

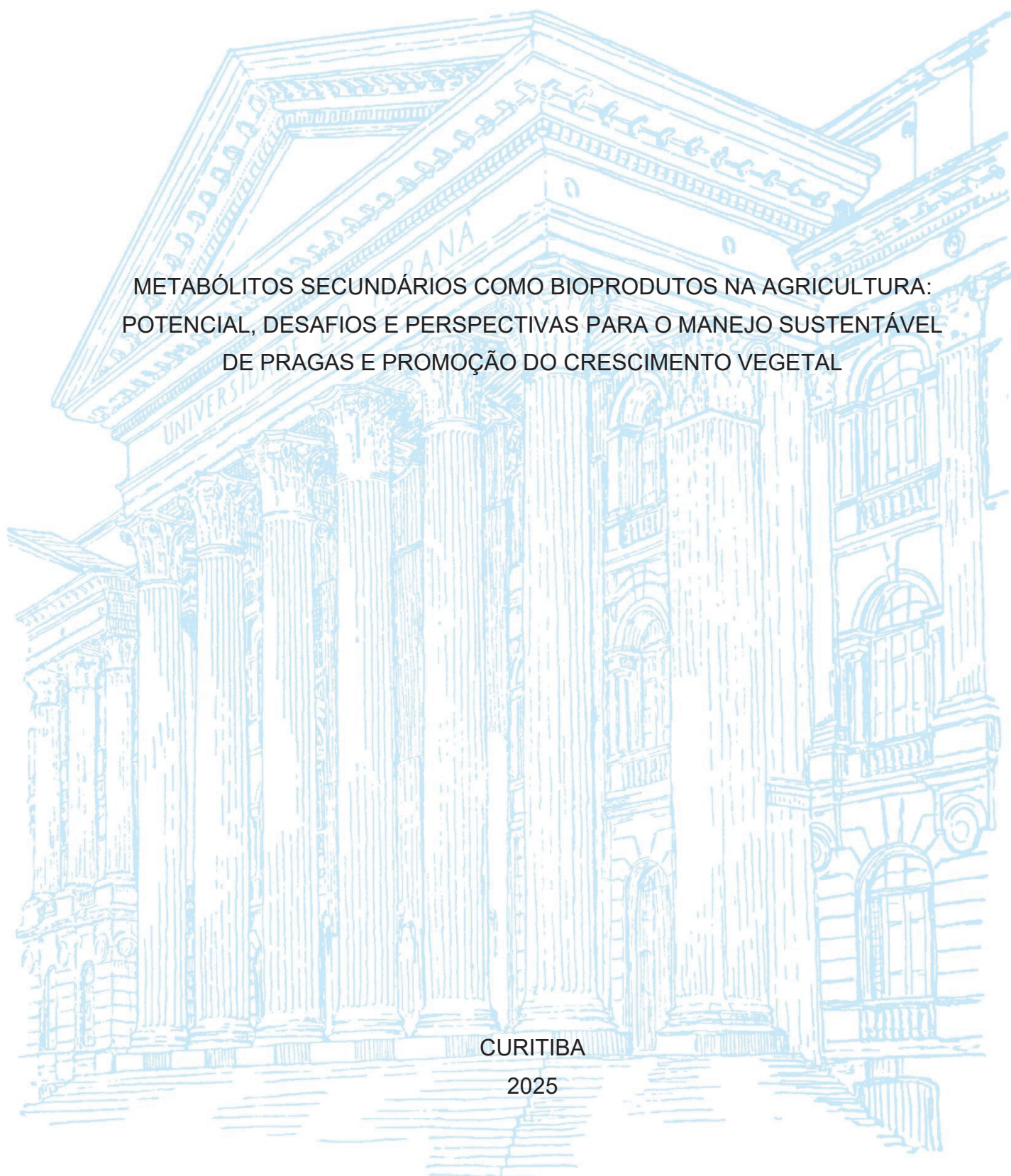
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ZAQUEO GAVA

METABÓLITOS SECUNDÁRIOS COMO BIOPRODUTOS NA AGRICULTURA:
POTENCIAL, DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA O MANEJO SUSTENTÁVEL
DE PRAGAS E PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO VEGETAL

CURITIBA

2025



LUCAS ZAQUEO GAVA

METABÓLITOS SECUNDÁRIOS COMO BIOPRODUTOS NA AGRICULTURA:
POTENCIAL, DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA O MANEJO SUSTENTÁVEL
DE PRAGAS E PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO VEGETAL

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Fitossanidade, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Fitossanidade.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Miguel Mazaro

CURITIBA

2025

Obrigado aos professores da Universidade Federal do Paraná, à minha família e à minha namorada Gabriela Gonçalves, por ter me permitido concluir mais uma etapa acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do curso de especialização em Fitossanidade da Universidade Federal do Paraná, cujas orientações e ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Cada aula contribuiu significativamente para o meu crescimento acadêmico e pessoal, despertando o interesse pela pesquisa e mostrando a importância da ciência no avanço da fitossanidade. Sou grato pela paciência, dedicação e pelo comprometimento em compartilhar conhecimento de maneira clara e objetiva, o que foi crucial para a realização deste trabalho.

Investing in agriculture is investing in a better future for all.
(NORMAN BOURLAG)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão crítica e abrangente sobre o uso de metabólitos secundários na agricultura, com ênfase em suas aplicações no manejo fitossanitário e na promoção do crescimento vegetal. Os metabólitos secundários são compostos bioativos produzidos por plantas e microrganismos, que desempenham funções essenciais na defesa contra estresses bióticos e abióticos. Ao contrário dos metabólitos primários, esses compostos não são essenciais para o crescimento das plantas, mas são fundamentais para sua adaptação ao ambiente. No contexto agrícola, os metabólitos secundários têm mostrado grande potencial como biopesticidas e bioestimulantes, com destaque para compostos como terpenos, fenóis, alcaloides e compostos sulfurados. A utilização desses compostos no controle de pragas e doenças tem se mostrado eficaz, com compostos como azadiractina e espinosade sendo amplamente utilizados no Manejo Integrado de Pragas (MIP), permitindo a redução do uso de agrotóxicos sintéticos e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Além disso, os metabólitos secundários têm demonstrado efeitos bioestimulantes nas plantas, como a promoção do crescimento radicular, maior tolerância a estresses abióticos e aumento da eficiência na absorção de nutrientes. No entanto, a adoção em larga escala desses bioprodutos enfrenta desafios significativos, como a variabilidade na produção dos compostos, a instabilidade de muitos metabólitos, especialmente óleos essenciais e terpenos, e as dificuldades regulatórias para aprovação desses produtos no mercado. Tecnologias emergentes, como nanoencapsulamento e biotecnologia, oferecem soluções promissoras para melhorar a produção, estabilidade e eficácia dos metabólitos secundários. No futuro, a combinação de novas tecnologias com práticas agrícolas sustentáveis pode permitir a superação dessas barreiras, tornando os metabólitos secundários uma solução viável e escalável para um sistema agrícola mais ecológico e eficiente. A continuidade das pesquisas científicas, bem como a colaboração entre academia, indústria e órgãos reguladores, será fundamental para que esses compostos se tornem uma parte central do manejo fitossanitário moderno, promovendo uma agricultura mais sustentável e com menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Metabólitos secundários. Biopesticida 2. Agricultura sustentável 3. Manejo Integrado de Pragas. Bioestimulantes vegetais 5.

