

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL E SANITÁRIA
CAMPUS CHAPECÓ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ECOTOXICIDADE DO ÓLEO ESSENCIAL DE CANELA E DO INSETICIDA
IMIDACLOPRIDO: EFEITOS INDIVIDUAIS E EM MISTURA**

ALUNO: Simone Zappe
ORIENTADOR Prof. Dr. Paulo Roger Lopes Alves
COORIENTADOR: Dr. Felipe Ogliari Bandeira

Junho - 2025

SIMONE ZAPPE

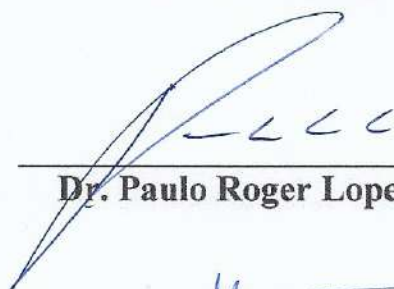
**ECOTOXICIDADE DO ÓLEO ESSENCIAL DE CANELA E DO
INSETICIDA IMIDACLOPRIDO: EFEITOS INDIVIDUAIS E EM
MISTURA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito
para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: **Prof. Dr. Paulo Roger Lopes Alves**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e
aprovado pela banca em: 30 / 06 / 2028

BANCA EXAMINADORA



Dr. Paulo Roger Lopes Alves – UFFS



Dr. Siomar Pedro Tironi – UFFS



Dr. Leandro Bassani - UFFS

ECOTOXICIDADE DO ÓLEO ESSENCIAL DE CANELA E DO INSETICIDA IMIDACLOPRIDO: EFEITOS INDIVIDUAIS E EM MISTURA

Simone Zappe¹
Paulo Roger Lopes Alves²
Felipe Ogliari Bandeira³

RESUMO

O uso crescente de substâncias químicas na agricultura, em especial os agrotóxicos sintéticos, tem suscitado preocupações quanto aos impactos ambientais, apesar de seus benefícios produtivos. Dentre esses compostos, destaca-se o inseticida imidacloprido (IMI), amplamente utilizado no controle de insetos sugadores. Em contrapartida, óleos essenciais extraídos de plantas, como o de canela, vêm sendo investigados como potenciais alternativas naturais aos agrotóxicos. No entanto, os efeitos ecotoxicológicos desses compostos naturais ainda são pouco compreendidos, sobretudo quando utilizados em misturas com agrotóxicos sintéticos. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos ecotoxicológicos, individuais e em mistura, do óleo essencial de canela e do imidacloprido sobre colêmbolos da espécie *Folsomia candida*, em solo artificial tropical (SAT). Os ensaios de toxicidade crônica foram realizados com base na ISO 11267, sob regime de temperatura de 20 ± 2 °C e fotoperíodo 12:12h (claro:escuro). As concentrações testadas foram estabelecidas com base nas doses comerciais (DC) para cada substância. Para o IMI, foram avaliadas as concentrações correspondentes a 0,25DC; 0,50DC; 1DC; 2DC e 4DC. No caso do óleo essencial de canela, adotou-se como referência a dose de 1 litro por hectare, testando-se concentrações equivalentes a 1DC; 2DC; 4DC; 7DC; 10,5DC; 16DC e 24DC. Para a avaliação das misturas, foi empregada uma combinação fatorial entre duas concentrações do óleo essencial de canela (1DC e 2DC) e as cinco concentrações do IMI. Os resultados encontrados demonstraram que o imidacloprido foi cerca de 70 vezes mais tóxico que o óleo essencial de canela quando avaliados separadamente [EC_{50} de 1,69 (87,17 - 149,61) $\mu\text{L kg}^{-1}$ e 118,39 (1,25 - 2,14) $\mu\text{L kg}^{-1}$ respectivamente]. Além disso, quando o agrotóxico foi testado em mistura com o óleo de canela, as misturas testadas apresentaram maior toxicidade que o inseticida isolado, com EC_{50} de 1,43 (1,18 - 1,68) $\mu\text{L kg}^{-1}$ e 1,09 (0,92 - 1,25) $\mu\text{L kg}^{-1}$ (mistura com 1DC e 2DC do óleo). Embora o óleo essencial isolado seja menos tóxico, sua combinação com o imidacloprido intensificou os efeitos adversos.

Palavras-chave: Ecotoxicologia terrestre. Colêmbolos. Biopesticidas. *Cinnamomum*.

¹ Acadêmica do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul; E-mail: simone.zappe@estudante.uffs.edu.br

² Professor Orientador – Universidade Federal da Fronteira Sul. Doutor. E-mail: paulo.alves@uffs.edu.br

³ Coorientador. Doutor. E-mail: bandeira.felipeog@gmail.com

ABSTRACT

The increasing use of chemicals in agriculture, especially pesticides, has raised concerns about their environmental impacts, despite their productive benefits. Among these compounds, the insecticide imidacloprid (IMI) stands out, widely used to control sucking insects. In contrast, essential oils extracted from plants, such as cinnamon, have been investigated as potential natural alternatives to synthetic pesticides. However, the ecotoxicological effects of these natural compounds are still poorly understood, especially when used in mixtures with synthetic pesticides. Therefore, the present study aimed to evaluate the individual and combined ecotoxicological effects of cinnamon essential oil and imidacloprid on springtails of the species *Folsomia candida*, in tropical artificial soil (TAS). Chronic toxicity tests were performed based on ISO 11267, under a temperature regime of 20 ± 2 °C and a photoperiod of 12:12 h (light:dark). The tested concentrations were established based on the commercial doses (CD) for each substance. For IMI, the concentrations corresponding to 0.25CD; 0.50CD; 1CD; 2CD and 4CD were evaluated. In the case of cinnamon essential oil, the dose of 1 liter per hectare was adopted as a reference, testing concentrations equivalent to 1x; 2x; 4x; 8x; 16x; 32x and 64x this dose. To evaluate the mixtures, a factorial combination between two concentrations of cinnamon essential oil (1CD and 2CD) and the five concentrations of IMI was used. The results showed that imidacloprid was approximately 70 times more toxic than cinnamon essential oil when evaluated separately [EC_{50} of 1.69 (87.17 - 149.61) $\mu\text{L kg}^{-1}$ and 118.39 (1.25 - 2.14) $\mu\text{L kg}^{-1}$ respectively]. Furthermore, when the pesticide was tested in mixture with cinnamon oil, the tested mixtures showed greater toxicity than the isolated insecticide, with EC_{50} of 1.43 (1.18 - 1.68) $\mu\text{L kg}^{-1}$ and 1.09 (0.92 - 1.25) $\mu\text{L kg}^{-1}$ (mixture with 1CD and 2CD of the oil). Although the isolated essential oil is less toxic, its combination with imidacloprid intensified the adverse effects.

