



JOYCE AMÉLIA CARVALHO SILVA

**ATIVIDADE ANTIMICROBIANA E INSETICIDA DO ÓLEO
ESSENCIAL DE COMINHO (*CUMINUM CYMINUM*) E
CUMINALDEÍDO**

LAVRAS - MG

2026

JOYCE AMÉLIA CARVALHO SILVA

**ATIVIDADE ANTIMICROBIANA E INSETICIDA DO ÓLEO ESSENCIAL DE
COMINHO (*CUMINUM CYMINUM*) E CUMINALDEÍDO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agroquímica, área de concentração em Química/Bioquímica, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Maria das Graças Cardoso
Orientadora

LAVRAS - MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Joyce Amélia Carvalho.

Atividade antimicrobiana e inseticida do óleo essencial de Cominho (*Cuminum cyminum*) e Cuminaldeído / Joyce Amélia Carvalho Silva. - 2026.
69 p. : il.

Orientadora: Maria das Graças Cardoso

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Óleo essencial. 2. Cominho. 3. Atividade biológica. 4. Atividade inseticida. 5. Ergosterol. I. Cardoso, Maria das Graças. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

JOYCE AMÉLIA CARVALHO SILVA

**ATIVIDADE ANTIMICROBIANA E INSETICIDA DO ÓLEO ESSENCIAL DE
COMINHO (*CUMINUM CYMINUM*) E CUMINALDEÍDO**

**ANTIMICROBIAL AND INSECTICIDAL ACTIVITY OF CUMIN (*CUMINUM
CYMINUM*) ESSENTIAL OIL AND CUMINALDEHYDE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agroquímica, área de concentração em Química/Bioquímica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de maio de 2026

Dra. Maria das Graças Cardoso	UFLA
Dra. Gabriela Aguiar Campolina	AGEALI
Dr. Khalid Haddi	UFLA



Documento assinado digitalmente

MARIA DAS GRACAS CARDOSO

Data: 30/08/2026 22:53:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria das Graças Cardoso
Orientadora

LAVRAS - MG

2026

A Deus, por sempre estar comigo, em meio as dificuldades e por me fortalecer todos os dias!

Ao meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram a estudar!!

Aos meus irmãos Júlio e Juliano por sempre se fazerem presentes e me incentivarem!!

Ao Gustavo pelo apoio contínuo todos os dias!

À minha orientadora Profa. Maria das Graças Cardoso, pelos ensinamentos e por ter aberto
com todo carinho as portas do laboratório para mim!

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força, sabedoria e por me sustentar durante toda esta caminhada.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Química e ao Programa de Agroquímica, pela oportunidade de realização deste mestrado e por toda a estrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projeto CAG 2390/2018), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Projeto 311183/2022) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro e suporte à pesquisa, fundamentais para a realização deste estudo.

À minha orientadora, Professora Dra. Maria das Graças Cardoso, pela confiança, dedicação, paciência e pelos ensinamentos compartilhados ao longo desta trajetória. Sua orientação foi essencial para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao Professor Dr. Luís Roberto Batista e ao Professor Dr. Khalid Haddi, pelas contribuições, apoio e disponibilidade em auxiliar durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, João José e Cleunilda, por todo amor, incentivo, apoio incondicional e por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Esta conquista também é de vocês.

Aos meus irmãos Júlio e Juliano, pelo carinho, apoio e companheirismo em todos os momentos.

Ao meu namorado Gustavo, pela compreensão, incentivo, paciência e por estar ao meu lado durante toda esta caminhada.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Danubia, Carolina, Sara, Isadora, Wilder, Wilton e Juliana, pela amizade, ajuda, companheirismo e pelos momentos compartilhados no dia a dia da pesquisa.

Aos meus amigos da faculdade, Shênnia, Wanderléia, Marcos e Mariane, pela amizade, apoio e por tornarem esta trajetória mais leve e especial.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade, atenção e valiosas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

À todos agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação e fizeram parte desta importante etapa da minha vida.

RESUMO

Os alimentos estão sujeitos à contaminação por microrganismos e à infestação por insetos-praga durante o processamento e armazenamento, resultando em perdas quantitativas e qualitativas, além de riscos à saúde humana e animal. Nesse contexto, há uma crescente demanda por alternativas naturais aos compostos sintéticos utilizados no controle desses agentes, destacando-se os óleos essenciais como fontes promissoras de compostos bioativos. O presente estudo teve como objetivos avaliar as atividades antifúngica, bacteriana e inseticida do óleo essencial de *Cuminum cyminum* e de seu composto majoritário padrão, o cuminaldeído. A atividade antifúngica foi avaliada frente aos microorganismos *Penicillium citrinum* e *Fusarium verticillioides*, empregando ensaios de contato direto e fumigação, além da quantificação do teor de ergosterol. Determinou-se a atividade bacteriana estudando a concentração mínima inibitória (CMI) e concentração mínima bactericida (CMB), sobre as bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* utilizando o método de microdiluição em caldo. A atividade inseticida foi avaliada sobre adultos de *Sitophilus zeamais*, por meio de bioensaios de contato e fumigação. De forma geral, o óleo essencial e o composto majoritário apresentaram efeito inibitório sobre o crescimento fúngico, com redução do desenvolvimento micelial e alterações morfológicas nas colônias. Observou-se redução no teor de ergosterol, indicando comprometimento da integridade celular. Na avaliação antibacteriana, tanto o óleo essencial quanto o cuminaldeído apresentaram atividade frente a *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. O cuminaldeído apresentou maior atividade antibacteriana, com valores de CMI e CMB variando de 1,56 a 6,25 $\mu\text{L mL}^{-1}$, enquanto para o óleo essencial os valores variaram de 6,25 a 25 $\mu\text{L mL}^{-1}$, evidenciando seu potencial na inibição do crescimento bacteriano e na redução da viabilidade celular. Pelo teste inseticida, o óleo essencial apresentou maior eficácia na mortalidade dos insetos, enquanto o composto padrão demandou concentrações mais elevadas para efeito semelhante. Os resultados obtidos reforçam o potencial do óleo essencial de *C. cyminum* como alternativa natural no controle de microrganismos e insetos associados a alimentos.

Palavras-chave: óleo essencial; cominho; atividade biológica; atividade inseticida; ergosterol.

ABSTRACT

Food is subject to contamination by microorganisms and infestation by insect pests during processing and storage, resulting in quantitative and qualitative losses, as well as risks to human and animal health. In this context, there is a growing demand for natural alternatives to synthetic compounds used to control these agents, with essential oils standing out as promising sources of bioactive compounds. This study aimed to evaluate the antifungal, antibacterial, and insecticidal activities of *Cuminum cyminum* essential oil and its major standard compound, cuminaldehyde. Antifungal activity was evaluated against the microorganisms *Penicillium citrinum* and *Fusarium verticillioides*, using direct contact and fumigation assays, in addition to quantifying the ergosterol content. Bacterial activity was determined by studying the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* using the broth microdilution method. The insecticidal activity was evaluated on adult *Sitophilus zeamais* using contact and fumigation bioassays. In general, the essential oil and the major compound showed an inhibitory effect on fungal growth, with reduced mycelial development and morphological alterations in the colonies. A reduction in ergosterol content was observed, indicating compromised cellular integrity. In the antibacterial evaluation, both the essential oil and cuminaldehyde showed activity against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. Cuminaldehyde showed greater antibacterial activity, with MIC and MBC values ranging from 1.56 to 6.25 $\mu\text{L mL}^{-1}$, while for the essential oil the values ranged from 6.25 to 25 $\mu\text{L mL}^{-1}$, highlighting its potential in inhibiting bacterial growth and reducing cell viability. In insecticidal tests, the essential oil showed greater efficacy in killing insects, while the standard compound required higher concentrations for a similar effect. The results obtained reinforce the potential of *C. cyminum* essential oil as a natural alternative in the control of microorganisms and insects associated with food.

Keywords: essential oil; cumin; biological activity; insecticidal activity; ergosterol.

INDICADORES DE IMPACTO

A segurança e a qualidade dos alimentos constituem importantes desafios para a cadeia produtiva, especialmente em razão das perdas ocasionadas pela contaminação por fungos, bactérias e insetos-praga durante o armazenamento. Nesse contexto, a busca por alternativas naturais aos produtos químicos convencionais tem se tornado cada vez mais relevante, visando reduzir impactos ambientais, minimizar resíduos químicos e aumentar a segurança alimentar. Assim, a avaliação da atividade antifúngica, antibacteriana e inseticida do óleo essencial de *Cuminum cyminum* e de seu composto majoritário, o cuminaldeído, contribui para a geração de conhecimento científico sobre o potencial de compostos naturais no controle desses organismos. Os resultados obtidos poderão subsidiar o desenvolvimento de tecnologias voltadas à conservação de alimentos e grãos armazenados, favorecendo estratégias de controle mais sustentáveis e reduzindo perdas pós-colheita. Dessa forma, esta pesquisa apresenta potencial impacto científico, tecnológico, econômico, ambiental e social, ao contribuir para o fortalecimento da segurança alimentar, para a redução do uso de produtos sintéticos e para o incentivo ao desenvolvimento de alternativas naturais aplicáveis aos sistemas de armazenamento e conservação de alimentos.

IMPACT INDICATORS

Food safety and quality pose significant challenges for the production chain, particularly due to losses caused by contamination from fungi, bacteria, and insect pests during storage. In this context, the search for natural alternatives to conventional chemicals has become increasingly relevant, aiming to reduce environmental impacts, minimize chemical residues, and enhance food safety. Thus, evaluating the antifungal, antibacterial, and insecticidal activities of *Cuminum cyminum* essential oil and its major compound, cuminaldehyde, contributes to scientific knowledge regarding the potential of natural compounds to control these organisms. The results obtained could support the development of technologies for the preservation of stored foods and grains, fostering more sustainable control strategies and reducing post-harvest losses. Consequently, this research holds potential scientific, technological, economic, environmental, and social impact by contributing to strengthened food safety, reduced use of synthetic products, and the development of natural alternatives applicable to food storage and preservation systems.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	12
1	INTRODUÇÃO	12
	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Óleos essenciais	15
2.2	Biossíntese dos Óleos Essenciais	16
2.3	Espécie Vegetal	20
2.3.1	<i>Cuminum cyminum</i> (Cominho): Características Botânicas, Composição Química e Aplicações Terapêuticas	20
2.4	Atividades Biológicas	22
2.4.1	Atividade Antifúngica	22
2.4.1.1	<i>Penicillium Citrinum</i>	23
2.4.1.2	<i>Fusarium Verticilioides</i>	25
2.4.2	Ergosterol	26
2.4.3	Atividade Antibacteriana	28
2.4.4	<i>Staphylococcus aureus</i>	29
2.4.5	<i>Escherichia Coli</i>	30
2.4.6	Atividade Inseticida	31
2.4.7	<i>Sitophilus Zeamais</i>	32
	SEGUNDA PARTE – ARTIGO	35
	ARTIGO - ATIVIDADE ANTIMICROBIANA E INSETICIDA DO ÓLEO ESSENCIAL DE <i>CUMINUM CYMINUM</i> E DO CUMINALDEÍDO CONTRA MICRORGANISMOS E <i>SITOPHILUS ZEAMAI</i>S	36
	TERCEIRA PARTE	62
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS	63

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A segurança e a qualidade de alimentos têm se tornado temas de crescente relevância em âmbito global (Fao, 2023; Bennett e Klich, 2003), especialmente em função das perdas causadas por microrganismos e insetos durante o processamento e armazenamento. Fungos, bactérias e insetos-praga estão entre os principais agentes responsáveis por danos quantitativos e qualitativos, comprometendo não apenas o valor comercial dos produtos, mas também a saúde humana e animal (Who, 2022; Fao, 2023). No caso de fungos filamentosos, destaca-se ainda a produção de micotoxinas, substâncias tóxicas associadas a diversos efeitos adversos, incluindo potencial carcinogênico e nefrotóxico (Stoev, 2023; Who, 2022).

Entre os fungos de interesse em alimentos armazenados, espécies dos gêneros *Penicillium* e *Fusarium* são amplamente distribuídas e frequentemente associadas à deterioração de grãos e outros produtos agrícolas. A espécie *Penicillium citrinum*, por exemplo, é conhecida pela produção de citrinina, enquanto *Fusarium verticillioides* se destaca pela síntese de fumonisinas, micotoxinas com impacto significativo na saúde pública (Pitt e Hocking, 2009). Além disso, esses microrganismos apresentam elevada capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais, o que dificulta seu controle por métodos convencionais, como o uso de fungicidas químicos, conservantes sintéticos e estratégias físicas de armazenamento baseadas no controle de temperatura e umidade.

A contaminação bacteriana de alimentos representa um importante desafio para a segurança alimentar e a saúde pública. Espécies como *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* são frequentemente utilizadas como indicadores de contaminação e estão associadas a surtos de doenças transmitidas por alimentos (Who, 2022). A crescente resistência dessas bactérias a antimicrobianos disponíveis tem intensificado a busca por alternativas eficazes e seguras para seu controle.

Além dos microrganismos, insetos-praga, como o gorgulho-do-milho (*Sitophilus zeamais*), desempenham papel relevante nas perdas pós-colheita, especialmente em sistemas de armazenamento de grãos (Nwosu, 2018; Phokwe *et al.*, 2023). Esses insetos são capazes de se desenvolverem no interior dos grãos, dificultando o controle e favorecendo a disseminação de infestações, além de contribuir indiretamente para a contaminação por fungos e micotoxinas (Lorini, 2008; Pinto *et al.*, 2020).

Tradicionalmente, o controle desses agentes tem sido realizado por meio da utilização de fungicidas, bactericidas e inseticidas sintéticos. Entretanto, o uso contínuo e indiscriminado

desses compostos tem favorecido o desenvolvimento de resistência microbiana e de insetos-praga, além de gerar preocupações relacionadas à presença de resíduos em alimentos, contaminação ambiental e riscos à saúde humana e animal (Isman, 2006; Who, 2020; Aslam *et al.*, 2021). Nesse contexto, cresce mundialmente a demanda por estratégias alternativas mais seguras, sustentáveis e ambientalmente compatíveis, especialmente aquelas baseadas em compostos naturais bioativos (Pavela *et al.*, 2022; Ali *et al.*, 2023).

Dentre essas alternativas, os óleos essenciais têm se destacado como fontes promissoras de compostos biologicamente ativos, apresentando ampla atividade antifúngica, antibacteriana e inseticida (Bakkali *et al.*, 2008; Mutlu-Ingok *et al.*, 2020; Iskandar *et al.*, 2025). Esses metabólitos naturais são constituídos predominantemente por monoterpenos, sesquiterpenos e fenilpropanoides, compostos caracterizados pela elevada reatividade química e capacidade de interação com membranas celulares, proteínas e estruturas fisiológicas de microrganismos e insetos (Simões *et al.*, 2017; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012.; Moustafa; El-Sayed; Youssef, 2023). Os fenilpropanoides, em especial, têm sido amplamente associados à atividade antimicrobiana e inseticida devido à sua capacidade de alterar a permeabilidade membranar, interferir em processos metabólicos celulares e atuar sobre mecanismos neurológicos de organismos-alvo (Pavela; Benelli, 2016; Isman, 2020).

Entre os óleos essenciais de interesse, destaca-se o obtido de *Cuminum cyminum* (cominho), amplamente utilizado na indústria alimentícia e reconhecido por suas propriedades biológicas (Souza *et al.*, 2021). Embora o cuminaldeído seja frequentemente descrito como o principal constituinte bioativo do óleo, outros compostos, como a E-carvona, também podem estar presentes em concentrações expressivas e contribuir para as atividades biológicas observadas. Esses compostos têm sido associados a diferentes mecanismos de ação, incluindo interferência em membranas celulares, alterações metabólicas e efeitos sobre sistemas fisiológicos essenciais (Kedia *et al.*, 2014; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

Dentre os mecanismos envolvidos na atividade antifúngica, destaca-se a interferência na biossíntese de ergosterol, principal esterol presente na membrana plasmática de fungos. Alterações nos níveis desse composto comprometem a integridade, fluidez e funcionalidade da membrana celular, resultando em prejuízos ao crescimento, desenvolvimento e viabilidade dos microrganismos (Silva *et al.*, 2010; Brandão, 2021). Dessa forma, a quantificação de ergosterol tem sido amplamente empregada como ferramenta indicadora de danos celulares e avaliação da atividade antifúngica de diferentes compostos bioativos. Estudos recentes demonstram que óleos essenciais e seus constituintes majoritários podem reduzir significativamente os níveis de ergosterol em fungos filamentosos, indicando interferência direta na organização da membrana

plasmática e em processos metabólicos essenciais ao desenvolvimento fúngico (Nazarpour *et al.*, 2022; Iskandar *et al.*, 2025).

O presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial biológico do óleo essencial de *Cuminum cyminum* e de seu composto majoritário, o cuminaldeído, por meio de ensaios contra fungos, bactérias e insetos, bem como investigar seus efeitos sobre a biossíntese de ergosterol em fungos de interesse.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Óleos Essenciais

Os óleos essenciais (OEs) são misturas complexas de compostos voláteis produzidos pelo metabolismo secundário de plantas aromáticas, podendo ser obtidos a partir de diferentes órgãos vegetais, como folhas, flores, frutos, sementes, cascas e raízes, principalmente por hidrodestilação, destilação a vapor ou prensagem mecânica no caso de frutos cítricos (Simões *et al.*, 2017). Esses metabólitos são constituídos predominantemente por monoterpenos, sesquiterpenos e fenilpropanoides, compostos responsáveis pelas propriedades aromáticas e por diversas atividades biológicas atribuídas aos óleos essenciais (Brandão, 2021). Em função de sua composição química, os OEs apresentam elevada capacidade de interação com membranas celulares, proteínas e diferentes sistemas fisiológicos, sendo amplamente investigados quanto às suas aplicações nas áreas alimentícia, farmacêutica, cosmética e agrícola (Mutlu-Ingok *et al.*, 2020; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

Atualmente, os óleos essenciais têm despertado crescente interesse científico devido ao seu potencial terapêutico e tecnológico, podendo apresentar atividades antioxidante, anti-inflamatória, antifúngica, antibacteriana e inseticida (Brandão, 2021; Pinto *et al.*, 2021; Isman, 2020). Essas propriedades estão associadas à presença de compostos bioativos capazes de interagir com membranas celulares e sistemas fisiológicos de microrganismos e insetos, promovendo alterações estruturais e metabólicas que comprometem a sobrevivência dos organismos-alvo (Pavela; Benelli, 2016; Nazarpour *et al.*, 2022).

Na natureza, os óleos essenciais desempenham importante função na defesa química das plantas contra herbívoros, insetos e microrganismos, além de participarem de processos relacionados à comunicação e adaptação vegetal (Bakkali *et al.*, 2008). Em virtude de suas propriedades biológicas e aromáticas, esses compostos vêm sendo amplamente explorados em diferentes segmentos industriais, destacando-se nas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética e agrícola, com aplicações relacionadas à conservação de alimentos, desenvolvimento de produtos terapêuticos e formulações de higiene e cuidados pessoais (EL Asbahani *et al.*, 2015; Mutlu-Ingok *et al.*, 2020).

Simões *et al.* (2017), citam que os óleos essenciais são uma mistura complexa de compostos orgânicos que podem ser chamados de óleos voláteis, etéreos ou essências. Tais denominações derivam-se de suas características físico-químicas; líquidos de aparência oleosa, voláteis, comumente apresentarem aroma agradável e intenso e serem solúveis em solventes

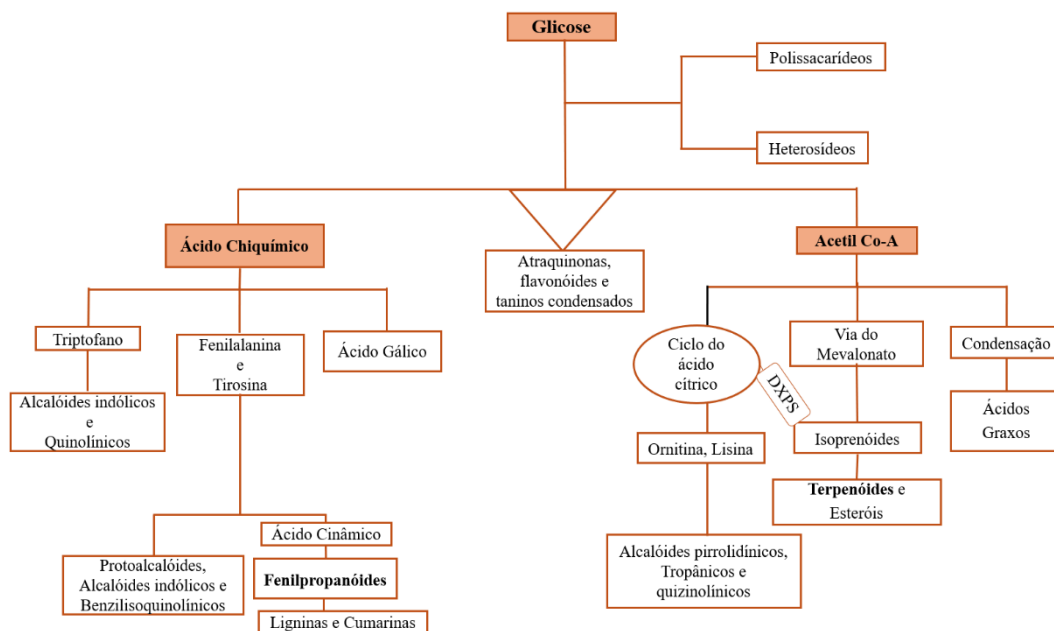
orgânicos apolares. Além dessas características, eles são normalmente incolores ou ligeiramente amarelados, com exceção dos óleos de camomila e mil folhas, que apresentam altos teores de azulenos conferindo-lhes a coloração azul, são pouco estáveis na presença de luz, calor, umidade e metais; a maioria possui índice de refração e são opticamente ativos (Simões *et al.*, 2017).

A estrutura química dos constituintes dos óleos essenciais é formada basicamente por carbono, oxigênio e hidrogênio, variando em relação à função orgânica, como hidrocarbonetos terpênicos, álcoois simples e terpênicos, aldeídos, cetonas, fenois, ésteres, éteres, óxidos, entre outros (Simões *et al.*, 2017). Os óleos essenciais podem conter aproximadamente entre 20-60 componentes em diferentes concentrações (Bakkali *et al.*, 2008). Os que apresentam maior concentração são denominados compostos majoritários, os de menor proporção denominados compostos minoritários e aqueles componentes em concentrações mínimas são conhecidos como traços (Simões *et al.*, 2017; Bakkali *et al.*, 2008). Estes podem ser sintetizados por todos os órgãos das plantas, entre eles, botões florais, flores, folhas, caule, galhos finos, sementes, frutos, raízes e cascas, e são estocados em células secretoras, cavidades, canais, células epidérmicas ou tricomas glandulares (Bakkali *et al.*, 2008; Simões *et al.*, 2017).

2.2 Biossíntese dos Óleos Essenciais

Os óleos essenciais são constituídos em sua maioria por fenilpropanoides e terpenos, obtidos a partir do metabolismo da glicose (Figura 1). Os fenilpropanoides são sintetizados pela via do chiquimato e os terpenos, terpenoides e seus derivados pela via do acetato (rota do mevalonato ou do 5 – fosfato de 1 – deoxi – D – xilulose (DXPS)).

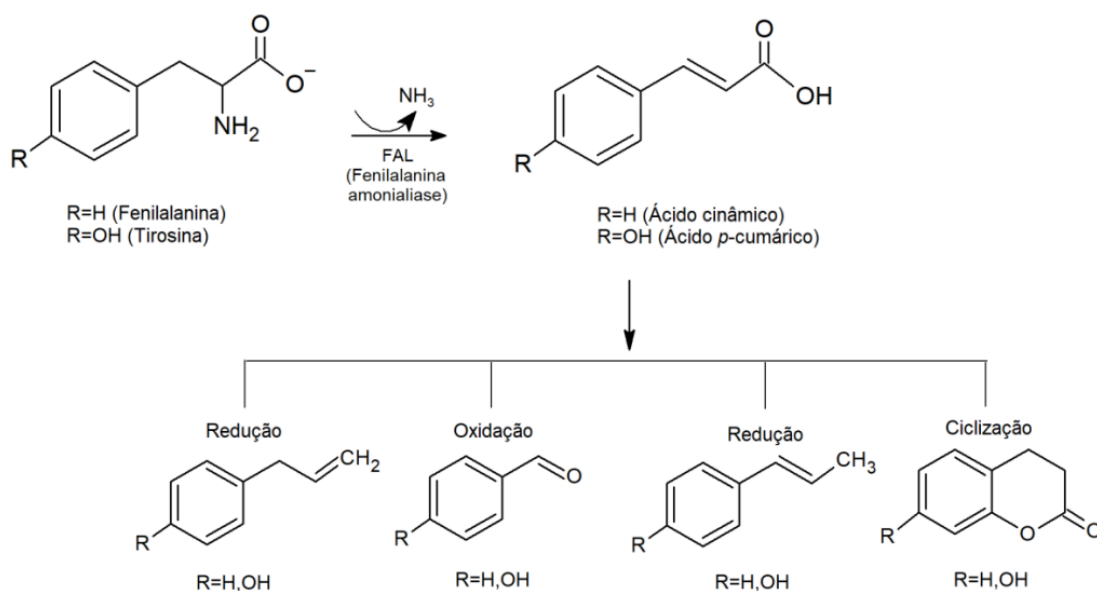
Figura 1 – Metabolismo da Glicose



Fonte: Simões et al (2017)

A biossíntese dos fenilpropanóides ocorre por meio da via do ácido chiquímico, formada a partir da condensação aldólica de fosfoenolpiruvato e eritrose-4-fosfato. Quando formado, o ácido chiquímico reage com uma molécula de fosfoenolpiruvato, gerando o ácido corísmico, que é responsável pela síntese de aminoácidos aromáticos (fenilalanina e a tirosina). Esses aminoácidos, por meio da perda de uma molécula de amônia, dão origem aos ácidos cinâmicos e *p*-cumárico, respectivamente. Os ácidos cinâmicos e *p*-cumárico, por sua vez, sofrem inúmeras reações de redução enzimática, formando propenilbenzenos e/ou alilbenzenos, que são oxidados com degradação das cadeias laterais e ciclização a fenilpropanóides (Simões *et al.*, 2017). A ilustração do mecanismo simplificado da formação dos fenilpropanóides por meio do ácido chiquímico pode ser observada na Figura 2.

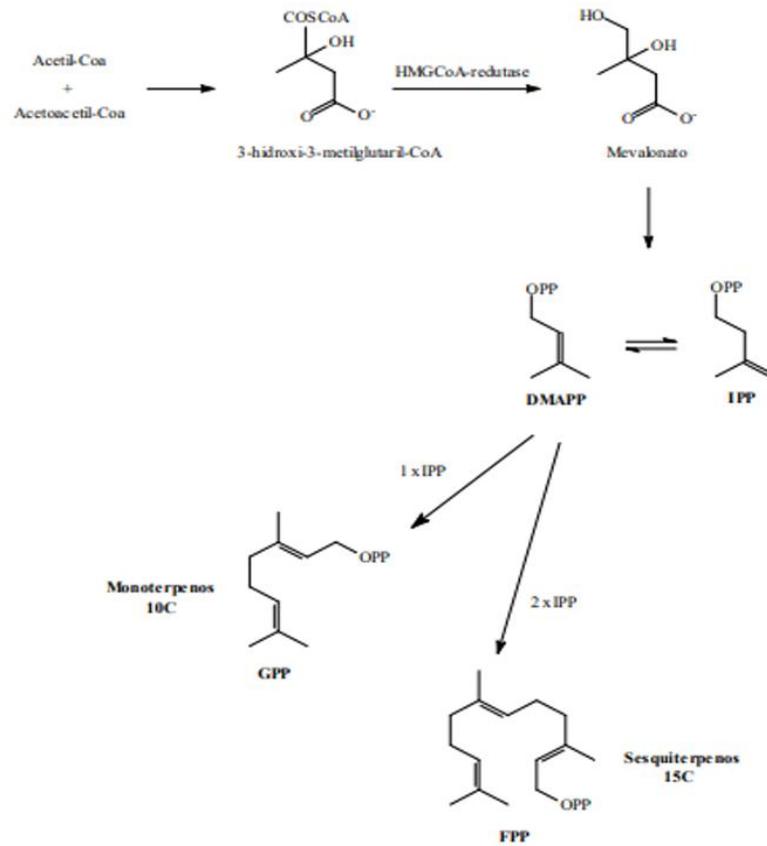
Figura 2 – Mecanismo simplificado da formação dos fenilpropanoides



Fonte: Adaptado de Simões *et al.* (2017)

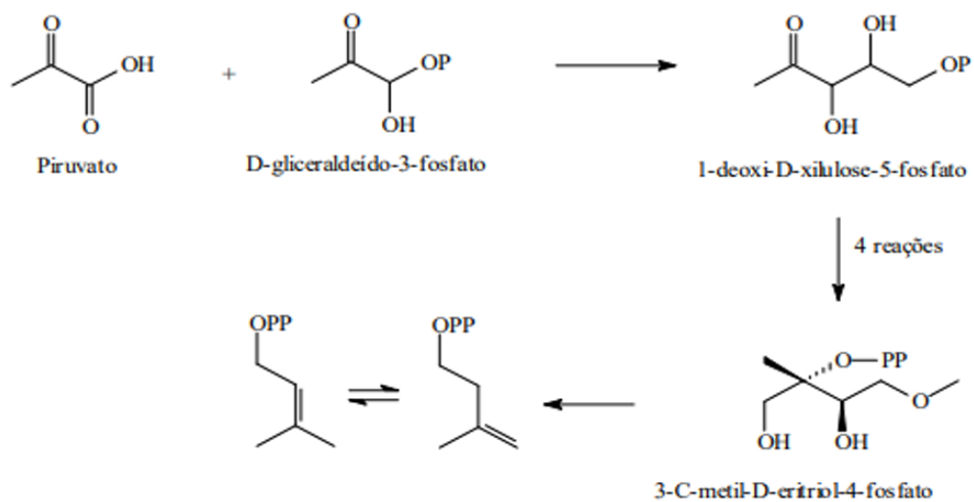
Os compostos terpênicos são biossintetizados a partir das moléculas fosforiladas e ativas isopentenil difosfato (IPP) e seu isômero dimetilalil difosfato (DMAPP). A síntese para a formação dos intermediários básicos (IPP e DMAPP), ocorre por meio de duas vias independentes localizadas em compartimentos intracelulares separados, no citosol, o IPP é formado por meio da via do mevalonato através da condensação do acetil CoA (Figura 3) e nos plastídios formado por meio do piruvato e gliceraldeído 3-fosfato por meio do fosfato de metileritritol, seguindo a via do DXPS (Figura 4) (Simões *et al.*, 2017). Os terpenos são classificados pela quantidade de unidades isoprênicas, uma única unidade é conhecida como hemiterpenos, quando dois isoprenos se juntam ocorre a formação dos monoterpenos (10 átomos de carbonos), já a junção de três unidades isoprênicas origina os sesquiterpenos (15 átomos de carbonos), e assim por diante (Simões *et al.*, 2017).

Figura 3 – Biossíntese dos terpenos pela via do mevalonato



Fonte: Adaptado de Simões *et al.* (2017)

Figura 4 – Biossíntese dos terpenos pela via do DXPS



Fonte: Dewick, (2008)

2.3 Espécie Vegetal

2.3.1 *Cuminum cyminum* (Cominho): Características Botânicas, Composição Química e Aplicações Terapêuticas

O cominho (*Cuminum cyminum* L.) é uma planta herbácea anual pertencente à família Apiaceae, amplamente utilizada como especiaria e reconhecida por suas propriedades medicinais e biológicas. Seu cultivo está concentrado principalmente em países como Índia, Irã e China, embora seu uso seja difundido globalmente, sendo considerado um dos condimentos mais consumidos no mundo (Zaky; Shim; ABD El-aty, 2021; ALI *et al.*, 2023). Além da importância culinária, o cominho tem despertado crescente interesse científico devido ao potencial biológico do seu óleo essencial, especialmente em aplicações antifúngicas, antibacterianas e inseticidas (Pavela *et al.*, 2022). A Figura 5 apresenta o aspecto geral dos grãos de *Cuminum cyminum*, principal matéria-prima utilizada para obtenção do óleo essencial

Figura 5 – Aspecto geral dos grãos de *Cuminum cyminum* (cominho)



Fonte: Da autora (2025)

Além de sua importância na culinária, o cominho apresenta longa tradição na medicina popular, sendo empregado no tratamento de distúrbios gastrointestinais, infecções respiratórias e outras condições clínicas, como diarreia, dispepsia e icterícia (Miri; Djenane, 2018; Moustafa; EL-Sayed; Youssef, 2023). Os frutos secos da planta, frequentemente denominados sementes,

constituem a principal fonte de compostos bioativos, especialmente do óleo essencial (Ghasemi *et al.*, 2022).

O óleo essencial de *C. cuminum* é uma mistura complexa de compostos voláteis, cuja composição química pode variar significativamente em função de fatores como origem geográfica, condições ambientais, estágio de maturação da planta e método de extração empregado. Essas variações influenciam diretamente o rendimento e as propriedades biológicas do óleo essencial (Gobbo-Neto; Lopes, 2007; Hashemi; Khaneghah; Sant'Ana, 2018).

De modo geral, o óleo essencial de cominho é composto predominantemente por monoterpenos e compostos oxigenados, destacando-se o cuminaldeído como o principal constituinte. Outros compostos frequentemente identificados incluem *p*-cimeno, γ -terpineno, β -pineno e α -terpineno, embora em proporções variáveis (Miri; Djenane, 2018; Ghasemi *et al.*, 2022). Em diferentes estudos de caracterização química, o cuminaldeído tem sido consistentemente reportado como o composto majoritário, podendo atingir concentrações superiores a 60% do óleo essencial (Miri; Djenane, 2018). No presente estudo, o cuminaldeído também foi identificado como constituinte majoritário do óleo essencial de cominho, correspondendo a 42,30% da composição química, seguido por *E*-carvona (15,38%), limoneno (8,51%) e *p*-cimeno (2,54%).