ABSTRACT

Secondary metabolites produced by plants and microorganisms have gained attention as promising bioproducts for sustainable agriculture. These bioactive compounds, which include terpenoids, phenolics, alkaloids, and sulfur compounds, play vital roles in defending plants against biotic and abiotic stresses while promoting plant growth. This review explores the recent advances in the use of secondary metabolites in agricultural systems, focusing on their biological functions, mechanisms of action, and practical applications in pest management, plant growth regulation, and disease control. Despite their great potential, challenges such as variability in production, instability, and regulatory barriers limit the widespread adoption of these compounds in commercial agriculture. However, innovations in biotechnology, including metabolic engineering and nanotechnology, offer promising solutions to improve the production, stability, and effectiveness of secondary metabolites. Furthermore, these bioproducts align with sustainable agricultural practices, including Integrated Pest Management (IPM) and organic farming, contributing to the reduction of synthetic pesticide use and the promotion of healthier ecosystems. The future of secondary metabolites in agriculture hinges on continued research, technological advancements, and collaborative efforts between academia, industry, and regulatory bodies to overcome existing obstacles and make these bioproducts more accessible and economically viable.

Keywords: Secondary metabolites, sustainable agriculture, bioproducts, pest management, plant growth regulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TIPOS DE METABÓLITOS SECUNDÁRIOS.....	23
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	166
1.2 OBJETIVOS.....	188
1.2.1 Objetivo geral	188
1.2.2 Objetivos específicos	188
2 METODOLOGIA	190
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 CLASSIFICAÇÃO E DIVERSIDADE QUÍMICA DOS METABÓLITOS SECUNDÁRIOS RELEVANTES.....	22
3.2 MECANISMOS DE AÇÃO NO CONTROLE DE PATÓGENOS E PRAGAS.....	24
3.2.1 Toxinas diretas	24
3.2.2 Repelência e antixenose.....	25
3.2.3 Efeitos aleloquímicos	25
3.2.4 Interação com o sistema imunológico das plantas	26
3.2.5 Efeitos nas membranas celulares.....	26
3.2.6 Estresse oxidativo e ROS	27
3.2.7 Interação com o microbioma das plantas.....	27
3.3 EFEITOS FISIOLÓGICOS E BIOESTIMULANTES EM PLANTAS	28
3.3.1 Modulação de processos hormonais.....	28
3.3.2 Crescimento radicular e absorção de nutrientes.....	29
3.3.3 Resposta ao estresse abiótico.....	29
3.3.4 Integração com práticas agrícolas sustentáveis	30
3.3.5 Efeitos sinérgicos em agricultura integrada	30
3.4 APLICAÇÕES EM SISTEMA DE CULTIVO, MIP, AGRICULTURA ORGÂNICA E GRANDES CULTURAS	31
3.4.1 Metabólitos secundários no manejo integrado de pragas (MIP)	31
3.4.2 Aplicações em agricultura orgânica.....	32
3.4.3 Metabólitos secundários em grandes culturas.....	32
3.4.4 Perspectivas de Integração e sustentabilidade.....	33
3.5 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	33
3.5.1 Limitações na produção e escalabilidade	34
3.5.2 Estabilidade e persistência dos compostos	34
3.5.3 Desafios regulatórios e comerciais.....	35

3.5.4 Potencial de inovação e avanços tecnológicos.....	35
3.5.5 Integração com práticas sustentáveis	36
3.5.6 Futuro da pesquisa.....	37
6 CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente demanda global por alimentos, fibras e biocombustíveis, combinada com o aumento da população mundial, tem levado à intensificação das práticas agrícolas. Embora esse modelo de produção tenha trazido benefícios de curto prazo, especialmente no aumento da produção agrícola, ele tem se mostrado insustentável a longo prazo. A dependência excessiva de agrotóxicos sintéticos e fertilizantes químicos resultou, entre outros problemas, na resistência crescente de pragas e patógenos, além de causar impactos ambientais graves, como a contaminação de solos, mananciais e alimentos (Aktar et al., 2009; Gupta et al., 2020; FAO, 2022). Estima-se que entre 20% e 40% da produção agrícola global seja perdida devido à ação de agentes bióticos, representando uma perda econômica anual de aproximadamente USD 220 bilhões (FAO, 2022). Esse cenário crítico, com elevados custos ambientais e econômicos, exige, portanto, uma busca urgente por soluções mais sustentáveis e eficientes.

Em resposta a esse desafio, os metabólitos secundários surgem como uma alternativa promissora para transformar a agricultura. Produzidos por plantas e microrganismos em resposta a estresses ambientais, esses compostos bioativos desempenham funções vitais, não só na defesa contra pragas e doenças, mas também na adaptação a condições ambientais adversas (Taiz et al., 2021; Wink, 2015). Ao contrário dos metabólitos primários, que são essenciais para o crescimento das plantas, os metabólitos secundários oferecem uma grande diversidade química e alta especificidade, tornando-os compostos ideais para a aplicação em práticas agrícolas sustentáveis (Gershenzon & Dudareva, 2007; Harborne & Williams, 2000).

Além da proteção contra patógenos e pragas, muitos desses compostos têm demonstrado forte potencial bioestimulante, promovendo o crescimento vegetal e aumentando a tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos, como seca, salinidade e variações térmicas (Calvo et al., 2014; Zhang et al., 2019). Compostos como flavonoides, terpenos e alcaloides atuam regulando processos hormonais, ativando vias antioxidantes e reforçando as paredes celulares, conferindo maior resistência estrutural às plantas (Paul & Southall, 2020; Jassbi et al., 2010).

No contexto do Manejo Integrado de Pragas (MIP), a aplicação de metabólitos secundários pode reduzir a pressão de seleção por resistência, uma vez que esses compostos atuam em múltiplos alvos moleculares, dificultando a adaptação rápida de insetos e patógenos. Essa abordagem contribui significativamente para a criação de sistemas agrícolas mais sustentáveis e resilientes (Isman, 2020). Além disso, a combinação sinérgica entre diferentes classes de metabólitos, como flavonoides e terpenos, tem sido explorada para a formulação de bioprodutos inovadores, ampliando o espectro de controle e a eficiência no campo (Moon et al., 2017; Scanderbeg et al., 2018).

Apesar dos avanços em biotecnologia e engenharia metabólica, que possibilitam o aumento da produção desses compostos (Hou & Kang, 2014; Ajikumar et al., 2010), ainda existem desafios significativos que limitam sua aplicação em larga escala. A variabilidade na síntese dos metabólitos, influenciada por fatores como temperatura, pH do solo e manejo hídrico, e a escassez de dados consistentes de campo dificultam a formulação de protocolos eficazes de aplicação (Borges et al., 2022; Mattiello et al., 2021). Em contraste com o mercado global de pesticidas químicos, que superou USD 60 bilhões em 2022, o mercado de biopesticidas ainda representa um nicho emergente de apenas USD 3,5 bilhões, mas com projeções de triplicar até 2026, refletindo o crescente interesse por soluções ecológicas e sustentáveis (MarketsandMarkets, 2023; Grand View Research, 2022).

Dessa forma, a necessidade de consolidar o estado da arte sobre o uso de metabólitos secundários na agricultura é clara. Esta revisão bibliográfica visa mapear os principais avanços e identificar as tendências, lacunas de pesquisa e perspectivas futuras que possam subsidiar o desenvolvimento de bioprodutos mais eficazes e economicamente viáveis, alinhados aos princípios da agricultura sustentável.