Keywords: Terrestrial ecotoxicology. Collembola. Biopesticides. *Cinnamomum*.

1 INTRODUÇÃO

Os agrotóxicos vem sendo amplamente utilizados na agricultura moderna, pois desempenham um papel crucial no controle de uma extensa variedade de pragas e doenças que acometem as culturas agrícolas, contribuindo significativamente para a segurança alimentar e a produtividade agrícola. No contexto global, o Brasil se sobressai no que diz respeito ao consumo e importação de agrotóxicos. Somente em 2022, foram importados cerca de 283,31 mil toneladas de ingredientes ativos (i. a.), enquanto o consumo interno ficou em torno de 731,74 mil toneladas de i. a. (IBAMA, 2023). Estes componentes ativos apresentam diversas funcionalidades e especificidades de uso.

Entre as principais moléculas de agrotóxicos inseticidas comercializados no Brasil, destaca-se o imidacloprido (IMI), que é um composto neurotóxico que pertence a classe dos

neonicotinoides. Ele é amplamente empregado em formulações de agrotóxicos voltados ao manejo de insetos sugadores, como pulgões, cigarrinhas, moscas brancas e besouros, entre outros (Motaung, 2020). O imidacloprido é comumente utilizado no controle de pragas em culturas como arroz, milho, beterraba, melão e algodão, por meio da pulverização foliar, do tratamento de sementes ou da aplicação direta no solo (Souza; Da Silva, 2016; Motaung, 2020). O mecanismo de ação do IMI baseia-se na ligação seletiva aos receptores nicotínicos de acetilcolina, interferindo no sistema nervoso, o que causa uma ativação prolongada desses receptores, resultando em desregulação na transmissão dos impulsos nervosos, paralisia e, posteriormente, morte (Buffin, 2003; Castro, 2007).

Apesar dos efeitos benéficos de agrotóxicos sintéticos proteção contra os ataques de insetos-praga e, conseqüentemente, no aumento da produção agrícola, sua persistência no solo e em corpos hídricos pode causar sérios impactos aos ecossistemas, devido à sua toxicidade e capacidade de se acumularem ao longo da cadeia alimentar (Milhorne *et al.*, 2009). A toxicidade do IMI tem sido avaliada sobre diferentes organismos não-alvos. Em ambientes aquáticos, os estudos já demonstraram a toxicidade do i.a. sobre lagostins *Cherax quadricarinatus* causando inibição do crescimento e indução de estresse oxidativo (Lu *et al.*, 2024), aumento da mortalidade em espécies de zooplâncton de água doce (Suzuki *et al.*, 2024) e comprometimento do comportamento visual de zebrafish (*Danio rerio*) (Fu *et al.*, 2024). Além disso, o declínio populacional de abelhas tem sido relacionado à exposição a este inseticida, afetando etapas críticas do ciclo de vida, como o acasalamento (Chen *et al.*, 2024; Motaung, 2020). Os efeitos tóxicos desse i.a. também foram observados na fauna edáfica, especialmente para espécies de colêmbolos *Folsomia candida* e para minhocas *Eisenia andrei* em testes ecotoxicológicos (crônicos e/ou agudos) com efeito na sobrevivência, reprodução e crescimento (Bandeira *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2023; Lima e Silva *et al.*, 2017; Lima e Silva *et al.*, 2020; Van Gestel *et al.*, 2017).

Diante dos impactos ambientais causados pelo uso de agrotóxicos sintéticos, tem crescido o interesse por alternativas mais sustentáveis, como os bioinseticidas, que são considerados menos tóxicos (Pavela, 2015). Nesse contexto, destacam-se os óleos essenciais como novas opções para o controle de pragas agrícolas, visando à redução dos efeitos adversos associados às substâncias sintéticas e à promoção de práticas de manejo mais sustentáveis (Bossou *et al.*, 2015; Amaral *et al.*, 2017).

Os óleos essenciais (OEs) são entendidos como misturas naturais complexas que podem conter cerca de 20 a 60 componentes, normalmente caracterizados em função de seus compostos voláteis que contêm elementos aromáticos potentes, proporcionando um aroma,

sabor ou odor distintos (Campos *et al.*, 2019; Pavela, 2015). Frequentemente denominados como metabólitos secundários, esses compostos são sintetizados e armazenados em estruturas complexas, encontrando-se em forma de pequenas gotículas de fluido nas folhas, caule, flores, frutos, casca e raízes das plantas (Fahn, 2000).

Os OEs desempenham uma série de funções vitais para as plantas, tais como atrair polinizadores e insetos benéficos, proporcionar proteção contra condições extremas de temperatura, bem como os compostos químicos presentes nos óleos podem atuar nos mecanismos de defesa contra pragas e microrganismos (Pavela, 2015). Devido a estas características, é comum encontrar na literatura científica estudos que exploram as propriedades inseticidas, bactericidas e fungicidas dos óleos essenciais (Estrela *et al.*, 2006; (Fierascu *et al.*, 2020; Jantan *et al.*, 2008; Pauliquevis; Favero, 2015; Oliveira; Vendramim, 1999).

O óleo essencial de canela é frequentemente utilizado na indústria de alimentos, por apresentarem efeitos sanitizantes mais eficientes em detrimento a de alguns sanitizantes químicos tradicionais (Beraldo *et al.*, 2013). Entretanto, esse OE tem se destacado também por apresentar propriedades fungicidas, sendo esse efeito observado por Lorenzetti *et al.* (2011) sobre *Botrytis cinerea*, causador do mofo cinzento em morangueiro, com 84% de inibição do crescimento micelial na concentração de 1000 ppm e supressão total da produção e germinação de conídios. Benato *et al.* (2018) também observaram efeitos do óleo de canela sobre o fungo *Penicillium digitatum* que causa o bolor verde em laranjas, inibindo totalmente o índice de crescimento micelial em concentrações superiores a 0,5 g L⁻¹ por contato. De mesmo, modo Jiang *et al.* (2016) identificaram efeito inseticida do óleo de sementes de *Cinnamomum camphora* sobre o pulgão-do-algodão (*Aphis gossypii*), com CL₅₀ de 146,78 mg/L em 48h e 89,86% de repelência em 24h.