O cuminaldeído, constituinte majoritário do óleo essencial de cominho, exerce importante influência sobre suas propriedades sensoriais e biológicas. Esse composto, pertencente à classe dos aldeídos aromáticos, apresenta elevada reatividade química, sendo capaz de interagir com proteínas e estruturas celulares de microrganismos, o que contribui para suas atividades antimicrobianas (Hyltdgaard; Mygind; Meyer, 2012). Além do cuminaldeído, outros compostos presentes no óleo essencial, como a *E*-carvona, o limoneno e o *p*-cimeno, também podem contribuir para as atividades biológicas observadas. Esses compostos apresentam diferentes grupos funcionais e mecanismos de ação, atuando de forma complementar e, em alguns casos, sinérgica sobre microrganismos e insetos. (Moustafa; EL-Sayed; Youssef, 2023; Nostro *et al.*, 2005).

O óleo essencial de *C. cuminum* tem sido amplamente investigado quanto ao seu potencial antimicrobiano, demonstrando eficácia contra diferentes microrganismos, incluindo bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, bem como fungos de importância clínica e alimentar (Miri; Djenane, 2018; Campolina *et al.*, 2024). Estudos indicam que esse óleo pode atuar inibindo o crescimento microbiano mesmo em baixas concentrações, o que evidencia seu potencial para aplicação como conservante natural em alimentos (Ghasemi *et al.*, 2022).

Nesse contexto, pesquisas têm demonstrado a eficácia do óleo essencial de cominho na inibição de microrganismos como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Bacillus cereus*, além de sua capacidade de atuar na preservação de alimentos quando incorporado a sistemas de embalagem ativa (Ghasemi *et al.*, 2022). Adicionalmente, sua atividade antifúngica também tem sido relatada, incluindo a inibição do crescimento de fungos toxigênicos e a redução da produção de micotoxinas, o que reforça seu potencial na segurança dos alimentos (Miri; Djenane, 2018).

Além da atividade antimicrobiana, o óleo essencial de cominho apresenta propriedades inseticidas, sendo considerado promissor no controle de pragas agrícolas e de armazenamento. Estudos relatam sua eficácia contra diferentes espécies de insetos, incluindo pragas de grãos armazenados e culturas agrícolas, ampliando suas possibilidades de aplicação no manejo integrado de pragas (Sadeghi *et al.*, 2019; El-Sayed; Yousef, 2021; Rosa *et al.*, 2020; Abdelaal *et al.*, 2021).

Dessa forma, o cominho e seu óleo essencial destacam-se como fontes relevantes de compostos bioativos, com aplicações potenciais nas indústrias alimentícia, farmacêutica e agrícola. A variabilidade de sua composição química, aliada à diversidade de atividades biológicas, reforça a importância de estudos que visem sua caracterização e exploração em diferentes contextos científicos.

2.4 Atividades Biológicas

2.4.1 Atividade Antifúngica

Os alimentos apresentam elevada suscetibilidade à contaminação por microrganismos durante as etapas de manipulação e processamento, uma vez que constituem ambientes ricos em nutrientes, favorecendo o crescimento de bactérias e fungos. Nesse contexto, estratégias de controle microbiológico são essenciais para garantir a segurança e a qualidade dos produtos alimentícios (Mainardi; Bidoia, 2024; Karanth *et al.*, 2023).

Devido à sua ampla atividade biológica, os óleos essenciais têm sido investigados como alternativas naturais para o controle de microrganismos em sistemas agrícolas e na conservação de alimentos. O interesse por esses compostos aumentou significativamente nos últimos anos, principalmente em função do avanço da resistência microbiana aos antimicrobianos convencionais e das preocupações relacionadas aos impactos toxicológicos e ambientais

causados pelo uso excessivo de conservantes sintéticos (Pinto *et al.*, 2021; Brandão, 2021; Silva *et al.*, 2022). Nesse contexto, compostos voláteis naturais têm se destacado devido às suas propriedades antimicrobianas, antioxidantes e biodegradáveis, apresentando potencial promissor para aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica e agrícola (Moraes *et al.*, 2023).

Além disso, estudos recentes demonstram que a incorporação de óleos essenciais em sistemas de conservação, como filmes e revestimentos ativos, pode contribuir para o aumento da vida de prateleira dos alimentos, reduzindo o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos, sem comprometer as características sensoriais dos produtos (Khan *et al.*, 2023; Ribeiro-Santos *et al.*, 2021).

Métodos tradicionais de controle da contaminação fúngica, como o uso de fungicidas químicos e tratamentos físicos, incluindo tratamento térmico, irradiação e controle da atividade de água durante o armazenamento, embora eficazes, apresentam limitações relacionadas à toxicidade, presença de resíduos e possível desenvolvimento de resistência microbiana. Dessa forma, a busca por alternativas mais seguras e sustentáveis tem impulsionado o estudo de compostos naturais, como os óleos essenciais (Brandão *et al.*, 2021; Nikolić *et al.*, 2021).

A atividade antifúngica desses compostos está associada à presença de substâncias lipofílicas, como terpenos, fenilpropanoides e aldeídos, capazes de interagir com estruturas celulares fúngicas, promovendo alterações na permeabilidade da membrana, desorganização estrutural e comprometimento de funções metabólicas essenciais. Além disso, esses compostos podem atuar na inibição do crescimento micelial, na redução da esporulação e na indução de estresse oxidativo, contribuindo para a diminuição da viabilidade celular fúngica (Burt, 2004; Nikolić *et al.*, 2021; Ribeiro-Santos *et al.*, 2021).

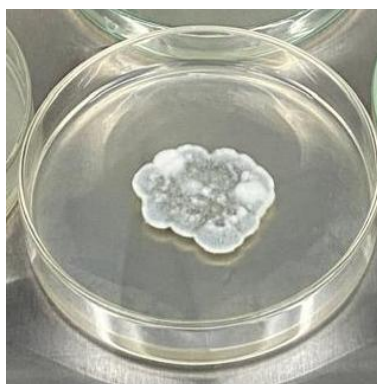
2.4.1.1 *Penicillium Citrinum*

O gênero *Penicillium* compreende fungos filamentosos de ampla ocorrência ambiental, sendo frequentemente encontrados no solo, no ar e em diversos substratos orgânicos (Pitt; Hocking, 2009). Espécies desse gênero estão associadas tanto a processos biotecnológicos benéficos quanto a efeitos deletérios, especialmente relacionados à deterioração de alimentos (Carvalho *et al.*, 2024; Pitt; Hocking, 2009). Em produtos armazenados, sua presença pode resultar em alterações sensoriais como mudanças de cor, odor e sabor além da síntese de

micotoxinas, o que compromete a segurança alimentar (Pitt; Hocking, 2009; Franco; Landgraf, 2008).

Dentro desse grupo, destaca-se o *Penicillium citrinum*, espécie recorrente na contaminação de grãos e derivados. Este microrganismo é frequentemente encontrado em produtos armazenados e tem sido associado à deterioração de alimentos em diferentes condições ambientais (Carvalho *et al.*, 2024; Pitt; Hocking, 2009). Além das perdas econômicas decorrentes da depreciação da qualidade do produto, o *P. citrinum* representa um risco à saúde humana e animal devido à produção de citrinina, uma micotoxina com potencial nefrotóxico (Kamle *et al.*, 2022). A Figura 6 apresenta aspectos morfológicos de *Penicillium citrinum*.

Figura 6 – Aspecto geral do fungo *Penicillium Citrinum*



Fonte: Da autora (2025)

No contexto da segurança de alimentos, o controle deste fungo torna-se essencial, especialmente em condições de elevada umidade que favorecem a produção de citrinina. Entretanto, a crescente demanda por alternativas aos conservantes sintéticos tem impulsionado a investigação de óleos essenciais como agentes naturais de controle. Os compostos presentes no óleo essencial são constituídos por metabólitos secundários como terpenos, fenilpropanoides e aldeídos, apresentam atividade antifúngica relevante, atuando na inibição do crescimento micelial, na redução da esporulação e na interferência em processos metabólicos essenciais ao patógeno (Burt, 2004; Nikolić *et al.*, 2021).

A eficácia desses agentes biológicos está diretamente vinculada à sua composição química e concentração. De modo geral, compostos com maior reatividade, como aldeídos e fenilpropanoides, tendem a apresentar atividade biológica superior, reforçando o potencial dos óleos essenciais no manejo de fungos toxigênicos em matrizes alimentares (Brandão, 2020).

A suscetibilidade de *P. citrinum* a esses compostos naturais decorre da interação direta de constituintes lipofílicos com sua estrutura celular. Essa dinâmica altera a permeabilidade da membrana plasmática e desestabiliza o sistema enzimático do microrganismo. Consequentemente, além da inibição do desenvolvimento micelial, observa-se o comprometimento das vias metabólicas responsáveis pela biossíntese de micotoxinas, o que reforça a viabilidade do uso de bioprodutos no controle desse patógeno (Bakkali *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2019).

2.4.1.2 *Fusarium Verticillioides*

O fungo *Fusarium verticillioides* demonstrado na figura 7, pertence a um gênero composto por espécies filamentosas onipresentes no ambiente, com ocorrência comum em solos, resíduos vegetais e produtos agrícolas. Tais microrganismos apresentam elevada capacidade de colonização de substratos orgânicos, sendo protagonistas na deterioração de grãos. Além disso, a relevância do gênero no contexto da segurança alimentar é ampliada pela sua capacidade de sintetizar micotoxinas (Pitt; Hocking, 2009; Logrieco *et al.*, 2002).

Embora seja encontrado em diferentes matrizes, o *F. verticillioides* é classicamente associado ao milho, seu principal hospedeiro, podendo colonizar a cultura ainda no campo e persistir durante a etapa de pós-colheita (Tran *et al.*, 2021; Omotayo *et al.*, 2023). Essa contaminação é favorecida por condições inadequadas de armazenamento, danos mecânicos aos grãos e fatores ambientais propícios ao desenvolvimento fúngico, contribuindo para a produção de fumonisinas, metabólitos de reconhecida importância toxicológica para humanos e animais (Anumudu *et al.*, 2024; Perrone; Logrieco; Visconti, 2020).

Khosravi, Shokri e Mokhtari (2015) avaliaram a ação do óleo essencial de *Cuminum cyminum* sobre cepas de *Fusarium verticillioides* produtoras de fumonisinas e verificaram redução do crescimento fúngico e da expressão do gene FUM1, diretamente relacionado à biossíntese dessas micotoxinas. Os autores destacaram que a atividade antifúngica observada pode estar associada à presença de compostos majoritários, como o cuminaldeído, reforçando o potencial do óleo essencial de cominho como alternativa natural para o controle desse patógeno em grãos armazenados (Khosravi; Shokri; Mokhtari, 2015).

Figura 7 – Aspecto geral do fungo *Fusarium Verticillioides*



Fonte: Da autora (2026)

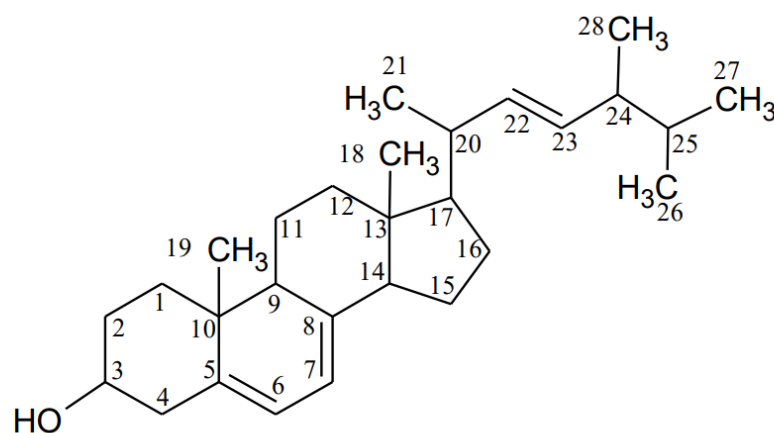
Nesse contexto, compostos naturais, como os óleos essenciais, têm sido amplamente investigados como alternativas promissoras no controle de fungos associados a alimentos armazenados. A atividade antifúngica desses compostos está relacionada à sua capacidade de atuar sobre diferentes alvos celulares, comprometendo o crescimento e a viabilidade fúngica por meio da inibição do desenvolvimento micelial e da germinação de esporos (Burt, 2004).

Adicionalmente, a ação desses metabólitos secundários está atrelada a alterações estruturais na membrana plasmática. O foco recai sobre o ergosterol, componente essencial para a manutenção da homeostase fúngica; sua modificação ou depleção resulta em desorganização da bicamada lipídica e aumento da permeabilidade, consolidando o efeito antifúngico observado.

2.4.2 Ergosterol

O ergosterol é o principal esterol da membrana plasmática fúngica, desempenhando papel fundamental na manutenção da estrutura, fluidez e funcionalidade celular. Sua presença é determinante para a integridade da bicamada lipídica, atuando na regulação da permeabilidade seletiva, no transporte de substâncias e na organização de proteínas transmembrana (Weete *et al.*, 2010; Jordá; Puig, 2020). A estrutura química do ergosterol está apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura química do ergosterol



Fonte: Da autora (2026)

A biossíntese desse composto ocorre por meio de uma via metabólica complexa, considerada um dos alvos primordiais para agentes antifúngicos. Alterações nessa rota resultam em modificações estruturais que comprometem a viabilidade celular (Ahmad *et al.*, 2010). Nesse contexto, a quantificação do ergosterol é amplamente empregada como marcador bioquímico; sua redução indica interferência na biossíntese ou danos estruturais diretos, correlacionando-se à perda da integridade celular e à inibição do crescimento fúngico (Brandão, 2021; Pinto *et al.*, 2021).

A diminuição dos níveis de ergosterol pode ocorrer por diferentes mecanismos, como a inibição enzimática ou a degradação indireta por estresse oxidativo. Compostos presentes em óleos essenciais, especialmente monoterpenos e fenóis, possuem natureza lipofílica, o que lhes permite interagir com os lipídios da membrana, alterando sua estabilidade (Hyltdgaard; Mygind; Meyer, 2012). Essas alterações bioquímicas frequentemente manifestam-se em danos morfológicos detectáveis por análises microscópicas, incluindo deformações de hifas, comprometimento de conídios e desorganização citoplasmática (Nikolić *et al.*, 2021).

Adicionalmente, evidências indicam que a integridade da membrana está intrinsecamente ligada à regulação do metabolismo secundário. Assim, a redução do ergosterol tem sido associada à menor produção de micotoxinas em fungos toxigênicos, impactando não apenas o desenvolvimento radial do microrganismo, mas também sua capacidade de síntese de compostos nocivos (Perrone; Logrieco; Visconti, 2020).

Dessa forma, a análise desse esterol constitui uma ferramenta essencial para elucidar o mecanismo de ação de agentes antifúngicos. Ao correlacionar alterações bioquímicas com efeitos fisiológicos, torna-se possível validar a eficácia de óleos essenciais no controle de fungos de relevância agrícola e alimentar.

2.4.3 Atividade Antibacteriana

O fenômeno da resistência bacteriana a antibióticos consolidou-se como um dos maiores desafios de saúde pública global, comprometendo a eficácia de tratamentos convencionais e favorecendo a recorrência de infecções. Diante da necessidade premente por novas vias terapêuticas, a investigação de metabólitos de origem vegetal tem se intensificado, destacando-se o potencial antimicrobiano de produtos naturais (Who, 2020; Ventola, 2021; Aslam *et al.*, 2021).

Dentre essas alternativas, os óleos essenciais recebem atenção significativa devido à sua composição rica em terpenos e compostos fenólicos. Tais substâncias podem atuar de forma isolada ou em sinergismo com antibióticos, potencializando a eficácia clínica e contribuindo para o manejo da resistência microbiana (Burt, 2004; Wińska *et al.*, 2019; Mutlu-Ingok *et al.*, 2020).

A atividade antibacteriana desses óleos está intrinsecamente ligada ao seu caráter lipofílico, que permite a interação direta com a membrana celular. Essa dinâmica promove a desorganização da bicamada lipídica e o aumento da permeabilidade, resultando no extravasamento de constituintes intracelulares essenciais e na consequente morte do patógeno (Mutlu-Ingok *et al.*, 2020; Angane *et al.*, 2022). Somado a isso, esses compostos podem interferir em processos metabólicos vitais, como a produção de ATP e o sistema de comunicação celular (*quorum sensing*), reduzindo a virulência e a formação de biofilmes (Aslam *et al.*, 2021).

Diversas espécies vegetais, especialmente as ricas em aldeídos e compostos fenólicos como o cominho (*Cuminum cyminum*), têm demonstrado eficácia frente a microrganismos de interesse clínico e alimentar, a exemplo de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. A ação bactericida nesses casos é frequentemente associada a constituintes majoritários, como o cuminaldeído, que reforçam o papel dos óleos essenciais como candidatos promissores tanto na área farmacêutica quanto na conservação de alimentos (Soliman *et al.*, 2016; Mutlu-Ingok *et al.*, 2020).

Diante do cenário crítico de aumento da resistência bacteriana a sanificantes e antibióticos convencionais, a caracterização detalhada dessas matrizes voláteis e de seus componentes isolados consolida-se como uma frente de pesquisa indispensável para validar novas barreiras naturais de controle (Mutlu-Ingok *et al.*, 2020).

2.4.4 *Staphylococcus aureus*

A bactéria *Staphylococcus aureus* destaca-se entre os principais agentes envolvidos em surtos de doenças transmitidas por alimentos, principalmente em razão da produção de enterotoxinas estafilocócicas termoestáveis em alimentos contaminados. A ingestão dessas toxinas pode provocar quadros de intoxicação alimentar caracterizados por náuseas, vômitos, cólicas abdominais e diarreia, representando um importante problema de saúde pública (Silva *et al.*, 2010).

