observadas em plantas receptoras expostas aos exsudatos radiculares do alho, reforçando a existência de uma ação sobre a produção e a utilização de energia (Ding *et al.*, 2020). Como resultado, podem ocorrer atraso da protrusão da radícula, diminuição da velocidade e do índice de germinação e menor estabelecimento das plântulas, efeitos registrados em sementes expostas a concentrações elevadas de DADS ou óleo essencial de alho (Cheng *et al.*, 2016; Bai *et al.*, 2023).

Após a emergência, o sistema radicular constitui um dos principais alvos da ação alelopática, devido ao contato direto com os compostos presentes na solução do solo. O DADS modifica a atividade mitótica das células meristemáticas e altera a frequência das fases do ciclo celular, restringindo a formação de novas células quando presente em concentrações elevadas (Cheng *et al.*, 2016). Em pepino, esse composto também regulou genes associados ao ciclo celular e modificou os níveis de auxinas, citocininas e giberelinas, demonstrando que a redução do crescimento radicular envolve simultaneamente alterações hormonais e citológicas (Ren *et al.*, 2018).

A expressão de genes que codificam expansinas, proteínas responsáveis pelo afrouxamento da parede celular, também pode ser desregulada, limitando o alongamento das células e a expansão da raiz (Cheng *et al.*, 2016). Consequentemente, observam-se raízes menores, redução da densidade de pelos radiculares e menor superfície de exploração do solo, características que restringem a absorção de água e nutrientes (Hayat *et al.*, 2020). Em plantas espontâneas, essa limitação pode diminuir rapidamente a capacidade competitiva e aumentar a mortalidade durante os estádios iniciais de desenvolvimento (Bai *et al.*, 2023).

A deterioração da estrutura radicular repercute na nutrição mineral e no metabolismo da parte aérea. A redução dos pelos absorventes e as alterações na permeabilidade das membranas podem comprometer o transporte de íons, a manutenção dos gradientes eletroquímicos e a absorção de nutrientes essenciais (Ren *et al.*, 2018). Além disso, compostos derivados da alicina podem interagir com proteínas de membrana e modificar sua funcionalidade, afetando processos de transporte e homeostase celular (Borlinghaus *et al.*, 2021). Sob elevada exposição aos exsudatos do alho, foram registradas reduções no teor de clorofilas e na produção de biomassa, indicando prejuízos à formação e à estabilidade do aparato fotossintético (Ding *et al.*, 2016).

A menor disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio, magnésio e ferro, pode intensificar a degradação dos pigmentos e reduzir a eficiência fotoquímica, enquanto o comprometimento estomático limita a assimilação de $CO_2$. Embora doses baixas de extrato ou DADS possam aumentar a clorofila e estimular o metabolismo de algumas plantas cultivadas, concentrações elevadas produzem respostas inibitórias, aspecto fundamental para sua utilização seletiva como bioherbicida (Ali *et al.*, 2019; Hayat *et al.*, 2020).

Outro mecanismo central envolve o desequilíbrio oxidativo. A exposição aos compostos organossulfurados pode aumentar a produção de espécies reativas de oxigênio, como o radical superóxido e o peróxido de hidrogênio, promovendo oxidação de proteínas, peroxidação lipídica e perda da seletividade das membranas (Hayat *et al.*, 2020). Inicialmente, a planta-alvo pode elevar a atividade de enzimas antioxidantes, incluindo superóxido dismutase, catalase, peroxidase e ascorbato-peroxidase, como resposta de defesa ao estresse químico (Ali *et al.*, 2019). Quando a concentração dos aleloquímicos supera a capacidade de desintoxicação, porém, ocorre acúmulo de malondialdeído, extravasamento de eletrólitos e redução da viabilidade celular (Ding *et al.*, 2016).

Essa condição agrava a inibição da germinação, do crescimento radicular e da fotossíntese, produzindo um efeito integrado sobre o estabelecimento das plantas espontâneas (Bai *et al.*, 2023). Assim, a ação bioherbicida do alho não decorre de um único sítio bioquímico, mas da combinação entre alterações enzimáticas, hormonais, mitóticas, nutricionais, fotossintéticas e oxidativas, cuja intensidade depende da concentração, da formulação e da sensibilidade da espécie-alvo.

### 3.3 Evidências Experimentais Do Potencial Bioherbicida De Extratos E Resíduos De Alho

As evidências experimentais recentes sobre o emprego direto do alho (*Allium sativum* L.) como bioherbicida ainda são limitadas e concentram-se principalmente em bioensaios de laboratório. Em uma das avaliações mais diretamente relacionadas ao controle de plantas espontâneas, Saraiva (2019) testou extrato aquoso e óleo essencial de alho sobre *Medicago minima*, *Rumex crispus* e *Taraxacum officinale*. O extrato foi preparado pela maceração de 20 g de material vegetal triturado em 100 mL de água destilada, durante 24 horas, enquanto o óleo essencial foi avaliado em diferentes concentrações. Os extratos aquosos apresentaram maior atividade em pré-emergência, sobretudo pela redução da germinação de *T. officinale*, demonstrando que compostos hidrossolúveis do bulbo podem atuar antes do estabelecimento da plântula (Saraiva, 2019).

Esse resultado é coerente com a predominância de compostos organossulfurados biologicamente ativos nos bulbos de alho (Batiha *et al*., 2020) e com a reconhecida capacidade dos extratos vegetais de interferir na germinação e no crescimento inicial das plantas-alvo (Khamare *et al*., 2022). Entretanto, a eficiência dos produtos botânicos depende da espécie receptora, do solvente e da concentração utilizada, o que dificulta extrapolar os resultados de um único bioensaio para diferentes comunidades infestantes (Kostina-Bednarz *et al*., 2023).

Nos ensaios de pós-emergência, o óleo essencial de alho aplicado a 7,5% provocou sintomas visuais de injúria em plântulas de *T. officinale*, enquanto o extrato aquoso apresentou menor efeito sobre plantas já estabelecidas e não ocasionou redução significativa da concentração de clorofila nas folhas remanescentes após 24 horas (Saraiva, 2019). Essa diferença indica que a forma de extração determina o perfil químico e, consequentemente, a atividade herbicida: a maceração em água favorece compostos polares, ao passo que o óleo essencial concentra sulfetos voláteis, particularmente dissulfeto de dialila, trissulfeto de dialila e outros derivados sulfurados (Bar *et al*., 2022).

A maior resposta obtida com concentrações elevadas também evidencia uma relação dose–efeito característica dos aleloquímicos, cuja atuação pode variar de estimulação em doses baixas a forte inibição em doses superiores (Ding *et al*., 2016). Em compostos isolados do alho, Ren *et al*. (2018) verificaram que o dissulfeto de dialila alterou o crescimento radicular, os níveis hormonais e a progressão do ciclo celular, oferecendo sustentação fisiológica para as reduções de germinação e desenvolvimento observadas nos bioensaios com extratos integrais.

Experimentos conduzidos com espécies cultivadas reforçam essa dependência da resposta em relação à dose e ajudam a interpretar os possíveis efeitos sobre plantas espontâneas. Em cocultivo hidropônico, concentrações baixas de exsudatos radiculares de alho estimularam

características fisiológicas da pimenta, enquanto níveis elevados comprometeram o crescimento, a fotossíntese e o equilíbrio antioxidativo (Ding *et al*., 2016).

De modo semelhante, o dissulfeto de dialila modificou a divisão e o alongamento celular das raízes de pepino de maneira dependente da concentração (Ren *et al*., 2018). A caracterização química de extratos de alho-verde também identificou compostos com atividade alelopática, embora sua intensidade tenha variado conforme a substância e a espécie receptora (Yang *et al*., 2019). Portanto, as respostas obtidas com *T. officinale*, pimenta e pepino mostram que a sensibilidade não é uniforme e que a seleção de doses herbicidas deve considerar simultaneamente o controle da planta espontânea e a seletividade para a cultura agrícola (Khamare *et al*., 2022).

Em relação aos resíduos de alho incorporados ao solo, a literatura da última década apresenta evidências muito mais escassas do que aquelas disponíveis para extratos, óleos essenciais e compostos isolados. Embora folhas, hastes, raízes e resíduos da industrialização possam liberar aleloquímicos durante a decomposição, sua atividade depende da quantidade incorporada, da umidade, da microbiota e da velocidade de degradação no solo (Khamare *et al*., 2022). A instabilidade dos compostos sulfurados e sua transformação rápida após o rompimento dos tecidos também podem explicar diferenças entre resultados laboratoriais e respostas obtidas em substratos ou solos (Bar *et al*., 2022).

Revisões recentes ressaltam que a eficácia demonstrada em placas de Petri geralmente diminui sob condições ambientais variáveis, em razão da adsorção, volatilização, lixiviação e degradação microbiana dos aleloquímicos (Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Assim, apesar dos resultados promissores em pré e pós-emergência (Saraiva, 2019), não foram localizados, no período analisado, ensaios de campo publicados em periódicos que comprovem controle consistente de plantas espontâneas por extratos ou resíduos de *A. sativum*. O potencial bioherbicida do alho deve, portanto, ser considerado experimental, demandando estudos de casa de vegetação e campo com curvas dose–resposta, diferentes espécies infestantes, avaliação de seletividade, persistência no solo e comparação com herbicidas comerciais.

### 3.4 Aplicação do alho no manejo sustentável de plantas espontâneas: possibilidades e limitações

O alho (*Allium sativum* L.) apresenta potencial para integrar programas sustentáveis de manejo de plantas espontâneas, principalmente na forma de extratos aquosos e óleo essencial. Os extratos podem ser obtidos pela trituração de bulbos frescos em água, seguida de filtração e aplicação ao solo ou à parte aérea das plantas, constituindo uma alternativa tecnicamente

simples para pequenas propriedades. Entretanto, sua eficiência depende da concentração, da parte vegetal utilizada e do estádio de desenvolvimento da espécie-alvo, pois respostas estimulantes em doses baixas e inibitórias em doses elevadas podem ocorrer (Adeleke, 2016). O óleo essencial de alho apresenta atividade mais concentrada, associada especialmente ao sulfeto de dialila e ao dissulfeto de dialila (Bai *et al.*, 2023), enquanto os compostos voláteis liberados pelos tecidos verdes também podem alterar o equilíbrio oxidativo das plantas expostas (Yang *et al.*, 2019). Apesar dessas possibilidades, extratos brutos geralmente apresentam composição variável e menor estabilidade, condição que dificulta a reprodução dos resultados entre lotes e ambientes de aplicação (Khamare *et al.*, 2022).

A incorporação de folhas, pseudocaules, cascas e bulbos descartados ao solo representa outra possibilidade de aproveitamento do alho, especialmente em regiões produtoras onde esses resíduos estão disponíveis. Durante a decomposição, os compostos aleloquímicos podem ser liberados na solução do solo, enquanto o emprego do material como cobertura morta também limita fisicamente a emergência e reduz a disponibilidade de luz para as plantas espontâneas (Khamare *et al.*, 2022). Essa estratégia, contudo, exige cautela, uma vez que a concentração efetivamente liberada depende da quantidade de biomassa, do grau de trituração, da umidade, da temperatura e da atividade microbiana do solo (Scavo; Mauromicale, 2021).

Além disso, a aplicação de extrato de alho ao solo reduziu o crescimento radicular e a nodulação de feijão-caupi e amendoim, com agravamento dos efeitos nas maiores concentrações, evidenciando riscos para culturas leguminosas e para microrganismos simbióticos (Adeleke, 2016). Portanto, resíduos e coberturas contendo alho devem ser avaliados quanto à dose, ao período entre incorporação e semeadura e à sensibilidade da cultura sucessora, pois a origem vegetal do produto não garante seletividade ou ausência de efeitos não alvo (Bai *et al.*, 2023).

A elevada volatilidade, a baixa solubilidade em água e a rápida degradação dos compostos sulfurados constituem obstáculos importantes para o emprego do óleo de alho em condições de campo. Luz, temperatura, oxigênio, chuva e propriedades do solo podem reduzir sua persistência e tornar o controle menos uniforme do que aquele observado em bioensaios laboratoriais (Vasconcelos *et al.*, 2025). Formulações emulsificadas, microencapsuladas ou nanoencapsuladas podem proteger os princípios ativos, melhorar a dispersão em água e proporcionar liberação gradual, ampliando o tempo de contato com as plantas-alvo (Rodríguez-Mejías *et al.*, 2023).

Sistemas biodegradáveis também podem reduzir a quantidade necessária do produto e melhorar sua retenção e direcionamento no ambiente (Jayasoorya *et al.*, 2024). Todavia, ainda

não estão disponíveis evidências suficientes para afirmar que formulações encapsuladas especificamente com óleo ou extratos de alho sejam eficientes e seguras em escala comercial. Antes de sua recomendação, são necessários estudos sobre cinética de liberação, resíduos, transporte no solo, toxicidade para organismos edáficos e aquáticos e comportamento dos materiais carreadores (Rodríguez-Mejías *et al.*, 2023).

A seletividade representa uma das principais limitações agronômicas. Embora o óleo essencial de alho tenha provocado aproximadamente 88% de inibição do crescimento de *Echinochloa crus-galli* e apresentado menor efeito sobre a germinação do arroz, doses mais elevadas também reduziram a biomassa das plântulas da cultura (Bai *et al.*, 2023). De modo semelhante, a fitotoxicidade observada em culturas leguminosas confirma que aplicações não direcionadas podem prejudicar o estabelecimento, o sistema radicular e as associações com rizóbios (Adeleke, 2016). A padronização deverá considerar genótipo, origem e armazenamento do alho, método de extração, composição química, concentração, adjuvantes e momento de aplicação, fatores decisivos para transformar um extrato variável em produto agrícola reprodutível (Yang *et al.*, 2019).

A viabilidade econômica dependerá do aproveitamento de resíduos agroindustriais, da disponibilidade local da matéria-prima e do custo das formulações, especialmente das tecnologias de encapsulação (Jayasoorya *et al.*, 2024). Assim, o alho deve ser considerado componente complementar do manejo integrado, associado à cobertura do solo, rotação de culturas, controle mecânico, redução do banco de sementes e aplicações localizadas, e não como substituto isolado dos demais métodos de controle (Khamare *et al.*, 2022).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências analisadas demonstram que o alho (*Allium sativum* L.) apresenta potencial como fonte de compostos naturais com atividade bioherbicida, principalmente em razão da presença de metabólitos organossulfurados capazes de interferir em diferentes processos fisiológicos e bioquímicos das plantas. Extratos aquosos, óleos essenciais, exsudatos e compostos derivados do alho podem afetar a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas receptoras, com efeitos sobre a divisão e o alongamento celular, o equilíbrio hormonal, a absorção de nutrientes, a atividade fotossintética e o metabolismo oxidativo.

A intensidade dessas respostas, entretanto, é fortemente dependente da concentração, da forma de obtenção e aplicação do produto e da sensibilidade da espécie receptora. A ocorrência de respostas horméticas, com estímulo em baixas concentrações e inibição em doses mais elevadas, evidencia a necessidade de estabelecer faixas de aplicação capazes de

proporcionar controle das plantas espontâneas sem causar danos às culturas. A fitotoxicidade observada em espécies cultivadas reforça que a origem natural dos compostos não implica, necessariamente, seletividade ou segurança agronômica.

Embora os resultados experimentais indicam potencial para utilização de extratos e, principalmente, do óleo essencial de alho no manejo de plantas espontâneas, a maior parte das evidências disponíveis ainda provém de condições controladas. A volatilidade, a instabilidade e a rápida degradação dos compostos organossulfurados podem reduzir sua persistência e eficácia em condições de campo. Além disso, permanecem lacunas relacionadas à padronização química das formulações, à seletividade para diferentes culturas, aos efeitos sobre organismos não alvo e à viabilidade econômica de sua utilização em escala agrícola.