Deste modo, certas plantas podem sintetizar metabólitos que possuem potencial para serem altamente tóxicos, tornando essencial a avaliação dos possíveis efeitos deletérios em organismos não-alvo (Ferraz *et al.*, 2022). Embora ainda reduzidos, alguns estudos desenvolvidos investigaram o efeito tóxico também em organismos não-alvos do solo. Por exemplo, Campos *et al.* (2019) demonstraram que o extrato aquoso de folhas de nim (*Azadirachta indica*) reduziu a atividade microbiana do solo em exposições de curto prazo, enquanto Brancalione (2022) avaliou sete óleos essenciais extraídos de diferentes espécies de *Eucalyptus*, observando toxicidade reprodutiva em *Folsomia candida* para três dessas espécies, a CE₅₀ (correspondente à redução de 50% na reprodução dos organismos em relação ao controle) foi estimada em 35,4; 41,8; e 42,6 mg kg⁻¹ para *Eucalyptus urocam*, *Eucalyptus*

dunnii e *Eucalyptus urograndis*, respectivamente. Por outro lado, Volpato *et al.* (2016b) relataram que o óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* não afetou negativamente a sobrevivência ou reprodução de *F. candida*. Em contrapartida, o óleo essencial de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) apresentou toxicidade significativa para os colêmbolos mesmo em baixas concentrações (25 mg kg⁻¹) (Volpato *et al.*, 2016a).

Esses resultados demonstram uma variabilidade do potencial ecotoxicológico dos OEs, não apenas entre diferentes espécies de plantas, mas também entre óleos de plantas de um mesmo gênero evidenciado em Brancalione (2022) para o gênero *Eucalyptus*.

Assim, frente à expansão do mercado de óleos essenciais para também uso agrícola, torna-se fundamental a condução estudos detalhados sobre a toxicidade específica de cada óleo com potencial de aplicação no solo (Ferraz *et al.*, 2022), com especial atenção para os efeitos sobre organismos não-alvo no ambiente. Nesse contexto, este trabalho propõe-se a avaliar os efeitos ecotoxicológicos individuais e em mistura do óleo essencial de canela e do inseticida imidacloprido, buscando compreender como essas substâncias podem influenciar a toxicidade para os colêmbolos da espécie *Folsomia candida* em solo SAT. Além disso, os dados resultantes da investigação, poderão vir ainda a contribuir para o desenvolvimento de novos produtos e práticas ambientais mais sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo realizou ensaios de toxicidade crônica para colêmbolos da espécie *F. candida* em solo artificial tropical (SAT), a fim de se avaliar a ecotoxicidade do óleo essencial de canela isoladamente e quando combinado com o inseticida imidacloprido. Os testes foram realizados conforme as recomendações da ISO 11267 (ISO, 2014), no Laboratório de Botânica, Ecologia e Entomologia da UFFS, Campus Chapecó (SC).

2.1 ESPÉCIE TESTE

Os testes utilizaram colêmbolos da espécie *F. candida*, mantidos em criação no laboratório, conforme as diretrizes da ISO 11267 (ISO, 2014), sob condições ambientais da criação controladas, com regime de temperatura de 20 ± 2 °C e fotoperíodo 12:12h (claro:escuro). Os organismos foram mantidos em recipientes plásticos contendo substrato composto por uma mistura de carvão ativado, água e gesso na proporção de 1:6:10 (p:p:p). A alimentação ocorreu duas vezes na semana, através da oferta da levedura granular seca (*Saccharomyces cerevisiae*). A oviposição dos colêmbolos foi induzida para a coleta de ovos,

com o objetivo de garantir a sincronização da idade dos organismos entre 10 e 12 dias para a realização dos testes.

2.2 SOLO TESTE

O solo utilizado nos testes foi o solo artificial tropical (SAT) adaptado de Garcia (2004), visando melhor padronização dos testes ecotoxicológicos para regiões tropicais e subtropicais. O SAT consiste em uma mistura de areia fina (75%), argila caulinita (20%) e fibra de coco (5%). Para viabilidade dos testes, o pH do solo artificial tropical foi ajustado para $6,0 \pm 0,5$ por adição de CaCO_3 .

2.3 SUBSTÂNCIAS TESTE

2.3.1 Óleo essencial de canela

O óleo essencial (OE) de canela foi obtido pelo Laboratório de Bromatologia da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, *Campus* Chapecó (SC). A remoção do óleo das cascas de canela (*Cinnamomum verum*) foi realizada utilizando o método de hidrodestilação, por meio de um hidrodestilador modelo Clevenger. Após a extração, o óleo foi submetido à análise cromatográfica para a identificação dos principais Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), conforme dados apresentados na Tabela 1. A análise cromatográfica completa dos VOCs encontra-se no Apêndice A.

Tabela 1 - Principais compostos identificados por Cromatografia

Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs)	Área Correspondente
Eucalyptol	26,14%
3-cyclohexene-1-methanol.alpha.alpha. 4-trimethyl-	12,33%

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

2.3.2 Inseticida Imidacloprido

O ingrediente ativo (i.a.) imidacloprido utilizado foi obtido da formulação comercial conhecida como Much 600 FS®, o qual possui uma concentração de 600 g L^{-1} (60% m/v) de imidacloprido.

2.4 ENSAIOS ECOTOXICOLÓGICOS

Os ensaios ecotoxicológicos seguiram um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Foram avaliados os efeitos individuais de concentrações crescentes do ingrediente ativo imidacloprido (Tabela 2), cuja dose comercial utilizada foi baseada em Bandeira *et al.* (2020), e do óleo de canela (Tabela 3), bem como a ecotoxicidade resultante da combinação fatorial de duas doses óleo essencial de canela (concentrações correspondentes a 1x e 2x a dose comercial - DC) com as cinco concentrações do IMI (Tabela 4). Para todos os ensaios realizados, foram utilizadas cinco repetições a cada tratamento.

Tabela 2 - Concentrações de IMI testado por kg de solo seco

Identificação	Conc. μL de IMI por kg^{-1} de solo seco	Correspondência à Dose comercial
C0	0,00	0,00 DC
C1	0,18	0,25 DC
C2	0,36	0,50 DC
C3	0,72	1,00 DC
C4	1,44	2,00 DC
C5	2,88	4,00 DC

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Tabela 3 - Concentrações de óleo de canela testado por kg de solo seco

Identificação	Conc. μL de óleo por kg^{-1} de solo seco	Correspondência mg kg^{-1} de solo seco	Correspondência à Dose Comercial
C0	0,00	0	0
C1	5,00	4,48	1 DC
C2	10,00	8,96	2 DC
C3	20,00	17,91	4 DC
C4	35,00	31,34	7 DC
C5	52,50	47,02	10,5 DC
C6	80,00	71,64	16 DC
C7	120,00	107,47	24 DC

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A escolha das concentrações fixas de óleo de canela justificam-se levando em consideração a utilização de 1 litro de óleo essencial de canela por hectare (dose comercial - DC), o que corresponde a 5 $\mu\text{L kg}^{-1}$ de solo. A segunda concentração leva em consideração um fator multiplicativo de 2, correspondendo a 2 DC.