Do ponto de vista microbiológico, o *S. aureus* caracteriza-se como um coco Gram-positivo, organizado em agrupamentos semelhantes a cachos de uva. Trata-se de um microrganismo anaeróbio facultativo, com características bioquímicas bem definidas, como reação positiva para coagulase e produção de DNase termoestável (Silva *et al.*, 2010). Um desafio crítico no controle deste patógeno reside na estabilidade de suas enterotoxinas; apesar de as células bacterianas serem sensíveis ao calor, as toxinas produzidas são termorresistentes, podendo permanecer ativas mesmo após tratamentos térmicos intensos em alimentos (Silva *et al.*, 2010) (Figura 9).

Figura 9 – Aspecto geral da bactéria *Staphylococcus aureus*



Fonte: Da autora (2025)

No contexto do controle por métodos naturais, o *S. aureus* tem demonstrado elevada suscetibilidade aos constituintes dos óleos essenciais. A ausência de uma membrana externa e a presença de uma parede celular predominantemente constituída por peptidoglicano facilitam a interação de compostos lipofílicos, como o cuminaldeído, com estruturas celulares essenciais, contribuindo para sua atividade antimicrobiana. Essa interação resulta na desorganização da parede celular e da membrana plasmática, levando ao extravasamento de íons e à inibição de sistemas enzimáticos vitais (Burt, 2004; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

Dessa forma, a aplicação de óleos essenciais, como o de cominho (*Cuminum cyminum*), surge como uma estratégia promissora para mitigar a presença de *S. aureus* em matrizes alimentares, atuando tanto na inibição do crescimento celular quanto no potencial prevenção da síntese de toxinas.

2.4.5 *Escherichia Coli*

A bactéria *Escherichia coli* é amplamente utilizada como indicador de qualidade higiênico-sanitária em alimentos e água, sendo um dos principais microrganismos associados à contaminação fecal. Embora a maioria das cepas interajam com a microbiota intestinal normal de humanos e animais, linhagens patogênicas são capazes de causar doenças transmitidas por alimentos (DTA) com diferentes graus de severidade, desde quadros diarreicos leves até colites hemorrágicas severas (Silva *et al.*, 2010 Alhadlaq *et al.*, 2024)

Do ponto de vista microbiológico, a *E. coli* é um bacilo Gram-negativo, anaeróbio facultativo, pertencente à família Enterobacteriaceae. Sua identificação baseia-se na capacidade de fermentar lactose com produção de ácido e gás, além de apresentar crescimento rápido em condições favoráveis, com temperatura ótima entre 35 e 37 °C (Silva *et al.*, 2010). A presença deste microrganismo em alimentos é um indicativo direto de falhas sanitárias no processamento, manipulação ou armazenamento, tendo como principais veículos a água contaminada e matérias-primas de origem animal (Silva *et al.*, 2010; Alhadlaq *et al.*, 2024 (Figura 10).

Figura 10 – Aspecto geral da bactéria *Escherichia coli*



Fonte: Da autora (2025)

No que tange ao controle por métodos naturais, a *E. coli* apresenta um desafio adicional em comparação às bactérias Gram-positivas. Por possuir uma membrana externa complexa, rica em lipopolissacarídeos (LPS), as Gram-negativas contam com uma barreira extra que limita a difusão de muitas substâncias hidrofóbicas (Hyltdgaard; Mygind; Meyer, 2012). No entanto, constituintes dos óleos essenciais, especialmente terpenos, fenóis e aldeídos, apresentam caráter lipofílico que lhes permite interagir com essa estrutura, promovendo sua desestabilização, aumento da permeabilidade celular e consequente extravasamento de constituintes intracelulares. Entre esses compostos destaca-se o cuminaldeído, amplamente associado à atividade antibacteriana observada em óleos essenciais de cominho.

Além dos aspectos microbiológicos, destaca-se o crescente interesse na aplicação de óleos essenciais como agentes antimicrobianos no controle de *E. coli*. Esses compostos naturais são constituídos principalmente por terpenos, fenóis e aldeídos, que apresentam reconhecida atividade antibacteriana. Adicionalmente, estudos indicam que os óleos essenciais podem interferir em processos metabólicos, na atividade enzimática e na expressão de fatores de virulência, contribuindo para a redução da viabilidade celular e do potencial patogênico desse microrganismo (Hyltdgaard; Mygind; Meyer, 2012; Nazarpour *et al.*, 2022).

2.4.6 Atividade Inseticida

Os óleos essenciais têm sido amplamente investigados como alternativas naturais no manejo de insetos-praga, especialmente em sistemas agrícolas e no armazenamento de grãos. O crescente interesse por esses metabólitos secundários deve-se à urgência em reduzir o uso de

inseticidas sintéticos, os quais estão frequentemente associados ao desenvolvimento de resistência, contaminação ambiental e riscos à saúde humana (Isman, 2020).

A eficácia inseticida desses compostos reside na sua capacidade de atuar sobre múltiplos sistemas fisiológicos, com destaque para o sistema nervoso, respiratório e endócrino (Ayllón-Gutiérrez *et al.*, 2024; Isman, 2020). Os constituintes bioativos podem interferir na transmissão de impulsos nervosos ao afetar receptores e canais iônicos da regulação neuromuscular, resultando em descoordenação motora, paralisia e morte do espécime (Isman, 2020; Pavela; Benelli, 2016).

Somado aos efeitos neurotóxicos, esses compostos promovem alterações bioquímicas cruciais, como a modulação de enzimas ligadas à detoxificação incluindo esterases, glutathione-S-transferases e citocromos P450 (Ayllón-Gutiérrez *et al.*, 2024; Isman, 2020). Tal interferência compromete a capacidade metabólica do inseto de metabolizar e eliminar compostos tóxicos, incluindo os constituintes bioativos dos óleos essenciais, potencializando sua suscetibilidade aos agentes inseticidas (Souza *et al.*, 2023). Observa-se, ainda, um impacto direto no metabolismo energético, promovendo alterações nas reservas de carboidratos e lipídios e comprometendo processos fisiológicos essenciais ao desenvolvimento e à sobrevivência dos insetos (Annaz *et al.*, 2025).

Um aspecto diferencial dos óleos essenciais é a interação entre seus diversos constituintes, que frequentemente resulta em efeitos sinérgicos. Essa multiplicidade de alvos moleculares não apenas amplia o espectro de ação, mas também dificulta o surgimento de populações resistentes, uma vez que o inseto é desafiado por vários mecanismos simultâneos (Pavela; Benelli, 2016).

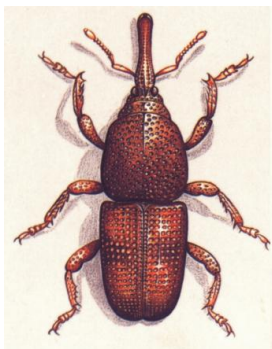
Diante dessa complexidade de ação, os óleos essenciais consolidam-se como ferramentas promissoras para o controle sustentável, sendo sua aplicação particularmente relevante no combate a pragas de alto impacto econômico na pós-colheita, como será discutido adiante.

2.4.7 *Sitophilus Zeamais*

O inseto *Sitophilus zeamais*, conhecido popularmente como gorgulho-do-milho, (Figura 11), entre as principais pragas de pós-colheita, sendo responsável por perdas quantitativas e qualitativas severas. Sua biologia permite que complete todo o ciclo de vida no interior dos

grãos, característica que dificulta o controle convencional e favorece sua disseminação durante as etapas de estocagem e transporte (Lorini; Krzyzanowski, 2009).

Figura 11 – *Sitophilus zeamais* - (gorgulho-do-milho)



Fonte: Santos (2005)

A dificuldade no manejo de *S. zeamais* reside, em grande parte, no seu hábito alimentar interno. Por ser uma praga primária, a penetração da larva no endosperma cria um microambiente protegido, onde os inseticidas de superfície apresentam eficácia limitada (Lorini, 2008). Além disso, o processo respiratório e a excreção desses insetos elevam a umidade relativa e a temperatura nos interstícios dos grãos, fenômeno conhecido como 'focos de aquecimento', que não apenas deprecia a qualidade fisiológica das sementes, mas atua como catalisador para a proliferação de microrganismos deterioradores (Puzzi, 2000; Lorini; Krzyzanowski, 2009).

Além dos danos físicos diretos decorrentes da alimentação e reprodução, a infestação por *S. zeamais* deprecia o valor comercial do produto e eleva a suscetibilidade à contaminação por microrganismos, especialmente fungos toxigênicos. Nesse cenário, o manejo tradicional baseia-se no uso de inseticidas sintéticos; contudo, a utilização contínua desses agentes tem selecionado populações resistentes, além de suscitar preocupações sobre resíduos químicos nos alimentos e impactos ambientais (Isman, 2020).

Nesse contexto, os óleos essenciais de especiarias, como o de cominho (*Cuminum cyminum*), têm se destacado como potenciais agentes inseticidas. A elevada atividade biológica desse óleo é frequentemente atribuída ao seu constituinte majoritário, o cuminaldeído, um aldeído aromático capaz de penetrar na cutícula do inseto e interferir em sistemas fisiológicos essenciais (Souza *et al.*, 2023). A avaliação conjunta do óleo essencial e de seu composto majoritário isolado é uma estratégia relevante na pesquisa científica, pois permite distinguir se

a toxicidade observada decorre da ação exclusiva do componente principal ou se é fruto de interações sinérgicas entre os diversos constituintes da mistura complexa.

Dessa forma, o uso de óleos essenciais e de compostos isolados representa uma estratégia promissora no controle de *S. zeamais*, destacando-se como alternativa sustentável e potencialmente eficaz para aplicação em sistemas de armazenamento de grãos.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Artigo - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Atividade antimicrobiana e inseticida do óleo essencial de <i>Cuminum cyminum</i> e do cuminaldeído contra microrganismos e <i>Sitophilus zeamais</i>
Autores:	Joyce Amélia Carvalho Silva Maria das Graças Cardoso Carolina Salles Freire Danúbia Aparecida de Carvalho Selvati Rezende Wilder Douglas Santiago Maria Eduarda Soares da Silva Ezequiel Garcia de Souza



**ATIVIDADE ANTIMICROBIANA E INSETICIDA DO ÓLEO ESSENCIAL DE
CUMINUM CYMINUM E DO CUMINALDEÍDO CONTRA MICRORGANISMOS E
*SITOPHILUS ZEAMAI*S**

**ANTIMICROBIAL AND INSECTICIDAL ACTIVITY OF *CUMINUM CYMINUM*
ESSENTIAL OIL AND CUMINALDEHYDE AGAINST MICROORGANISMS AND
*SITOPHILUS ZEAMAI*S¹**

Joyce Amélia Carvalho Silva

<https://orcid.org/0009-0004-8229-220X>

Maria das Graças Cardoso

<https://orcid.org/0000-0001-8075-1725>

Carolina Salles Freire

<https://orcid.org/0009-0007-9136-0632>

Danúbia Aparecida de Carvalho Selvati Rezende

<https://orcid.org/0000-0001-9106-4250>

Wilder Douglas Santiago

<https://orcid.org/0000-0003-4941-2527>

Maria Eduarda Soares da Silva

<https://orcid.org/0009-0009-1934-7462v>

Ezequiel Garcia de Souza

<https://orcid.org/0000-0001-7638-0183>

¹Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agroquímica, área de concentração em Química/Bioquímica

Resumo: A contaminação por microrganismos e a infestação por insetos em alimentos causam expressivas perdas e riscos à saúde, impulsionando a busca por alternativas naturais aos defensivos sintéticos. Este estudo avaliou as atividades antifúngica, antibacteriana e inseticida do óleo essencial de *Cuminum cyminum* e de seu composto majoritário, o cuminaldeído. A atividade antifúngica foi determinada contra *Penicillium citrinum* e *Fusarium verticillioides* por meio de ensaios de contato direto, fumigação e determinação do teor de ergosterol. A atividade antibacteriana foi avaliada sobre *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* pelo método de microdiluição em caldo, com determinação da concentração mínima inibitória (CMI) e da concentração mínima bactericida (CMB), enquanto a atividade inseticida foi avaliada em adultos de *Sitophilus zeamais* por meio de ensaios de contato e fumigação. Tanto o óleo essencial quanto o cuminaldeído inibiram o crescimento fúngico, com redução do teor de ergosterol. O cuminaldeído demonstrou maior atividade antibacteriana, apresentando CMI e CMB entre 1,56 e 6,25 $\mu\text{L mL}^{-1}$, enquanto o óleo essencial apresentou valores entre 6,25 e 25 $\mu\text{L mL}^{-1}$. Em contrapartida, o óleo essencial apresentou maior efeito sobre a mortalidade de *S. zeamais*. Os achados evidenciam o potencial do óleo essencial de *C. cyminum* e do cuminaldeído como bioprodutos promissores para a preservação de alimentos e grãos armazenados.

Palavras-chaves: *Cuminum cyminum*; Cuminaldeído; óleos essenciais; atividade antimicrobiana; *Sitophilus zeamais*; Ergosterol.

Abstract: Microbial contamination and insect infestation in food cause significant losses and health risks, driving the search for natural alternatives to synthetic pesticides. This study evaluated the antifungal, antibacterial, and insecticidal activities of *Cuminum cyminum* essential oil and its major compound, cuminaldehyde. Antifungal activity against *Penicillium citrinum* and *Fusarium verticillioides* was determined via direct contact assays, fumigation, and ergosterol content analysis. Antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* was assessed using the broth microdilution method to determine the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC), while insecticidal activity was evaluated against adult *Sitophilus zeamais* using contact and fumigation assays. Both the essential oil and cuminaldehyde inhibited fungal growth and reduced ergosterol content. Cuminaldehyde demonstrated greater antibacterial activity, with MIC and MBC values ranging from 1.56 to 6.25 $\mu\text{L mL}^{-1}$, whereas the essential oil showed values between 6.25 and 25 $\mu\text{L mL}^{-1}$. Conversely, the essential oil had a greater effect on *S. zeamais* mortality. These findings highlight the potential of *C. cyminum* essential oil and cuminaldehyde as promising bioproducts for the preservation of food and stored grains.

Keywords: *Cuminum cyminum*; Cuminaldehyde; essential oils; antimicrobial activity; *Sitophilus zeamais*; Ergosterol.

1 INTRODUÇÃO

A segurança e a qualidade dos alimentos constituem desafios globais, especialmente diante das perdas quantitativas e qualitativas causadas por microrganismos e pragas durante o processamento e armazenamento (Fao, 2023; Bennett; Klich, 2003). Fungos filamentosos, como *Penicillium citrinum* e *Fusarium verticillioides*, podem comprometer a qualidade de grãos e alimentos, além de estarem associados à produção de micotoxinas prejudiciais à saúde humana e animal (Pitt; Hocking, 2009; Stoev, 2023). Paralelamente, bactérias patogênicas, como *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, estão associadas a importantes problemas de saúde pública (Who, 2022), enquanto pragas como o gorgulho-do-milho (*Sitophilus zeamais*) causam danos aos grãos armazenados e podem favorecer a ocorrência de contaminações secundárias (Nwosu, 2018; Pinto *et al.*, 2020).

Embora fungicidas, bactericidas e inseticidas sintéticos constituam importantes ferramentas para o controle desses agentes, seu uso contínuo pode contribuir para a seleção de populações resistentes e suscitar preocupações relacionadas à presença de resíduos e à contaminação ambiental (Isman, 2006; Aslam *et al.*, 2021). Nesse contexto, cresce o interesse por compostos naturais bioativos como alternativas para estratégias de controle mais sustentáveis (Pavela *et al.*, 2022). Entre esses compostos, destacam-se os óleos essenciais, constituídos por diferentes classes de metabólitos secundários, incluindo monoterpenos e fenilpropanoides, capazes de interagir com estruturas celulares e interferir em processos fisiológicos de microrganismos e pragas (Bakkali *et al.*, 2008; Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

Entre as espécies vegetais de interesse, o cominho (*Cuminum cyminum*) destaca-se pela produção de óleo essencial com reconhecida atividade biológica, tendo o cuminaldeído como um de seus principais constituintes e frequentemente identificado como composto majoritário (Kedia *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2021). No contexto da atividade antifúngica, a interferência na biossíntese ou na manutenção do ergosterol constitui um dos mecanismos associados à ação de diferentes compostos bioativos, uma vez que esse esterol desempenha papel fundamental na estrutura e na função da membrana plasmática dos fungos (Silva *et al.*, 2010; Iskandar *et al.*, 2025).

Apesar do potencial biológico do óleo essencial de *C. cyminum* e do cuminaldeído, ainda são necessários estudos que avaliem de forma integrada suas atividades sobre diferentes grupos

de organismos associados à conservação de alimentos e grãos armazenados, bem como possíveis alterações em componentes da membrana fúngica. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar as atividades antifúngica, antibacteriana e inseticida do óleo essencial de *Cuminum cyminum* e do cuminaldeído contra fungos, bactérias e *Sitophilus zeamais*, investigando também seus efeitos sobre o teor de ergosterol dos fungos avaliados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Química Orgânica – Óleos Essenciais do Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras, na Unidade de Recursos Microbiológicos – URMICRO e no Laboratório de Entomologia Molecular e Ecotoxicologia (MEET) da Universidade Federal de Lavras.