1.1 JUSTIFICATIVA

A dependência excessiva de defensivos químicos no manejo fitossanitário tem se tornado um dos maiores desafios enfrentados pela agricultura contemporânea. O aumento da resistência das pragas e patógenos a esses produtos compromete a eficácia do controle, tornando-o cada vez mais ineficiente e oneroso (Desneux et al.,

2021). O uso contínuo e crescente de agroquímicos também resulta em impactos ambientais e de saúde pública, como a contaminação do solo, dos recursos hídricos e dos alimentos, além da perda de biodiversidade (Zhao et al., 2022). Este ciclo vicioso de dependência de substâncias químicas afeta tanto a saúde ambiental quanto a saúde humana, exigindo soluções alternativas para o controle de pragas e doenças que sejam sustentáveis e eficazes.

Nesse contexto, os metabólitos secundários se apresentam como uma alternativa sustentável e inovadora aos pesticidas químicos, com o potencial de substituir ou complementar as abordagens convencionais no controle de pragas e no manejo fitossanitário (Schmidt et al., 2022). Compostos como terpenos, flavonoides, fenilpropanoides, alcaloides e saponinas têm mostrado eficácia não apenas no controle de fungos, bactérias e insetos, mas também no estímulo ao crescimento vegetal, promovendo aumentos de produtividade e melhorando a saúde do solo (Hassan et al., 2021). A adoção desses compostos pode, assim, reduzir a dependência de agroquímicos e promover práticas agrícolas mais ecológicas, que não só protejam a biodiversidade, mas também melhorem a qualidade dos produtos agrícolas.

Além de seus benefícios ecológicos, o uso de metabólitos secundários também oferece vantagens econômicas significativas. Ao reduzir os custos com agrotóxicos sintéticos, esses compostos têm o potencial de melhorar a eficiência da produção agrícola, aumentar a rentabilidade e diminuir os impactos econômicos negativos associados ao uso excessivo de produtos químicos. No entanto, apesar do crescente número de estudos sobre esses compostos, existem lacunas importantes no conhecimento sobre sua produção, eficácia e mecanismos de ação, o que ainda limita a adoção em larga escala. A variabilidade na produção desses compostos e os desafios associados à escalabilidade e viabilidade econômica de sua aplicação prática são obstáculos que precisam ser superados para que esses compostos se tornem uma opção viável em grande escala (Mussa et al., 2021).

Este trabalho se justifica pela necessidade urgente de uma compreensão mais profunda sobre os metabólitos secundários, suas funções, mecanismos de ação e aplicações práticas no contexto agrícola. Através desta revisão, pretende-se fornecer um panorama atualizado e crítico sobre os avanços científicos, os desafios atuais e as perspectivas futuras do uso desses compostos, com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis no manejo fitossanitário.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo é realizar uma revisão crítica e detalhada sobre o uso de metabólitos secundários aplicados à agricultura, com destaque para suas funções biológicas, mecanismos de ação e as aplicações no manejo fitossanitário e na promoção do crescimento vegetal. A pesquisa também visa analisar os desafios e oportunidades associados à utilização desses compostos, explorando como variáveis ambientais e biológicas influenciam sua produção e eficiência em diferentes contextos agrícolas, além de avaliar as possibilidades de integração desses compostos em sistemas agrícolas sustentáveis.

1.2.1 Objetivo geral

Revisar e discutir os avanços científicos mais recentes sobre o uso de metabólitos secundários como bioprodutos na agricultura, com ênfase em sua aplicação no manejo fitossanitário sustentável e na promoção da saúde das plantas, identificando as lacunas no conhecimento atual e as possibilidades de ampliação de seu uso no setor agrícola, com foco nas soluções tecnológicas e nos desafios regulatórios para uma implementação mais ampla.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar os principais metabólitos secundários com aplicação comprovada ou potencial na agricultura.

Este objetivo visa mapear os compostos bioativos mais estudados e com maior potencial de aplicação agrícola, considerando suas propriedades biológicas e seu uso no controle de pragas, doenças e na promoção do crescimento vegetal. Será realizada uma análise detalhada de como esses compostos têm sido aplicados em diferentes culturas agrícolas e seus impactos na produtividade e saúde das plantas, com ênfase nas práticas agrícolas mais sustentáveis e na redução da dependência de agroquímicos (Schmidt et al., 2022; Hassan et al., 2021).

2. Descrever os mecanismos de ação desses compostos no controle de pragas e patógenos.

Compreender como os metabólitos secundários interagem com os organismos-alvo é crucial para otimizar as estratégias de Manejo Integrado de Pragas (MIP). Este objetivo se concentra em analisar como esses compostos atuam molecularmente, celularmente e fisiologicamente nos patógenos e pragas, detalhando os efeitos sobre os sistemas biológicos dos organismos-alvo, com exemplos de sua aplicação em cultivos específicos (Isman, 2020).

3. Avaliar os efeitos desses metabólitos na indução de resistência e na promoção do crescimento vegetal.

Muitos metabólitos secundários têm demonstrado eficácia não apenas no controle de patógenos e pragas, mas também na promoção de crescimento e na indução de resistência sistêmica nas plantas. Este objetivo busca investigar como compostos como flavonoides e terpenóides afetam processos fisiológicos, metabólicos e hormonais, promovendo maior tolerância a estresses abióticos, como seca e salinidade, além de melhorar o crescimento radicular e a absorção de nutrientes (Paul & Southall, 2020; Zhang et al., 2019).

4. Propor direções para futuras pesquisas e o desenvolvimento de bioprodutos baseados em metabólitos secundários.

Através da análise dos avanços recentes, será possível identificar lacunas no conhecimento atual sobre os metabólitos secundários e sugerir novas linhas de pesquisa que possam ampliar a aplicação desses compostos na agricultura. O objetivo é indicar áreas promissoras para o desenvolvimento de bioprodutos eficazes e sustentáveis, bem como recomendar estratégias de integração desses compostos em sistemas agrícolas mais sustentáveis, abordando também as barreiras regulatórias e as inovações tecnológicas necessárias para a produção em larga escala (Borges et al., 2022).

2 METODOLOGIA

Esta revisão bibliográfica será conduzida de forma sistemática e crítica, com o objetivo de compilar, analisar e sintetizar as informações mais recentes sobre os metabólitos secundários como bioprodutos na agricultura. A pesquisa será realizada em bases de dados acadêmicas de referência, incluindo Scopus, Web of Science, Google Scholar e PubMed, com foco em artigos publicados entre 2015 e 2025. Serão priorizados artigos revisados por pares que abordem a aplicação desses compostos na agricultura, com ênfase em estudos experimentais e de campo, pois fornecem evidências robustas e aplicáveis à prática agrícola real.

A seleção dos artigos será realizada com base em palavras-chave específicas como "metabólitos secundários", "bioestimulantes", "biopesticidas", "controle de pragas" e "crescimento vegetal". Utilizar-se-á operadores booleanos para refinar os resultados e garantir que os artigos selecionados sejam os mais pertinentes ao tema da pesquisa. Os critérios de inclusão estarão focados na qualidade metodológica dos artigos, priorizando aqueles que utilizam controle experimental, tamanho amostral adequado, replicações experimentais e que apresentam clareza metodológica.