Tabela 4 - Concentrações do controle de óleo e das misturas testados por kg de solo seco

Identificação	Concentração $\mu\text{L kg}^{-1}$ de solo seco	
	Mistura 1 (Óleo + IMI)	Mistura 2 (Óleo + IMI)
C0	5,00 + 0,00	10,00 + 0,00
C1	5,00 + 0,18	10,00 + 0,18
C2	5,00 + 0,36	10,00 + 0,36
C3	5,00 + 0,72	10,00 + 0,72
C4	5,00 + 1,44	10,00 + 1,44
C5	5,00 + 2,88	10,00 + 2,88

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para os ensaios ecotoxicológicos foram utilizados recipientes cilíndricos de vidro, nos quais foram adicionados aproximadamente 30g de solo úmido contaminado nas concentrações pré determinadas (Tabela 2, 3 e 4), ou solo controle. Em cada recipiente, foram inseridos dez colêmbolos de idade sincronizada entre 10 e 12 dias. Os recipientes permaneceram fechados ao longo do teste, e mantidos sobre as mesmas condições ambientais da criação. Os recipientes somente foram abertos uma vez na semana em função de ajuste da umidade do solo e renovação do ar interior. Decorridos 14 dias de início do ensaio, foi ofertado alimento a cada unidade experimental, pela adição de 2 mg de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*).

Após o período de 28 dias do início dos testes, cada unidade experimental foi imersa em água tingida com tinta nanquim preta para facilitar a visualização dos organismos sobreviventes. Posteriormente, as réplicas foram fotografadas com vista superior em alta resolução, e as imagens foram analisadas com o auxílio do software ImageJ® para contabilizar o número de juvenis gerados.

2.5 ANÁLISE DOS DADOS

A fim de garantir que os dados obtidos estão de acordo com as pressuposições necessárias para a análise de variância (ANOVA), foram realizados testes de homogeneidade de variâncias e de normalidade utilizando os métodos de Bartlett e Shapiro-Wilk, respectivamente. Atendidas as preposições, os dados foram submetidos a uma análise ANOVA, e as diferenças significativas entre o controle e as concentrações testadas foram comparadas por meio do teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

A partir desta análise, foi possível determinar a menor concentração testada com efeito de redução significativa observada (CEO) e a maior concentração testada sem efeito de redução significativa observada (CENO). Além disso, foram determinados os valores das concentrações de efeito em 50% (EC_{50}), e 10% (EC_{10}) da população, respectivamente, através

de modelos de regressão não lineares (Environment Canada, 2007). Todas as análises descritas foram realizadas no software Statistica 13.0®.

3 RESULTADOS

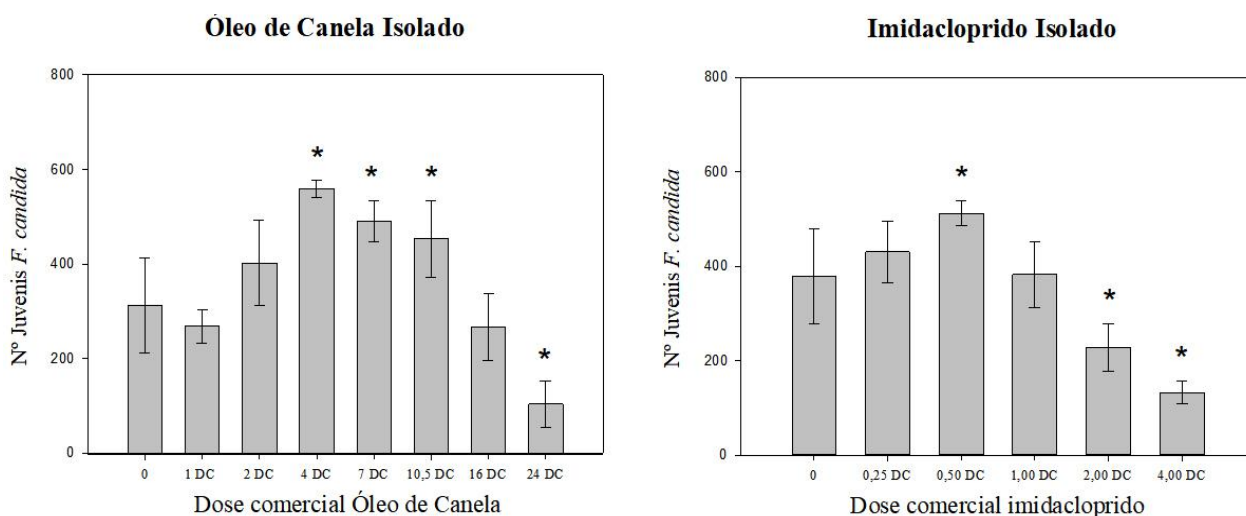
3.1 VALIDAÇÃO DOS ENSAIOS DE TOXICIDADE

Os ensaios de toxicidade crônica atenderam aos critérios estabelecidos na ISO 11267 (ISO, 2014). Isso implica que, o coeficiente de variação (CV) obtido nos tratamentos controle foi inferior a 30%, o número médio de juvenis no tratamento controle foi maior do que 100 indivíduos, e que a mortalidade média dos organismos adultos no tratamento controle ficou abaixo de 20%.

3.2 TESTES DE TOXICIDADE CRÔNICA

Os ensaios de toxicidade crônica realizados em solo artificial tropical (SAT), utilizando óleo essencial de canela e imidacloprido, promoveram reduções no número de juvenis produzidos, indicando efeitos adversos sobre a reprodução dos *F. candida* (Figuras 1 e 2). Além disso, foi possível observar que as concentrações correspondentes a 4DC, 7DC e 10,5DC do óleo de canela, aplicadas isoladamente, estimularam o aumento da taxa reprodutiva de *F. candida* em relação ao controle (Figura 1).

Figura 1 - Número médio de juvenis de colêmbolos *F. candida* ($\pm$ desvio padrão, n = 5) encontrados em solo SAT, após teste crônico pela exposição a doses comerciais de imidacloprido e óleo de canela.