2.1 Obtenção do Material Vegetal

As sementes de *Cuminum cyminum* (cominho) foram adquiridas em 30 de junho de 2025, na empresa Zona Cerealista LTDA, localizada na cidade de São Paulo - SP, Brasil. O material foi destinado à extração do óleo essencial e aos experimentos subsequentes, sendo encaminhado ao Laboratório de Química Orgânica – Óleos Essenciais, do Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.2 Extração do Óleo Essencial

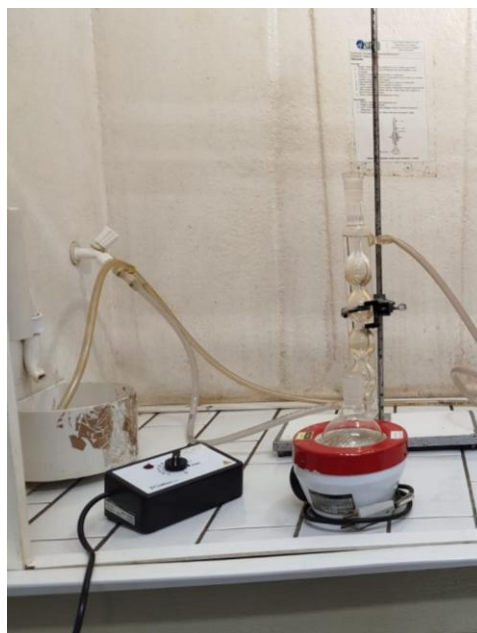
O óleo essencial da espécie foi estudado e obtido por hidrodestilação, utilizando um aparelho de Clevenger modificado acoplado a um balão de fundo redondo de 5L, de acordo com a metodologia descrita por Brasil (2010).

Aproximadamente 500 g do material vegetal da espécie *C. cyminum* foram adicionados em balão de fundo redondo com cerca de 2500 mL de água. O processo de destilação teve uma duração de 3 horas, para a obtenção do hidrolato. Decorrido esse tempo, o óleo essencial foi separado do hidrolato por centrifugação, utilizando uma centrífuga de cruzeta horizontal (FANEM, 206-R) a 9,6 G por 15 min. O óleo foi retirado com o auxílio de uma pipeta de Pasteur, acondicionado em frasco de vidro, armazenado ao abrigo de luz e calor. O processo de extração foi realizado em triplicata para determinação do rendimento do óleo essencial.

2.3 Determinação da Umidade e do Rendimento do Óleo Essencial

Na determinação do material vegetal em estudo foi utilizada um sistema de Dean e Stark, que se baseia no princípio da imiscibilidade de solventes (cicloexano e água). Foram pesados cerca de 5 g de material vegetal, juntamente com 80 mL de cicloexano, foram colocados em um balão de fundo redondo onde foi acoplada a uma manta aquecedora e um condensador de refluxo como mostra a Figura 12. Após 2 horas, de refluxo lento o volume de água presente no material vegetal foi quantificado. A determinação da umidade foi realizada em triplicata seguindo a metodologia descrita por Pimentel *et al.* (2006).

Figura 12 – Montagem experimental para determinação de umidade por Dean-Stark



Fonte: Da autora (2025)

O rendimento da extração do óleo essencial foi determinado em porcentagem de peso/peso (%p/p) em Base Livre de Umidade (BLU), utilizando a Equação 1:

Equação 1

$$\%R = \frac{100 \times \text{peso do óleo}}{\frac{\text{Peso da amostra} - (\text{peso da amostra} \times \text{umidade})}{5}}$$

Onde R é rendimento do óleo essencial (base livre de umidade).

2.4 Caracterização Química do Óleo Essencial

A caracterização e quantificação química do óleo essencial foram realizadas no Centro de Análises e Prospecção Química – CAPQ, no Departamento de Química da UFLA. Os constituintes químicos do óleo essencial foram identificados por cromatografia em fase gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM- Shimadzu, QP5050A) utilizando-se uma coluna capilar de sílica fundida (30 m x 0,25 mm) com fase ligada a DB5 (0,25 µm de espessura). O gás de arraste foi o hélio a um fluxo de 1,18 mL min⁻¹ a 210 °C; a temperatura iniciará em 60 °C, seguida de um aumento de 3 °C até 240 °C; posteriormente, a 10 °C, até chegar em 300 °C, que permaneceram constante por 7 min. A temperatura do injetor foi de 220 °C e a do detector (ou interface) de 240 °C. Foram injetados 0,1 µL de amostra, diluída em hexano a uma taxa de partição de 1:100. Na avaliação quantitativa, utilizou-se um cromatógrafo gasoso (Shimadzu GC – 17A) equipado com detector por ionização de chamas (FID). Os parâmetros experimentais de análise foram os mesmos utilizados na identificação por CG/EM, com temperatura do detector de 300 °C. Os constituintes foram identificados comparando os índices de retenção calculados pela equação de Van Den Dool e Kratz (1963), levando em consideração a relação da série homóloga de alcanos (nC8- nC18) e com extrapolação para C19 e C20, com os índices de retenção da literatura, segundo Adams (2017) e duas bibliotecas do equipamento NIST107 e NIST2. Estas bibliotecas possibilitam a comparação dos espectros obtidos com os existentes.

2.5 Atividade Antifúngica do óleo essencial

A atividade antifúngica do óleo essencial e do padrão (cuminaldeído) foi realizada no Laboratório de Micotoxinas e Micologia de Alimentos do Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram utilizadas duas espécies de fungos filamentosos: *Penicillium citrinum* (URMICRO – 10689) e *Fusarium verticillioides* (URMICRO – 11547), adquiridas da Coleção de Culturas de Micro-organismos do Departamento de Ciência dos Alimentos da UFLA.

2.5.1 Teste de Fumigação

A atividade antifúngica do óleo essencial de *C. cuminum* e do composto majoritário

cuminaldeído foi avaliada pelo método de fumigação *in vitro*, conforme descrito por Guimarães *et al.* (2011), com adaptações propostas por Allan *et al.* (2022). O óleo essencial e o cuminaldeído foram previamente diluídos em dimetilsulfóxido (DMSO) nas concentrações de 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000 e 3000 $\mu\text{L/L}^{-1}$. Para obtenção do inóculo, os fungos foram cultivados em placas de Petri contendo meio Ágar Extrato de Malte (MEA) e incubados em estufa do tipo BOD a 25 °C por sete dias.

O plaqueamento foi realizado utilizando-se 10 μL da suspensão de esporos depositados no centro das placas contendo aproximadamente 20 mL de meio MEA. Discos de papel-filtro estéreis (4 cm de diâmetro) foram fixados na face interna das tampas das placas, nos quais foram adicionados 250 μL das soluções contendo o óleo essencial ou o cuminaldeído nas diferentes concentrações avaliadas. Como controle (testemunha), utilizaram-se placas contendo apenas o solvente DMSO, sem a presença dos compostos voláteis.

Após a aplicação dos tratamentos, as placas foram imediatamente vedadas com filme plástico para evitar perda dos compostos voláteis e incubadas em BOD a 25 °C durante sete dias. Ao final do período de incubação, o crescimento micelial foi avaliado por meio da medição do diâmetro das colônias em dois eixos perpendiculares. Os ensaios foram conduzidos em triplicata, e a porcentagem de inibição do crescimento micelial foi calculada conforme metodologia descrita por Brandão *et al.* (2020).

2.5.2 Teste por Contato

A atividade antifúngica foi avaliada pelo método de contato direto, por meio da incorporação do óleo essencial ao meio de cultura.

Inicialmente, foram vertidos 15 mL de Ágar Batata Dextrose (BDA) fundido em placas de Petri, sendo o preparo realizado em pequenas quantidades (três placas por vez), a fim de evitar a solidificação precoce do meio. O óleo essencial e o cuminaldeído (padrão), foram adicionados diretamente ao meio ainda líquido, nas concentrações de 0; 31,25; 62,5; 125; 250; 500; 1000; 5000 e 10.000 $\mu\text{L/L}^{-1}$, seguido de homogeneização manual com auxílio da ponteira de micropipeta, visando sua distribuição uniforme. Após a homogeneização, as placas foram fechadas e mantidas em repouso até a completa solidificação do meio.

O inóculo fúngico foi previamente preparado na concentração de 10^6 esporos mL^{-1} . Em seguida, o fungo foi inoculado no centro das placas contendo o meio incorporado com o óleo essencial. As placas foram vedadas com filme plástico e incubadas em estufa tipo BOD a 25 °C por 7 dias. Após o período de incubação, o crescimento micelial foi avaliado por meio da

medição do diâmetro das colônias em dois sentidos diametralmente opostos.

2.5.3 Avaliação do teor de ergosterol

Os ensaios foram realizados utilizando o fungo *Fusarium verticillioides* (URMICRO – 11547), obtido da Coleção de Cultura de Micro-organismos do DCA/UFLA. A determinação e quantificação do ergosterol foram realizadas com base em metodologias descritas na literatura, conforme proposto por Bomfim *et al.* (2015), Kohiyama *et al.* (2015) e Yamamoto-Ribeiro *et al.* (2013), com adaptações.

2.5.4 Cultivo fúngico e preparo das amostras para análise de ergosterol

O fungo *F. verticillioides* foi previamente cultivado em placas de Petri contendo Ágar Batata Dextrose (BDA) e incubado em estufa tipo BOD a 25 °C por 7 dias, visando a obtenção de crescimento micelial adequado.

Após esse período, foi realizado o ensaio de contato direto, onde o óleo essencial e o composto padrão foram incorporados ao meio de cultura nas concentrações de 0; 31,25; 62,5; 125; 250; 500; 1000; 5000 e 10.000 µL/L. As placas foram novamente incubadas por 7 dias, nas mesmas condições.

Ao final do período de incubação, foi avaliado o crescimento micelial do fungo em cada concentração, sendo selecionadas aquelas que apresentaram desenvolvimento fúngico para a etapa de análise de ergosterol.

A partir dessas placas, foram retirados três discos miceliais (plugues) de diferentes regiões da colônia, os quais foram transferidos para frascos Erlenmeyer contendo meio líquido apropriado (Caldo Batata Dextrose). Em seguida, procedeu-se ao cultivo do fungo sob condições controladas, conforme metodologia adaptada de Brandão (2020), para obtenção de biomassa fúngica destinada à extração do ergosterol.

2.5.5 Extração e Quantificação de Ergosterol

A extração e quantificação de ergosterol foram realizadas com base na metodologia descrita por Silva, Corso e Matheus (2010), com adaptações propostas por Brandão (2021) e Pinto *et al.* (2021). Inicialmente, aproximadamente 300 mg de micélio úmido foram transferidos para tubos de ensaio protegidos da luz com papel-alumínio, visando minimizar a

fotodegradação do ergosterol. Em seguida, adicionaram-se 20 mL de metanol, 5 mL de etanol e 2,0 g de hidróxido de potássio (KOH) a cada amostra.

Posteriormente, as amostras foram submetidas à agitação por 5 minutos e aquecidas em banho-maria a 70 °C durante 40 minutos para realização da etapa de saponificação. Após resfriamento à temperatura ambiente, adicionaram-se 5 mL de água destilada, seguindo-se centrifugação a $965,36 \times g$ por 30 minutos.

O sobrenadante foi transferido para novos recipientes e submetido à partição líquido-líquido utilizando-se 15 mL de *n*-hexano. Após agitação por 2 minutos e repouso por 10 minutos para separação das fases, a fase orgânica superior foi recuperada e o solvente removido por evaporação à temperatura ambiente sob capela de exaustão. O resíduo obtido foi acondicionado em frascos âmbar e armazenado sob refrigeração (4 °C), protegido da luz, até o momento das análises cromatográficas.

Para quantificação do ergosterol, o resíduo foi ressuspendido em 2 mL de metanol grau HPLC e filtrado em membrana de 0,45 µm (Millipore®). A determinação do composto foi realizada por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), utilizando o método de padronização externa. Para construção da curva analítica, preparou-se inicialmente uma solução estoque de ergosterol na concentração de $1000 \mu\text{g mL}^{-1}$ em metanol grau HPLC, a partir da qual foram obtidas soluções padrão em concentrações variando de 0,1 a $1000 \mu\text{g mL}^{-1}$. A curva analítica foi obtida por regressão linear, apresentando coeficiente de determinação (R^2) de 0,9999.

Todas as soluções padrão e amostras foram preparadas sob proteção da luz, filtradas em membrana de 0,45 µm (Millipore®) e injetadas diretamente no sistema cromatográfico. As análises foram realizadas em triplicata, sendo a identificação do ergosterol confirmada com base no tempo de retenção e no perfil do espectro de absorção em comparação ao padrão analítico.

2.6 Condições Cromatográficas

A análise do ergosterol foi realizada em sistema de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) da marca Shimadzu, equipado com duas bombas de alta pressão (modelo LC-6AD), detector de arranjo de diodos (DAD, modelo SPD-M20A), desgaseificador (modelo DGU-20A3) e injetor automático com amostrador automático (modelo SIL-10AF). A separação cromatográfica foi conduzida utilizando coluna Agilent Zorbax Eclipse XDB-C18

(4,6 × 250 mm; 5 µm), acoplada a uma pré-coluna Agilent Zorbax Eclipse XDB-C18 (4,6 × 12,5 mm; 5 µm). A fase móvel utilizada foi metanol de grau HPLC, em sistema isocrático. A detecção foi realizada em comprimento de onda de 282 nm, com fluxo de 1,0 mL min⁻¹ e volume de injeção de 20 µL.

2.7 Atividade Antibacteriana – Determinação da Concentração Mínima Inibitória (CMI) e da Concentração Mínima Bactericida (CMB)

As cepas bacterianas foram previamente ativadas em caldo BHI e incubadas em BOD a 37 °C por 24 horas, obtendo-se as culturas-mãe. Posteriormente, a turbidez das suspensões bacterianas foi ajustada com auxílio de espectrofotômetro, no comprimento de onda de 625 nm, até atingir absorvância entre 0,08 e 0,1, correspondente a aproximadamente 10⁸ UFC mL⁻¹. Em seguida, o inóculo foi diluído em caldo TSB, obtendo-se concentração final de 10⁷ UFC mL⁻¹ para utilização nos ensaios.

A determinação da CMI foi realizada pelo método de microdiluição em caldo, utilizando placas de 96 poços. Inicialmente, preparou-se uma solução contendo 500 µL de óleo essencial e 500 µL de dimetilsulfóxido (DMSO). Em cada poço da placa foram adicionados 150 µL de caldo TSB. No primeiro poço, adicionaram-se 150 µL da solução contendo o óleo essencial diluído em DMSO, realizando-se, em seguida, diluições seriadas a partir da transferência de 150 µL de um poço para o seguinte, obtendo-se as diluições 1:1; 1:2; 1:4; 1:8; 1:16; 1:32; 1:64 e 1:128.

Após o preparo das diluições, adicionou-se o inóculo bacteriano padronizado aos poços, e as placas foram incubadas a 37 °C por 24 horas. A CMI foi definida como a menor concentração capaz de inibir o crescimento visível da bactéria. Para determinação da CMB, alíquotas dos poços correspondentes às concentrações sem crescimento visível foram retiradas e semeadas em placas contendo meio de cultura sólido. As placas foram incubadas a 37 °C por 24 horas, a CMB foi definida como a menor concentração na qual não houve crescimento bacteriano, indicando efeito bactericida.

2.8 Atividade Inseticida – Mortalidade por Fumigação

Os insetos da espécie *Sitophilus zeamais* utilizados nos bioensaios foram provenientes de uma colônia mantida no Laboratório de Entomologia Molecular e Ecotoxicologia do Departamento de Entomologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sob condições

controladas de temperatura (28 ± 2 °C), umidade relativa ($70 \pm 5\%$) e fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro. A criação foi mantida em recipientes de vidro com capacidade de 1 L contendo grãos de milho não transgênicos e livres de resíduos de pesticidas como substrato alimentar.

A atividade inseticida por fumigação do óleo essencial de cominho e do composto majoritário cuminaldeído foi avaliada utilizando adultos de *S. zeamais*, conforme metodologia descrita por Robertson *et al.* (2017), com adaptações propostas por Campolina *et al.* (2024) e De Souza *et al.* (2025). Os bioensaios foram conduzidos em recipientes de vidro com capacidade de 50 mL, hermeticamente vedados.

O óleo essencial de cominho foi testado nas dosagens de 0, 5, 10, 15, 25 e 50 µL por recipiente, enquanto o cuminaldeído foi avaliado nas dosagens de 0, 1, 3, 5, 7, 10, 25, 50, 75 e 100 µL por recipiente. Para preparo das soluções utilizou-se acetona (Sigma-Aldrich®, St. Louis, MO, EUA) como solvente.

Alíquotas de 50 µL de cada tratamento foram aplicadas em discos de papel-filtro estéreis (0,5 cm de diâmetro). Após evaporação completa do solvente em capela de exaustão, os discos foram fixados na face interna das tampas dos recipientes, permitindo a volatilização dos compostos sem contato direto com os insetos.

Posteriormente, dez adultos não sexados de *S. zeamais* foram introduzidos em cada unidade experimental, sendo os recipientes imediatamente vedados. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento. As unidades experimentais foram mantidas em câmara do tipo BOD sob condições controladas de temperatura (25 ± 2 °C), umidade relativa ($70 \pm 10\%$) e fotoperíodo de 12:12 h (L/D).

A mortalidade dos insetos foi avaliada após 24, 48 e 72 horas de exposição, sendo considerados mortos os indivíduos que não apresentaram movimentação após estímulo mecânico realizado com auxílio de pinça entomológica.