Após a seleção dos artigos, será realizada uma análise qualitativa, com o objetivo de explorar três aspectos principais:

1. Descrição detalhada dos mecanismos de ação desses compostos no controle de patógenos e pragas. A análise buscará compreender como os metabólitos secundários interagem com os organismos-alvo, tanto em nível molecular, celular e fisiológico. O objetivo é entender os efeitos sobre o comportamento das pragas, a resposta imunológica das plantas e o desenvolvimento dos patógenos, com exemplos específicos do uso desses compostos em cultivos agrícolas (Isman, 2020).
2. Descrição detalhada dos mecanismos de ação desses compostos no controle de patógenos e pragas. A análise buscará compreender como esses metabólitos interagem com os organismos-alvo em nível molecular, celular e fisiológico, avaliando o impacto no comportamento das pragas, na resposta imunológica das plantas e no desenvolvimento dos patógenos (Isman, 2020).
3. Avaliação dos efeitos bioestimulantes dos metabólitos secundários. Será investigada a capacidade desses compostos de induzir resistência nas plantas e melhorar sua tolerância a estresses abióticos, como seca, salinidade e

temperaturas extremas. Além disso, serão avaliados os impactos na absorção de nutrientes e no crescimento radicular, fatores essenciais para a saúde e produtividade das plantas (Paul & Southall, 2020).

Após a análise qualitativa, será realizada uma síntese crítica das evidências encontradas, destacando os pontos fortes e as limitações dos estudos selecionados, bem como as lacunas de pesquisa que ainda precisam ser abordadas. Serão discutidos os aspectos técnicos e econômicos relacionados ao uso de metabólitos secundários, com foco nas dificuldades de produção em larga escala, estabilidade e viabilidade econômica desses compostos no mercado agrícola (Borges et al., 2022).

A análise dos dados será organizada de maneira a permitir uma comparação clara entre os compostos mais eficazes, suas propriedades e aplicações em diferentes tipos de culturas agrícolas. Também serão identificadas as principais vantagens e limitações de cada composto no contexto do manejo fitossanitário.

Por fim, será realizada uma discussão crítica sobre as perspectivas futuras para o uso de metabólitos secundários na agricultura, com destaque para a integração de novas tecnologias, como nanoencapsulamento e biotecnologia, que podem aumentar a eficiência e a estabilidade desses compostos. A revisão também buscará propor novas linhas de pesquisa, com o objetivo de superar as barreiras existentes e promover o desenvolvimento de bioprodutos mais eficazes e acessíveis, alinhados aos princípios da agricultura sustentável.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo fornecer uma análise crítica e abrangente sobre os metabólitos secundários e suas aplicações agrícolas, enfatizando suas funções biológicas, mecanismos de ação, efeitos bioestimulantes e suas aplicações no manejo fitossanitário. Serão discutidos os avanços mais recentes, as potencialidades e as limitações desses compostos no controle de pragas e na promoção do crescimento vegetal.

3.1 CLASSIFICAÇÃO E DIVERSIDADE QUÍMICA DOS METABÓLITOS SECUNDÁRIOS RELEVANTES

Os metabólitos secundários são compostos orgânicos produzidos por plantas e microrganismos que desempenham funções cruciais para a defesa contra estresses bióticos (como ataque de pragas e patógenos) e abióticos (como variações climáticas adversas). Embora não sejam essenciais para os processos metabólicos primários, sua produção oferece vantagens adaptativas significativas, sendo vitais para a sobrevivência e adaptação das plantas em ambientes naturais competitivos e hostis. Quimicamente, esses compostos são classificados em quatro grandes grupos: terpenos, fenólicos, compostos nitrogenados e compostos sulfurados (Wink, 2015; Taiz et al., 2021).

Os terpenos (ou terpenoides) representam a classe mais diversificada de metabólitos secundários, derivando-se de unidades isoprenóides. Esses compostos variam desde os simples monoterpenos (C₁₀), como o mentol encontrado em *Mentha*, até os mais complexos diterpenos e triterpenos. Sua função biológica principal é a defesa contra herbívoros e a atração de polinizadores ou predadores naturais de pragas, além de também desempenharem um papel na proteção contra fungos fitopatogênicos, como no caso do *Alternaria alternata* (Isman, 2020). Esses compostos são frequentemente utilizados em estratégias de manejo sustentável de culturas, especialmente para o controle de pragas como mosca-branca e lagartas, que causam danos econômicos significativos a cultivos de hortaliças e grãos.

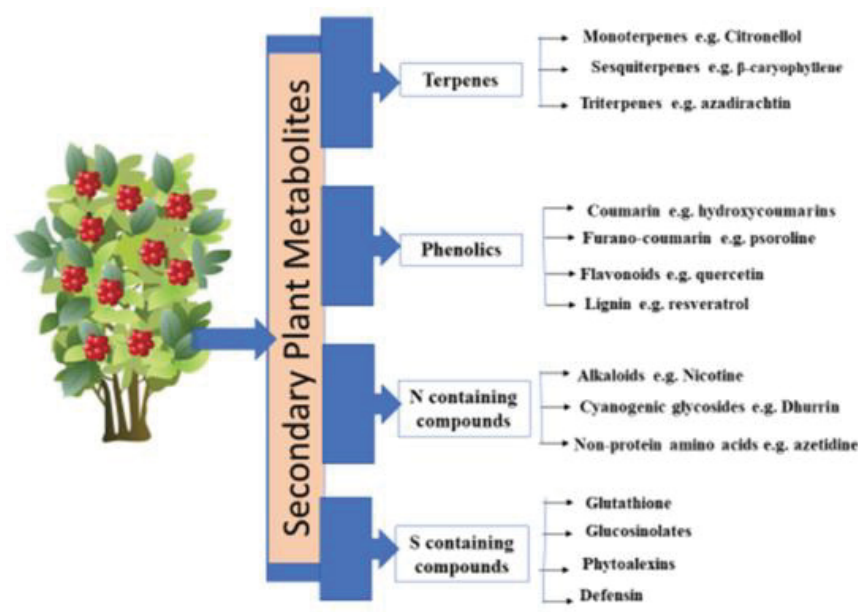
Os fenólicos incluem flavonoides, taninos e cumarias, compostos que possuem um amplo espectro de atividades biológicas, como antioxidantes, antimicrobianos e anti-inflamatórias. Esses compostos desempenham um papel crítico no controle de patógenos e herbívoros, atuando diretamente na integridade celular das plantas ou microrganismos, e interferindo na inibição de enzimas essenciais nos patógenos (Harborne & Williams, 2000). Os flavonoides, por exemplo, têm demonstrado proteção contra radiação UV e estresse oxidativo, sendo particularmente úteis em culturas sensíveis a esses fatores, como tomates e uvas (Zhang et al., 2019).

Os compostos nitrogenados, como alcaloides, glucosídeos cianogênicos e aminas, são amplamente produzidos por plantas como um mecanismo de defesa

contra herbívoros. Exemplos notáveis incluem a nicotina e ricinina, que atuam como neurotoxinas nos insetos, e compostos como cafeína e teobromina, que têm efeitos aleloquímicos, inibindo a germinação de sementes competidoras (Borges et al., 2022). Além disso, compostos como glucosídeos cianogênicos liberam cianeto em resposta a danos mecânicos, sendo extremamente eficazes contra herbívoros que tentam consumir as plantas (Mattiello et al., 2021).

Os compostos sulfurados incluem glucosinolatos e aliinas, encontrados em plantas das famílias Brassicaceae e Aliaceae (como o alho). Quando hidrolisados, esses compostos geram produtos bioativos como isotiocianatos e alicina, que possuem potentes propriedades antibacterianas, antifúngicas e inseticidas (Paul & Southall, 2020). A alicina, por exemplo, tem demonstrado um forte efeito de controle sobre fungos do gênero *Fusarium*, bem como uma potente ação contra nematoides em cultivos de alho e cebola (Zhang et al., 2019).