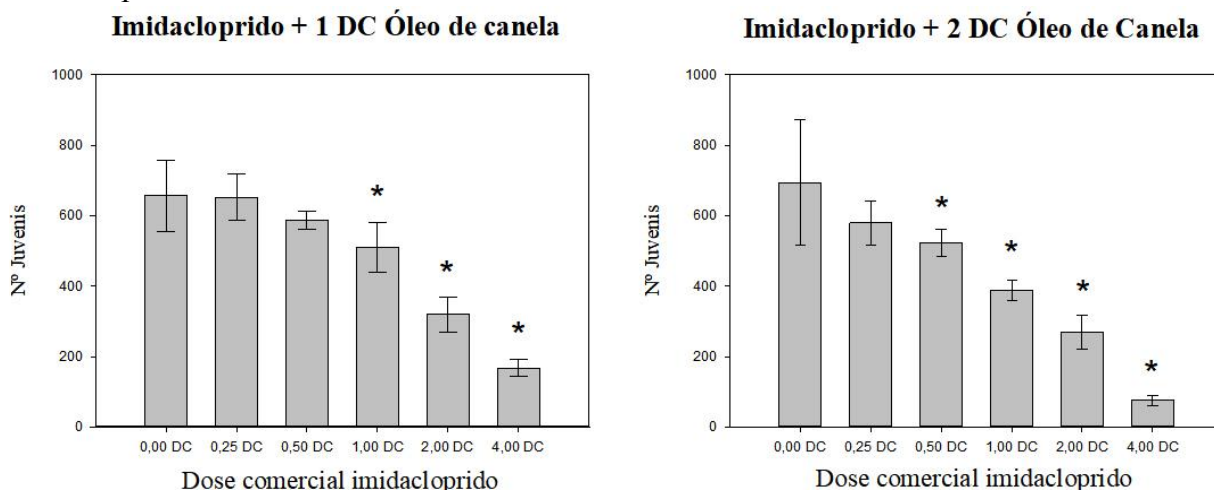


Nota: (*) representam redução ou aumento significativo do número médio de juvenis em relação ao controle ($p < 0,05$, teste de post-hoc de Dunnett).

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Observou-se que o IMI apresentou toxicidade já na concentração correspondente a 2,0 vezes sua dose comercial. Em contrapartida, para o OE de canela, efeitos tóxicos foram observados apenas em concentrações 24 vezes superiores à sua dose comercial, evidenciando sua menor toxicidade em comparação ao inseticida. Os parâmetros de menor concentração com efeito de redução significativa observada (CEO) e maior concentração sem efeito de redução significativa observada (CENO), resultaram em valores de CEO para óleo essencial de canela e IMI isolados de 120 $\mu\text{L kg}^{-1}$ e 1,44 $\mu\text{L kg}^{-1}$, respectivamente. Quanto ao CENO, os valores foram de 80 $\mu\text{L kg}^{-1}$ para o óleo de canela e 0,72 $\mu\text{L kg}^{-1}$ para o IMI isolado.

Figura 2 - Número médio de juvenis de colêmbolos *F. candida* ($\pm$ desvio padrão, n = 5) encontrados em solo SAT, após teste crônico pela exposição a doses comerciais de imidacloprido associado à 1 DC ou 2 DC do óleo de canela.



Nota: (*) representam redução significativa do número médio de juvenis em relação ao controle ($p < 0,05$, teste de post-hoc de Dunnett).

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Quando avaliados em mistura (Figura 2) também foram observadas reduções significativas no número de juvenis. A mistura 1, contendo uma dose comercial de óleo essencial de canela em combinação com concentrações crescentes de IMI apresentou um CEO de 0,72 $\mu\text{L de IMI kg}^{-1}$, enquanto a mistura 2, contendo o equivalente a duas doses comerciais de óleo essencial de canela combinada com as mesmas concentrações crescentes de IMI atingiu um CEO de 0,36 $\mu\text{L de IMI kg}^{-1}$. As misturas com C1 e C2 apresentaram CENOs de 0,36 e 0,18 $\mu\text{L de IMI kg}^{-1}$, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de CEO e CENO obtidos a partir dos testes crônicos com colêmbolos *F. candida* em solo SAT com óleo de canela e imidacloprido isolados e em mistura.

Parâmetros	Concentrações ($\mu\text{L kg}^{-1}$)			
	Isolados		Misturados	
	Óleo de canela	Imidacloprido	Mistura 1	Mistura 2
CEO	120	1,44	0,72	0,36
CENO	80	0,72	0,36	0,18

Nota: CEO = menor concentração com efeito observado; CENO = maior concentração sem efeito observado. Os valores estão expressos em μL por kg de solo seco ($\mu\text{L kg}^{-1}$).

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os ensaios realizados demonstram que o imidacloprid foi aproximadamente 70 vezes mais tóxico que o óleo essencial de canela, quando analisados isoladamente, visto que os EC_{50} estimados para o óleo essencial de canela e imidacloprid isolados foram de 118,39 (87,17 - 149,61) $\mu\text{L kg}^{-1}$ e 1,69 (1,25 - 2,14) $\mu\text{L kg}^{-1}$, respectivamente. Entretanto, quando analisados em combinação, demonstraram que o efeito de redução na população de juvenis é maior com a adição de óleo essencial de canela (nas concentrações comerciais testadas), sendo para a mistura 1, corresponde a 1,18 vezes mais tóxico que a formulação comercial do imidacloprido e na mistura 2, cerca de 1,55 vezes respectivamente, considerando que a mistura 1 apresentou um EC_{50} de 1,43 (1,18 - 1,68) $\mu\text{L kg}^{-1}$, enquanto a mistura 2 mostrou um EC_{50} de 1,09 (0,92 - 1,25) $\mu\text{L kg}^{-1}$. Quanto ao EC_{10} estimado, que indica o efeito observado em 10% da população de juvenis, o imidacloprido foi 135 vezes mais tóxico que o óleo de canela, os valores foram de 83,86 (67,76 - 99,95) $\mu\text{L kg}^{-1}$ para o óleo essencial de canela, 0,62 (0,21 - 1,03) $\mu\text{L kg}^{-1}$ para o imidacloprido isolado. Para a mistura com 1DC de óleo de canela, a toxicidade foi aproximadamente 1,68 vezes maior que o imidacloprido (individualmente) [EC_{10} = 0,37 (0,17 - 0,39) $\mu\text{L kg}^{-1}$]. Para a mistura com 2 DC de óleo de canela, a toxicidade foi 2,21 vezes maior que o IMI individualmente [EC_{10} = 0,28 (0,17 - 0,39) $\mu\text{L kg}^{-1}$]. Os valores dos ECs estimados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de EC_{50} e EC_{10} dos testes crônicos com colêmbolos *F. candida* em solo SAT com óleo de canela e imidacloprido isolados e em mistura.