Tecnologias de formulação, como emulsificação, microencapsulamento e nanoencapsulamento, apresentam perspectivas para aumentar a estabilidade, melhorar a dispersão e promover a liberação gradual dos compostos ativos. Entretanto, sua aplicação específica aos derivados do alho ainda necessita de validação quanto à eficácia agronômica, segurança ambiental e viabilidade econômica. Da mesma forma, o aproveitamento de resíduos provenientes da produção e do processamento do alho constitui uma possibilidade relevante, mas requer estudos que determinem doses, formas de aplicação e períodos seguros entre a incorporação dos resíduos e o estabelecimento das culturas.

Dessa forma, o alho deve ser considerado uma fonte promissora de moléculas e produtos naturais para o desenvolvimento de bioherbicidas e uma ferramenta potencialmente complementar ao manejo integrado de plantas espontâneas, e não um substituto plenamente estabelecido dos herbicidas convencionais. A consolidação dessa alternativa depende, principalmente, da realização de ensaios em condições de campo, da construção de curvas de dose–resposta para diferentes espécies espontâneas e cultivadas, da definição de doses seletivas, da avaliação da persistência dos compostos no ambiente e de estudos ecotoxicológicos e econômicos. O avanço dessas pesquisas poderá contribuir para transformar o potencial alelopático do alho em estratégias de manejo mais eficientes, seletivas e ambientalmente compatíveis com sistemas agrícolas sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

ADELEKE, Martina T. V.; EZEABASILI, S. I.; ESEIGBE, D. A. Effect of Allium sativum (garlic) extract on the growth and nodulation of cowpea (Vigna unguiculata) and groundnut (Arachis hypogaea). African Journal of Agricultural Research, v. 11, n. 43, p. 4304–4312, 2016. DOI: https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11208.

ALI, M.; CHENG, Z. H.; HAYAT, S.; AHMAD, H.; GHANI, M. I.; LIU, T. Foliar spraying of aqueous garlic bulb extract stimulates growth and antioxidant enzyme activity in eggplant (Solanum melongena L.). Journal of Integrative Agriculture, v. 18, p. 1001–1013, 2019.

BAI, Haodong; NI, Xianzhi; HAN, Jincai; LUO, Dingfeng; HU, Yihong; JIN, Chenzhong; LI, Zuren. Phytochemical profiling and allelopathic effect of garlic essential oil on barnyard grass (Echinochloa crus-galli L.). PLOS ONE, v. 18, n. 4, e0272842, 2023. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272842.

BAR, M.; BINDUGA, U. E.; SZCZEPANIAK, M. Methods of isolation of active substances from garlic (Allium sativum L.) and its impact on the composition and biological properties of garlic extracts. Antioxidants, v. 11, n. 7, art. 1345, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox11071345.

BATIHA, G. E.-S. et al. Chemical constituents and pharmacological activities of garlic (Allium sativum L.): a review. Nutrients, v. 12, n. 3, art. 872, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/nu12030872.

BORLINGHAUS, J.; ALBRECHT, F.; GRUHLKE, M. C. H.; NWACHUKWU, I. D.; SLUSARENKO, A. J. Allicin: chemistry and biological properties.. Molecules, v. 26, n. 6, art. 1505, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26061505.

CHENG, Fang; CHENG, Zhihui; MENG, H.; TANG, X. The garlic allelochemical diallyl disulfide affects tomato root growth by influencing cell division, phytohormone balance and expansin gene expression. Frontiers in Plant Science, v. 7, art. 1199, 2016. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01199.

DING, H.; ALI, A.; CHENG, Z. An allelopathic role for garlic root exudates in the regulation of carbohydrate metabolism in cucumber in a hydroponic co-culture system. Plants, v. 9, n. 1, art. 45, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/plants9010045.

DING, H.; CHENG, Z.; LIU, M.; HAYAT, S.; FENG, H. Garlic exerts allelopathic effects on pepper physiology in a hydroponic co-culture system. Biology Open, v. 5, n. 5, p. 631–637, 2016. DOI: https://doi.org/10.1242/bio.016451.

HAYAT, S.; AHMAD, H.; NASIR, M.; KHAN, M. N.; ALI, M.; HAYAT, K.; KHAN, F.; ALI, Q.; CHENG, Z. Some physiological and biochemical mechanisms during seed-to-seedling transition in tomato as influenced by garlic allelochemicals. Antioxidants, v. 9, n. 3, art. 235, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox9030235.

ISLAM, A. K. M. M. et al. Unlocking the potential of bioherbicides for sustainable and environmentally friendly weed management. Heliyon, v. 10, 2024.

JAYASOORYA, R. et al. Utilization of biodegradable carrier-based nano herbicide formulations for sustainable weed management in agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 6, art. 1497041, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1497041.

KHAMARE, Yuvraj; CHEN, J.; MARBLE, S. Christopher; QURESHI, J.; KOSTENYUK, I. Allelopathy and its application as a weed management tool: a review. Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 1034649, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649.

KOSTINA-BEDNARZ, M.; PŁONKA, J.; BARCHANSKA, H. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 22, p. 471–504, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-023-09656-1.

MARTINS, N.; PETROPOULOS, S.; FERREIRA, I. C. F. R. Chemical composition and bioactive compounds of garlic (Allium sativum L.) as affected by pre- and post-harvest conditions: a review. Food Chemistry, v. 211, p. 41–50, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.029.

RADHAKRISHNAN, Ramalingam; ALQARAWI, Abdulaziz A.; ABD_ALLAH, Elsayed F. Bioherbicides: current knowledge on weed control mechanism. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 158, p. 131–138, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.018.

REN, K.; HAYAT, S.; QI, X.; LIU, T.; CHENG, Z. The garlic allelochemical DADS influences cucumber root growth involved in regulating hormone levels and modulating cell cycling. Journal of Plant Physiology, v. 230, p. 51–60, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.007.

ROBERTS, Jonathan; FLINTAN, F.; GILLON, K. et al. Achievements, developments and future challenges in the field of bioherbicides for weed control: a global review. Plants, v. 11, n. 17, art. 2242, 2022.

RODRÍGUEZ-MEJÍAS, Francisco J.; SCAVO, Aurelio; CHINCHILLA, Nuria; MOLINILLO, José M. G.; SCHWAIGER, Stefan; MAUROMICALE, Giovanni; MACÍAS, Francisco A. Perspectives and advances in organic formulations for agriculture: encapsulation of herbicides for weed control. Agronomy, v. 13, n. 7, art. 1898, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13071898.

SARAIVA, C. S. S. Bioherbicidal effect of plant aqueous extracts and essential oils. 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura Biológica) – Escola Superior Agrária de Coimbra, Coimbra, 2019.

SCAVO, Aurelio; MAUROMICALE, Giovanni. Crop allelopathy for sustainable weed management in agroecosystems: knowing the present with a view to the future. Agronomy, v. 11, n. 11, art. 2104, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy11112104.

VASCONCELOS, L. C. et al. Bioherbicidal and cytogenotoxic potential of nanoemulsions containing essential oils from Piper amalago and Piper dilatatum. Scientific Reports, v. 15, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-18224-2.

YANG, Fan; LIU, Xiaoxue; WANG, Hui; DENG, Rui; YU, Hanhan; CHENG, Zhihui. Identification and allelopathy of green garlic (Allium sativum L.) volatiles on scavenging of cucumber (Cucumis sativus L.) reactive oxygen species. Molecules, v. 24, n. 18, art. 3263, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules24183263

# CAPÍTULO 6

## COMPATIBILIDADE DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS COM INSETICIDAS ORGANOSSINTÉTICOS NO CONTROLE DE PRAGAS AGRÍCOLAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-6

Samuel Farias Santana, e-mail: samuel.santana@ceca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/1458348397042006

**RESUMO**

O uso intensivo de inseticidas organossintéticos no manejo de pragas agrícolas têm estimulado a busca por estratégias que conciliam eficiência de controle e maior integração entre métodos químicos e biológicos. Nesse contexto, os fungos entomopatogênicos apresentam potencial para associação com inseticidas em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP). Esta revisão sistemática objetivou analisar a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos, considerando os fatores que influenciam essa interação e seus efeitos sobre o controle de pragas agrícolas. A revisão foi conduzida conforme as recomendações do protocolo PRISMA 2020, contemplando estudos publicados entre 2021 e 2026. Inicialmente, foram identificados 90 estudos potencialmente relevantes e, após a aplicação dos critérios de elegibilidade, 19 artigos constituíram a amostra final. As evidências demonstraram que a compatibilidade varia de acordo com a espécie e o isolado fúngico, ingrediente ativo, formulação, concentração, período de exposição e condições experimentais. *Beauveria bassiana* e espécies de *Metarhizium* destacaram-se entre os agentes mais investigados. Associações compatíveis apresentaram potencial para aumentar a mortalidade das pragas, reduzir o tempo necessário para o controle e, em determinadas condições, produzir interações aditivas ou sinérgicas. Entretanto, resultados obtidos *in vitro* nem sempre corresponderam ao desempenho observado em condições mais próximas da aplicação prática, evidenciando a influência de fatores ambientais e metodológicos. Conclui-se que a integração entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos constitui uma estratégia promissora para o MIP, embora sua recomendação dependa da seleção criteriosa das combinações e da ampliação de estudos de campo com protocolos padronizados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle biológico; Entomopatógenos; Compatibilidade.

## 1. INTRODUÇÃO

O manejo de pragas agrícolas constitui um componente essencial para a manutenção da produtividade e da qualidade das culturas. Embora os inseticidas organossintéticos apresentem elevada importância nesse processo, seu uso frequente e inadequado pode favorecer a seleção de populações resistentes e aumentar os riscos de efeitos indesejáveis sobre organismos não alvo e o ambiente. Diante desse cenário, estratégias que integrem diferentes métodos de controle têm recebido maior atenção, especialmente aquelas capazes de conciliar eficiência fitossanitária e redução da dependência exclusiva do controle químico (Sparks *et al*., 2021; Tudi *et al.*, 2021).

Entre as alternativas disponíveis, os fungos entomopatogênicos destacam-se como agentes de controle biológico capazes de infectar diferentes grupos de artrópodes. Espécies pertencentes aos gêneros *Beauveria*, *Metarhizium*, *Cordyceps* e *Akanthomyces* apresentam potencial para utilização no manejo de pragas devido à capacidade de penetrar diretamente pelo

tegumento do hospedeiro e desencadear processos infecciosos que resultam em sua morte. Além da ação entomopatogênica, determinados fungos podem estabelecer associações com plantas e participar de interações ecológicas que ampliam suas possibilidades de utilização em sistemas agrícolas (Lovett; St. Leger, 2023; Wallis; Sisterson, 2024).

Nesse contexto, a associação de fungos entomopatogênicos com inseticidas organossintéticos representa uma estratégia promissora para o Manejo Integrado de Pragas (MIP). Entretanto, a utilização conjunta desses agentes depende de sua compatibilidade, uma vez que determinados inseticidas podem interferir na germinação, no crescimento vegetativo, na esporulação e na capacidade infectiva dos fungos. Por outro lado, combinações adequadas podem manter a atividade do entomopatógeno e favorecer o controle da praga, inclusive por meio de interações aditivas ou sinérgicas. Essas respostas variam conforme o fungo, o isolado, o ingrediente ativo, a formulação e a concentração utilizada, o que impossibilita generalizações entre diferentes associações (Ribeiro *et al.*, 2023; Polanczyk et al., 2025).

Apesar do avanço das pesquisas, os estudos apresentam considerável diversidade quanto aos fungos, inseticidas, organismos-alvo e métodos empregados para determinar a compatibilidade. Além disso, resultados obtidos *in vitro* nem sempre correspondem ao desempenho observado *in vivo* ou em condições de campo, dificultando a definição das combinações mais adequadas para aplicação prática. Desse modo, a sistematização das evidências disponíveis torna-se necessária para compreender os fatores responsáveis por essa variabilidade e identificar lacunas que ainda limitam a integração entre os métodos de controle (Wallis; Sisterson, 2024; Bouketta *et al*., 2026).

Diante disso, esta revisão sistemática, conduzida de acordo com as recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), foi orientada pela seguinte pergunta: “Qual é a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos e quais fatores influenciam o desempenho dessa associação no controle de pragas agrícolas?” Assim, objetivou-se sistematizar e analisar criticamente as evidências disponíveis sobre essas interações, considerando os principais fungos e inseticidas avaliados, os fatores que condicionam a compatibilidade e os efeitos das associações sobre o controle das pragas, bem como suas limitações e perspectivas de aplicação no MIP.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Delineamento da revisão e estratégia de busca

O estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura, conduzida de acordo com as recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020), visando garantir maior transparência e reprodutibilidade nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. A revisão foi direcionada à análise de pesquisas sobre a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos empregados no controle de pragas agrícolas (Page *et al*., 2021).

A busca bibliográfica foi estruturada a partir de descritores relacionados ao tema da revisão, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR. Foram utilizados termos em português e inglês referentes a fungos entomopatogênicos, inseticidas, compatibilidade e controle de pragas, incluindo combinações como: *"entomopathogenic fungi"* AND *"insecticides"* AND *"compatibility"*, *"Beauveria bassiana"* AND *"insecticides"*, *"Metarhizium anisopliae"* AND *"insecticides"* e *"entomopathogenic fungi"* AND *"integrated pest management"*. As buscas foram delimitadas no período de 2021 a 2026, considerando publicações relacionadas diretamente ao objetivo da revisão.

## 2.2 Critérios de elegibilidade

Foram considerados elegíveis artigos científicos publicados no período estabelecido, disponíveis em texto completo e que apresentassem resultados relacionados à associação ou compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos no controle de pragas agrícolas. Foram incluídos estudos conduzidos *in vitro, in vivo,* em casa de vegetação, semicampo ou campo, desde que avaliassem pelo menos um parâmetro relacionado à compatibilidade, ao desenvolvimento do fungo ou à eficiência da associação sobre o organismo-alvo.

Foram excluídos estudos duplicados, trabalhos publicados fora do período estabelecido, revisões de literatura, capítulos de livros, resumos de eventos, dissertações, teses e publicações que não apresentassem relação direta com a pergunta de pesquisa. Também foram excluídos trabalhos que abordassem exclusivamente fungicidas, herbicidas ou outros produtos fitossanitários sem avaliação de inseticidas organossintéticos, bem como estudos que utilizassem fungos sem finalidade entomopatogênica.

## 2.3 Seleção dos estudos

O processo de seleção foi realizado de forma sequencial, conforme as etapas recomendadas pelo PRISMA 2020. Inicialmente, as estratégias de busca resultaram na identificação de 90 estudos potencialmente relevantes. Posteriormente, os registros foram submetidos à triagem com base nos títulos e resumos, considerando sua correspondência com

a pergunta de pesquisa e os critérios de elegibilidade previamente estabelecidos. Os trabalhos potencialmente pertinentes foram, então, avaliados em texto completo para confirmação da elegibilidade.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão ao longo das etapas de seleção, 19 artigos científicos atenderam aos requisitos estabelecidos e constituíram a amostra final desta revisão sistemática. O processo de identificação, triagem, avaliação da elegibilidade e inclusão dos estudos foi organizado conforme o fluxograma PRISMA, permitindo representar de maneira sistemática a redução dos registros inicialmente identificados até a composição da amostra final.

### 2.4 Extração, organização e análise dos dados

Dos 19 estudos selecionados foram extraídas informações relacionadas aos fungos entomopatogênicos e respectivos isolados, inseticidas e ingredientes ativos avaliados, pragas-alvo, condições experimentais, concentrações utilizadas e parâmetros empregados para determinar a compatibilidade. Também foram registrados os principais efeitos dos inseticidas sobre germinação, crescimento vegetativo, esporulação e viabilidade dos fungos, além dos resultados referentes à mortalidade das pragas e às possíveis interações aditivas, sinérgicas ou antagônicas relatadas pelos autores.