FIGURA 1– TIPOS DE METABÓLITOS SECUNDÁRIOS



FONTE: Divekar, P.A.et al. 2022.

A diversidade química dos metabólitos secundários é imensa, com mais de 200 mil compostos descritos até o momento, o que reflete sua enorme importância ecológica e adaptativa nas plantas. Essa diversidade oferece um arsenal químico natural de interesse para a agricultura, com compostos que podem ser utilizados tanto como biopesticidas quanto como bioestimulantes, proporcionando uma solução eficaz e ecológica para o manejo fitossanitário em sistemas agrícolas sustentáveis.

3.2 MECANISMOS DE AÇÃO NO CONTROLE DE PATÓGENOS E PRAGAS

Os metabólitos secundários atuam de maneira multifacetada para proteger as plantas contra pragas e patógenos. Eles podem funcionar como toxinas diretas, repelentes, deterrentes alimentares e moduladores comportamentais. Esses compostos agem em nível molecular, celular e fisiológico, oferecendo uma defesa química contra as ameaças bióticas.

3.2.1 Toxinas Diretas

Os alcaloides, como a nicotina, são amplamente estudados por sua ação neurotóxica contra insetos. A nicotina é um alcaloide com ação comprovada contra insetos mastigadores e sugadores, como mosca branca (*Bemisia tabaci*) e pulgões (*Aphidoidea*), que causam danos significativos em culturas de hortaliças, como tomate, pepino e alface. Em experimentos conduzidos por Borges et al. (2022), a nicotina demonstrou efeito neurotóxico em moscas brancas, resultando em paralisia e morte após a ingestão. A aplicação de nicotina como biopesticida pode ser feita por pulverização em forma de extratos vegetais, com doses ajustadas para evitar a toxicidade em organismos benéficos.

Outros alcaloides, como ricinina e teobromina, também são eficazes no controle de insetos. A teobromina, presente no cacau, é tóxica para uma ampla gama de insetos sugadores e mastigadores e tem sido investigada como alternativa para o controle de lagartas e moscas da fruta (*Ceratitis capitata*), que atacam citrus e outras frutas tropicais (Gupta et al., 2020). Esses compostos podem ser aplicados através de irrigação ou pulverização, dependendo da cultura e do alvo.

3.2.2 Repelência e Antixenose

O efeito antixenótico de metabólitos secundários pode ser observado em compostos como a azadiractina, extraída do nim (*Azadirachta indica*), que é repelente para uma variedade de pragas sugadoras como a mosca branca (*Bemisia tabaci*), pulgões (*Aphidoidea*) e lagartas. Em um estudo realizado por Borges et al. (2022), a azadiractina demonstrou efeito repelente e anticrescimento em moscas brancas em culturas de tomateiro, resultando em menor infestação e danos significativos à planta. A aplicação de azadiractina em culturas de hortaliças pode ser feita através de pulverização foliar ou tratamento do solo, sendo eficaz em sistemas de manejo integrado de pragas (MIP).

Além disso, compostos como flavonoides e taninos agem como deterrentes alimentares, reduzindo o consumo de folhas e flores por herbívoros. Em estudos realizados por Zhang et al. (2019), o tanino mostrou ser eficaz no controle de lagartas (lepidópteros) em culturas de milho e feijão, reduzindo significativamente os danos às folhas. Esses compostos podem ser aplicados por pulverização foliar, ajudando a reduzir a pressão de pragas em sistemas orgânicos ou com uso reduzido de agroquímicos.

3.2.3 Efeitos Aleloquímicos

Os efeitos aleloquímicos desempenham um papel importante na competição interplante e no controle de pragas. Compostos como cafeína e teobromina têm efeitos aleloquímicos significativos, inibindo a germinação de sementes de plantas competidoras, como plantas daninhas em cultivos de arroz e milho. Gupta et al. (2020) observaram que a aplicação de teobromina em sistemas de cultivo de milho resultou em uma diminuição da germinação de plantas daninhas, como capim-amargoso (*Digitaria insularis*), competindo eficientemente com as culturas.

Outro exemplo é o uso de glucosídeos cianogênicos, que liberam cianeto após dano mecânico, tornando-se altamente tóxicos para herbívoros. Esses compostos têm sido estudados em espécies de mandioca e feijão, e seu uso pode ser uma ferramenta

eficaz na proteção contra roedores e insetos mastigadores que atacam culturas de raízes (Mattiello et al., 2021).

3.2.4 Interação com o Sistema Imunológico das Plantas

Além de suas ações diretas sobre os patógenos e pragas, os metabólitos secundários influenciam o sistema imunológico das plantas. Compostos como flavonoides e terpenos podem modular as respostas imunes das plantas, ativando mecanismos de defesa que aumentam a resistência a patógenos e herbívoros.

Os flavonoides, como a quercetina, ativam vias de sinalização hormonal, como a via de ácido salicílico, que é crucial na defesa contra fungos e bactérias fitopatogênicas (Taiz et al., 2021). Em estudos de campo, a quercetina demonstrou aumentar a resistência a fungos do gênero *Fusarium*, responsáveis por doenças em culturas de trigo e soja (Harborne & Williams, 2000).

Os terpenos, como o ácido abscísico (ABA), desempenham um papel fundamental na modulação das defesas sistêmicas. A aplicação de terpenos tem mostrado potencial na indução de resistência a estresses abióticos, como seca e salinidade, ajudando as plantas a se manterem vigorosas em condições ambientais desafiadoras (Gershenzon & Dudareva, 2007).

3.2.5 Efeitos nas Membranas Celulares

Compostos fenólicos e terpenoides têm um impacto significativo nas membranas celulares de patógenos e insetos, causando dano direto à sua estrutura e resultando na morte celular. Esse mecanismo é essencial no controle de fungos e bactérias, especialmente fungos do gênero *Fusarium* e *Rhizoctonia*, que afetam culturas de legumes e hortaliças.

Estudos de Zhang et al. (2019) mostraram que cumarinas, compostos fenólicos amplamente encontrados em plantas como canela e alcarraza, são altamente eficazes

no controle de fungos fitopatogênicos. A aplicação de extratos ricos em cumarinas em culturas de tomateiro e pepino resultou na redução significativa da incidência de doenças, como murcha bacteriana e podridão radicular. Esses compostos afetam diretamente a membrana celular dos patógenos, provocando a liberação de conteúdo celular e a destruição das células.

3.2.6 Estresse Oxidativo e ROS

A indução de estresse oxidativo é um dos principais mecanismos de ação dos metabólitos secundários. Compostos como flavonoides, catequinas e terpenos geram espécies reativas de oxigênio (ROS) nos patógenos e insetos, levando ao dano celular e morte dos organismos-alvo. Por exemplo, catequinas, encontradas em chá verde e banana, foram demonstradas como potentes indutores de estresse oxidativo em fungos do gênero *Fusarium* e *Aspergillus*, amplificando o efeito antimicrobiano (Zhang et al., 2019).

Os terpenos, como o mentol e o limoneno, também são conhecidos por induzir ROS em insetos, como mosca-branca e pulgões, afetando diretamente suas células e sistemas fisiológicos, levando à paralisia e morte dos insetos (Isman, 2020).