Parâmetros	Isolados		Misturados	
	Óleo de canela	Imidacloprido	Mistura 1	Mistura 2
EC_{50}	118,39 (87,17 - 149,61)	1,69 (1,25 - 2,14)	1,43 (1,18 - 1,68)	1,09 (0,92 - 1,25)
EC_{10}	83,86 (99,95 - 67,76)	0,62 (0,21 - 1,03)	0,37 (0,54 - 0,20)	0,28 (0,17 - 0,39)

Nota: os valores entre parênteses são referentes aos intervalos de confiança de 95% da estimativa. EC_{50} e EC_{10} = concentração com efeitos observado em 50% e 10% da população de juvenis, respectivamente. Os valores estão expressos em μL por kg de solo seco ($\mu\text{L kg}^{-1}$).

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

4 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o imidacloprido apresenta toxicidade significativa para *F. candida* em solo artificial tropical (SAT). Entretanto, resultados que indicam uma maior ecotoxicidade do IMI (com relação a de EC_{50}) foram observados por Bandeira *et al.* (2020), que relataram uma EC_{50} de 0,80 mg kg⁻¹ em SAT e 0,83 mg kg⁻¹ em latossolo, utilizando a formulação comercial MUCH 600 FS®, e por Mabubu *et al.* (2017), que encontraram EC_{50} de 0,82 mg kg⁻¹ ao testar o composto puro em solo artificial OECD (5% de turfa). Estudos conduzidos em solo LUFA 2.2 demonstraram uma maior sensibilidade dos organismos ao composto, com efeitos reprodutivos adversos ocorrendo em concentrações substancialmente menores, foram encontrados EC_{50} de 0,15 mg kg⁻¹ e 0,29 mg kg⁻¹ quando avaliado o i.a. puro e EC_{50} de 1,0 mg kg⁻¹ quando na formulação comercial Confidor® (de Lima e Silva *et al.*, 2021; Van Gestel *et al.*, 2017). Essas variações sugerem que a toxicidade do inseticida encontra-se relacionada também às características físico-químicas do solo, como teor de matéria orgânica, pH, umidade e capacidade de adsorção, que reduzem a biodisponibilidade do contaminante, o que pode reduzir a fração livre do imidacloprido disponível para absorção pelos organismos (Cycoń e Piotrowska-Seget, 2015; Braúlio Hennig *et al.*, 2020). Além disso, a presença de adjuvantes nas formulações comerciais pode alterar a biodisponibilidade e a toxicidade do ingrediente ativo, tornando-o potencialmente menos biodisponível em comparação à forma pura, o que contribui para a variabilidade observada entre os estudos (Renaud *et al.*, 2018).

Os efeitos deletérios do imidacloprido sobre *F. candida* decorrem de seu modo de ação no sistema nervoso central, onde o composto causa o bloqueio dos receptores nicotínicos pós-sinápticos da acetilcolina (nAChRs), o que interfere na neurotransmissão colinérgica, assim o ingrediente ativo não é degradado pela enzima acetilcolinesterase, a molécula permanece ligada de forma persistente aos receptores, provocando uma estimulação contínua do sistema nervoso que pode levar à exaustão neural e, conseqüentemente, à morte do organismo exposto (Matias, 2016; Gallo *et al.*, 2002). No ambiente edáfico, mais de 90% da dose dos neonicotinóides aplicados pode permanecer no solo, e sua persistência favorece uma exposição prolongada, resultando em efeitos negativos ao longo de múltiplas gerações, especialmente em espécies com ciclo de vida curto, como os colêmbolos (Goulson, 2013; Laurent; Rathahao, 2003; Van Gestel *et al.*, 2017).

Diante dos riscos associados aos inseticidas sintéticos para organismos não-alvo, a busca por alternativas mais seguras têm impulsionado a investigação de óleos essenciais (OEs), muitos dos quais possuem propriedades bioinseticidas ou bioherbicidas (Pavela, 2015). Nesse contexto, os resultados obtidos para o óleo essencial de canela (*Cinnamomum verum*) indicaram que os efeitos ecotoxicológicos sobre colêmbolos *F. candida* foram observados apenas na presença de concentrações bastante elevadas, superiores a 24 vezes a DC (correspondente 24 L ha⁻¹), equivalente a 107,47 mg kg⁻¹ de solo. Esse resultado, no entanto, diverge substancialmente dos dados reportados por Volpato *et al.* (2016a), cujo experimento demonstrou efeitos significativos do óleo de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) já a partir de 10 mg kg⁻¹ de solo, sendo que, na dose de 25 mg kg⁻¹, a reprodução dos colêmbolos foi completamente inibida.

Portanto, o que parece ser a principal explicação para essa discrepância reside na composição química dos óleos analisados. Enquanto o presente estudo identificou o Eucalyptol (1,8-cineol) como o composto majoritário, com teor acima de 26%, Volpato *et al.* (2016a) descreveram um óleo rico em cinamaldeído, responsável por cerca de 41,27% da composição total do óleo de canela. Diversos estudos apontam o cinamaldeído como o principal fitoconstituente do óleo essencial de canela, atribuindo a ele a maioria das propriedades biológicas observadas (Nwanade *et al.*, 2021).

Desta forma, a ausência de cinamaldeído como composto majoritário no óleo essencial analisado, evidencia que os óleos essenciais do gênero *Cinnamomum* apresentam significativa variabilidade composicional, conforme demonstrado por Son *et al.* (2014) que analisou OEs de espécies asiáticas desse gênero, eles também apresentaram baixos teores de cinamaldeído, enquanto o Eucalyptol foi identificado em altas proporções em diversas amostras de folhas, como nas espécies *C. mairei*, *C. damhaensis* e *C. caryophyllus* (13%, 8,5% e 22% respectivamente). Essa variabilidade pode ser influenciada por múltiplos fatores, incluindo a parte da planta utilizada (folha, casca, raiz), o estágio fenológico, o genótipo, às condições edafoclimáticas do local de cultivo e o método de extração empregado (Nenaah, 2014).