Após a extração, os dados foram organizados e analisados de forma descritiva e comparativa, buscando identificar padrões e divergências entre os estudos. A síntese das evidências considerou os principais fungos entomopatogênicos utilizados no controle de pragas, a compatibilidade com inseticidas organossintéticos, os fatores responsáveis pela variação dessa interação, as diferenças entre avaliações in vitro e condições de campo e os efeitos das associações sobre o controle das pragas. Por fim, foram discutidas as possibilidades de aplicação dessas combinações no Manejo Integrado de Pragas, bem como as principais limitações e lacunas identificadas na literatura.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Fungos entomopatogênicos utilizados no controle de pragas agrícolas

Os fungos entomopatogênicos constituem importantes agentes de controle biológico de artrópodes-praga, com crescente utilização em programas de manejo integrado. Diferentemente de microrganismos cuja infecção depende predominantemente da ingestão, esses fungos podem iniciar o processo infeccioso pelo contato dos propágulos com a superfície corporal do

hospedeiro. Essa característica amplia sua aplicação contra insetos com diferentes hábitos alimentares e em distintos sistemas agrícolas (Rajula *et al*., 2021; Karthi *et al*., 2024).

Entre os principais agentes utilizados destacam-se espécies dos gêneros *Beauveria*, *Metarhizium*, *Cordyceps* e *Akanthomyces*. Nesse grupo, *Beauveria bassiana* e espécies de *Metarhizium* apresentam especial relevância pela diversidade de hospedeiros suscetíveis, disponibilidade de isolados virulentos e desenvolvimento de formulações para uso agrícola. Consequentemente, esses fungos estão entre os agentes microbiológicos mais investigados para o controle de diferentes grupos de insetos-praga (Wallis; Sisterson, 2024; Karthi *et al*., 2024).

A eficiência desses microrganismos está relacionada às diferentes etapas do processo infeccioso. Após a adesão dos conídios à cutícula, ocorre a germinação e a penetração no tegumento, favorecida pela ação mecânica e pela produção de enzimas, como proteases, quitinases e lipases. Posteriormente, o fungo coloniza os tecidos internos e interfere na homeostase do hospedeiro até provocar sua morte. Portanto, o sucesso da infecção depende da ocorrência coordenada de adesão, germinação, penetração e colonização (Lovett; St. Leger, 2023; Karthi *et al*., 2024).

Além da infecção direta, algumas espécies podem colonizar tecidos vegetais como endófitos sem causar sintomas de doença. Essa capacidade, relatada principalmente para representantes de *Beauveria* e *Metarhizium*, pode contribuir para a proteção das plantas ao interferir na alimentação, no desenvolvimento, na sobrevivência ou na oviposição de determinados artrópodes. Entretanto, esses efeitos dependem da interação entre a espécie vegetal, o isolado fúngico e o organismo-alvo (Panwar *et al*., 2024; Wallis; Sisterson, 2024).

A atividade entomopatogênica, contudo, não é uniforme entre isolados de uma mesma espécie. Diferenças na virulência, germinação, produção de conídios, tolerância ambiental e capacidade de infectar hospedeiros tornam a seleção de isolados uma etapa fundamental para o desenvolvimento de agentes eficientes. Essa variabilidade também deve ser considerada na integração com outras medidas fitossanitárias, uma vez que isolados da mesma espécie podem responder de maneira distinta aos produtos utilizados no sistema de produção (Wallis; Sisterson, 2024).

Nesse sentido, a prospecção de isolados adaptados às condições locais apresenta importância para o controle biológico. Santos *et al.* (2026) demonstraram o potencial de fungos entomopatogênicos nativos do Semiárido brasileiro como fonte de agentes para o manejo de insetos-praga. Paralelamente, avanços na produção e formulação de blastosporos de *B. bassiana* e *Cordyceps javanica* evidenciam que o desempenho desses microrganismos depende não

apenas da virulência, mas também das características do propágulo, da formulação e da estabilidade do produto (Santos *et al*., 2026; Mascarin *et al*., 2026).

Apesar desse potencial, a eficiência dos fungos entomopatogênicos em sistemas agrícolas é influenciada por fatores ambientais e tecnológicos. Temperatura, umidade, radiação solar, método de aplicação, formulação e persistência dos propágulos podem alterar o desempenho dos agentes e contribuir para diferenças entre resultados laboratoriais e de campo. Por isso, a seleção de isolados adaptados e o aprimoramento das formulações e estratégias de aplicação são essenciais para aumentar sua persistência e atividade no agroecossistema (Wallis; Sisterson, 2024; Liu *et al*., 2026).

Diante dessas limitações, os fungos entomopatogênicos devem ser considerados componentes de estratégias integradas, e não necessariamente substitutos isolados do controle químico. Sua associação com inseticidas apresenta potencial para o manejo de pragas, desde que a compatibilidade entre os agentes seja previamente determinada (Liu *et al*., 2026). Em *B. bassiana*, por exemplo, diferentes isolados apresentaram respostas distintas a inseticidas utilizados no manejo de *Dalbulus maidis* (Ribeiro *et al*., 2023). Assim, compreender a diversidade e as características desses fungos é fundamental para estabelecer associações eficientes entre o controle biológico e o químico.

### 3.2 Compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos

A integração de fungos entomopatogênicos com inseticidas organossintéticos constitui uma alternativa relevante para o manejo de pragas agrícolas. Entretanto, sua utilização conjunta depende da compatibilidade entre os agentes, uma vez que os compostos químicos podem interferir em processos essenciais ao desenvolvimento e à atividade infectiva dos fungos. Dessa forma, a compatibilidade deve considerar não apenas a possibilidade de associação entre os produtos, mas também a preservação da germinação, do crescimento vegetativo e da produção de conídios após a exposição ao inseticida (Ribeiro *et al*., 2023; Polanczyk *et al.*, 2025).

Entre os parâmetros utilizados para avaliar essa interação, a germinação dos conídios apresenta particular importância por representar uma das etapas iniciais do processo infeccioso. Sua redução pode diminuir a quantidade de propágulos capazes de infectar o hospedeiro. Contudo, esse indicador não deve ser analisado isoladamente, pois um inseticida pode apresentar baixo efeito sobre a germinação e, simultaneamente, comprometer etapas posteriores do desenvolvimento fúngico (Ribeiro *et al*., 2023).

O crescimento vegetativo e a esporulação também constituem indicadores relevantes de compatibilidade. Enquanto alterações no crescimento micelial podem limitar o

desenvolvimento do fungo, a redução da produção de conídios pode comprometer sua multiplicação e disseminação. Nesse viés, Sperotto *et al.* (2025) observaram que a esporulação de fungos entomopatogênicos foi mais afetada por inseticidas à base de isocicloseram do que o crescimento vegetativo e a germinação, demonstrando que diferentes etapas do desenvolvimento fúngico podem apresentar sensibilidades distintas.

Além disso, a resposta aos inseticidas pode variar entre espécies e isolados de fungos entomopatogênicos. Ribeiro *et al.* (2023), ao avaliarem isolados de *Beauveria bassiana* e *Cordyceps fumosorosea*, identificaram diferenças de sensibilidade aos produtos testados, evidenciando que resultados obtidos para determinado isolado não devem ser generalizados para toda a espécie. Assim, a identidade do isolado constitui um aspecto importante na seleção de agentes microbiológicos destinados à integração com o controle químico.

De modo semelhante, inseticidas pertencentes ao mesmo grupo ou contendo ingredientes ativos semelhantes podem apresentar respostas distintas em função da formulação e das condições de avaliação. Polanczyk *et al*. (2025) verificaram diferenças na compatibilidade de produtos comerciais com *B. bassiana* IBCB 170, incluindo formulações contendo imidacloprido. Esse comportamento reforça que a seletividade deve ser avaliada para cada associação específica entre produto e agente microbiológico.

A variabilidade observada entre fungos, isolados e inseticidas evidencia, portanto, que a compatibilidade não constitui uma característica fixa de determinada classe química. Ao contrário, resulta da interação entre as características do produto e do microrganismo avaliado. Nesse sentido, a Tabela 1 sintetiza resultados recentes sobre a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos, considerando os principais efeitos observados sobre parâmetros biológicos dos agentes fúngicos.

**Tabela 1.** Compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos relatada em estudos recentes.

| Fungo/isolado | Inseticida | Principal efeito observado | Compatibilidade | Referência |
|---|---|---|---|---|
| *B. bassiana* IBCB 66 e Simbi BB15; *C. fumosorosea* Esalq-1296 | Diferentes inseticidas | Sensibilidade variável entre produtos e isolados | Variável | Ribeiro *et al.* (2023) |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *B. bassiana* 170 | IBCB | Tiametoxam | Redução dos parâmetros biológicos | Tóxico a moderadamente tóxico | Polanczyk *et al*. (2025) |
| *B. bassiana* 170 | IBCB | Clorantraniliprole | Alterações no desenvolvimento fúngico | Tóxico | Polanczyk *et al*. (2025) |
| *B. bassiana* 170 | IBCB | Bifentrina | Comprometimento do desempenho biológico | Tóxico | Polanczyk *et al.* (2025) |
| *B. bassiana* 170 | IBCB | Imidacloprido | Efeito dependente da concentração | Compatível a moderadamente tóxico | Polanczyk *et al.* (2025) |
| *B. bassiana* 170 | IBCB | Tiametoxam + lambda-cialotrina | Redução dos parâmetros biológicos | Tóxico | Polanczyk *et al.* (2025) |
| *B. bassiana* 170 | IBCB | Fipronil | Redução do desempenho biológico | Tóxico | Polanczyk *et al*. (2025) |
| Fungos utilizados contra *D. maidis* | | Isocicloseram | Maior efeito sobre a esporulação | Variável | Sperotto *et al.* (2025) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados sintetizados na Tabela 1 demonstram que a classificação da compatibilidade pode mudar conforme o parâmetro biológico considerado. Em alguns casos, a germinação permanece relativamente preservada enquanto o crescimento ou a produção de conídios é reduzida. Portanto, a análise conjunta desses indicadores fornece uma interpretação mais consistente dos possíveis impactos dos inseticidas sobre os agentes entomopatogênicos (Polanczyk *et al.*, 2025; Sperotto *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante é que a exposição ao inseticida não resulta necessariamente em antagonismo entre os agentes. Zhang *et al.* (2021), por exemplo, observaram que a associação de *B. bassiana* com beta-cipermetrina em concentração reduzida apresentou baixo efeito sobre o crescimento micelial e interação sinérgica contra larvas de *Phauda flammans*. De forma

semelhante, Sperotto *et al.* (2025) identificaram efeito aditivo sobre a mortalidade de *D. maidis* em determinadas associações, apesar de alterações em parâmetros fúngicos.

Em síntese, as evidências indicam que a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos depende da combinação específica entre o microrganismo e o produto químico. Desse modo, classificações generalizadas devem ser evitadas, especialmente diante da variabilidade entre isolados, ingredientes ativos e formulações. Além disso, fatores como concentração e período de exposição podem modificar essas interações, aspectos que devem ser considerados na definição de estratégias de integração entre os métodos de controle.

### 3.3 Fatores que influenciam a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas

A compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas é condicionada por diferentes fatores relacionados tanto ao agente microbiano quanto ao produto químico. Por essa razão, a classificação de uma associação como compatível ou incompatível não deve ser considerada uma característica absoluta. Ingrediente ativo, formulação, concentração, período de exposição e características do isolado podem modificar a resposta do fungo e, consequentemente, determinar a viabilidade de sua utilização conjunta com inseticidas em programas de manejo integrado (Ribeiro *et al*., 2023; Bouketta *et al.*, 2026).

Entre esses fatores, a concentração do inseticida exerce influência direta sobre a interação. O aumento da exposição ao composto químico pode intensificar seus efeitos sobre estruturas fúngicas, embora essa relação não seja uniforme entre produtos e isolados. Estudos recentes demonstram respostas dependentes da concentração, indicando que um produto tolerado pelo fungo em determinada condição pode apresentar maior efeito inibitório quando utilizado em concentração superior. Esse comportamento reforça a necessidade de avaliar os produtos nas doses efetivamente empregadas no manejo da cultura, evitando extrapolações entre diferentes condições experimentais (Polanczyk *et al.*, 2025; Sperotto *et al*., 2026).

Além da concentração, a sequência e o período de exposição podem modificar a interação entre os agentes. A aplicação simultânea promove contato direto entre os propágulos fúngicos e o inseticida, enquanto aplicações sequenciais podem reduzir essa exposição ou alterar a resposta do organismo-alvo. Em associações envolvendo *Metarhizium anisopliae* e diflubenzuron, por exemplo, a aplicação do inseticida após a exposição ao fungo resultou em interação sinérgica em determinadas condições, enquanto outras sequências produziram respostas aditivas. Portanto, o intervalo entre as aplicações constitui uma variável relevante para

definir estratégias que preservem a atividade do entomopatógeno e potencializam o controle da praga.

As características genéticas e fisiológicas do isolado também contribuem para as diferenças de compatibilidade. Ribeiro *et al.* (2023) verificaram respostas distintas entre isolados de *Beauveria bassiana* e *Cordyceps fumosorosea* expostos a inseticidas empregados no manejo de *Dalbulus maidis*, sendo *B. bassiana* IBCB 66 mais sensível aos produtos testados. De forma semelhante, isolados nativos de *B. bassiana* apresentaram níveis diferentes de tolerância a imidacloprido, clorantraniliprole, tiametoxam, cipermetrina e outros produtos em estudo publicado por Nimisha *et al.* (2024). Assim, resultados obtidos para um isolado não devem ser generalizados para todos os representantes da mesma espécie.

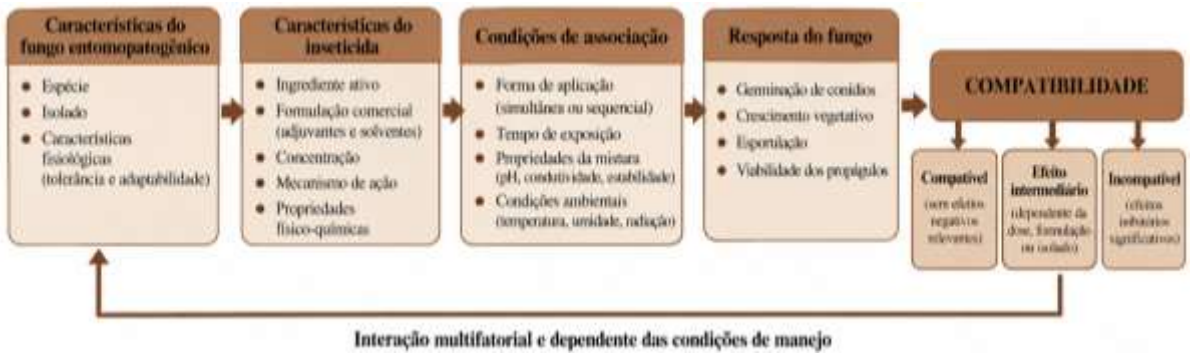
Por sua vez, as características do inseticida também interferem nessa relação, uma vez que diferentes ingredientes ativos apresentam mecanismos de ação e propriedades físico-químicas distintas. Além disso, a formulação comercial incorpora componentes que podem alterar o contato entre os conídios e o ingrediente ativo. Essa particularidade ajuda a explicar por que produtos destinados ao controle da mesma praga podem produzir respostas diferentes quando associados aos entomopatógenos. Consequentemente, a avaliação da compatibilidade deve considerar o produto formulado utilizado no sistema agrícola, e não apenas o ingrediente ativo de maneira isolada (Ribeiro *et al.*, 2023; Sperotto *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante corresponde às propriedades físico-químicas das misturas destinadas à aplicação conjunta. Alterações de pH, condutividade elétrica, homogeneidade e estabilidade podem afetar a qualidade da calda e modificar a exposição dos propágulos ao produto químico. Ribeiro *et al.* (2023) observaram que a maioria das associações entre inseticidas e micoinseticidas avaliadas apresentou compatibilidade física, enquanto Sperotto *et al.* (2025) também identificaram compatibilidade físico-química na maior parte das misturas contendo inseticidas à base de isocicloseram. Esses resultados demonstram que a compatibilidade biológica e a físico-química representam dimensões complementares e devem ser consideradas antes da recomendação de misturas em tanque.