3.2.7 Interação com o Microbioma das Plantas

Os metabólitos secundários também interagem com o microbioma das plantas, modulando o ecossistema microbiano ao redor das raízes e no solo. Esses compostos podem inibir patógenos do solo, como nematoides e fungos fitopatogênicos, enquanto promovem a proliferação de microrganismos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos.

Estudos de Mattiello et al. (2021) demonstraram que compostos como glucosinolatos e alicina ajudam a regular o microbioma do solo, promovendo a saúde das raízes e resistência a doenças. A aplicação de extratos de alho, ricos em

compostos sulfurados como alicina, tem mostrado efeitos significativos no controle de nematoides em cultivos de tomate e batata.

3.3 EFEITOS FISIOLÓGICOS E BIOESTIMULANTES EM PLANTAS.

Além de suas funções protetoras contra pragas e doenças, muitos metabólitos secundários têm mostrado um impacto significativo na fisiologia das plantas, promovendo o crescimento vegetal e a tolerância a estresses ambientais. Esses compostos funcionam como bioestimulantes, modulando processos metabólicos, hormonais e de defesa, fundamentais para o crescimento e a adaptação das plantas em ambientes desafiadores.

3.3.1 Modulação de Processos Hormonais

Metabólitos secundários desempenham um papel crucial na modulação hormonal das plantas, influenciando processos vitais como a germinação, o crescimento radicular e a resposta ao estresse ambiental. Compostos como terpenos e flavonoides têm sido identificados por sua capacidade de modular a síntese de auxinas, giberelinas e citocininas, hormônios que regulam o crescimento e a divisão celular das plantas.

Estudos de Gershenzon & Dudareva (2007) mostraram que compostos como o mentol e a mentona, ambos terpenos, não apenas têm propriedades antimicrobianas, mas também estimulam a síntese de auxinas, promovendo o crescimento das raízes e a absorção eficiente de nutrientes. Esse efeito se traduz em maior vigor radicular e expansão foliar, fatores cruciais para o desenvolvimento saudável da planta.

3.3.2 Crescimento Radicular e Absorção de Nutrientes

Outro aspecto importante dos efeitos bioestimulantes dos metabólitos secundários é o impacto na eficiência de absorção de nutrientes. Compostos como flavonoides, terpenos e poliaminas têm demonstrado potencial para melhorar a absorção de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, além de ajudar na solubilização de nutrientes no solo, o que melhora a disponibilidade de elementos essenciais para o crescimento das plantas.

Mattiello et al. (2021) observaram que a aplicação de extratos ricos em alicina, um composto sulfurado derivado do alho, aumentou a absorção de fósforo e nitrogênio em cultivos de tomate e batata, promovendo crescimento mais robusto. Esse efeito bioestimulante foi associado à interação desses compostos com a microbiota do solo, favorecendo microrganismos benéficos como bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos.

3.3.3 Resposta ao Estresse Abiótico

Muitos metabólitos secundários são especialmente eficazes na indução de resistência a estresses abióticos, como seca, salinidade e temperaturas extremas. Compostos como prolina, betainas e flavonoides têm a capacidade de atuar como osmólitos ou antioxidantes, protegendo as células vegetais contra os danos causados por condições adversas.

Por exemplo, Zhang et al. (2019) demonstraram que o uso de extratos de flavonoides aumentou a tolerância das plantas à seca, promovendo a acumulação de prolina nas células vegetais e melhorando a integridade celular. Em cultivos de milho e feijão, esses extratos ajudaram as plantas a manterem sua homeostase celular, reduzindo os efeitos prejudiciais da escassez de água.

3.3.4 Integração com Práticas Agrícolas Sustentáveis

Além dos efeitos diretos sobre o crescimento e a resistência das plantas, os metabólitos secundários também têm um impacto importante na sustentabilidade agrícola. Sua aplicação tem sido associada à redução do uso de agroquímicos, à melhora da saúde do solo e à promoção da biodiversidade, fatores cruciais para o avanço da agricultura orgânica e dos sistemas de Manejo Integrado de Pragas (MIP).

A utilização de extratos vegetais ricos em metabólitos secundários, como terpenos, flavonoides e compostos sulfurados, tem mostrado resultados promissores em sistemas agrícolas sustentáveis. Um exemplo notável é o uso de extratos de nim e azadiractina no controle de moscas-brancas em cultivos de tomate, onde o bioinseticida foi eficaz tanto no controle de pragas quanto no aumento da resistência da planta a estresses ambientais (Borges et al., 2022). Essas estratégias podem ser integradas ao manejo de culturas, promovendo sistemas agrícolas mais resilientes e ecologicamente responsáveis.

3.3.5 Efeitos Sinérgicos em Agricultura Integrada

A combinação de diferentes classes de metabólitos secundários tem demonstrado efeitos sinérgicos significativos, o que pode ser aproveitado em sistemas de MIP. A interação de compostos como flavonoides e terpenos pode ampliar o espectro de controle de pragas e patógenos, além de proporcionar um efeito bioestimulante mais robusto nas plantas. Estudo realizado por Moon et al. (2017) destacou como a sinergia entre flavonoides e terpenos pode potencializar a ação contra pragas como mosca-branca e pulgões, aumentando a eficiência dos biopesticidas.

3.4 APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE CULTIVO, MIP, AGRICULTURA ORGÂNICA E GRANDES CULTURAS.

Os metabólitos secundários desempenham um papel fundamental no aumento da sustentabilidade e eficiência de sistemas agrícolas específicos, como o Manejo Integrado de Pragas (MIP), a agricultura orgânica e grandes culturas. Esses sistemas buscam promover uma produção agrícola mais equilibrada e ecológica, reduzindo a dependência de insumos químicos e melhorando a saúde do solo e das culturas. A seguir, discutem-se as aplicações e resultados observados com o uso desses compostos em diferentes contextos agrícolas.

3.4.1 Metabólitos Secundários no Manejo integrado de Pragas (MIP)

No contexto do MIP, os metabólitos secundários oferecem uma alternativa ecológica e eficaz ao uso de pesticidas sintéticos, sendo empregados para o controle de uma ampla gama de pragas. Compostos como a azadiractina, extraída do nim, e espinosade, derivada de *Saccharopolyspora spinosa*, têm mostrado grande eficácia no controle de insetos-praga, como mosca-branca (*Bemisia tabaci*) e pulgões, sem prejudicar os inimigos naturais das pragas. Estudos de Borges et al. (2022) demonstraram que a azadiractina, aplicada em culturas de tomate e pepino, resultou em uma redução significativa da infestação de mosca-branca e pulgões, mantendo a biodiversidade no sistema agrícola.

Além disso, o uso de espinosade em grandes culturas, como milho e soja, tem mostrado resultados positivos na proteção contra pragas lepidópteras, como a *Spodoptera frugiperda*, sem afetar organismos benéficos, como as abelhas. A aplicação desses biopesticidas no MIP contribui para o controle das pragas de forma integrada, associando-os com outras estratégias, como controle biológico e práticas culturais sustentáveis, aumentando a resistência das culturas e diminuindo a dependência de produtos químicos sintéticos (Mattiello et al., 2021).

3.4.2 Aplicações em Agricultura Orgânica

Na agricultura orgânica, a utilização de metabólitos secundários é fundamental para o controle de pragas e doenças, uma vez que os produtos químicos sintéticos

são proibidos. Compostos bioativos, como os encontrados em óleos essenciais de plantas como eucalipto, tomilho e cravo-da-índia, têm demonstrado grande eficácia no controle de pragas de grãos armazenados, como gorgulhos e carunchos. A pesquisa de Isman (2020) documenta que o uso desses óleos essenciais em sistemas de cultivo orgânico de feijão e soja resultou em uma redução significativa da infestação de pragas sem impactar negativamente os organismos benéficos presentes no sistema.