2.8.1 Mortalidade por Contato

A atividade inseticida por contato foi avaliada utilizando adultos de *S. zeamais*. O óleo essencial de cominho e o composto padrão cuminaldeído foram previamente diluídos em acetona (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EUA), para obtenção de diferentes concentrações. Para o óleo essencial, foram avaliadas oito concentrações, enquanto para o cuminaldeído foi utilizada uma faixa mais ampla, com número superior de concentrações, visando melhor ajuste das respostas biológicas.

Alíquotas de 200 µL de cada solução foram aplicadas em discos de papel-filtro com 5 cm de diâmetro. Após a completa evaporação do solvente, os discos foram acondicionados no fundo de placas de Petri. Em seguida, foram introduzidos dez insetos adultos não sexados de *S. zeamais* em cada placa, as quais foram vedadas com filme de PVC para evitar a fuga dos insetos e a perda de compostos voláteis.

Cada concentração foi avaliada em quatro repetições, totalizando 40 insetos por tratamento. Como controle negativo, utilizou-se apenas acetona. As placas foram mantidas em condições controladas de temperatura (25 ± 2 °C), umidade relativa de $70 \pm 10\%$ e fotoperíodo de 12:12 h (luz:escuro). A mortalidade dos insetos foi avaliada após 24, 48 e 72 horas de exposição, sendo considerados mortos aqueles que não apresentaram movimento após estímulo mecânico leve.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rendimento e Umidade

Os resultados obtidos para o teor de umidade (%) e rendimento em base livre de umidade (%p/p BLU) do óleo essencial em estudo, estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Teor de umidade e rendimento do óleo essencial

Óleo Essencial	Teor de Umidade (%)	Rendimento (%p/p BLU)
Semente Cominho	$5,02 \pm 0,01$	$0,9611 \pm 0,01$

Fonte: Da autora (2026)

O rendimento do óleo essencial de *C. cyminum* obtido neste estudo foi de 0,9611%, valor próximo ao relatado por Campolina *et al.* (2024), que observaram um rendimento de 1,02% para o óleo dessa mesma espécie. A proximidade entre os resultados sugere consistência nas condições de hidrodestilação e na qualidade da matéria-prima utilizada. No entanto, variações na eficiência da extração são frequentemente descritas na literatura e correlacionadas a aspectos latitudinais, sazonais e fitotécnicos (Campolina *et al.*, 2024).

De acordo com a literatura, o ambiente exerce influência direta sobre a rota de síntese de metabólitos secundários em plantas aromáticas, afetando consequentemente o acúmulo de voláteis. Segundo Fattahian *et al.* (2022), variáveis como temperatura ambiente, estresse hídrico e índices de radiação solar podem alterar significativamente a biossíntese desses compostos. Adicionalmente, o tempo e as condições de armazenamento do material vegetal após a colheita interferem na taxa de volatilização prévia dos constituintes, impactando a

eficiência final da extração (Fattahian *et al.*, 2022).

Resultados similares também são reportados na literatura para o óleo essencial de *C. cyminum*, com registros de rendimentos que variam substancialmente em função das condições experimentais, da maturidade das sementes e da origem geográfica dos lotes (BettaieB *et al.*, 2010; Rezaei *et al.*, 2023). Essa variabilidade é esperada em estudos com matrizes vegetais, uma vez que o quimiotipo e a produtividade sofrem influência de múltiplos estímulos agrônômicos e metodológicos, reforçando a relevância da padronização de todas as etapas pós-colheita.

3.2 Caracterização Química do óleo essencial

Os resultados obtidos para caracterização química da espécie em estudo estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Composição química do óleo essencial de Cominho

<i>Pico</i>	<i>Compostos</i>	<i>TR (min)</i>	<i>IR_{tab}</i>	<i>IR_{cal}</i>	<i>N. Área (%)</i>
1	α - tujeno	5,747	930	933	0,3709
2	β – pineno	6,985	979	979	2,6691
3	<i>p</i> - Cimeno	8,438	1024	1024	2,5382
4	Limoneno	8,612	1029	1029	8,5051
5	γ – terpineno	9,644	1059	1057	2,9574
6	Fenchona	10,818	1086	1090	0,8252
7	<i>p</i> -Alil-anisol	15,296		1198	6,8508
8	<i>E</i> - carvona	15,580	1200	1205	15,3831
9	Cuminaldéido	17,209	1241	1243	42,3020
10	(<i>E</i>) – anetol	19,092	1284	1286	4,9683
11	Fenicol	19,300		1291	9,0663
12	Apiol	32,616	1678	1618	3,5635
	Total identificado				99,9999%

Legenda: TR – tempo de retenção; IR_{cal} – Índice de retenção calculado; IR_{tab} – Índice de retenção tabelado.

Fonte: Da autora (2026)

A análise por cromatografia em fase gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-

MS) permitiu a identificação de 12 constituintes químicos no óleo essencial de *C. cyminum*, totalizando 100% da composição volátil da amostra (Tabela 2). O perfil cromatográfico revelou uma predominância acentuada de compostos oxigenados, com destaque para o **cuminaldeído** como o componente majoritário, apresentando **42,30%** da área relativa total. Outros constituintes majoritários identificados em proporções significativas foram a *E*-carvona (15,38%), o fenicol (9,07%) e o limoneno (8,51%).

A proeminência do cuminaldeído converge com os padrões descritos na literatura científica para o óleo essencial de cominho obtido a partir das sementes, o qual é frequentemente classificado como o marcador quimiotípico desta espécie (Kedia *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2021). Estudos realizados por Campolina *et al.* (2024) também apontaram o cuminaldeído como o principal volátil do cominho, embora variações nos teores percentuais exatos sejam recorrentes devido a fatores edafoclimáticos e de armazenamento da matéria-prima vegetal.

A presença expressiva de monoterpenos hidrocarbonetos, como o limoneno (8,51%) e o *p*-cimeno (2,54%), bem como da cetona monoterpênica *E*-carvona (15,38%) e do fenilpropanoide (*E*)-anetol (4,97%), pode ter contribuído para a atividade biológica observada para o óleo essencial. A *E*-carvona tem sido associada a atividades antifúngica, antibacteriana e inseticida, sendo considerada um importante composto bioativo presente em diversos óleos essenciais. Estudos indicam que sua ação está relacionada à interação com membranas celulares microbianas e à interferência em processos fisiológicos de organismos-alvo (Moro *et al.*, 2017; Mutlu-Ingok *et al.*, 2020). Dessa forma, a atividade observada para o óleo essencial pode estar relacionada não apenas ao cuminaldeído, mas também à contribuição conjunta dos demais constituintes presentes no óleo essencial.

3.3 Atividade Antifúngica

Os dados descritos na Tabela 3 indicam que ensaios de fumigação revelaram que tanto o óleo essencial de *C. cyminum* quanto o cuminaldeído exerceram efeito inibitório significativo sobre o desenvolvimento micelial de *P. citrinum*.

Tabela 3 – Crescimento micelial (cm) de *Penicillium citrinum* submetido a diferentes concentrações do óleo essencial de *Cuminum cyminum* (cominho) e de seu composto majoritário (cuminaldeído) empregando – se o teste de fumigação

Dose (µL/L)	Cominho	Cuminaldeído
	Crescimento micelial (cm)	Crescimento micelial (cm)
0	3,00 a	3,00 a
100	2,40 b	2,42 ab
250	2,15 b	2,20 b
500	2,23 b	2,17 b
1000	2,12 b	2,07 b
1500	2,12 b	2,18 b
2000	2,22 b	2,17 b
3000	2,18 b	2,02 b

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Da autora (2026)

Pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), a aplicação de ambos os tratamentos reduziu estatisticamente o diâmetro das colônias em relação ao controle negativo (dose 0 µL/L, com média de 3,00 cm), evidenciando a suscetibilidade do fitopatógeno aos constituintes voláteis dispersos na atmosfera do ensaio.

Com o óleo essencial de cominho, o efeito inibitório máximo foi alcançado logo na concentração inicial de 100 µL/L (2,40 cm), estabelecendo um platô estatisticamente homogêneo (letra 'b') que se estendeu até a dose máxima de 3000 µL/L (2,18 cm). No caso do cuminaldeído isolado, a dose de 100 µL/L atuou como uma zona de transição estatística (2,42 cm, letra 'ab'), diferindo significativamente do controle a partir de 250 µL/L (2,20 cm) e registrando o menor diâmetro absoluto na dose de 3000 µL/L (2,02 cm). É importante destacar que nenhuma das concentrações avaliadas promoveu a inibição completa do crescimento de *P. citrinum*. Entretanto, a redução significativa do desenvolvimento micelial observada ao longo dos tratamentos indica uma ação predominantemente fungistática do óleo e do cuminaldeído nas condições estudadas.

O estabelecimento desse platô inibitório sem o bloqueio total do crescimento micelial

converge com observações recentes de Campolina *et al.* (2024). Ao avaliarem o óleo essencial de cominho frente a fungos filamentosos de armazenamento grãos, os autores reportaram que o comportamento do patógeno varia de acordo com a resistência intrínseca da parede celular de cada espécie, sendo comum que doses intermediárias (500 a 1500 $\mu\text{L/L}$) causem inibição parcial sem induzir a letalidade imediata do microrganismo. Essa resistência fúngica exige saturações atmosféricas acentuadamente elevadas para que ocorra o colapso total das estruturas vegetativas.

A sutil variação observada na dose de 100 $\mu\text{L/L}$ onde o óleo bruto já foi significativamente eficiente e o cuminaldeído permaneceu em transição pode estar associada a interações sinérgicas entre os compostos da matriz volátil completa. Conforme discutido por Ali *et al.* (2023), os constituintes minoritários de óleos essenciais, como monoterpenos hidrocarbonetos e fenilpropanoides, frequentemente atuam de forma cooperativa. Moléculas secundárias identificadas no óleo avaliado, como a *E*-carvona (15,38%) e o limoneno (8,51%), possuem a capacidade de interagir com a bicamada lipídica da membrana plasmática, alterando sua permeabilidade (Bakkali *et al.*, 2008). Esse fenômeno facilita a penetração do agente majoritário no interior da célula fúngica, explicando o motivo pelo qual o óleo bruto demonstrou uma resposta ligeiramente mais imediata nas doses iniciais em comparação ao cuminaldeído isolado.

3.3.1 Análise Estatística

Os dados obtidos nos ensaios antifúngicos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito dos tratamentos sobre o crescimento micelial dos fungos avaliados. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR (Ferreira, 2011).

3.3.2 Avaliação da atividade antifúngica por meio da quantificação de ergosterol

Os resultados obtidos nos ensaios de contato demonstraram que tanto o óleo essencial de cominho quanto o cuminaldeído promoveram inibição do crescimento micelial de *F. verticillioides*, evidenciando atividade antifúngica dos tratamentos avaliados, como evidenciam os dados descritos na Tabela 4.

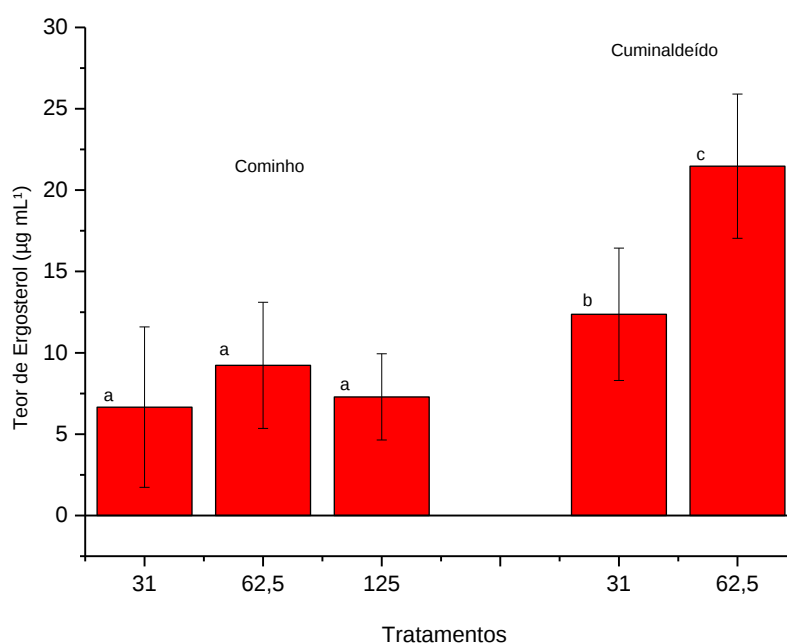
Tabela 4 – Porcentagem de inibição do crescimento micelial (PIC) de *Fusarium verticillioides* submetido ao tratamento com óleo essencial de cominho (*Cuminum cyminum*) e cuminaldeído pelo método de contato

Tratamento	Concentração (µL mL)	PIC (%)
Cominho	31	21,57 ± 7,95
Cominho	62,5	26,80 ± 5,81
Cominho	125	36,17 ± 0,75
Cuminaldeído	31	50,54 ± 7,23
Cuminaldeído	62,5	65,36 ± 18,41

Fonte: Da autora (2026)

A partir dos resultados encontrados para o PIC, procedeu-se à quantificação do ergosterol, visando investigar possíveis alterações na integridade da membrana plasmática fúngica relacionadas à exposição aos compostos testados.

Figura 13 – Teores de ergosterol em *Fusarium verticillioides* submetido ao tratamento com óleo essencial de cominho (*Cuminum cyminum*) e cuminaldeído.



Legenda: Barras representam média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Fonte: Da autora (2026)

A análise dos teores de ergosterol (Figura 13), revelou comportamentos distintos entre o óleo essencial e o composto majoritário isolado. Para o óleo essencial de cominho, embora tenham sido observadas alterações nos valores médios de ergosterol entre as concentrações avaliadas, não foram verificadas diferenças estatísticas significativas ($P > 0,05$). Os valores médios obtidos para as concentrações de 31, 62,5 e 125 $\mu\text{L mL}^{-1}$ foram de 6,66; 9,23 e 7,29 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente. Esses resultados sugerem que a redução do crescimento micelial observada no teste de contato pode não estar exclusivamente relacionada à interferência direta na biossíntese de ergosterol, indicando a participação de mecanismos celulares complementares.

Segundo Brandão (2021), compostos voláteis de origem vegetal frequentemente exercem atividade antifúngica multifatorial, envolvendo alterações de permeabilidade membrana, desorganização estrutural da parede celular, estresse oxidativo e desequilíbrio metabólico intracelular. Dessa forma, mesmo na ausência de diferenças significativas nos teores de ergosterol, a atividade antifúngica observada para o óleo essencial de cominho demonstra potencial de interferência sobre diferentes vias metabólicas do fungo.

Em contrapartida, o cuminaldeído apresentou comportamento estatisticamente significativo sobre os teores de ergosterol ($P < 0,05$), sendo observados valores médios de 12,37 e 21,47 $\mu\text{g mL}^{-1}$ para as concentrações de 31 e 62,5 $\mu\text{L mL}^{-1}$, respectivamente. Esse resultado demonstra que o composto isolado promoveu alterações mais específicas sobre a fisiologia da membrana plasmática fúngica quando comparado ao óleo essencial.

O aumento observado nos teores de ergosterol na maior concentração do cuminaldeído pode estar associado a uma resposta adaptativa celular frente ao estresse químico induzido pelo composto. Conforme discutido por Jordá e Puig (2020), fungos submetidos à exposição de agentes antifúngicos podem ativar mecanismos compensatórios relacionados à biossíntese de esteróis, buscando preservar a estabilidade e funcionalidade da membrana plasmática. Resultados semelhantes também foram discutidos por Brandão (2021), que observou alterações nos teores de ergosterol associadas à capacidade adaptativa dos fungos frente à exposição a compostos bioativos de origem vegetal.

Os resultados obtidos também estão de acordo com estudos que demonstram a atividade antifúngica de óleos essenciais ricos em compostos terpênicos frente a fungos dos gêneros *Penicillium* e *Fusarium*. Mohammadpour *et al.* (2012), ao avaliarem o óleo essencial de

Cuminum cyminum, observaram efeito inibitório sobre diferentes fungos filamentosos, atribuindo essa atividade à ação conjunta de compostos voláteis presentes no óleo. Adicionalmente, revisões recentes destacam que monoterpenos e compostos oxigenados podem comprometer a integridade da membrana plasmática, alterar sua permeabilidade e interferir em processos metabólicos relacionados aos esteróis fúngicos, contribuindo para a redução do crescimento micelial (Mutlu-Ingok *et al.*, 2020). Dessa forma, os resultados observados para o óleo essencial de cominho e para o cuminaldeído reforçam a importância da membrana celular como um dos possíveis alvos envolvidos na atividade antifúngica desses compostos.

De modo geral, a associação entre os resultados do teste de contato e da quantificação de ergosterol sugere que a atividade antifúngica observada decorre da ação sobre diferentes processos celulares. Enquanto o óleo essencial apresentou um mecanismo de ação aparentemente multifatorial, o cuminaldeído demonstrou efeito mais direcionado, evidenciado pelas alterações significativas nos teores de ergosterol.

3.3.3 Análise Estatística

Os dados obtidos na quantificação de ergosterol foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando observadas diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR (Ferreira, 2011).

3.4 Atividade Antibacteriana - Concentração Mínima Inibitória (CMI) e Concentração Mínima Bactericida (CMB)

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados de Concentração Mínima Inibitória (CMI) e Concentração Mínima Bactericida (CMB) do óleo essencial de cominho e do cuminaldeído frente às bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*.