A própria metodologia empregada nos ensaios pode, ainda, influenciar a interpretação da compatibilidade. Bouketta *et al.* (2026) demonstraram que a incorporação de pesticidas ao meio de cultura e a exposição direta dos conídios à mistura podem resultar em classificações distintas. Os autores observaram que o método baseado no contato direto entre conídios e pesticidas apresentou maior correspondência com os resultados obtidos *in vivo*. Dessa forma, diferenças metodológicas entre os estudos devem ser consideradas na comparação das evidências, sobretudo em revisões sistemáticas que reúnem experimentos conduzidos sob

protocolos distintos. Diante da natureza multifatorial dessas interações, a Figura 1 sintetiza os principais fatores que condicionam a compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos.

**Figura 1.** Principais fatores envolvidos na compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos.




Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Em conjunto, essas evidências demonstram que a compatibilidade resulta da interação entre fungo, isolado, inseticida, concentração, formulação, sequência de aplicação e método de avaliação. Portanto, a seleção de associações para o manejo integrado deve considerar simultaneamente esses fatores, uma vez que resultados obtidos em uma condição experimental específica não podem ser automaticamente extrapolados para outras situações. Essa complexidade também evidencia a importância de confrontar os resultados obtidos *in vitro* com o desempenho das associações em condições mais próximas do ambiente de cultivo (Ribeiro *et al*., 2023; Bouketta *et al*., 2026).

### 3.4 Compatibilidade *in vitro* e desempenho da associação em condições de campo

A avaliação da compatibilidade entre fungos entomopatogênicos e inseticidas requer a integração de diferentes condições experimentais, uma vez que resultados obtidos em laboratório nem sempre representam integralmente o desempenho da associação em situações de cultivo. Os ensaios *in vitro* permitem identificar respostas dos agentes biológicos sob condições controladas, enquanto experimentos em casa de vegetação e campo incorporam fatores que interferem na sobrevivência do fungo e na suscetibilidade da praga. Dessa forma, a validação em condições mais próximas da realidade agrícola constitui uma etapa fundamental para determinar o potencial de utilização conjunta desses agentes (Wakil *et al.*, 2022; Aynalem *et al.*, 2022).

Em condições laboratoriais, temperatura, concentração dos agentes e tempo de exposição podem ser controlados com maior precisão, facilitando a identificação das interações

entre fungos e inseticidas. Wakil *et al.* (2022), ao avaliarem *Beauveria bassiana* associada ao fipronil contra quatro espécies de coleópteros de produtos armazenados, verificaram aumento da mortalidade quando o fungo foi combinado à maior dose do inseticida. Além disso, a resposta variou em função da temperatura, com maior mortalidade a 30 °C. Esses resultados demonstram que mesmo sob condições controladas a eficácia da associação permanece condicionada às características do ambiente experimental.

Quando essas combinações são transferidas para condições de campo, outros fatores passam a interferir na atividade dos agentes. Em estudo envolvendo *B. bassiana* e spinetoram, Wakil *et al.* (2023) observaram que a associação apresentou desempenho superior aos tratamentos isolados contra diferentes pragas de grãos armazenados, tanto em laboratório quanto em avaliações de campo. Contudo, diferenças na mortalidade entre espécies e condições experimentais evidenciaram que a resposta obtida em ambiente controlado não deve ser automaticamente extrapolada para situações de aplicação prática.

A influência das condições de cultivo também foi demonstrada no manejo de *Tuta absoluta*. Aynalem *et al*. (2022) verificaram que *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*, utilizados isoladamente ou em associação com outros agentes de controle, reduziram os danos causados pela praga em tomateiro. Em condições de campo, combinações envolvendo os entomopatógenos e concentrações reduzidas do inseticida proporcionaram elevada proteção das plantas, alcançando até 94,4% de proteção em um dos tratamentos. Esses resultados demonstram que associações entre agentes biológicos e doses reduzidas de inseticidas podem manter elevada eficiência de controle, reforçando a importância da validação dessas combinações em condições de cultivo antes de sua incorporação aos programas de manejo integrado (Aynalem *et al*., 2022).

Além do ambiente de aplicação, a proporção entre o agente biológico e o inseticida pode determinar o resultado da interação. Dearlove *et al.* (2024), ao avaliarem *B. bassiana* e *Cordyceps farinosa* associados ao spiromesifen contra *Trialeurodes vaporariorum*, observaram respostas que variaram entre aditividade, sinergismo e antagonismo conforme as concentrações utilizadas. Para determinadas combinações de *B. bassiana* e spiromesifen, também foi constatada redução no tempo necessário para provocar a mortalidade da praga. Portanto, a eficácia de uma mistura não deve ser interpretada apenas pela presença dos dois agentes, mas pela relação entre suas respectivas concentrações.

Outro aspecto relevante é que o desempenho observado em campo resulta da interação entre o agente de controle e as condições ambientais às quais ele permanece exposto. Temperatura, umidade, radiação solar e características do sistema de cultivo podem alterar a

persistência dos conídios e, consequentemente, modificar a eficiência da associação. Nesse contexto, os resultados de Wakil *et al.* (2023) demonstram que a temperatura influenciou significativamente a mortalidade das espécies avaliadas, reforçando que a eficácia obtida em laboratório representa apenas uma das dimensões necessárias para prever o desempenho do fungo associado ao inseticida em condições práticas.

Em conjunto, os estudos analisados indicam que as avaliações laboratoriais e de campo desempenham funções complementares. Enquanto os ensaios controlados permitem identificar associações potencialmente eficientes e compreender as interações entre os agentes, os experimentos realizados em condições de cultivo possibilitam verificar se essa resposta é mantida diante da variabilidade ambiental e biológica. Assim, a recomendação da utilização conjunta de fungos entomopatogênicos e inseticidas deve considerar evidências provenientes de diferentes escalas experimentais, especialmente quando o objetivo é incorporar essas associações aos programas de Manejo Integrado de Pragas (Wakil *et al.,* 2023; Aynalem *et al*., 2022).

### 3.5 Efeito da associação entre fungos entomopatogênicos e inseticidas no controle de pragas agrícolas

A associação entre fungos entomopatogênicos e inseticidas pode ampliar a eficiência do controle de pragas quando os agentes apresentam compatibilidade e atuam de forma complementar. Enquanto os inseticidas geralmente promovem resposta mais rápida sobre a população-alvo, os fungos dependem de etapas sucessivas de adesão, germinação, penetração e colonização do hospedeiro. Nesse contexto, a integração entre os dois métodos pode aumentar a mortalidade e reduzir o tempo necessário para o controle, além de possibilitar o emprego de concentrações menores dos agentes quando a interação é favorável (Nawaz *et al*., 2022; Dearlove *et al*., 2024).

O aumento da mortalidade constitui um dos principais efeitos observados nas associações. Nawaz *et al.* (2022), ao avaliarem *Metarhizium anisopliae* combinado com diferentes inseticidas contra *Aphis gossypii*, verificaram que as misturas foram mais tóxicas à praga do que os tratamentos individuais. Entre as combinações avaliadas, *M. anisopliae* associado ao flonicamida proporcionou mortalidade de 91,68% após 72 horas, enquanto o fungo aplicado isoladamente apresentou mortalidade de 17,08% na concentração considerada. Os resultados demonstram que a integração pode intensificar a ação dos agentes, desde que o inseticida empregado preserve a atividade do entomopatógeno.

Entretanto, o efeito combinado não deve ser interpretado exclusivamente a partir do aumento da mortalidade. As interações podem ser classificadas como sinérgicas, aditivas ou antagônicas, dependendo da resposta observada em relação àquela esperada para a ação independente dos agentes. No estudo de Nawaz *et al.* (2022), diferentes combinações apresentaram evidências de interação sinérgica ao longo do período de avaliação. Em contraste, Dearlove *et al.* (2024) demonstraram que a resposta de *Trialeurodes vaporariorum* às associações entre fungos entomopatogênicos e spiromesifen variou conforme o fungo e as concentrações utilizadas. Esses resultados evidenciam que a presença de dois agentes eficazes isoladamente não garante, por si só, uma interação favorável quando utilizados conjuntamente.

Além da mortalidade final, a velocidade de ação representa um componente importante da eficiência dessas associações. Embora os fungos entomopatogênicos possam proporcionar níveis elevados de controle, o processo infeccioso geralmente demanda tempo para resultar na morte do hospedeiro. Dearlove *et al.* (2024) verificaram que determinadas combinações de *Beauveria bassiana* com spiromesifen reduziram em cinco dias o tempo de ação contra *T. vaporariorum* em comparação aos tratamentos individuais. A redução do período necessário para causar a morte pode ser particularmente relevante em situações nas quais o rápido crescimento populacional da praga exige maior velocidade de supressão.

A integração também pode produzir efeitos sobre o desenvolvimento do inseto que ultrapassam a mortalidade imediata. Em estudo recente com *Spodoptera frugiperda*, a combinação de *B. bassiana* com benzoato de emamectina resultou em 92,6% de mortalidade larval e reduziu a pupação, a emergência de adultos e a eclosão dos ovos em comparação aos tratamentos avaliados. Além disso, foram observadas alterações na duração das fases de desenvolvimento e redução da longevidade dos adultos. Esses efeitos indicam que a avaliação da associação deve considerar não apenas a mortalidade aguda, mas também alterações subletais capazes de interferir na continuidade da população da praga.

Apesar dos resultados favoráveis observados em determinadas combinações, a eficiência da integração permanece dependente da escolha dos agentes e das condições de aplicação. Variações na concentração do inseticida e do fungo podem modificar uma interação inicialmente favorável, inclusive resultando em antagonismo. Dessa maneira, a identificação de sinergismo ou aditividade deve ser sustentada por análise experimental específica, não sendo adequado assumir que qualquer aumento de mortalidade representa necessariamente uma interação sinérgica (Dearlove *et al*., 2024).

Em conjunto, as evidências indicam que a associação entre fungos entomopatogênicos e inseticidas pode aumentar a mortalidade, acelerar o controle e produzir efeitos sobre diferentes

etapas do desenvolvimento das pragas. Contudo, esses benefícios dependem da combinação utilizada e das concentrações dos agentes, tornando necessária a seleção criteriosa das associações. Nesse sentido, a integração apresenta potencial para ampliar as alternativas disponíveis para o controle de pragas e reduzir a dependência exclusiva de aplicações sucessivas de inseticidas, aspecto particularmente relevante para sua inserção em programas de Manejo Integrado de Pragas (Nawaz *et al*., 2022; Dearlove *et al*., 2024).

### 3.6 Aplicabilidade no Manejo Integrado de Pragas, limitações e perspectivas

A utilização de fungos entomopatogênicos apresenta potencial para ampliar a diversificação das estratégias empregadas no Manejo Integrado de Pragas (MIP), especialmente diante das limitações decorrentes da dependência contínua do controle químico. A incorporação desses microrganismos aos programas de manejo permite combinar agentes com características distintas, desde que sejam selecionados isolados adaptados ao sistema produtivo e compatíveis com as demais práticas fitossanitárias. Nesse contexto, o desenvolvimento de estratégias integradas depende não apenas da capacidade infectiva dos fungos, mas também de sua estabilidade e persistência nas condições em que serão utilizados (Wallis; Sisterson, 2024).

Entretanto, a eficiência dos fungos entomopatogênicos em condições de campo permanece condicionada por fatores ambientais que podem limitar sua persistência e atividade. Diferenças de temperatura, umidade e características do agroecossistema influenciam a sobrevivência e o desempenho dos isolados, tornando necessária a seleção de materiais biológicos adequados às condições locais. Wallis e Sisterson (2024) destacam, nesse sentido, a necessidade de ampliar a prospecção e a caracterização de espécies e linhagens, bem como identificar aquelas mais adaptadas aos diferentes climas e agroecossistemas. Assim, a seleção criteriosa dos isolados constitui uma etapa essencial para reduzir a variabilidade da resposta observada em aplicações práticas.

Além da seleção do agente biológico, a produção e a formulação representam aspectos determinantes para a aplicação dos fungos em maior escala. A obtenção de propágulos com elevada qualidade e estabilidade é necessária para assegurar que o produto mantenha características adequadas durante o armazenamento e após a aplicação. Mascarin *et al.* (2024) destacam avanços na fermentação líquida submersa, tecnologia que possibilita maior controle das condições nutricionais e ambientais durante a produção e pode reduzir o tempo, a demanda de mão de obra e os custos associados ao processo produtivo. Dessa forma, avanços

tecnológicos na produção e formulação podem contribuir para ampliar a disponibilidade e a consistência dos micoinseticidas utilizados no manejo de pragas.

Apesar desses avanços, a compatibilidade com os produtos fitossanitários empregados no sistema produtivo permanece como um requisito para a integração dos fungos ao MIP. Bouketta *et al.* (2026) demonstraram que a classificação da compatibilidade pode variar de acordo com o método utilizado para expor os fungos aos pesticidas. No estudo, a exposição direta dos conídios aos produtos apresentou maior correspondência com a atividade observada *in vivo* do que o método convencional baseado na incorporação dos pesticidas ao meio de cultura. Esse resultado evidencia que a metodologia empregada pode influenciar a interpretação da compatibilidade e reforça a necessidade de procedimentos experimentais capazes de representar adequadamente as condições de exposição encontradas durante a aplicação agrícola.

Outra limitação relevante corresponde à dificuldade de extrapolar resultados obtidos com determinada espécie ou isolado para outros agentes entomopatogênicos. A diversidade existente entre os fungos pode resultar em diferenças de virulência, tolerância às condições ambientais e resposta às tecnologias de formulação. Consequentemente, a identificação de um isolado eficiente em determinada condição não assegura comportamento semelhante em outros sistemas produtivos. Por essa razão, Wallis e Sisterson (2024) defendem maior esforço na coleta, triagem e caracterização de espécies e linhagens, associado ao estabelecimento de estruturas experimentais mais padronizadas para sua avaliação.

Nesse contexto, a padronização metodológica constitui uma perspectiva importante para o avanço das pesquisas sobre a integração entre fungos entomopatogênicos e produtos químicos. Diferenças nos métodos de exposição podem produzir classificações distintas para uma mesma associação, dificultando a comparação entre estudos. Bouketta *et al.* (2026) verificaram diferenças expressivas entre os resultados obtidos pelo método de incorporação ao meio de cultura e pela exposição direta dos conídios aos pesticidas. Portanto, protocolos que reproduzam com maior fidelidade as condições de aplicação podem aumentar a capacidade dos ensaios laboratoriais de prever o comportamento das associações em condições mais próximas da prática agrícola.

As perspectivas para ampliar a utilização desses agentes também envolvem o aperfeiçoamento das tecnologias de produção e formulação. A fermentação líquida permite a produção de diferentes tipos de propágulos, incluindo blastosporos, conídios submersos e outras estruturas fúngicas com potencial para aplicações no controle de pragas. Paralelamente, o desenvolvimento de formulações capazes de preservar a qualidade dos propágulos representa uma etapa importante para transformar isolados promissores em produtos adequados à

aplicação agrícola. Assim, a integração entre seleção de isolados, produção massal e tecnologia de formulação constitui um dos principais caminhos para aumentar a viabilidade prática dos fungos entomopatogênicos (Mascarin *et al*., 2024).