Os extratos de nim também têm sido amplamente utilizados para controlar lagartas e moscas da fruta em cultivos orgânicos, como tomate e melancia. Zhang et al. (2019) observaram que, em cultivos de tomate, os extratos de nim reduziram significativamente a infestação de moscas da fruta, proporcionando uma alternativa segura para os agricultores, que podem reduzir o uso de produtos químicos em favor de biopesticidas naturais.

3.4.3 Metabólitos Secundários em Grandes Culturas

Em grandes culturas, como milho, soja e trigo, o uso de metabólitos secundários tem mostrado benefícios tanto no controle de pragas quanto na promoção do crescimento das plantas. Compostos derivados de terpenos e flavonoides têm sido aplicados em culturas de milho para reduzir os danos causados por pragas, como a *Spodoptera frugiperda*, uma das principais pragas do milho. A aplicação de extratos de mentol e geraniol em sistemas de cultivo de milho tem demonstrado resultados positivos na redução da infestação das larvas (Isman, 2020).

Além disso, o uso de extratos vegetais ricos em compostos fenólicos e terpenos também tem mostrado eficácia no controle de doenças causadas por patógenos fúngicos, como *Fusarium* e *Rhizoctonia*, que afetam culturas de grãos como soja e trigo. A aplicação de extratos de alho, que contêm alicina, tem sido usada para controlar nematoides fitopatogênicos em cultivos de soja e feijão, oferecendo uma alternativa ecológica aos nematicidas sintéticos (Mattiello et al., 2021).

3.4.4 Perspectivas de Integração e Sustentabilidade

Embora os metabólitos secundários mostrem grande potencial em sistemas agrícolas sustentáveis, ainda existem desafios importantes para sua adoção em larga escala. A variabilidade na produção desses compostos, sua instabilidade e as barreiras regulatórias são obstáculos significativos. Contudo, a engenharia metabólica, aliada a novas tecnologias, como o nanoencapsulamento, tem o potencial de aumentar a eficiência e estabilidade dos metabólitos secundários, facilitando sua utilização em sistemas agrícolas em grande escala (Mattiello et al., 2021).

A integração dos metabólitos secundários em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP) e na agricultura orgânica requer a capacitação dos agricultores, a implementação de novas tecnologias e a aprovação regulatória de biopesticidas naturais. As perspectivas futuras dependem da superação desses desafios, permitindo que esses produtos biológicos se tornem uma alternativa viável e eficiente aos pesticidas químicos convencionais, contribuindo para uma agricultura mais sustentável e ecológica.

3.5 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar do vasto potencial dos metabólitos secundários para a agricultura, sua adoção em larga escala enfrenta várias limitações técnicas, econômicas e regulatórias. Embora esses compostos bioativos mostrem grande promessa no controle de pragas, doenças e na promoção do crescimento vegetal, sua aplicação prática em sistemas agrícolas comerciais ainda é desafiadora. A seguir, discutem-se as principais limitações e as perspectivas futuras para o uso de metabólitos secundários na agricultura.

3.5.1 Limitações na Produção e Escalabilidade

Uma das principais limitações para a adoção dos metabólitos secundários em larga escala é a variabilidade na produção desses compostos, que pode ser influenciada por fatores ambientais, genéticos e de manejo agrícola. A quantidade e a qualidade dos metabólitos secundários variam amplamente entre as diferentes

culturas e condições de cultivo. Por exemplo, a concentração de azadiractina nos extratos de nim (*Azadirachta indica*) pode ser afetada por variáveis como clima, fertilidade do solo e estágio de crescimento da planta, o que dificulta a padronização dos biopesticidas para uso comercial (Mattiello et al., 2021).

A produção em larga escala de metabólitos secundários, como óleos essenciais e extratos vegetais, pode ser dispendiosa e difícil de realizar de maneira eficiente, especialmente quando se considera a necessidade de grandes quantidades de plantas para extrair os compostos desejados. Tecnologias como biotecnologia e engenharia metabólica, incluindo fermentação microbiana e biorreatores, têm sido exploradas para aumentar a produção desses compostos de maneira mais controlada e eficiente. Contudo, essas tecnologias ainda estão em estágios iniciais e precisam de investimentos substanciais para serem viáveis comercialmente (Borges et al., 2022).

3.5.2 Estabilidade e Persistência dos Compostos

Outra limitação importante é a instabilidade e a baixa persistência de muitos metabólitos secundários, especialmente os óleos essenciais e os terpenos. Muitos desses compostos possuem alta volatilidade, o que reduz sua eficácia ao longo do tempo e exige aplicações mais frequentes no campo. Óleos essenciais, como o óleo de eucalipto ou tomilho, são rapidamente degradados por exposição ao calor, luz solar ou oxidação, o que diminui sua eficácia como biopesticidas (Zhang et al., 2019). Esse problema de persistência limita sua adoção em larga escala, especialmente em cultivos extensivos, onde os custos com reaplicações contínuas podem ser elevados.

Soluções tecnológicas, como o nanoencapsulamento ou o uso de nanopartículas, têm sido sugeridas para aumentar a estabilidade e eficiência de metabólitos secundários. Essas tecnologias podem proteger os compostos bioativos de degradação rápida, melhorando sua liberação controlada e aumentando a persistência no campo. A pesquisa nesse campo está em expansão e pode representar um caminho promissor para superar essa limitação (Mattiello et al., 2021).

3.5.3 Desafios Regulatórios e Comerciais

Os desafios regulatórios representam um obstáculo significativo para a comercialização de biopesticidas e bioinsumos derivados de metabólitos secundários. Embora muitos desses compostos sejam de origem natural, sua aprovação para uso comercial segue um processo regulatório rigoroso, semelhante ao dos pesticidas sintéticos, o que implica em testes de eficácia e toxicologia extensivos. Em muitos países, a aprovação de biopesticidas naturais requer longos prazos e altos custos, o que pode dificultar a sua disponibilidade no mercado (Zhang et al., 2019). Além disso, a falta de padronização na qualidade e composição dos biopesticidas naturais dificulta a aprovação de normas regulatórias claras, tornando a regulamentação mais complexa.

Uma solução potencial seria a criação de caminhos regulatórios simplificados para biopesticidas naturais, como já ocorre em alguns países, onde produtos biológicos com provas de eficácia comprovada possam ser mais rapidamente autorizados para uso comercial. A colaboração entre a comunidade científica, indústria e órgãos reguladores será crucial para superar essas barreiras e promover a adoção mais ampla desses compostos na agricultura (Borges et al., 2022).

3.5.4 Potencial de Inovação e Avanços Tecnológicos

Apesar das limitações atuais, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras têm criado perspectivas para o uso de metabólitos secundários na agricultura. O avanço de biotecnologia, engenharia metabólica e nanotecnologia pode aumentar significativamente a eficiência e viabilidade econômica desses compostos.

Uma das inovações mais promissoras é o uso de biotecnologia para produção em larga escala de metabólitos secundários, utilizando plantas geneticamente modificadas ou microorganismos para a produção controlada desses compostos em bioreatores. Isso pode reduzir os custos de produção e melhorar a eficiência da extração. Além disso, o nanoencapsulamento de metabólitos secundários tem o

potencial de aumentar a estabilidade e a eficácia desses compostos, permitindo uma liberação controlada e uma aplicação mais eficiente no campo, com menor necessidade de reaplicações (Borges et al., 2022).