Tabela 5 – Concentração Mínima Inibitória (CMI) e Concentração Mínima Bactericida (CMB) do óleo essencial de cominho e do cuminaldeído sobre *Staphylococcus aureus*

Tratamento	CMI ($\mu\text{L mL}^{-1}$)	CMB ($\mu\text{L mL}^{-1}$)
Óleo essencial de Cominho	12,5	25
Cuminaldeído	1,56	3,12

Fonte: Da autora (2026)

Tabela 6 – Concentração Mínima Inibitória (CMI) e Concentração Mínima Bactericida (CMB) do óleo essencial de cominho e do cuminaldeído sobre *Escherichia coli*

Tratamento	CMI ($\mu\text{L mL}^{-1}$)	CMB ($\mu\text{L mL}^{-1}$)
Óleo essencial de Cominho	6,25	12,5
Cuminaldeído	3,12	6,25

Fonte: Da autora (2026)

Os ensaios microbiológicos demonstraram que tanto o óleo essencial de cominho (*C. cyminum*) quanto o seu constituinte isolado cuminaldeído apresentaram atividade antibacteriana frente às cepas de *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, evidenciando o potencial antimicrobiano dos tratamentos avaliados (Tabela 6). Entretanto, observou-se diferença marcante entre os tratamentos testados, sendo o cuminaldeído significativamente mais eficiente na inibição (CMI) e na eliminação bacteriana (CMB) em ambas as espécies avaliadas.

Conforme apresentado na Tabela 5, frente à bactéria Gram-positiva *S. aureus*, o cuminaldeído exibiu valores de CMI e CMB de 1,56 e 3,12 $\mu\text{L mL}^{-1}$, respectivamente, ao passo que o óleo essencial de cominho registrou valores superiores, correspondendo a 12,5 $\mu\text{L mL}^{-1}$ para a CMI e 25 $\mu\text{L mL}^{-1}$ para a CMB. Esses resultados indicam maior atividade bacteriostática e bactericida do composto purificado em comparação ao óleo essencial de cominho.

Resultados semelhantes têm sido relatados na literatura envolvendo constituintes bioativos de óleos essenciais. Sharifi *et al.* (2021) verificaram elevada atividade antimicrobiana do óleo essencial de *C. cyminum* sobre isolados multirresistentes de *S. aureus*, correlacionando a eficácia biológica diretamente ao teor de cuminaldeído presente na composição química do óleo. Os autores observaram severas alterações ultraestruturais na membrana celular bacteriana por microscopia, incluindo deformações e perda irreversível da integridade celular após a exposição ao composto.

Adicionalmente, estudos de Iskandar *et al.* (2025) demonstraram que os aldeídos aromáticos presentes em óleos essenciais manifestam forte interação físico-química com as membranas fosfolipídicas bacterianas, promovendo aumento da permeabilidade celular, extravasamento de componentes intracelulares essenciais, como íons, proteínas e metabólitos citoplasmáticos, além do consequente colapso metabólico da célula bacteriana. Para os autores

os compostos voláteis possuem mecanismos de ação multifatoriais que transcendem a lise celular, atuando também sobre a desestruturação de biofilmes, na modulação de sistemas de quorum sensing e no bloqueio de bombas de efluxo bacterianas, o que corrobora os expressivos índices de inibição obtidos.

Para a bactéria Gram-negativa *E. coli*, verificou-se comportamento análogo, embora com perfis de sensibilidade distintos (Tabela 6). O óleo essencial de cominho apresentou valores de CMI e CMB de 6,25 e 12,5 $\mu\text{L mL}^{-1}$, respectivamente, enquanto o cuminaldeído isolado manteve valores inferiores, registrando 3,12 $\mu\text{L mL}^{-1}$ para a CMI e 6,25 $\mu\text{L mL}^{-1}$ para a CMB. Esses dados atestam a maior susceptibilidade de *E. coli* ao composto puro quando comparado ao óleo essencial.

Embora as bactérias Gram-negativas possuam uma complexa membrana externa rica em lipopolissacarídeos (LPS) barreira hidrofílica frequentemente associada a maiores taxas de resistência antimicrobiana diversos estudos confirmam que compostos lipofílicos de pequeno peso molecular, como terpenos e aldeídos aromáticos, possuem capacidade de transpor essa barreira e promover desorganização da bicamada lipídica (Masyita *et al.*, 2022; Iskandar *et al.*, 2025). A inserção dessas moléculas hidrofóbicas compromete as interações moleculares da membrana celular, favorecendo desidratação e extravasamento de constituintes citoplasmáticos vitais (Guimarães *et al.*, 2019).

Essa dinâmica foi observada por Wongkattiya *et al.* (2019), os quais relataram atividade antibacteriana significativa do cuminaldeído sobre patógenos de importância alimentar, incluindo *E. coli* e *S. aureus*, vinculando o sucesso antimicrobiano à desorganização estrutural e às alterações funcionais da permeabilidade bacteriana. Em paralelo, investigações conduzidas por Gheisary *et al.* (2025) sustentam que os constituintes de óleos essenciais podem atuar de forma combinada sobre múltiplos alvos fisiológicos bacterianos. Entretanto, no presente estudo, a maior atividade antibacteriana observada para o cuminaldeído em comparação ao óleo essencial de cominho provavelmente está associada à elevada concentração e pureza do composto ativo. Nessa condição, a interação com estruturas celulares bacterianas ocorre de forma mais direta, refletindo nos menores valores de CMI e CMB obtidos para o composto isolado. Diferentemente do óleo essencial, cuja atividade resulta da interação entre diversos constituintes, o cuminaldeído foi avaliado sem a influência de outros compostos presentes na mistura.

Os resultados obtidos reforçam o potencial do óleo essencial de cominho e, principalmente, do cuminaldeído como bioprodutos promissores frente a microrganismos de

relevância clínica e sanitária. Ademais, o crescente interesse por fitoconstituintes bioativos está diretamente relacionado ao avanço da resistência bacteriana aos antibióticos convencionais, impulsionando a busca por alternativas naturais aplicáveis tanto na conservação de alimentos quanto na sanitização microbiológica.

3.5 Teste Inseticida - Mortalidade por Fumigação

Os resultados descritos na Tabela 7 demonstraram que tanto o óleo essencial de cominho quanto o cuminaldeído apresentaram atividade inseticida sobre adultos de *S. zeamais*, promovendo aumento da mortalidade conforme se estendeu o tempo de exposição.

Tabela 7 – Toxicidade do óleo essencial de cominho e do cuminaldeído sobre adultos de *Sitophilus zeamais* em diferentes tempos de exposição

Tratamento	Tempo	Nº insetos	LC ₅₀ (µL mL ⁻¹)	IC95%	χ ²	P
Cominho	24 h	240	7,05	6,44 – 7,69	3,45	0,4861
Cominho	48 h	240	6,61	6,05 – 7,21	6,96	0,1383
Cominho	72 h	240	6,04	4,94 – 7,30	8,74	0,0679
Cuminaldeído	24 h	240	33,34	26,77 – 41,48	7,43	0,1148
Cuminaldeído	48 h	240	29,15	23,37 – 36,06	4,72	0,3167
Cuminaldeído	72 h	240	24,59	19,81 – 30,10	5,78	0,2163

Legenda: CL₅₀ Concentração Letal capaz de causar a mortalidade de 50% da população dos insetos, expressa em µL mL⁻¹ de ar; IC 95%: Intervalo de Confiança ao nível de 95% de probabilidade; χ² Valor do Qui-quadrado calculado; P: Nível de significância pelo teste de adequação do modelo Probit (P > 0,05) indica que o modelo se ajusta adequadamente aos dados experimentais).

Fonte: Da autora (2026)

Observou-se redução progressiva nos de CL₅₀ ao longo das avaliações de 24, 48 e 72 horas, confirmando a ampliação da toxicidade dos tratamentos por via fumigatória com o decorrer do tempo. Conforme os dados apresentados na Tabela 7, o óleo essencial de cominho registrou valores de CL₅₀ de 7,05; 6,61 e 6,04 µL mL⁻¹ de ar para os períodos de 24, 48 e 72 horas, respectivamente. Em contrapartida, o cuminaldeído isolado demandou concentrações

significativamente maiores, registrando valores de CL_{50} de 33,34; 29,15 e 24,59 $\mu\text{L mL}^{-1}$ de ar nos respectivos intervalos. Esses resultados demonstram maior eficiência inseticida do óleo essencial integral em comparação ao seu composto majoritário isolado, uma vez que menores valores de CL_{50} correspondem a maior potência letal.

A redução gradual da CL_{50} ao longo do tempo evidencia que períodos prolongados de confinamento potencializam o efeito tóxico dos compostos voláteis sobre a praga. Esse comportamento dependente do tempo de exposição converge com as observações de Campolina *et al.* (2024), que ao avaliarem a toxicidade fumigante de óleos essenciais sobre coleópteros de grãos armazenados observaram aumento progressivo da mortalidade em maiores períodos de exposição. Segundo os autores, a permanência dos insetos em atmosfera saturada favorece o acúmulo gradual das moléculas bioativas no sistema espiracular e em tecidos lipofílicos, comprometendo processos fisiológicos essenciais e reduzindo a capacidade de destoxificação.

A elevada atividade do óleo essencial em comparação ao cuminaldeído isolado pode estar relacionada ao efeito sinérgico entre os constituintes presentes na matriz química do óleo. Embora o cuminaldeído represente a maior fração do óleo essencial de cominho (42,30%), a ausência dos compostos secundários na forma isolada reduziu significativamente sua eficiência biológica, exigindo concentrações até quatro vezes maiores para atingir níveis semelhantes de mortalidade. Conforme demonstrado por Pavela *et al.* (2022) e Ali *et al.* (2023), compostos minoritários frequentemente presentes em óleos essenciais, como limoneno e para-cimeno, podem atuar de forma complementar sobre a cutícula e membranas lipídicas dos insetos, aumentando a permeabilidade celular e favorecendo a penetração do composto majoritário até os sítios-alvo no sistema nervoso central.

Adicionalmente, observou-se relação dose-dependente entre as concentrações avaliadas e a mortalidade de *S. zeamais*. Enquanto as menores dosagens promoveram baixos índices de letalidade, o aumento das concentrações resultou em mortalidade próxima ou igual a 100%, principalmente após 72 horas de exposição. Esse comportamento corrobora os achados de Isman (2020) e Pavela e Benelli (2016), que destacam que compostos terpênicos presentes em óleos essenciais podem atuar sobre múltiplos alvos fisiológicos, incluindo inibição da acetilcolinesterase e interferência em receptores de octopamina, promovendo desordens neurológicas e comprometimento das funções vitais dos insetos.

Por fim, os baixos valores de χ^2 associados a níveis de probabilidade (P) superiores a 0,05 demonstram adequado ajuste estatístico dos dados experimentais, indicando elevada

confiabilidade estatística das estimativas de CL_{50} obtidas.

3.5.1 Mortalidade por contato

Os resultados obtidos no ensaio de toxicidade por contato demonstraram que tanto o óleo essencial de cominho quanto o cuminaldeído apresentaram atividade inseticida sobre adultos de *Sitophilus zeamais*, promovendo redução progressiva dos valores de CL_{50} ao longo do período de exposição. Observou-se comportamento dependente do tempo para ambos os tratamentos, evidenciado pelo decréscimo das concentrações letais entre 24 e 72 horas (Tabela 8).

Tabela 8 – Toxicidade por contato do óleo essencial de cominho e do cuminaldeído sobre adultos de *Sitophilus zeamais*

Tratamento	Tempo	CL_{50} ($\mu\text{L mL}^{-1}$)	IC95%	χ^2	P
Cominho	24 h	18,74	15,62 – 22,11	3,85	0,426
Cominho	48 h	15,93	13,08 – 19,27	5,16	0,271
Cominho	72 h	12,41	9,88 – 15,27	6,92	0,140
Cuminaldeído	24 h	51,32	42,81 – 61,78	4,47	0,346
Cuminaldeído	48 h	44,17	36,05 – 53,89	5,73	0,219
Cuminaldeído	72 h	37,85	30,74 – 46,18	7,08	0,132

Legenda: CL_{50} : concentração letal capaz de causar mortalidade de 50% da população; IC95%: intervalo de confiança de 95%; χ^2 : qui-quadrado.

Fonte: Da autora (2026)

O óleo essencial de cominho apresentou maior eficiência inseticida em comparação ao cuminaldeído isolado, registrando menores valores de CL_{50} em todos os tempos avaliados. Após 72 horas de exposição, o óleo essencial apresentou CL_{50} de $12,41 \mu\text{L cm}^{-2}$, enquanto o cuminaldeído isolado demandou $37,85 \mu\text{L cm}^{-2}$. Esses resultados demonstram que a matriz integral do óleo essencial apresentou efeito inseticida mais pronunciado do que o composto majoritário isolado. Essa superioridade biológica pode estar relacionada à ação combinada e sinérgica entre os metabólitos presentes na composição química do óleo. Estudos de Pavela *et al.* (2022) e Ali *et al.* (2023) demonstram que a associação entre monoterpenos hidrocarbonetos

e aldeídos aromáticos potencializa os efeitos neurotóxicos e aumenta a eficiência inseticida frente a pragas de grãos armazenados.

De acordo com Pavela e Benelli (2016), constituintes minoritários presentes no óleo essencial de cominho, como p-cimeno, γ -terpineno e β -pineno, podem atuar de forma cooperativa. No método de contato, esses compostos lipofílicos favorecem o aumento da permeabilidade da epicutícula do inseto, facilitando a difusão e a penetração cuticular do cuminaldeído até os tecidos internos da praga. Após a absorção, os compostos voláteis podem atuar sobre múltiplos alvos fisiológicos, inibindo a enzima acetilcolinesterase (AChE), bloqueando receptores de octopamina e desregulando canais iônicos neuronais, desencadeando hiperexcitação nervosa, descoordenação motora e morte do inseto (Isman, 2020; Kumar *et al.*, 2022; Ali *et al.*, 2023).

Os maiores valores de CL_{50} observados no ensaio por contato, quando comparados aos bioensaios de fumigação, estão diretamente relacionados às diferenças nas rotas de exposição dos insetos aos compostos voláteis. Enquanto na fumigação os constituintes ativos penetram rapidamente pelo sistema respiratório espira-traqueal, no ensaio por contato a absorção ocorre predominantemente via tegumento, um processo mais lento que exige maiores concentrações para promover efeito letal semelhante. Esse comportamento também foi observado por De Souza *et al.* (2025) em estudos envolvendo inseticidas botânicos aplicados sobre pragas de grãos armazenados. Resultados semelhantes foram relatados por Benelli *et al.* (2022), que afirmam destacar que a eficiência inseticida de compostos voláteis depende diretamente da via de exposição e da capacidade de penetração cuticular.

Além disso, a redução gradual dos valores de CL_{50} ao longo do tempo evidencia efeito residual e cumulativo dos tratamentos. A exposição prolongada à superfície tratada favorece o acúmulo progressivo dos compostos lipofílicos no organismo do inseto, superando gradualmente seus sistemas enzimáticos de destoxificação, como citocromos P450 e glutathione S-transferases. Esse padrão de toxicidade crônica retardada é frequentemente descrito para bioinseticidas ricos em monoterpenos oxigenados e compostos fenólicos bioativos (Pavela *et al.*, 2022; Iskandar *et al.*, 2025).

Por fim, os baixos valores de χ^2 associados aos níveis de probabilidade superiores a 0,05 confirmam o adequado ajuste do modelo Probit aos dados experimentais, demonstrando confiabilidade estatística das estimativas obtidas. Dessa forma, os resultados reforçam o potencial do óleo essencial de *C. cyminum* como alternativa promissora e sustentável para integração em programas de manejo de *S. zeamais* em sistemas de armazenamento de grãos.

3.5.2 Análise Estatística

Os dados de mortalidade observados nos ensaios de fumigação e contato foram corrigidos, quando necessário, e submetidos à análise de Probit. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAS, por meio do procedimento PROC PROBIT. Foram estimados os valores de concentração letal média (CL_{50}), acompanhados dos respectivos intervalos de confiança a 95%, coeficientes angulares (slope) e valores de qui-quadrado (χ^2), utilizados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo estatístico.

CONCLUSÃO

O óleo essencial de *Cuminum cyminum* e seu composto majoritário, o cuminaldeído, apresentaram atividades antifúngica, antibacteriana e inseticida frente aos microrganismos e insetos avaliados. Nos ensaios antifúngicos, observou-se inibição do crescimento micelial de *Penicillium citrinum* e *Fusarium verticillioides*, com valores superiores a 60% em algumas concentrações, além de alterações nos teores de ergosterol, especialmente para o cuminaldeído, sugerindo interferência na integridade da membrana plasmática fúngica.

Nos ensaios antibacterianos, o cuminaldeído apresentou maior atividade frente a *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, evidenciada pelos menores valores de CMI e CMB em comparação ao óleo essencial. Em contrapartida, nos bioensaios com *Sitophilus zeamais*, o óleo essencial apresentou maior eficácia inseticida, com redução progressiva dos valores de CL_{50} ao longo do tempo de exposição nos métodos de fumigação e contato. De modo geral, os resultados demonstram o potencial do óleo essencial de cominho e do cuminaldeído como fontes de compostos bioativos com aplicação no controle de fungos, bactérias e insetos associados a alimentos armazenados.

TERCEIRA PARTE

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos evidenciam que o óleo essencial de *C. cuminum* e o cuminaldeído possuem elevado potencial para aplicação no controle de fungos, bactérias e insetos associados a alimentos e grãos armazenados.