Em conjunto, as evidências indicam que a incorporação de fungos entomopatogênicos aos programas de MIP depende de uma abordagem integrada, envolvendo seleção de isolados, compatibilidade com produtos fitossanitários, métodos de avaliação representativos e tecnologias adequadas de produção e formulação. Embora avanços recentes tenham ampliado as possibilidades de utilização desses agentes, ainda são necessários estudos capazes de aproximar os resultados experimentais das condições encontradas nos sistemas produtivos. Nesse sentido, a padronização dos ensaios, a identificação de isolados adaptados aos diferentes agroecossistemas e o aperfeiçoamento das formulações representam caminhos importantes para ampliar a consistência e a aplicabilidade desses agentes no manejo integrado de pragas (Wallis; Sisterson, 2024; Mascarin *et al*., 2024; Bouketta *et al*., 2026).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática evidencia que a associação entre fungos entomopatogênicos e inseticidas organossintéticos apresenta potencial para o manejo de pragas agrícolas, embora sua eficiência dependa da combinação específica entre os agentes. A compatibilidade é influenciada pelo ingrediente ativo, formulação, concentração, espécie e isolado fúngico, além das condições de exposição. Quando adequadamente selecionadas, essas associações podem preservar a atividade dos entomopatógenos e, simultaneamente, aumentar a mortalidade ou reduzir o tempo necessário para o controle da praga.

Os estudos analisados também demonstram que resultados obtidos in vitro não devem ser utilizados isoladamente para prever o desempenho das associações em condições de cultivo. A variabilidade ambiental, a concentração dos agentes e a forma de aplicação podem modificar a resposta observada, tornando indispensável a integração entre ensaios laboratoriais, avaliações in vivo e experimentos de campo. Nesse sentido, a utilização conjunta dos agentes apresenta perspectivas para diversificar as estratégias empregadas no Manejo Integrado de Pragas e reduzir a dependência exclusiva do controle químico.

Apesar dos avanços, permanecem lacunas relacionadas à padronização dos métodos de avaliação, à validação de diferentes combinações em campo e à definição de concentrações, intervalos e sequências de aplicação mais adequados. Portanto, estudos futuros devem priorizar protocolos comparáveis e experimentos em diferentes condições edafoclimáticas e sistemas de

cultivo, visando identificar associações eficientes, estáveis e tecnicamente viáveis para ampliar a utilização integrada de fungos entomopatogênicos e inseticidas na agricultura.

## REFERÊNCIAS


AYNALEM, B. *et al*. Biocontrol competence of Beauveria bassiana, Metarhizium anisopliae and Bacillus thuringiensis against tomato leaf miner, Tuta absoluta Meyrick 1917 under greenhouse and field conditions. Heliyon, v. 8, n. 6, e09694, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09694.

BOUKETTA, I. *et al*. Assessing pesticide compatibility with entomopathogenic fungi for biological control: evidence from in vivo and in vitro assays. Journal of Economic Entomology, v. 119, n. 4, p. 2535–2550, 2026. DOI: 10.1093/jee/toag127.

DEARLOVE, E. L. *et al*. Improved control of Trialeurodes vaporariorum using mixture combinations of entomopathogenic fungi and the chemical insecticide spiromesifen. Scientific Reports, v. 14, art. 15259, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-66051-8.

KARTHI, S. *et al*. Entomopathogenic fungi promising biocontrol agents for managing lepidopteran pests: review of current knowledge. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, v. 58, 103146, 2024. DOI: 10.1016/j.bcab.2024.103146.

KUMAR, A. *et al.* In vitro compatibility of entomopathogenic fungi, Beauveria bassiana (Balsam) with insecticides and fungicides. International Journal of Advanced Biochemistry Research, v. 10, n. 3S, p. 4–8, 2026. DOI: 10.33545/26174693.2026.v10.i3Sa.7783.

LIU, Q. *et al*. Advances in pest control technologies based on entomopathogenic fungi. Biological Control, v. 217, 106046, 2026. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2026.106046.

NAWAZ, A. et al. Compatibility and synergistic interactions of fungi, Metarhizium anisopliae, and insecticide combinations against the cotton aphid, Aphis gossypii Glover (Hemiptera: Aphididae). Scientific Reports, v. 12, art. 4843, 2022.

NIMISHA, T. *et al*. Tolerant native isolates of Beauveria bassiana with commonly used pesticides in Kerala. Journal of Eco-friendly Agriculture, v. 19, n. 1, 2024. DOI: 10.48165/jefa.2024.19.01.15.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, n. 71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.

PANWAR, V. *et al*. Endophytic entomopathogenic fungi as biological control agents of insect pests. Pest Management Science, 2024. DOI: 10.1002/ps.8322.

POLANCZYK, R. A.; SMANIOTTO, G.; GONÇALVES, K. C. Beauveria bassiana In Vitro Compatibility with Pesticides: A Mixture Efficacy Prediction against the Sugar Cane Weevil, Sphenophorus levis. ACS Omega, v. 10, n. 30, p. 33837–33842, 2025. DOI: 10.1021/acsomega.5c05193.

RAJULA, J. *et al.* Insect-fungal-interactions: a detailed review on entomopathogenic fungi pathogenicity to combat insect pests. Microbial Pathogenesis, v. 159, 105122, 2021. DOI: 10.1016/j.micpath.2021.105122.

RIBEIRO, L. P. *et al*. Insecticides for corn leafhopper management versus entomopathogenic fungal isolates: In vitro compatibility, physical-chemical interactions, and on-farm assessments. Crop Protection, v. 174, 106417, 2023. DOI: 10.1016/j.cropro.2023.106417.

SPARKS, T. C. *et al*. Insecticide resistance management and industry: the origins and evolution of the Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) and the mode of action classification scheme. Pest Management Science, v. 77, n. 6, p. 2609–2619, 2021. DOI: 10.1002/ps.6254.

SPEROTTO, M. E. *et al*. In vitro and in vivo compatibility of isocycloseram-based insecticides with entomopathogenic fungi used for corn leafhopper management. Crop Protection, v. 194, 107204, 2025. DOI: 10.1016/j.cropro.2025.107204.

TUDI, M. *et al*. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 3, art. 1112, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18031112.

WAKIL, W. *et al*. Laboratory and field studies on the combined application of Beauveria bassiana and fipronil against four major stored-product coleopteran insect pests. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 34912–34929, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-17527-x.

WAKIL, W. *et al*. Combinations of Beauveria bassiana and spinetoram for the management of four important stored-product pests: laboratory and field trials. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 10, p. 27698–27715, 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-23753-8.

WALLIS, C. M.; SISTERSON, M. S. Opportunities for optimizing fungal biological control agents for long-term and effective management of insect pests of orchards and vineyards: a review. Frontiers in Fungal Biology, v. 5, 1443343, 2024. DOI: 10.3389/ffunb.2024.1443343.

# CAPÍTULO 7

## POTENCIAL ALELOPÁTICO DE ESPÉCIES DO GÊNERO *Turnera* E SUAS IMPLICAÇÕES ECOLÓGICAS E AGRÍCOLAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-7

Hygor Maikon Ramos, e-mail: hygor.ramos@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/4219929951290046
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Xênia Luana Santos Silva, e-mail: xenialuana17@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/1300848121457532
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688

**RESUMO**

A alelopatia constitui uma importante interação química entre plantas, podendo influenciar a germinação, o crescimento e diferentes processos fisiológicos de espécies receptoras. Nesse contexto, espécies do gênero *Turnera* apresentam interesse ecológico e agrícola em razão de sua diversidade fitoquímica e da presença de metabólitos secundários potencialmente relacionados à atividade alelopática. Este estudo teve como objetivo reunir e analisar evidências científicas sobre o potencial alelopático de espécies de *Turnera*, considerando seus aspectos botânicos e ecológicos, composição fitoquímica, mecanismos de ação e efeitos sobre plantas cultivadas e espontâneas. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, orientada pelas recomendações do PRISMA 2020. As buscas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed/MEDLINE e SciELO, complementadas pelo Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações entre 2021 e 2026. Os resultados evidenciaram ampla diversidade de compostos fenólicos, flavonoides, terpenoides, alcaloides, cumarinas, taninos e outros metabólitos em espécies do gênero. Entretanto, as evidências experimentais de alelopatia concentraram-se principalmente em *Turnera subulata*, cujos exsudatos radiculares, solo rizosférico, resíduos, compostos voláteis e extratos foliares promoveram alterações no crescimento e em parâmetros fisiológicos de diferentes plantas receptoras. Os efeitos mostraram-se dependentes da concentração, da forma de exposição e da espécie ou genótipo avaliado, com maior sensibilidade frequentemente observada no sistema radicular. Apesar do potencial identificado, não foi demonstrada seletividade consistente entre plantas espontâneas e culturas agrícolas, nem estabelecida relação causal definitiva entre metabólitos específicos e a fitotoxicidade observada. Conclui-se que *T. subulata* representa uma fonte promissora para a prospecção de substâncias naturais com atividade fitotóxica, embora sejam necessários estudos adicionais de isolamento de compostos, seletividade, persistência ambiental e validação em condições de casa de vegetação e campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** alelopatia; *Turnera subulata*; metabólitos secundários; fitotoxicidade; bioherbicidas.

## 1. INTRODUÇÃO

A alelopatia compreende um importante componente das interações químicas entre plantas, envolvendo a liberação de metabólitos capazes de modificar processos relacionados à germinação, ao crescimento e ao desenvolvimento de organismos vegetais presentes no mesmo ambiente. Esses compostos, frequentemente denominados aleloquímicos, podem alcançar as

plantas receptoras por diferentes vias, incluindo exsudação radicular, lixiviação de tecidos, volatilização e decomposição de resíduos vegetais, apresentando efeitos cuja intensidade depende da natureza química da substância, da concentração, da espécie receptora e das condições ambientais (Choudhary *et al*., 2023; Cheng *et al*., 2024).

Entre as principais classes químicas relacionadas a essas interações encontram-se compostos fenólicos, flavonóides, terpenóides, alcalóides e outras substâncias do metabolismo especializado, capazes de interferir em processos fisiológicos e bioquímicos essenciais às plantas (Kostina-Bednarz *et al*., 2023; Kong *et al*., 2024). Nesse contexto, a investigação de espécies vegetais produtoras desses metabólitos apresenta interesse ecológico e agrícola, especialmente diante da possibilidade de identificação de moléculas com potencial para o desenvolvimento de estratégias alternativas de manejo de plantas espontâneas (Sahrir *et al*., 2023; Mahé *et al*., 2022).

Entre os grupos vegetais ainda pouco explorados sob essa perspectiva encontra-se o gênero *Turnera* L., pertencente à ordem Malpighiales e atualmente incluído em Passifloraceae *sensu lato*, no grupo tradicionalmente reconhecido como Turneraceae/Turneroideae (Cruz *et al*., 2025; Silva *et al*., 2025). O gênero reúne aproximadamente 132 espécies, distribuídas predominantemente nas Américas, com expressiva representação no Brasil e ocorrência em diferentes formações vegetacionais, incluindo Caatinga, Cerrado, ambientes costeiros, áreas florestais e locais antropizados (Cruz *et al*., 2025; Silva *et al*., 2025).

Além de sua diversidade botânica e ecológica, espécies de *Turnera* participam de complexas interações com polinizadores, herbívoros e insetos associados aos nectários extraflorais, destacando sua relevância funcional nos ecossistemas em que ocorrem (Passos; Gimenes, 2022; Barbosa *et al*., 2025). A capacidade de determinadas espécies, como *T. subulata*, de se estabelecerem em ambientes abertos e perturbados também amplia o interesse pela investigação das características químicas que podem participar de suas interações com outras plantas e organismos (De Andrade; Pereira-Colavite, 2024; Cruz *et al*., 2025).

Sob o ponto de vista fitoquímico, diferentes espécies de *Turnera* apresentam expressiva diversidade de metabólitos secundários, destacando-se compostos fenólicos e flavonoides, além de registros de terpenoides, alcaloides, taninos, cumarinas, saponinas, quinonas e outros constituintes bioativos (Parra-Naranjo *et al*., 2023; Vital Júnior *et al*., 2026). Em *T. subulata*, por exemplo, análises químicas de folhas e flores demonstraram a ocorrência de derivados dos ácidos cafeoilquínico e feruloilquínico, ácido ferúlico, vitexina, homoorientina, luteolina e derivados da apigenina, entre outros compostos pertencentes a classes frequentemente relacionadas às interações químicas entre plantas (Luz *et al*., 2022; Rebouças *et al*., 2022).

Embora a simples presença desses metabólitos não seja suficiente para demonstrar atividade alelopática, sua ocorrência fornece fundamento químico para a realização de bioensaios destinados a investigar possíveis efeitos sobre espécies receptoras (Kong *et al*., 2024; Cheng *et al*., 2024). A manifestação desses efeitos pode envolver alterações na mobilização de reservas durante a germinação, no crescimento radicular e da parte aérea, no equilíbrio hormonal, na atividade de enzimas antioxidantes, no metabolismo oxidativo, na fotossíntese e na absorção de nutrientes (Zhang *et al*., 2023; Paterska; Osowski, 2026).

Evidências experimentais recentes reforçam esse interesse, sobretudo para *T. subulata*, cujos exsudatos radiculares, solo rizosférico, resíduos vegetais, compostos voláteis e extratos foliares apresentaram efeitos sobre espécies cultivadas e espontâneas em condições controladas (Wan Abdul Halim *et al*., 2021; Yusoff *et al*., 2022). Estudos posteriores demonstraram respostas dependentes da concentração diante da aplicação de extratos foliares da espécie, incluindo redução do crescimento radicular e alterações em parâmetros fisiológicos de plantas receptoras, ao mesmo tempo em que concentrações mais baixas produziram respostas estimulatórias em determinados bioensaios (Aridi *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026). Entretanto, a sensibilidade também foi constatada em espécies cultivadas, indicando que a atividade observada ainda não pode ser considerada seletiva para plantas espontâneas e que sua eventual aplicação agrícola depende da determinação de doses, seletividade, persistência ambiental e identificação dos metabólitos efetivamente responsáveis pelos efeitos observados (Sahrir *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026).

Diante desse cenário, compreender o potencial alelopático das espécies de *Turnera* exige integrar conhecimentos sobre sua diversidade botânica, distribuição ecológica, composição fitoquímica e mecanismos de ação dos metabólitos sobre as plantas receptoras. Embora os resultados disponíveis indiquem perspectivas relevantes, especialmente para *T. subulata*, permanecem lacunas relacionadas à identificação dos aleloquímicos ativos, à confirmação de seus mecanismos de ação, à seletividade entre espécies receptoras e à validação dos efeitos em condições de casa de vegetação e campo (Sahrir *et al*., 2023; Mahé *et al*., 2022).

Assim, este capítulo tem como objetivo reunir e discutir as evidências científicas disponíveis acerca do potencial alelopático de espécies do gênero *Turnera*, abordando seus aspectos botânicos e ecológicos, os principais metabólitos secundários e compostos bioativos, os mecanismos fisiológicos associados à alelopatia e os efeitos relatados sobre plantas cultivadas e espontâneas, com ênfase nas possíveis implicações ecológicas e agrícolas desse fenômeno.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Delineamento do estudo

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, com o objetivo de reunir e analisar evidências científicas acerca do potencial alelopático de espécies do gênero *Turnera* e suas implicações ecológicas e agrícolas. A condução e o relato da revisão foram orientados pelas recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020), conforme Page *et al.* (2021), visando garantir maior transparência, rastreabilidade e reprodutibilidade ao processo de seleção dos estudos.