Complementarmente, observou-se que a aplicação do óleo essencial, nas concentrações equivalentes a 4, 7 e 10,5 vezes a dose comercial, resultou em um aumento significativo na taxa reprodutiva de *F. candida*. Tal comportamento reprodutivo sugere um possível efeito estimulante do óleo, possivelmente associado à presença de fitormônios ou outros metabólitos bioativos presentes em sua composição. Os óleos essenciais são misturas complexas de metabólitos secundários voláteis, principalmente terpenóides e fenilpropanóides, produzidos pelas plantas (Bakkali *et al.*, 2008). Essas substâncias

apresentam uma vasta gama de atividades biológicas, decorrentes de sua capacidade de interagir com processos bioquímicos, fisiológicos e metabólicos em diversos organismos (Bakkali *et al.*, 2008; Jankowska *et al.*, 2017; Regnault-Roger; Vincent; Arnason, 2012). Nesse contexto, é plausível inferir que efeitos semelhantes possam ocorrer em colêmbolos, ainda que não tenha sido possível, neste estudo, identificar os possíveis compostos e mecanismos subjacentes responsáveis pela resposta reprodutiva observada.

Entretanto, tal aumento na reprodução também pode ser atribuído ao fenômeno da hormese, caracterizado por uma resposta biológica na qual uma substância que em altas doses, causa efeitos adversos, pode provocar efeitos benéficos, como estímulo ao crescimento ou à fecundidade, quando administrada em baixas concentrações (Chapman, 2001). Essa resposta não linear decorre da ativação de mecanismos de supercompensação, em que o organismo mobiliza processos reparadores após o estresse inicial e que, quando exposto a concentrações abaixo do limiar tóxico, pode apresentar uma melhora funcional temporária, com efeitos estimulatórios variando entre 30% e 60% acima dos níveis de controle (Calabrese, 2015).

Considerando o potencial uso de óleos essenciais (OEs) no manejo integrado de pragas, estes compostos naturais têm sido frequentemente associados a outros agentes de controle. A adição de OEs pode aumentar a resistência dos inseticidas sintéticos à erosão causada pela chuva, à seca e à evaporação, além de favorecer sua propagação e penetração (Zhou *et al.*, 2022). Nesse contexto, o manejo integrado com a incorporação direta ou indireta de OEs representa uma estratégia promissora para substituir parcial ou totalmente o uso de agrotóxicos sintéticos mais tóxicos (Vineesh *et al.*, 2023). Entretanto, do ponto de vista ecotoxicológico, os resultados do presente estudo indicam que essa estratégia deve ser adotada com cautela. Apesar de ser observado que, em baixas concentrações, o óleo essencial de canela promoveu aumento na reprodução dos colêmbolos *F. candida* (indicando potencial para aplicações que minimizem impactos sobre organismos não-alvo), ao ser associado ao inseticida imidacloprido, essa hipótese não mostrou-se verdadeira, pois tanto a mistura 1 (EC_{50} de $1,43 \mu\text{L kg}^{-1}$), quanto a mistura 2 (EC_{50} de $1,09 \mu\text{L kg}^{-1}$) intensificaram a toxicidade comparadas ao imidacloprido isolado (EC_{50} de $1,69 \mu\text{L kg}^{-1}$). Essa resposta pode ser interpretada como um efeito sinérgico entre o óleo analisado e o imidacloprido.

Diversos estudos têm demonstrado o potencial sinérgico entre óleos essenciais (OEs) e compostos sintéticos, indicando que os metabólitos presentes nos OEs são biologicamente ativos e podem promover efeitos sinérgicos ou aditivos quando combinados a agrotóxicos sintéticos (Dassanayake *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2022). A sinergia do óleo de canela com um inseticida foi relatada por Li *et al.* (2017), onde o OE potencializou a toxicidade da rotenona

contra larvas de *Spodoptera litura* ao modificar a estrutura das células do intestino médio, aumentando a permeabilidade da membrana e facilitando a absorção do inseticida, resultando em maior concentração do composto no cordão nervoso ventral das larvas, o que resultou em um aumento superior a duas vezes na toxicidade em relação à rotenona isolada (concentração letal de 50% (CL₅₀) após 72h de exposição de 1.081 mg L⁻¹, > 10.000 mg L⁻¹ e 506 mg L⁻¹ referente a de rotenona, óleo de canela e rotenona + óleo de canela respectivamente).

Embora o óleo essencial de canela tenha apresentado efeitos relativamente baixos de toxicidade para *F. candida* quando aplicado individualmente em SAT, a combinação com o inseticida imidacloprido resultou em efeitos sinérgicos, aumentando a toxicidade sobre a reprodução. Esses resultados indicam que as interações entre óleos essenciais e agrotóxicos sintéticos podem alterar significativamente a biodisponibilidade e a toxicidade dos compostos para organismos não-alvo do solo. Dessa forma, embora o óleo essencial de canela, quando utilizado isoladamente, se mostra promissor como alternativa ao imidacloprido, são necessários estudos mais aprofundados que considerem as interações químicas, a estabilidade das formulações e os impactos sobre uma gama mais ampla de organismos não-alvo, a fim de garantir uma aplicação segura.

5 CONCLUSÃO

Observou-se que o imidacloprido apresentou elevada toxicidade para *F. candida*, enquanto o óleo essencial de canela, quando aplicado isoladamente, demonstrou baixa toxicidade. No entanto, a combinação dessas substâncias (nas concentrações testadas) resulta em um possível efeito sinérgico intensificando significativamente os efeitos toxicológicos sobre a espécie. Esses resultados ressaltam a importância de se avaliar com cautela o uso conjunto de compostos naturais e sintéticos em ambientes terrestres, devido ao potencial aumento da toxicidade resultante da interação entre os mesmos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. C. F. *et al.* Atividade acaricida do óleo essencial de *Derris floribunda* e seu principal constituinte. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. 791–796, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2221169117308432>. Acesso em: 27 abr. 2025.
- BAKKALI, F. *et al.* Biological effects of essential oils-a review. **Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 446–475, 2008. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17996351>. Acesso em: 22 maio 2024.
- BANDEIRA, F. *et al.* Toxicity of imidacloprid to the earthworm *Eisenia andrei* and collembolan *Folsomia candida* in three contrasting tropical soils. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 267, p. 115565, dez. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749120362539>. Acesso em: 08 jun. 2025.
- BENATO, E. A. *et al.* Óleos essenciais e tratamento térmico no controle pós-colheita de bolor verde em laranja. **Summa Phytopathologica**, [s. l.], v. 44, p. 65–71, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sp/a/kLKNhG4Mdm8cg7pyMCDN9tm/?lang=pt>. Acesso em: 13 maio 2025.
- BERALDO, C. *et al.* Eficiência de óleos essenciais de canela e cravo-da-índia como sanitizantes na indústria de alimentos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 436–440, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-40632013000400006&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 13 maio 2025.
- BOSSOU, A. D. *et al.* Caracterização de compostos voláteis de três espécies de *Cymbopogon* e *Eucalyptus citriodora* do Benim e suas atividades inseticidas contra *Tribolium castaneum*. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 76, p. 306–317, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015301965>. Acesso em: 27 abr. 2025.
- BRANCALIONE, J. Efeito ecotoxicológico de óleos essenciais de plantas sobre colêmbolos *Folsomia candida*. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br:8443/handle/prefix/5740>. Acesso em: 14 maio 2024.
- BRAÚLIO HENNIG, T. *et al.* Toxicity of imidacloprid to collembolans in two tropical soils under different soil moisture. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 49, n. 6, p. 1491–1501, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jeq2.20143>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- BUFFIN, D. Imidacloprid. **Pesticide News**, [s. l.], v. 62, p. 22–23, 2003.
- CALABRESE, E. J. Hormesis: principles and applications. **Homeopathy: The Journal of the Faculty of Homeopathy**, [s. l.], v. 104, n. 2, p. 69–82, 2015. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25869971>. Acesso em: 26 jun. 2025.