Dessa forma, estudos futuros poderão avaliar sua incorporação em sistemas de conservação, revestimentos, embalagens ativas ou outras tecnologias destinadas à proteção de alimentos armazenados, ampliando as possibilidades de aplicação prática desses compostos bioativos.

REFERÊNCIAS

- ABDELAAL, A. A. A. *et al.* **Insecticidal activity of cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil against stored-product insects.** *Journal of Stored Products Research*, v. 93, p. 101845, 2021.
- ADAMS, R. P. **Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry.** 5. ed. Carol Stream: Allured Publishing Corporation, 2017.
- AHMAD, A. *et al.* **Fungicidal activity of thymol and carvacrol by disrupting ergosterol biosynthesis and membrane integrity against *Candida*.** *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, v. 30, n. 1, p. 41–50, 2010.
- ALHADLAQ, M. A. *et al.* **Overview of pathogenic *Escherichia coli*, with a focus on Shiga toxin-producing serotypes, global outbreaks (1982–2024) and food safety criteria.** *Gut Pathogens*, v. 16, art. 57, 2024.
- ALI, B. *et al.* **Essential oils and their bioactive compounds as eco-friendly alternatives for insect pest management: mechanisms, applications and challenges.** *Industrial Crops and Products*, v. 197, p. 116563, 2023.
- ALLAN, N. F. *et al.* **Volatile compounds from essential oils in the control of filamentous fungi associated with stored foods.** *Journal of Applied Microbiology*, v. 132, n. 5, p. 3852–3864, 2022.
- ANGANE, M. *et al.* **Essential oils and their major components: an updated review on antimicrobial activities, mechanism of action and their potential application in the food industry.** *Foods*, v. 11, n. 3, art. 464, 2022
- ANNAZ, H. *et al.* **Impact of essential oils on enzyme activity, reserve products, biomarkers, and gene expression of *Tribolium castaneum*.** *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, v. 299, art. 110167, 2025
- ANUMUDU, C. K.; *et al.* **A review of the mycotoxin family of fumonisins, their occurrence, toxicity, and detection.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 26, n. 1, art. 184, 2024.
- ASLAM, B. *et al.* **Antibiotic resistance: a global crisis.** *Infection and Drug Resistance*, v. 14, p. 1645–1658, 2021.
- AYLLÓN-GUTIÉRREZ, R. *et al.* **Applications of Plant Essential Oils in Pest Control and Their Encapsulation Strategies: A Review.** *Agriculture*, v. 14, 2024.
- BAKKALI, F. *et al.* **Biological effects of essential oils – a review.** *Food and Chemical Toxicology*, v. 46, n. 2, p. 446–475, 2008.

BENELLI, G. *et al.* **Acute and sub-lethal toxicity of essential oils against stored-product insects: recent advances and future perspectives.** *Industrial Crops and Products*, v. 178, p. 114617, 2022.

BENNETT, J. W.; KLICH, M. **Mycotoxins.** *Clinical Microbiology Reviews*, v. 16, n. 3, p. 497–516, 2003.

BETTAIEB, I. *et al.* **Essential oils, phenolics, and antioxidant activities of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds cultivated in different regions of Tunisia.** *Food and Bioprocess Technology*, v. 4, n. 4, p. 655–662, 2010.

BOMFIM, N. S. *et al.* **Ergosterol quantification as an indicator of antifungal activity of natural compounds against filamentous fungi.** *Food Chemistry*, v. 178, p. 125–132, 2015.

BRANDÃO, R. M. *et al.* **Antifungal and antimycotoxigenic effect of the essential oil of *Eremanthus erythropappus* on three different *Aspergillus* species.** *Flavour and Fragrance Journal*, v. 35, n. ?, p. 524–533, 2020.

BRANDÃO, R. M. *et al.* **Antifungal activity and the effect of the essential oil of *Lippia origanoides* Kunth on *Aspergillus* mycotoxins production.** *Aust. J. Crop Sci.*, v. 15, p. 1005–1012, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Farmacopeia Brasileira.** 5. ed. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), 2010. v. 1.

BURT, S. **Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods — a review.** *International Journal of Food Microbiology*, v. 94, n. 3, p. 223–253, 2004.

CAMPOLINA, G. A. *et al.* **Essential oils from *Cuminum cyminum* and *Laurus nobilis* and their principal constituents: evaluation of antifungal and antimycotoxigenic potential in *Aspergillus* species.** *FEMS Microbiology Letters*, v. 371, fnae081, 2024.

CARVALHO, T. B. *et al.* **Preventing fungal spoilage from raw materials to final product: innovative preservation techniques for fruit fillings.** *Foods*, v. 13, n. 17, art. 2669, 2024.

DE SOUZA, L. *et al.* **Synergism, biochemical changes and morphophysiological impacts induced by terpenes and phenylpropanoids in *Sitophilus zeamais*.** *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 213, art. 106475, 2025.

DEWICK, P. M. **Medicinal natural products: a biosynthetic approach.** 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

EL ASBAHANI, A. *et al.* **Essential oils: from extraction to encapsulation.** *International Journal of Pharmaceutics*, v. 483, n. 1-2, p. 220–243, 2015.

EL-SAYED, A. M.; YOUSEF, H. M. **Botanical insecticides based on essential oils for stored grain pest management.** *Industrial Crops and Products*, v. 171, p. 113892, 2021.

FAO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.

FATTAHIAN, N. *et al.* **Environmental factors affecting essential oil biosynthesis in aromatic plants.** *Industrial Crops and Products*, v. 186, p. 115198, 2022.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a computer statistical analysis system.** *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos alimentos.** São Paulo: Atheneu, 2008.

GHASEMI, M. *et al.* **Chemical composition and antimicrobial activity of *Cuminum cyminum* essential oil against foodborne pathogens.** *Food Bioscience*, v. 47, p. 101651, 2022.

GHEISARY, Z. *et al.* **Synergistic antibacterial mechanisms of essential oil compounds against foodborne pathogens.** *Foods*, v. 14, n. 2, p. 388, 2025.

GOBBO-NETO, L.; LOPES, N. P. **Plant secondary metabolites.** *Química Nova*, v. 30, p. 374–381, 2007.

GUIMARÃES, A. G. *et al.* **Bioactive compounds and antibacterial activity of essential oils against foodborne bacteria.** *Food Control*, v. 98, p. 172–180, 2019.

HASHEMI, S. M. B.; KHANEGHAH, A. M.; SANT'ANA, A. S. **Essential oils in food systems.** *Trends in Food Science & Technology*, v. 72, p. 140–148, 2018.

HYLDGAARD, M.; MYGIND, T.; MEYER, R. L. **Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components.** *Frontiers in Microbiology*, v. 3, art. 12, 2012.

ISKANDAR, M. M.; HUSSEIN, R. A.; ALI, H. M.; *et al.* **Essential oils as multifunctional bioactive agents against foodborne pathogens and spoilage microorganisms.** *Foods*, v. 14, p. 522, 2025.

ISMAN, M. B. **Botanical insecticides in the twenty-first century—fulfilling their promise?** *Annual Review of Entomology*, v. 65, p. 233–249, 2020.

ISMAN, M. B. **Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world.** *Annual Review of Entomology*, v. 51, p. 45–66, 2006.

JORDÁ, T.; PUIG, S. **Ergosterol metabolism in fungi.** *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1865, p. 158731, 2020.

KAMLE, M. *et al.* **Citrinin mycotoxin contamination in food and feed: impact on agriculture, human health, and detection and management strategies.** *Toxins*, v. 14, n. 2, art. 85, 2022.

KARANTH, S. *et al.* **Linking microbial contamination to food spoilage and food waste: the role of smart packaging, spoilage risk assessments, and date labeling.** *Frontiers in Microbiology*, v. 14, art. 1198124, 2023.

KEDIA, A. *et al.* **Antifungal, antiaflatoxicogenic, and insecticidal efficacy of spearmint (*Mentha spicata* L.) essential oil.** *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 89, p. 29–36, 2014.

KHAN, S. *et al.* **The extraction and impact of essential oils on bioactive films and food preservation, with emphasis on antioxidant and antibacterial activities—A review.** *Foods*, v. 12, n. 22, art. 4169, 2023

KHOSRAVI, A. R.; SHOKRI, H.; MOKHTARI, A. R. **Efficacy of *Cuminum cyminum* essential oil on FUM1 gene expression of fumonisin-producing *Fusarium verticillioides* strains.** *Avicenna Journal of Phytomedicine*, v. 5, n. 1, p. 34–42, 2015.

KOHIYAMA, C. Y. *et al.* **Antifungal properties and inhibitory effects upon aflatoxin production of thyme and cinnamon essential oils and their major compounds.** *Food Control*, v. 40, p. 146–152, 2015.

KUMAR, P. *et al.* **Insecticidal properties of essential oils against stored grain pests: mechanisms, toxicity and applications.** *Journal of Stored Products Research*, v. 98, p. 101995, 2022.

LOGRIECO, A. *et al.* **Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with maize ear rot in Europe.** *European Journal of Plant Pathology*, v. 108, n. 7, p. 597–609, 2002.

LORINI, I. **Manejo integrado de pragas de grãos armazenados.** Passo Fundo: Embrapa, 2008.

LORINI, I.; KRZYZANOWSKI, F. C. **Armazenagem de grãos.** Campinas: IBG, 2009.

MURRAY, B. **Botanical insecticides in the twenty-first century: fulfilling their promise?** *Annual Review of Entomology*, Palo Alto, v. 65, p. 233–249, 2020.

MAINARDI, P. H.; BIDOIA, E. D. **Food safety management: preventive strategies and control of pathogenic microorganisms in food.** *European Journal of Biological Research*, v. 14, n. 1, p. 13–32, 2024

MASYITA, A. *et al.* **Antibacterial mechanisms of essential oils against Gram-negative bacteria.** *Molecules*, v. 27, n. 14, p. 4577, 2022.

MIRI, A.; DJENANE, D. **Essential oils in food preservation.** *Food Control*, v. 85, p. 26–35, 2018.

- MOHAMMADPOUR, H. *et al.* **Chemical composition and antifungal activity of *Cuminum cyminum* L. essential oil from Alborz Mountain against *Aspergillus* species.** *Journal of Mycology*, v. 2012, Article ID 402492, 2012.
- MORAES, L. P. *et al.* **Natural volatile compounds as sustainable alternatives for microbial control in food systems.** *Foods*, v. 12, n. 15, p. 2874, 2023.
- MORO, I. J. *et al.* **Antifungal activity of (R)-carvone and (S)-carvone against *Candida* species.** *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 48, n. 2, p. 296–302, 2017.
- MOUSTAFA, A. A.; EL-SAYED, S. M.; YOUSSEF, M. M. **Antimicrobial activity of essential oils.** *Food Bioscience*, v. 53, p. 102547, 2023.
- MUTLU-INGOK, A. *et al.* **Antibacterial, antifungal, antimycotoxigenic, and antioxidant activities of essential oils: an updated review.** *Molecules*, v. 25, n. 20, art. 4711, 2020.
- NAZARPOUR, F.; SHAMS-GHAHFAROKHI, M.; RAZZAGHI-ABYANEH, M. **Effects of essential oils on ergosterol biosynthesis and membrane integrity in foodborne fungi.** *Food Control*, v. 133, p. 108620, 2022.
- NIKOLIĆ, M. *et al.* **Antifungal activity of plant extracts.** *Industrial Crops and Products*, v. 162, p. 113281, 2021.
- NOSTRO, A. *et al.* **Susceptibility of methicillin-resistant *Staphylococci* to oregano essential oil, carvacrol and thymol.** *Letters in Applied Microbiology*, v. 41, n. 2, p. 174–178, 2005.
- NWOSU, L. C. **Maize and the maize weevil (*Sitophilus zeamais*): advances and innovations in postharvest control of the pest.** *Food Quality and Safety*, v. 2, n. 3, p. 145–152, 2018.
- OMOTAYO, O. P. *et al.* ***Fusarium verticillioides* of maize: from seedling disease to fumonisin contamination and control strategies.** *Frontiers in Fungal Biology*, v. 4, art. 1095765, 2023.
- PAVELA, R.; BENELLI, G. **Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints.** *Trends in Plant Science*, v. 21, n. 12, p. 1000–1007, 2016.
- PAVELA, R. *et al.* **Outstanding insecticidal activity and synergistic effects of essential oils against major insect pests.** *Industrial Crops and Products*, v. 178, p. 114614, 2022.
- PEREIRA, F. O. *et al.* **Antifungal activity of essential oils and their constituents against toxigenic fungi.** *Food Control*, v. 99, p. 346–353, 2019.
- PERRONE, G.; LOGRIECO, A. F.; VISCONTI, A. **Mycotoxigenic fungi: methods and protocols.** New York: Humana Press, 2020.

- PHOKWE, O. J. *et al.* **Medicinal plants as a natural greener biocontrol approach against maize weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky): a review.** *Plants*, v. 12, n. 13, art. 2505, 2023. DOI: 10.3390/plants12132505.
- PIMENTEL, D. *et al.* **Economic and environmental costs of pest control.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 113, p. 273–283, 2006.
- PINTO, J. G. *et al.* **Stored grain losses caused by insect pests and their impact on food quality.** *Journal of Stored Products Research*, v. 88, p. 101651, 2020.
- PINTO, M. E. A. *et al.* **Antifungal and antioxidant activity of essential oils and their major compounds against foodborne fungi.** *Food Research International*, v. 137, p. 109648, 2021.
- PITT, J. I.; HOCKING, A. D. **Fungi and food spoilage.** 3. ed. New York: Springer, 2009. 524 p.
- PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos.** Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000.
- REZAEI, M. *et al.* **Geographic variation in yield and chemical composition of cumin essential oil.** *Plants*, v. 12, n. 8, p. 1664, 2023.
- RIBEIRO-SANTOS, R. *et al.* **Use of essential oils in active food packaging: recent advances and future trends.** *Trends in Food Science & Technology*, v. 61, p. 132–140, 2021.
- ROBERTSON, J. L. *et al.* **Bioassays with arthropods.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- ROSA, J. S. *et al.* **Insecticidal activity of essential oils against stored grain pests: current perspectives and future applications.** *Crop Protection*, v. 135, p. 105205, 2020.
- SADEGHI, A.; GHASEMI, V.; MOSAVI, S. A. **Evaluation of insecticidal activity of *Cuminum cyminum* essential oil against stored-product insects.** *Journal of Plant Protection Research*, v. 59, n. 4, p. 456–463, 2019.
- SANTOS, F. A. **Uso de plantas medicinais.** 2005.
- SHARIFI, A. *et al.* **Antibacterial activity and membrane damage caused by cumin essential oil against multidrug-resistant *Staphylococcus aureus*.** *Microbial Pathogenesis*, v. 158, p. 105102, 2021.
- SILVA, D. M.; CORSO, M. P.; MATHEUS, D. R. **Determinação de ergosterol.** *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, v. 46, p. 303–309, 2010.
- SILVA, J. O. *et al.* **Natural compounds as alternatives for microbial control and food preservation.** *Food Research International*, v. 156, p. 111162, 2022.

SIMÕES, C. M. O. *et al.* **Farmacognosia: do produto natural ao medicamento.** 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

SOLIMAN, S. S. M. *et al.* **Antimicrobial activity of plant extracts.** *Journal of Food Science*, v. 81, p. M273–M280, 2016.

SOUZA, E. L. *et al.* **Chemical composition and biological activities of *Cuminum cyminum* essential oil: a review.** *Food Reviews International*, v. 39, n. 4, p. 2154–2176, 2021.

SOUZA, R. T. *et al.* **Biochemical and physiological effects of essential oils against stored-grain insects.** *Industrial Crops and Products*, v. 198, p. 116712, 2023.

TRAN, T. M. *et al.* **Post-harvest contamination of maize by *Fusarium verticillioides* and fumonisins linked to traditional harvest and post-harvest practices: a case study of small-holder farms in Vietnam.** *International Journal of Food Microbiology*, v. 339, art. 109022, 2021.

VENTOLA, C. L. **Antibiotic resistance crisis.** *Pharmacy and Therapeutics*, v. 40, p. 277–283, 2021.

WEETE, J. D. *et al.* **Ergosterol biosynthesis in fungi: physiological roles and antifungal targets.** *Fungal Biology Reviews*, v. 24, n. 3–4, p. 168–176, 2010.

WHO. **Antimicrobial resistance.** Geneva: World Health Organization, 2020.

WHO. **Food safety.** Geneva: World Health Organization, 2022.

WIŃSKA, K. *et al.* **Essential oils as antimicrobial agents — myth or real alternative?** *Molecules*, v. 24, n. 11, p. 2130, 2019.

WONGKATTIYA, N. *et al.* **Mechanisms of antibacterial activity of cuminaldehyde against foodborne pathogens.** *PLOS ONE*, v. 14, n. 11, p. e0225429, 2019.

YAMAMOTO-RIBEIRO, M. M. G. *et al.* **Effect of cinnamaldehyde and essential oils on the inhibition of fungal growth and ergosterol biosynthesis in toxigenic fungi.** *Food Chemistry*, v. 139, n. 1–4, p. 743–750, 2013.

ZAKY, A. A.; SHIM, J. H.; ABD EL-ATY, A. M. **Chemical composition, biological activities and applications of cumin (*Cuminum cyminum* L.): a review.** *Food Bioscience*, v. 42, p. 101213, 2021.