### 2.2 Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed/MEDLINE e SciELO, complementada por consultas ao Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações compreendidas entre 2021 e 2026. Foram utilizados descritores em inglês e português, combinados pelos operadores booleanos AND e OR, incluindo: *"Turnera", "Turnera subulata", "allelopathy", "allelopathic potential", "phytotoxicity", "plant extract", "root exudates", "secondary metabolites", "phenolic compounds", "flavonoids", "germination", "root growth", "oxidative stress" e "bioherbicide"*. As combinações foram adaptadas às particularidades de cada base de dados.

Para a contextualização dos mecanismos de ação alelopática também foram considerados estudos envolvendo outras espécies vegetais, desde que abordassem processos fisiológicos diretamente relacionados à germinação, crescimento radicular e da parte aérea, fotossíntese, atividade enzimática, metabolismo oxidativo ou absorção de nutrientes. Esses estudos foram utilizados exclusivamente para fundamentação mecânica, não sendo interpretados como evidência direta de atividade alelopática em *Turnera.*

### 2.3 Critérios de elegibilidade

Foram incluídos artigos científicos originais, publicados em periódicos revisados por pares, disponíveis em texto completo e relacionados ao gênero *Turnera*, contemplando aspectos botânicos e ecológicos, composição fitoquímica, metabólitos secundários ou avaliação experimental da atividade alelopática e fitotóxica. Para os estudos experimentais, foram considerados trabalhos envolvendo extratos vegetais, exsudatos radiculares, resíduos, material

rizosférico, compostos voláteis ou substâncias isoladas, desde que apresentassem informações sobre a planta receptora e os efeitos sobre germinação, crescimento ou parâmetros fisiológicos.

Foram excluídos registros duplicados, resumos de eventos, editoriais, trabalhos sem acesso ao texto completo, estudos sem relação direta com os objetivos da revisão e publicações nas quais espécies de *Turnera* fossem apenas mencionadas, sem apresentação de resultados pertinentes. Revisões foram utilizadas principalmente como suporte conceitual e para rastreamento de estudos primários, não sendo consideradas evidências experimentais diretas de alelopatia.

## 2.4 Seleção e extração dos dados

A seleção dos estudos foi realizada inicialmente pela leitura dos títulos e resumos, seguida da avaliação integral dos trabalhos potencialmente elegíveis. As publicações que não atenderam aos critérios previamente estabelecidos foram excluídas, com registro das respectivas justificativas. O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi organizado de acordo com o fluxograma PRISMA 2020.

Dos estudos selecionados foram extraídas informações referentes aos autores, ano de publicação, espécie de *Turnera,* órgão vegetal utilizado, método de obtenção do extrato ou material experimental, solvente, concentração ou dose, espécie receptora, condições experimentais e principais respostas observadas. Nos estudos fitoquímicos, também foram registrados os métodos analíticos empregados e as principais classes ou compostos identificados.

## 2.5 Análise e síntese das evidências

Devido à heterogeneidade entre os estudos quanto às espécies avaliadas, formas de exposição, concentrações, plantas receptoras e variáveis analisadas, optou-se pela síntese qualitativa e narrativa dos resultados. Os trabalhos foram agrupados conforme a espécie de *Turnera*, o tipo de material utilizado extratos, exsudatos, resíduos, voláteis ou solo rizosférico e os efeitos sobre germinação, crescimento e respostas fisiológicas das plantas receptoras.

Os resultados foram interpretados considerando a direção e a magnitude das respostas, distinguindo efeitos inibitórios, estimulatórios ou ausência de diferenças em relação aos controles. Também foram consideradas as limitações metodológicas dos estudos, especialmente quanto à ausência de caracterização química dos extratos, diferenças de concentração e predominância de experimentos conduzidos sob condições controladas. Dessa forma, evitou-se

a extrapolação direta de resultados laboratoriais para condições de campo e a atribuição de atividade alelopática a compostos específicos sem comprovação experimental.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Aspectos botânicos, distribuição e importância ecológica do gênero *Turnera*

O gênero *Turnera* L. integra a ordem Malpighiales e é atualmente tratado no contexto de Passifloraceae sensu lato, subgrupo tradicionalmente reconhecido como Turneraceae/Turneroideae, destacando-se como o gênero mais representativo desse clado (Cruz *et al.,* 2025; Silva *et al.,* 2025). A circunscrição filogenética atual reconhece cerca de 132 espécies, das quais aproximadamente 130 ocorrem nas Américas e apenas duas na África, organizadas em 11 séries e três subséries estabelecidas principalmente a partir de caracteres florais, dos frutos e das sementes (Cruz *et al.,* 2025; Silva *et al.,* 2025).

Morfologicamente, Turnera apresenta folhas simples, geralmente com estípulas pouco evidentes e, em numerosas espécies, nectários extraflorais basilares ou peciolares; as flores não possuem corona e apresentam, predominantemente, pétalas amarelas, embora ocorram táxons com outras colorações e combinações morfológicas (Cruz *et al.,* 2025; Silva *et al.,* 2023). Essa heterogeneidade também se expressa em estruturas reprodutivas e palinológicas, contribuindo para a delimitação dos táxons e revelando que a diversidade morfológica do gênero ainda demanda investigação sistemática contínua, fato evidenciado pela descrição recente de espécies como *T. carolina* no Cerrado maranhense (Silva *et al.,* 2023; Cruz *et al.,* 2025).

A distribuição de *Turnera* é predominantemente americana, com importante diversificação na América tropical, e o Brasil constitui um dos principais centros de riqueza e endemismo do grupo (Cruz *et al.,* 2025; Silva *et al.,* 2025). No território brasileiro, representantes do gênero estão particularmente associados à Caatinga e ao Cerrado, embora levantamentos recentes também registrem espécies em formações costeiras, bordas florestais e remanescentes amazônicos, demonstrando amplitude ecológica superior à associação exclusiva com ambientes sazonalmente secos (Cruz *et al.,* 2025; Silva *et al.,* 2025).

Essa heterogeneidade ambiental pode ser observada, por exemplo, em *T. carolina*, endêmica da região da Chapada das Mesas e associada a savanas rupestres sobre solos rochosos, enquanto o complexo T. sidoides ocupa diferentes condições ambientais do domínio Chaquenho, incluindo gradientes de precipitação, temperatura e características edáficas (Silva *et al.,* 2023; Solís Neffa *et al.,* 2022; Moreno *et al.,* 2021). Além dos ambientes naturais, determinadas espécies demonstram elevada capacidade de estabelecimento em áreas abertas e

antropizadas; *T. subulata*, por exemplo, ocorre com frequência em ambientes urbanos e perturbados, nos quais mantém interações com polinizadores, herbívoros e outros artrópodes (Passos; Gimenes, 2022; De Andrade; Pereira-Colavite, 2024). A síntese das principais características botânicas, dos ambientes de ocorrência e da relevância ecológica das espécies de Turnera abordadas nesta revisão é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1**. Síntese de aspectos botânicos, distribuição e importância ecológica de espécies do gênero Turnera.

| Espécie/grupo | Aspectos ou características relevantes | Distribuição/habitat | Importância ecológica | Referências |
|---|---|---|---|---|
| *Turnera subulata* | Apresenta características típicas do gênero, incluindo estruturas florais associadas à atração de visitantes e ocorrência de nectários extraflorais | Ocorre em ambientes naturais, urbanos e antropizados | Recurso para polinizadores; participação em redes envolvendo nectários extraflorais; hospedeira de insetos especializados | Passos; Gimenes (2022); Barbosa *et al.* (2025); De Andrade; Pereira-Colavite (2024) |
| *Turnera ulmifolia* | Espécie representativa do gênero, com estruturas florais utilizadas por diferentes grupos de insetos | Registrada em ambientes tropicais | Fornece recursos florais e participa de interações com diferentes grupos de polinizadores | Layek *et al.* (2025) |
| *Turnera carolina* | Espécie recentemente descrita, contribuindo para a ampliação da diversidade conhecida do gênero | Endêmica da Chapada das Mesas, associada a savanas rupestres e solos rochosos | Relevante para a compreensão da diversidade e do endemismo de *Turnera* no Cerrado | Silva *et al.* (2023); Cruz *et al.* (2025) |
| Complexo *Turnera sidoides* | Apresenta elevada diversidade genética e citogenética, incluindo variação associada à poliploidia | Domínio Chaquenho, em diferentes condições climáticas e edáficas | Modelo para estudos de adaptação, diversificação e evolução vegetal na América do Sul | Moreno *et al.* (2021); Solis Neffa *et al.* (2022) |
| Gênero *Turnera* | Cerca de 132 espécies, com diversidade morfológica em folhas, flores, frutos e sementes | Predominantemente americano, com forte diversificação na América tropical; elevada riqueza no Brasil | Participação em redes planta-polinizador, planta-formiga e outras interações ecológicas | Cruz *et al.* (2025); Silva *et al.* (2025) |

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Ecologicamente, as espécies de *Turnera* participam de diferentes níveis de interação planta-animal, especialmente por meio da oferta de recursos florais e extraflorais. Em *T. subulata*, abelhas nativas e a espécie exótica *Apis mellifera* atuam como potenciais polinizadores, com a atividade dos visitantes associada ao período de maior disponibilidade floral e formação de frutos e sementes; em *T. ulmifolia*, diferentes grupos de insetos também contribuem para a polinização, evidenciando a importância dessas plantas como recursos para comunidades de visitantes florais (Passos; Gimenes, 2022; Layek *et al.,* 2025). A presença frequente de nectários extraflorais constitui outra característica ecologicamente relevante do gênero, pois favorece interações com formigas e insere algumas espécies em redes complexas de associações tróficas (Cruz *et al.,* 2025; Barbosa *et al.,* 2025).

Nesse contexto, *T. subulata* foi identificada como uma das espécies relevantes na conectividade de redes envolvendo plantas com nectários extraflorais em diferentes biomas brasileiros, além de servir como hospedeira de insetos especializados mesmo em paisagens submetidas à urbanização (Barbosa *et al.,* 2025; De Andrade; Pereira-Colavite, 2024). Paralelamente, a elevada variação genética, citogenética e ecológica observada no complexo *T. sidoides* demonstra que espécies do gênero constituem modelos importantes para compreender processos de adaptação, poliploidia e diversificação vegetal na América do Sul (Solís Neffa *et al.,* 2022; Moreno *et al.,* 2021).

### 3.2 Metabólitos secundários e compostos bioativos presentes em espécies de *Turnera*

O gênero *Turnera* apresenta diversidade fitoquímica expressiva, caracterizada sobretudo por compostos fenólicos e flavonoides, mas também por terpenoides, alcaloides, taninos, cumarinas, saponinas e outras classes de metabólitos especializados, cuja ocorrência varia entre espécies, órgãos vegetais e condições de extração (Parra-Naranjo *et al.,* 2023; Vital Júnior *et al.,* 2026). Em *T. subulata*, análises cromatográficas de folhas e flores demonstraram uma composição particularmente rica em derivados fenólicos e flavonoídicos, reforçando essas classes como componentes relevantes do perfil químico da espécie (Luz *et al.,* 2022; Rebouças *et al.,* 2022). Perfil semelhante é observado em *T. diffusa*, para a qual estudos recentes descrevem extratos predominantemente flavonoídicos, com forte representação de derivados de luteolina e, em análises mais abrangentes, flavonas, flavonóis, glicosídeos de luteolina e apigenina e metoxiflavonas (Bernardo*et al.,* 2022; Benito-Vázquez *et al.,* 2026).

A relevância desses constituintes é corroborada pela padronização fitoquímica de extratos de *T. diffusa*, nos quais foram constatados elevados teores de flavonoides e a presença de hepatodamianol, enquanto revisões recentes do gênero confirmam flavonoides entre os grupos de metabólitos mais consistentemente isolados em *Turnera* (Delgado-Montemayor *et al.,* 2022; Parra-Naranjo *et al.,* 2023). Essa composição diversificada é relevante sob a perspectiva ecológica, pois metabólitos especializados participam das interações das plantas com fatores bióticos e abióticos e incluem diversas classes reconhecidas em outras espécies como fontes de aleloquímicos (Kong *et al.,* 2024; Cheng *et al.,* 2024).

Entre os constituintes de *Turnera*, os flavonoides e demais compostos fenólicos constituem o conjunto mais bem caracterizado e, consequentemente, um dos mais relevantes para investigar possíveis efeitos alelopáticos. Em *T. subulata*, análises recentes por LC–MS/MS permitiram anotar ácidos fenólicos, como derivados dos ácidos gentísico, feruloilquínico e cafeoilquínico, juntamente com flavonoides glicosilados, incluindo homoorientina, vitexina,

derivados O-glicosilados da vitexina, apiína e derivados glicosilados da apigenina (Vital Júnior *et al.,* 2026; Luz *et al.,* 2022). Outros estudos com flores dessa espécie identificaram ácido clorogênico, luteolina-7-O-glicosídeo, vitexina e apigenina-7-O-glicosídeo, enquanto a caracterização de folhas e flores também revelou ferulato e outros derivados fenólicos, demonstrando que diferentes órgãos podem abrigar conjuntos complementares desses metabólitos (Rebouças *et al.,* 2022; Luz *et al.,* 2022).

A possível relação desses compostos com a alelopatia é biologicamente plausível porque ácidos fenólicos, flavonoides e outros derivados da via dos fenilpropanoides figuram entre as principais classes de aleloquímicos descritas em plantas e podem, dependendo da molécula e da concentração, interferir na germinação, no alongamento radicular, na absorção de nutrientes e no equilíbrio oxidativo das plantas receptoras (Cheng *et al.,* 2024; Kong *et al.,* 2024). Contudo, a resposta provocada por compostos fenólicos é dependente da estrutura química, concentração, espécie receptora e condições ambientais, podendo variar entre estimulação em baixas concentrações e inibição em níveis mais elevados (Kostina-Bednarz *et al.,* 2023; Choudhary *et al.,* 2023). Dessa forma, embora a elevada ocorrência de fenólicos e flavonoides em *Turnera* forneça uma base fitoquímica consistente para investigar alelopatia, a identificação desses metabólitos isoladamente não permite atribuir-lhes efeito fitotóxico sem validação experimental específica.

Além dos compostos fenólicos, terpenóides, alcalóides e outros metabólitos secundários ampliam a diversidade química potencialmente envolvida nas interações ecológicas do gênero. Em *T. ulmifolia*, triagens fitoquímicas recentes realizadas em folhas, caules e raízes detectaram alcalóides, polifenóis, saponinas, terpenoides, esteroides, flavonoides, cumarinas e taninos, além de quinonas nas partes aéreas, indicando distribuição diferencial dessas classes entre os órgãos vegetais (Suresh; Pappuswamy, 2025; Parra-Naranjo *et al.,* 2023). Deve-se ressaltar, entretanto, que o estudo de *T. ulmifolia* empregou predominantemente testes fitoquímicos qualitativos e FTIR, de modo que seus resultados demonstram a ocorrência provável das classes químicas, mas não equivalem à identificação estrutural individual de cada molécula (Suresh; Pappuswamy, 2025; Vital Júnior et al., 2026).