3.5.5 Integração com Práticas Sustentáveis

A utilização de metabólitos secundários está fortemente alinhada com os princípios de agricultura sustentável, agricultura orgânica e Manejo Integrado de Pragas (MIP). A aplicação desses compostos pode ser uma alternativa viável para reduzir a dependência de agrotóxicos sintéticos e melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Adoção de práticas sustentáveis, como a agricultura regenerativa e o uso de biopesticidas naturais, pode ser crucial para mitigar os impactos ambientais da agricultura convencional.

Além disso, o uso de metabólitos secundários oferece oportunidades para melhorar a qualidade dos produtos agrícolas e para aumentar a biodiversidade no ecossistema agrícola. Ao reduzir a contaminação por pesticidas sintéticos, esses produtos podem contribuir para cultivos mais saudáveis, com menos impactos na fauna benéfica e solo.

3.5.6 Futuro da Pesquisa

O futuro da pesquisa em metabólitos secundários se concentra no desenvolvimento de novos bioprodutos mais eficientes e acessíveis. A investigação dos efeitos sinérgicos entre diferentes classes de metabólitos, bem como o uso de estratégias de nanoencapsulação para melhorar a eficácia desses compostos, são áreas de intensa pesquisa. O foco deve estar em novas fontes desses compostos,

como microorganismos e plantas geneticamente modificadas, que podem ser produzidas em grande escala de maneira mais econômica e sustentável.

O avanço da biotecnologia verde e a parceria entre a academia e a indústria serão cruciais para o futuro desenvolvimento de produtos biológicos eficazes, alinhando a sustentabilidade com a produtividade agrícola. Ao superar as barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, os metabólitos secundários têm o potencial de se tornar uma solução central para um futuro mais verde e sustentável na agricultura.

4 CONCLUSÃO

Os metabólitos secundários emergem como uma alternativa promissora para o manejo sustentável de pragas e doenças, além de promoverem o crescimento vegetal. Esta revisão abordou os mecanismos de ação desses compostos e suas aplicações práticas, destacando como esses bioprodutos podem contribuir para um modelo agrícola mais sustentável, alinhado com as necessidades da agricultura orgânica e do Manejo Integrado de Pragas (MIP).

A pesquisa evidenciou que compostos como azadiractina, espinosade, terpenos e fenólicos são eficazes no controle de uma ampla gama de pragas e patógenos. Além disso, esses metabólitos promovem o crescimento vegetal e aumentam a resistência das plantas a estresses abióticos. Esses resultados reforçam a importância dos metabólitos secundários no contexto da agricultura sustentável, onde a redução do uso de agrotóxicos sintéticos é essencial para minimizar os impactos ambientais e garantir a saúde dos ecossistemas agrícolas.

No entanto, as limitações técnicas, como a variabilidade na produção e a instabilidade dos compostos, ainda representam desafios significativos para a adoção em larga escala. A instabilidade de muitos biopesticidas naturais, como óleos essenciais, exige aplicações frequentes, o que pode representar um obstáculo econômico para os agricultores. Além disso, as barreiras regulatórias para a aprovação de biopesticidas naturais dificultam sua disponibilidade comercial.

Apesar dessas limitações, as perspectivas futuras para o uso de metabólitos secundários são extremamente promissoras. Inovações em biotecnologia, engenharia metabólica e nanoencapsulação têm o potencial de aumentar a produção, a estabilidade e a eficiência desses compostos, tornando-os mais acessíveis e viáveis para os agricultores. O avanço dessas tecnologias, juntamente com uma maior colaboração entre pesquisadores, indústria e órgãos reguladores, será fundamental para superar as barreiras que ainda limitam a adoção desses compostos em larga escala.

Em conclusão, o uso de metabólitos secundários na agricultura representa uma alternativa sustentável e eficaz ao uso de agrotóxicos sintéticos. Embora os desafios atuais sejam significativos, as inovações tecnológicas oferecem grandes perspectivas para que esses compostos se tornem uma parte central do manejo fitossanitário moderno, promovendo uma agricultura mais ecológica, econômica e sustentável. O futuro dos bioprodutos derivados de metabólitos secundários depende da continuidade das pesquisas científicas e da implementação de soluções tecnológicas que possam tornar sua produção comercialmente viável e escalável, garantindo a sustentabilidade a longo prazo do setor agrícola global.

REFERÊNCIAS

AKTAR, M.; DHARMAPALAN, S.; SENGUPTA, D. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2009.

BORGES, A. et al. Recent advances in the use of secondary metabolites in plant protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 70, p. 7041-7054, 2022.

FAO. The state of food and agriculture 2022: leveraging food systems for affordable healthy diets. Rome: FAO, 2022. Available at: <http://www.fao.org/publications/sofa/2022/en/>. Accessed on: 10 May 2025.

GUERRA, D. A.; MONDELLI, D.; COSTA, M. M. Pesticide impact on agricultural ecosystems. *Science Progress*, v. 103, n. 2, p. 140-151, 2020.

GERSHENZON, J.; DUDAREVA, N. The function of terpenoids in plants. *Plant Physiology*, v. 145, p. 550-561, 2007.

HARBORNE, J. B.; WILLIAMS, C. A. Advances in flavonoid research. *Phytochemistry*, v. 50, n. 1, p. 29-50, 2000.

ISMAN, M. B. Plant essential oils for pest control. *Current Opinion in Insect Science*, v. 36, p. 14-21, 2020.

JASSBI, A. R. et al. Biological activities of plant secondary metabolites. In: *Bioactive Natural Products: Opportunities and Challenges for the Pharmaceutical Industry*, p. 45-68, 2010.

MARKETSANDMARKETS. Biopesticides market by type (bioinsecticides, biofungicides, bionematicides), origin (biological, botanical), crop type (cereals & grains, fruits & vegetables, oilseeds & pulses, others), formulation, mode of application, and region – global forecast to 2026. 2023. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/biopesticides.asp>. Accessed on: 10 May 2025.

MATTIELLO, L. et al. Plant secondary metabolites as bioactive agents for plant protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 69, p. 1220-1228, 2021.

PAUL, R. E.; SOUTHALL, M. The use of phenolic compounds for plant defense. *Botanical Journal of the Linnean Society*, v. 164, p. 105-119, 2020.

TAIZ, L. et al. Plant Physiology and Development. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2021.

WINK, M. Functions of plant secondary metabolites and their impact on human health. *Science Progress*, v. 99, p. 35-50, 2015.

SCHMIDT, J. et al. Metabolic diversity of secondary metabolites and their potential as bioactive compounds in agriculture. *Agricultural and Food Chemistry*, v. 70, n. 9, p. 4043-4051, 2022.

HASSAN, S. A. et al. Secondary metabolites in plant protection and growth regulation. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 2583, 2021.

ZHANG, X. et al. Secondary metabolites in plant protection and growth regulation. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 2583, 2019.

GUPTA, S. et al. Secondary metabolites as natural bioinsecticides for pest control: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 69, p. 72-83, 2020.

BORGHESI, P. et al. Recent advances in the use of secondary metabolites in plant protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 70, p. 7041-7054, 2022.

ZHAO, Z. et al. Pesticides and their impact on agricultural sustainability. *Sustainable Agriculture Reviews*, v. 50, p. 225-250, 2022.