Em escala de gênero, há registros de monoterpenoides, triterpenoides, glicosídeos cianogênicos e ácidos graxos em espécies de *Turnera*, demonstrando que sua química secundária ultrapassa amplamente os compostos fenólicos (Parra-Naranjo *et al.,* 2023; Suresh; Pappuswamy, 2025). Essa diversidade apresenta interesse alelopático porque terpenóides e compostos nitrogenados, incluindo alcalóides, integram grupos reconhecidos de aleloquímicos capazes de alterar processos fisiológicos de plantas receptoras, incluindo integridade de

membranas, metabolismo celular, crescimento radicular e estabelecimento de plântulas (Kong *et al.,* 2024; Cheng *et al.,* 2024). Cumarinas, quinonas e taninos também pertencem a classes associadas a interações químicas entre plantas, enquanto a presença simultânea de diversos metabólitos em um mesmo tecido levanta a possibilidade de efeitos aditivos ou sinérgicos, em vez da atuação exclusiva de uma única substância (Kostina-Bednarz *et al.,* 2023; Arora *et al.,* 2024).

Em conjunto, os dados disponíveis indicam que espécies de *Turnera* possuem um repertório químico compatível com a presença de moléculas potencialmente aleloquímicas, destacando-se flavonoides e ácidos fenólicos pela maior consistência das evidências analíticas, seguidos por terpenoides, alcaloides, cumarinas, taninos, quinonas e outros constituintes menos caracterizados (Parra-Naranjo *et al.,* 2023; Vital Júnior *et al.,* 2026). Entretanto, os trabalhos recentes com *T. subulata* e *T. diffusa* concentram-se majoritariamente na caracterização fitoquímica e em propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas ou farmacológicas, e não em bioensaios direcionados à germinação ou ao crescimento de plantas receptoras (Vital Júnior *et al.,* 2026; Benito-Vázquez *et al.,* 2026).

Portanto, a presença de moléculas pertencentes a classes reconhecidamente aleloquímicas não deve ser interpretada como demonstração direta de alelopatia no gênero, pois a ocorrência desse fenômeno exige que os compostos sejam liberados pela planta em condições biologicamente relevantes e alcancem organismos receptores em concentrações capazes de modificar seu desenvolvimento (Choudhary *et al.,* 2023; Kong *et al.,* 2024). Para estabelecer essa relação de forma robusta, estudos futuros devem integrar ensaios de germinação e crescimento radicular com curvas dose–resposta, fracionamento bioguiado, LC–MS/MS ou técnicas metabolômicas, identificação dos compostos ativos e avaliação de sua liberação por exsudação radicular, lixiviação, volatilização ou decomposição dos resíduos vegetais (Kostina-Bednarz *et al.,* 2023; Arora *et al.,* 2024). Essa abordagem permitiria distinguir simples bioatividade fitoquímica de uma interação verdadeiramente alelopática e definir quais metabólitos de *Turnera* apresentam maior potencial para aplicações ecológicas e para o desenvolvimento futuro de bioherbicidas.

### 3.3 Mecanismos de ação alelopática e respostas fisiológicas em plantas receptoras

Os efeitos alelopáticos sobre a germinação podem resultar da interferência dos aleloquímicos em processos metabólicos indispensáveis à retomada do crescimento embrionário, incluindo mobilização das reservas, metabolismo de carboidratos e sinalização hormonal (Zhang *et al*., 2023; Cheng *et al*., 2024). Em sementes de *Eleusine indica*, por

exemplo, a exposição à cumarina reduziu a atividade de amilases e o conteúdo de açúcares solúveis, favoreceu a retenção de amido e modificou os níveis de ácido indolacético e ácido abscísico, evidenciando que a supressão da germinação pode envolver simultaneamente limitações energéticas e desequilíbrio hormonal (Zhang *et al*., 2023; Choudhary *et al*., 2023). Após a germinação, o sistema radicular constitui um dos compartimentos mais sensíveis à exposição, pois alterações na viabilidade celular, na divisão e no alongamento das células do ápice podem limitar rapidamente a elongação das raízes (He *et al*., 2022; Paterska; Osowski, 2026).

A redução do sistema radicular pode ser acompanhada por menor crescimento da parte aérea e acúmulo de biomassa, uma vez que compromete a exploração do substrato e repercute sobre o suprimento de água e elementos minerais necessários ao desenvolvimento da plântula (Padu *et al*., 2023; Paterska; Osowski, 2026). Entretanto, a magnitude e até a direção dessas respostas dependem da natureza química do composto, da concentração, do tempo de exposição e da espécie receptora, sendo descritas respostas estimulatórias em baixas doses e inibitórias à medida que a exposição aumenta, característica compatível com fenômenos horméticos (Cheng *et al*., 2024; Kostina-Bednarz *et al*., 2023).

O metabolismo oxidativo representa outro componente recorrente da resposta das plantas receptoras aos aleloquímicos, embora deva ser entendido como parte de uma rede de eventos fisiológicos e não como mecanismo exclusivo de fitotoxicidade (Staszek *et al*., 2021; Paterska; Osowski, 2026). O aumento excessivo de espécies reativas de oxigênio, especialmente $H_2O_2$ e $O_2^{\bullet -}$, pode superar a capacidade de detoxificação celular, favorecer a peroxidação de lipídios e elevar os teores de malondialdeído, comprometendo a integridade e a permeabilidade das membranas (He *et al*., 2022; Staszek *et al*., 2021).

Em resposta, plantas submetidas ao estresse alelopático frequentemente modificam a atividade de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase, catalase, peroxidases e ascorbato peroxidase; aumentos dessas atividades podem constituir uma resposta defensiva inicial, enquanto exposições mais intensas ou prolongadas podem produzir padrões distintos entre enzimas e espécies (He *et al*., 2022; Al-Hawas, 2025). Esse comportamento também foi observado após a exposição a ácidos fenólicos, associada à elevação da atividade de enzimas antioxidantes concomitantemente ao aumento da peroxidação lipídica, demonstrando que a ativação do sistema antioxidante não implica, necessariamente, ausência de dano celular (Anwar *et al*., 2023; Staszek *et al*., 2021). Além disso, os efeitos metabólicos podem alcançar processos centrais de obtenção de energia e síntese de biomoléculas, pois a cumarina alterou intermediários do ciclo dos ácidos tricarboxílicos, o perfil de aminoácidos e vias relacionadas

à tradução proteica, enquanto ácidos fenólicos também foram associados a modificações no conteúdo proteico e em sistemas enzimáticos das plantas receptoras (Zhang *et al*., 2023; Anwar *et al*., 2023).

A fotossíntese também constitui importante alvo fisiológico da ação alelopática, podendo ser afetada pela redução dos pigmentos fotossintéticos, alterações no funcionamento dos fotossistemas e do transporte de elétrons e, em determinadas condições, por restrições às trocas gasosas e danos oxidativos aos cloroplastos (Rahaman *et al*., 2022; Paterska; Osowski, 2026). Evidências experimentais demonstram que os ácidos ferúlico e gálico reduziram os conteúdos de clorofila em espécies daninhas e promoveram forte redução da expressão do gene *psbA*, que codifica a proteína D1 associada ao fotossistema II, indicando interferência molecular no aparato fotossintético; contudo, as interações específicas propostas por modelagem molecular nesse estudo devem ser interpretadas como evidências *in silico*, e não como confirmação isolada de um alvo bioquímico direto (Anwar *et al*., 2023; Cheng *et al*., 2024).

Paralelamente, o excesso de espécies reativas de oxigênio pode intensificar a peroxidação das membranas dos tilacoides, prejudicar a estabilidade dos pigmentos e favorecer condições de fotoinibição, conectando o comprometimento fotossintético ao metabolismo oxidativo induzido pelos aleloquímicos (Staszek *et al*., 2021; Paterska; Osowski, 2026). Em bioensaios com diferentes culturas, o aumento da concentração de extratos de plantas com atividade alelopática também foi acompanhado por expressiva diminuição do conteúdo de clorofila e do crescimento das plantas receptoras, reforçando a associação entre deterioração do desempenho fotossintético e menor produção de biomassa (Padu *et al*., 2023; Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Assim, a supressão da parte aérea pode resultar tanto dos efeitos diretos sobre a maquinaria fotossintética quanto das limitações secundárias impostas pelo comprometimento radicular, nutricional e oxidativo, configurando uma resposta fisiológica integrada (Cheng *et al*., 2024; Paterska; Osowski, 2026).

A absorção de nutrientes representa outro ponto de integração dos efeitos alelopáticos, especialmente porque as raízes constituem a principal interface entre os aleloquímicos presentes na rizosfera e a planta receptora (Mushtaq; Fauconnier, 2024; Kostina-Bednarz *et al*., 2023). Ácidos fenólicos podem modificar propriedades da membrana plasmática, interferir no gradiente eletroquímico de prótons e favorecer despolarização, aumento da permeabilidade e perdas iônicas, condições capazes de reduzir a eficiência dos processos de transporte associados à aquisição mineral (Mushtaq; Fauconnier, 2024; Rahaman *et al*., 2022). Além do efeito fisiológico direto, a redução da superfície radicular funcional e as alterações na rizosfera e nas comunidades microbianas podem modificar a disponibilidade de nutrientes, de modo que a

diminuição da nutrição mineral observada em condições alelopáticas não deve ser atribuída exclusivamente à inibição direta de transportadores de membrana (Paterska; Osowski, 2026; Choudhary *et al*., 2023).

Experimentalmente, extratos de plantas daninhas reduziram a concentração e a absorção de N, P e K em diferentes culturas, enquanto outros sistemas experimentais mostraram alterações específicas nos conteúdos de $K^+$ e $Ca^{2+}$, indicando que a resposta mineral depende da espécie, do elemento avaliado e da intensidade do tratamento, não correspondendo necessariamente a uma redução uniforme de todos os nutrientes (Padu *et al*., 2023; Al-Hawas, 2025). Desse modo, germinação, crescimento radicular e da parte aérea, atividade enzimática, fotossíntese, metabolismo oxidativo e nutrição mineral devem ser interpretados como processos interdependentes na resposta alelopática (Cheng *et al*., 2024; Paterska; Osowski, 2026); especificamente para espécies de *Turnera*, esses mecanismos constituem hipóteses fisiológicas consistentes para orientar bioensaios, mas sua atribuição causal ao gênero requer demonstração experimental com extratos caracterizados ou compostos isolados e parâmetros fisiológicos adequadamente controlados (Choudhary *et al*., 2023; Paterska; Osowski, 2026).

### 3.4 Evidências do potencial alelopático de espécies de *turnera* sobre plantas cultivadas e espontâneas

No recorte recente da literatura, as evidências experimentais de alelopatia no gênero *Turnera* concentram-se principalmente em *Turnera subulata* Sm., com estudos que abordam diferentes vias pelas quais substâncias potencialmente aleloquímicas podem alcançar plantas receptoras, incluindo exsudação radicular, interação com o solo rizosférico, decomposição de resíduos foliares e volatilização a partir das folhas (Wan Abdul Halim *et al*., 2021; Yusoff *et al*., 2022). Em ensaios controlados, os exsudatos radiculares e o solo rizosférico associado a *T. subulata* interferiram no crescimento de *Brassica chinensis*, *Oryza sativa* var. *sativa* (arroz daninho), *Triticum aestivum* e da cultivar de arroz MR303, enquanto resíduos e voláteis foliares afetaram diferentemente variedades de arroz cultivado, evidenciando que a resposta depende tanto da forma de exposição quanto da espécie ou genótipo receptor (Wan Abdul Halim *et al*., 2021; Yusoff *et al*., 2022).

Essa sensibilidade foi particularmente evidente no sistema radicular: os exsudatos de *T. subulata* reduziram em 62,6% o comprimento da radícula e em 84,6% o do hipocótilo de trigo, enquanto nos ensaios com resíduos foliares a radícula das variedades de arroz respondeu mais intensamente às maiores quantidades de material vegetal que a parte aérea, sendo o arroz híbrido apontado como o material mais sensível (Wan Abdul Halim *et al*., 2021; Yusoff *et al*.,

2022). Em conjunto, esses resultados indicam que a expressão do potencial alelopático de *T. subulata* não constitui uma resposta uniforme, mas varia de acordo com a quantidade de material vegetal, a via de liberação e a identidade da planta receptora, tendência igualmente observada nos estudos posteriores envolvendo extratos foliares em diferentes concentrações e solventes (Yusoff *et al*., 2022; Aridi *et al*., 2023).

A avaliação direta de extratos foliares ampliou essas evidências ao demonstrar uma relação pronunciada entre concentração e fitotoxicidade. Aridi *et al*. (2023) compararam extratos de folhas de formas de flores amarelas e branco-creme de *T. subulata*, preparados em água, metanol, acetato de etila e hexano, nas concentrações de 0,1; 1; 10; 50 e 100 mg $mL^{-1}$, enquanto Aridi *et al*. (2026) avaliaram extratos aquosos foliares de 0; 0,1; 1; 10; 50 e 100 mg $mL^{-1}$ aplicados sobre plântulas de *Brassica chinensis* var. *parachinensis* (choy sum), demonstrando a recorrência de respostas dependentes da dose (Aridi *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026).

No primeiro estudo, as concentrações de 50 e 100 mg $mL^{-1}$ promoveram as respostas inibitórias mais pronunciadas, e, a 100 mg $mL^{-1}$, o extrato aquoso da forma branco-creme reduziu aproximadamente 92% do comprimento radicular da mostarda, enquanto a forma amarela ocasionou redução próxima de 89%; no segundo estudo, a mesma concentração máxima provocou alterações expressivas no desempenho fisiológico de choy sum (Aridi *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026). Particularmente, a aplicação de 100 mg $mL^{-1}$ do extrato aquoso reduziu em aproximadamente 25% o índice SPAD, em 65% a clorofila *a*, em 71% a clorofila *b* e em 45% o comprimento estomático, complementando as evidências morfológicas de inibição observadas em mostarda, trigo e arroz daninho (Aridi *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026). Em contraste, concentrações de 0,1 e 1 mg $mL^{-1}$ produziram estímulo do crescimento radicular ou da parte aérea em alguns dos bioensaios de 2023, indicando uma resposta não linear e ressaltando que a definição de doses agronomicamente úteis exige curvas dose–resposta e validação além de condições laboratoriais (Aridi *et al*., 2023; Sahrir *et al*., 2023).

A interpretação desses efeitos deve considerar a composição química de *T. subulata*, mas sem atribuir causalidade a metabólitos individuais antes de sua confirmação experimental. Análises de folhas e flores realizadas por técnicas cromatográficas e espectrométricas identificaram constituintes como vitexina-2-*O*-ramnosídeo, derivados metoxiisoflavônicos, ácido ferúlico e diferentes ácidos graxos, enquanto análises posteriores de folhas evidenciaram ampla diversidade química, incluindo ácidos carboxílicos, terpenos, flavonoides e ácidos graxos (Luz *et al*., 2022; Andrade-Pinheiro *et al*., 2023). Essa composição é compatível com a constatação de compostos fenólicos e flavonoides nos extratos foliares utilizados nos bioensaios

alelopáticos, ao mesmo tempo que a abordagem metabolômica realizada em plantas receptoras expostas ao extrato de *T. subulata* identificou 15 metabólitos discriminantes pertencentes principalmente às classes de aminoácidos, carboidratos e ácidos graxos (Aridi *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026).

Entretanto, a presença de fenólicos, flavonoides ou outros metabólitos no tecido da planta doadora não demonstra, isoladamente, que determinado composto seja responsável pela fitotoxicidade observada, pois o próprio estudo metabolômico mais recente ressalta que o modo exato de ação permanece incompletamente elucidado, condição igualmente reconhecida em revisões contemporâneas sobre alelopatia (Aridi *et al*., 2026; Sahrir *et al*., 2023). Assim, embora os trabalhos recentes sustentem a existência de moléculas candidatas e de alterações metabólicas associadas à exposição, os estudos de 2021–2026 aqui reunidos basearam a demonstração direta de fitotoxicidade predominantemente em extratos, exsudatos, solo rizosférico, resíduos e voláteis, não sendo prudente atribuir a ação alelopática a vitexina, ácido ferúlico ou outro constituinte específico sem fracionamento, isolamento e bioensaios direcionados com as substâncias purificadas (Luz *et al*., 2022; Sahrir *et al*., 2023).

Sob a perspectiva agrícola, os resultados revelam simultaneamente potencial para supressão de plantas espontâneas e risco de efeitos não seletivos sobre culturas. O arroz daninho apresentou reduções de crescimento diante de exsudatos, resíduos e extratos de *T. subulata*, mas materiais de arroz cultivado, incluindo MR303 e diferentes variedades comerciais, também responderam negativamente à exposição, demonstrando que a atividade observada não pode ser interpretada, até o momento, como seletiva para plantas daninhas (Wan Abdul Halim *et al*., 2021; Yusoff *et al*., 2022). De modo semelhante, espécies cultivadas de *Brassica* mostraram elevada sensibilidade, tanto nos ensaios de crescimento radicular quanto nas avaliações fisiológicas de choy sum, reforçando que eventual emprego de derivados de *T. subulata* precisará considerar a seletividade entre culturas e espécies-alvo, além da concentração e do estádio de desenvolvimento das plantas receptoras (Aridi *et al*., 2023; Aridi *et al*., 2026).

Além disso, grande parte das evidências específicas para *Turnera* deriva de condições controladas, enquanto revisões recentes salientam que respostas obtidas em laboratório não podem ser diretamente extrapoladas para sistemas agrícolas, nos quais disponibilidade dos aleloquímicos, atividade microbiana, características do solo, competição por recursos e condições ambientais podem modificar substancialmente o efeito observado (Sahrir *et al*., 2023; Mahé *et al*., 2022). Dessa forma, *T. subulata* pode ser considerada uma fonte promissora para investigação de moléculas ou produtos de origem vegetal destinados ao manejo de plantas espontâneas, mas sua aplicação como bioherbicida ainda requer estudos em casa de vegetação

e campo, avaliação de seletividade e segurança para culturas, identificação e quantificação dos aleloquímicos ativos, determinação de sua persistência no solo e separação experimental dos efeitos alelopáticos daqueles decorrentes de competição ou outros processos ecológicos (Sahrir *et al*., 2023; Mahé *et al*., 2022).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da literatura demonstra que espécies do gênero *Turnera* apresentam características botânicas, ecológicas e fitoquímicas que justificam seu interesse em estudos de alelopatia. A diversidade de metabólitos secundários identificada no gênero, com destaque para compostos fenólicos, flavonoides, terpenoides, alcaloides, cumarinas e taninos, fornece uma base química compatível com a ocorrência de interações alelopáticas. Entretanto, as evidências experimentais disponíveis ainda são concentradas principalmente em *Turnera subulata*, indicando que o potencial de outras espécies do gênero permanece pouco investigado.

Os estudos envolvendo *T. subulata* demonstram que exsudatos radiculares, solo rizosférico, resíduos vegetais, compostos voláteis e extratos foliares podem modificar o crescimento e parâmetros fisiológicos de plantas receptoras. A intensidade dessas respostas mostrou-se dependente da concentração, da forma de exposição e da espécie ou genótipo avaliado, sendo o sistema radicular frequentemente um dos componentes mais sensíveis. Em concentrações mais elevadas, foram observadas reduções expressivas do crescimento e de parâmetros relacionados ao aparato fotossintético, enquanto doses menores apresentaram, em determinados experimentos, efeitos estimulatórios, evidenciando que as respostas alelopáticas não são necessariamente lineares.

Apesar desses resultados, as evidências disponíveis não permitem atribuir os efeitos observados a um aleloquímico específico. A identificação de flavonoides, ácidos fenólicos e outros metabólitos nos tecidos de *Turnera* demonstra apenas a existência de moléculas candidatas, sendo necessários isolamento, fracionamento bioguiado e bioensaios com compostos purificados para estabelecer relações causais. Da mesma forma, a atividade observada não se mostrou restrita às plantas espontâneas, uma vez que espécies cultivadas, incluindo arroz, trigo e representantes de *Brassica*, também apresentaram respostas negativas. Esse aspecto constitui uma limitação importante para qualquer proposta de utilização direta de derivados de *Turnera* como bioherbicidas.

Conclui-se, portanto, que *T. subulata* constitui uma espécie promissora para a prospecção de substâncias naturais com atividade fitotóxica, mas o desenvolvimento de

aplicações agrícolas exige avanços experimentais substanciais. Estudos futuros devem ampliar a investigação para outras espécies do gênero, identificar e quantificar os compostos efetivamente responsáveis pela atividade, estabelecer curvas dose–resposta, determinar seletividade sobre culturas e plantas-alvo, avaliar persistência e comportamento dos aleloquímicos no solo e validar os efeitos em condições de casa de vegetação e campo. A integração entre abordagens fitoquímicas, fisiológicas, metabolômicas e agronômicas será fundamental para esclarecer a relevância ecológica da alelopatia em *Turnera* e determinar se esse potencial poderá ser convertido, de forma segura e eficiente, em estratégias sustentáveis para o manejo de plantas espontâneas.

## REFERÊNCIAS


AL-HAWAS, G. H. S. Allelopathy effects of Matricaria chamomilla L. on germination, early growth and nutrient uptake of pea seedlings. Brazilian Journal of Biology, v. 85, e292131, 2025. DOI: 10.1590/1519-6984.292131.

ANDRADE-PINHEIRO, J. C. et al. LC-MS analysis and antifungal activity of Turnera subulata Sm. Plants, v. 12, n. 2, art. 415, 2023. DOI: 10.3390/plants12020415.

ANWAR, S.; NASEEM, S.; ALI, Z. Biochemical analysis, photosynthetic gene (psbA) down-regulation, and in silico receptor prediction in weeds in response to exogenous application of phenolic acids and their analogs. PLOS ONE, v. 18, n. 3, e0277146, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0277146.

ARIDI, N. A. M. et al. Allelopathic effect of different solvent extracts of Turnera subulata Sm. leaves against selected plants and weed. Bulgarian Journal of Agricultural Science, v. 29, n. 3, p. 490–500, 2023.

ARIDI, N. A. M. et al. Allelopathic potential of Turnera subulata leaf extract on choy sum (Brassica chinensis var. parachinensis) via untargeted metabolomics. Plant Protection Science, v. 62, n. 1, p. 79–92, 2026. DOI: 10.17221/148/2024-PPS.

ARORA, S.; HUSAIN, T.; PRASAD, S. M. Allelochemicals as biocontrol agents: promising aspects, challenges and opportunities. South African Journal of Botany, v. 166, p. 503–511, 2024. DOI: 10.1016/j.sajb.2024.01.029.

BARBOSA, V. D. C. et al. Extrafloral nectary plants in Brazilian biomes: dominance of Cerrado and Fabaceae. Flora, v. 323, art. 152668, 2025. DOI: 10.1016/j.flora.2024.152668.

BENITO-VÁZQUEZ, I. et al. Flavonoid composition and molecular basis of the potential sexual-enhancing properties of a Turnera diffusa extract (Liboost®). Pharmaceuticals, v. 19, n. 4, art. 597, 2026. DOI: 10.3390/ph19040597.

BERNARDO, J. et al. Trichilia catigua and Turnera diffusa phyto-phospholipid nanostructures: physicochemical characterization and bioactivity in cellular models of induced neuroinflammation and neurotoxicity. International Journal of Pharmaceutics, v. 620, art. 121774, 2022. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2022.121774.

CHENG, Y.; LI, M.; XU, P. Allelochemicals: a source for developing economically and environmentally friendly plant growth regulators. Biochemical and Biophysical Research Communications, v. 690, art. 149248, 2024. DOI: 10.1016/j.bbrc.2023.149248.

CHOUDHARY, C. S. et al. Mechanisms of allelopathic interactions for sustainable weed management. Rhizosphere, v. 25, art. 100667, 2023. DOI: 10.1016/j.rhisph.2023.100667.

CRUZ, P. F. et al. Palynotaxonomy of species of Turnera (Turneraceae) occurring in Brazil. Plant Systematics and Evolution, v. 311, n. 2, art. 10, 2025. DOI: 10.1007/s00606-025-01936-3.

DE ANDRADE, A. C.; PEREIRA-COLAVITE, A. Galls in the city: effects of urbanization on the interaction of a highly specialized fly (Neolasioptera sp.) and a wildflower (Turnera subulata) in tropical environments. Urban Ecosystems, v. 27, n. 1, p. 27–39, 2024. DOI: 10.1007/s11252-023-01427-8.

DELGADO-MONTEMAYOR, C. et al. Development of a hepatoprotective herbal drug from Turnera diffusa. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, v. 2022, art. 5114948, 2022. DOI: 10.1155/2022/5114948.

HE, Z. et al. Dynamic analysis of physiological indices and transcriptome profiling revealing the mechanisms of the allelopathic effects of phenolic acids on Pinellia ternata. Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 1039507, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1039507.

KONG, C.-H. et al. Chemically mediated plant–plant interactions: allelopathy and allelobiosis. Plants, v. 13, n. 5, art. 626, 2024. DOI: 10.3390/plants13050626.

KOSTINA-BEDNARZ, M.; PŁONKA, J.; BARCHANSKA, H. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 22, p. 471–504, 2023. DOI: 10.1007/s11157-023-09656-1.

LAYEK, U. et al. Impact of seasonal atmospheric factors and photoperiod on floral biology, plant–pollinator interactions, and plant reproduction on Turnera ulmifolia L. (Passifloraceae). Biology, v. 14, n. 1, art. 100, 2025. DOI: 10.3390/biology14010100.

LUZ, J. R. D. da et al. Chemical characterization of flowers and leaf extracts obtained from Turnera subulata and their immunomodulatory effect on LPS-activated RAW 264.7 macrophages. Molecules, v. 27, n. 3, art. 1084, 2022. DOI: 10.3390/molecules27031084.

MAHÉ, I. et al. Deciphering field-based evidences for crop allelopathy in weed regulation: a review. Agronomy for Sustainable Development, v. 42, art. 50, 2022. DOI: 10.1007/s13593-

021-00749-1.

MORENO, E. M. S. et al. Species diversification in the lowlands of mid-latitude South America: Turnera sidoides subsp. carnea as a case study. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 93, supl. 3, e20201067, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120201067.

MUSHTAQ, W.; FAUCONNIER, M.-L. Phenolic profiling unravelling allelopathic encounters in agroecology. Plant Stress, v. 13, art. 100523, 2024. DOI: 10.1016/j.stress.2024.100523.

PADU, K. et al. Phytotoxicity of common weeds on germination, seedling growth, NPK uptake and chlorophyll content of four hill crops of Garhwal Himalaya. Journal of Agriculture and Food Research, v. 12, art. 100539, 2023. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100539.

PARRA-NARANJO, A. et al. Bioactivity of the genus Turnera: a review of the last 10 years. Pharmaceuticals, v. 16, n. 11, art. 1573, 2023. DOI: 10.3390/ph16111573.

PASSOS, J. M. O.; GIMENES, M. Pollination of Turnera subulata: exotic or native bees? Iheringia, Série Zoologia, v. 112, e2022006, 2022. DOI: 10.1590/1678-4766e2022006.

PATERSKA, M.; OSOWSKI, K. Impact of angiosperm tree-derived allelochemicals on physiological responses of acceptor plants: a systematic review. International Journal of Molecular Sciences, v. 27, n. 14, art. 6188, 2026. DOI: 10.3390/ijms27146188.

RAHAMAN, F. et al. Allelopathic potential in rice: a biochemical tool for plant defence against weeds. Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 1072723, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1072723.

REBOUÇAS, E. L. et al. Antinociceptive, anti-inflammatory and hypoglycemic activities of the ethanolic Turnera subulata Sm. flower extract in adult zebrafish (Danio rerio). Journal of Biomolecular Structure and Dynamics, v. 40, n. 23, p. 13062–13074, 2022. DOI: 10.1080/07391102.2021.1981449.

SAHRIR, M. A. S.; YUSOFF, N.; AZIZAN, K. A. Allelopathy activity under laboratory, greenhouse and field conditions: a review. AIMS Agriculture and Food, v. 8, n. 1, p. 78–104, 2023. DOI: 10.3934/agrfood.2023004.

SILVA, M. J. C.; ROCHA, L.; MARINHO, L. C. Taxonomic synopsis and distribution of Turneraceae in Maranhão state, Brazil. Anales del Jardín Botánico de Madrid, v. 82, n. 1, e158, 2025. DOI: 10.3989/ajbm.626.

SILVA, M. J. C. da et al. Turnera carolina (Turneraceae, Passifloraceae s.l.): a new species from Chapada das Mesas, Maranhão, Northeastern Brazil. Systematic Botany, v. 48, n. 2, p. 300–306, 2023. DOI: 10.1600/036364423X16847773873152.

SOLÍS NEFFA, V. G. et al. How important was polyploidy in the diversification of herbs in the Chaquean Domain? The case of the Turnera sidoides autopolyploid complex (Passifloraceae: Turneroideae). Botanical Journal of the Linnean Society, v. 199, n. 1, p. 286–311, 2022. DOI: 10.1093/botlinnean/boab085.

STASZEK, P. et al. ROS metabolism perturbation as an element of mode of action of allelochemicals. Antioxidants, v. 10, n. 11, art. 1648, 2021. DOI: 10.3390/antiox10111648.

SURESH, M.; PAPPUSWAMY, M. Identification of bioactive metabolites in Turnera ulmifolia: preliminary phytochemical screening and FTIR analysis. Plant Science Today, v. 12, n. 3, p. 1–8, 2025. DOI: 10.14719/pst.7515.

VITAL JÚNIOR, A. C. et al. Phytochemicals from Turnera subulata exhibiting antioxidant, immunomodulatory, and microbiological activity. Foods, v. 15, n. 11, art. 1841, 2026. DOI: 10.3390/foods15111841.

WAN ABDUL HALIM, W. Z. A. et al. Allelopathic potential assessment of root exudates and rhizosphere soil of Turnera subulata. Bioscience Research, v. 18, n. SI-2, p. 145–152, 2021.

YUSOFF, N. et al. Differential allelopathic effect of Turnera subulata leaves on selected rice varieties. Bioscience Research, v. 19, n. S1-1, p. 82–90, 2022.

ZHANG, T.-J. et al. Metabolic pathways modulated by coumarin to inhibit seed germination and early seedling growth in Eleusine indica. Plant Physiology and Biochemistry, v. 203, art. 108035, 2023. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.108035.

## *Do solo à folha, a sanidade das plantas começa no manejo.*

A produção agrícola sustentável depende de decisões que começam no solo e se estendem à água, aos microrganismos e às próprias plantas. Esta obra reúne sete capítulos que discutem, à luz da literatura científica recente, como o manejo da irrigação modula a epidemiologia de doenças de plantas, como o biochar e o regime hídrico contribuem para a formação de solos supressivos e de que modo os bioinsumos ampliam as possibilidades de controle biológico de fitopatógenos.

Completam o volume estudos sobre o potencial alelopático do alho e de espécies do gênero *Turnera* no manejo de plantas espontâneas e sobre a compatibilidade de fungos entomopatogênicos com inseticidas no controle de pragas. Um livro voltado a pesquisadores, estudantes e profissionais das Ciências Agrárias que buscam bases científicas para conciliar produtividade, sanidade vegetal e conservação dos recursos naturais.

### TEMAS DA OBRA

- Irrigação e epidemiologia de doenças
- Bioinsumos no controle biológico
- Alho como ferramenta bioherbicida
- Alelopatia em espécies de *Turnera*
- Biochar e solos supressivos
- Manejo hídrico e microbiota do solo
- Fungos entomopatogênicos e inseticidas



ISBN: 978-6-58312-134-9
9 786583 121349

EDITORA MANUAL