CAMPOS, E. V. R. *et al.* Use of botanical insecticides for sustainable agriculture: Future perspectives. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 105, p. 483–495, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X18302917>. Acesso em: 15 maio 2025.

CASTRO, K. N. C. **Métodos de quantificação de imidacloprid em soluções aquosas: validação metrológica e comparação entre absorciometria molecular e cromatografia líquida de alta eficiência**. 2007. Mestre Em Metrologia - Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2007. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=9960@1. Acesso em: 13 maio 2025.

CHAPMAN, P. M. The implications of hormesis to ecotoxicology and ecological risk assessment. **Human & Experimental Toxicology**, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 499–505, 2001. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11858510> . Acesso em: 15 maio 2025.

CHEN, X. *et al.* Imidacloprid reduces the mating success of males in bumblebees. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 928, p. 172525, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724026718>. Acesso em: 13 maio 2025.

CYCON, M.; PIOTROWSKA-SEGET, Z. Biochemical and microbial soil functioning after application of the insecticide imidacloprid. **Journal of Environmental Sciences**, [s. l.], v. 27, p. 147–158, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074214002010>. Acesso em: 21 abr. 2025.

DASSANAYAKE, M. K. *et al.* Synergistic Field Crop Pest Management Properties of Plant-Derived Essential Oils in Combination with Synthetic Pesticides and Bioactive Molecules: A Review. **Foods (Basel, Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 2016, 2021. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34574123>. Acesso em: 02 jul. 2025.

DE LIMA E SILVA, C. *et al.* Bringing ecology into toxicology: Life-cycle toxicity of two neonicotinoids to four different species of springtails in LUFA 2.2 natural soil. **Chemosphere**, [s. l.], v. 263, p. 128245, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520324401>. Acesso em: 13 abr. 2025.

DE LIMA E SILVA, C. *et al.* Comparative toxicity of imidacloprid and thiacloprid to different species of soil invertebrates. **Ecotoxicology (London, England)**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 555–564, 2017. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28337632>. Acesso em: 19 maio 2025.

DE LIMA E SILVA, C. *et al.* Toxicity in Neonicotinoids to *Folsomia candida* and *Eisenia andrei*. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 548–555, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7064934/>. Acesso em: 20 maio 2025.

ESTRELA, J. L. V. *et al.* Toxicidade de óleos essenciais de *Piper aduncum* e *Piper hispidinervum* em *Sitophilus zeamais*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 41, p. 217–222, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/ZvdytXLjf3KR6ZBTbwTtbFb/>.

Acesso em: 13 maio 2025.

FAHN, A. Structure and function of secretory cells. *In: ADVANCES IN BOTANICAL RESEARCH*. [S. l.]: Academic Press, 2000. v. 31, p. 37–75. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065229600310060>. Acesso em: 16 maio 2025.

FERNANDES, S. *et al.* Effects of Life Stage on the Sensitivity of *Folsomia candida* to Four Pesticides. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 42, n. 8, p. 1782–1790, 2023. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37283205>. Acesso em: 14 maio 2025.

FERRAZ, C. A. *et al.* Ecotoxicity of plant extracts and essential oils: A review. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 292, p. 118319, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121019011>. Acesso em: 14 maio 2025.

FIERASCU, R. C. *et al.* The application of essential oils as a next-generation of pesticides: recent developments and future perspectives. **Zeitschrift für Naturforschung C**, [s. l.], v. 75, n. 7–8, p. 183–204, 2020. Disponível em: <https://www-degruyter-com.ez372.periodicos.capes.gov.br/document/doi/10.1515/znc-2019-0160/html>. Acesso em: 27 maio 2025.

FU, R. *et al.* O imidaclopride afeta o comportamento visual do peixe-zebra adulto (*Danio rerio*) mediando a expressão dos genes da opsina e da fototransdução e alterando o metabolismo dos neurotransmissores. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 910, p. 168572, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072005>. Acesso em: 13 maio 2025.

GALLO, D. *et al.* Entomologia Agrícola. Piracicaba: Fealq, 2002.

GOULSON, D. REVIEW: An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 977–987, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2664.12111>. Acesso em: 13 abr. 2025.

IBAMA. **Relatórios De Comercialização De Agrotóxicos — IBAMA** Acesso em: 13 maio 2024. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ISO, 2014. International Standardization Organization – 11267. Soil quality - Inhibition of reproduction of *Collembola* (*Folsomia candida*) by soil contaminants. Genève, Suíça.

JANKOWSKA, M. *et al.* Molecular Targets for Components of Essential Oils in the Insect Nervous System—A Review. **Molecules : A Journal of Synthetic Chemistry and Natural Product Chemistry**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 34, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5943938/>. Acesso em: 28 maio 2025.

JANTAN, I. bin *et al.* Correlation Between Chemical Composition and Antifungal Activity of the Essential Oils of Eight Cinnamomum. Species. **Pharmaceutical Biology**, [s. l.], v. 46, n.

6, p. 406–412, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13880200802055859>. Acesso em: 21 maio 2025.

JIANG, H. *et al.* GC×GC-TOFMS Analysis of Essential Oils Composition from Leaves, Twigs and Seeds of *Cinnamomum camphora* L. Presl and Their Insecticidal and Repellent Activities. **Molecules (Basel, Switzerland)**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 423, 2016. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27043503>. Acesso em: 20 maio 2025.

LAURENT, F. M.; RATHAHAO, E. Distribution of [14C]Imidacloprid in Sunflowers (*Helianthus annuus* L.) following Seed Treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 51, n. 27, p. 8005–8010, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf034310n>. Acesso em: 20 maio 2025.

LI, Z. *et al.* Addition of Cinnamon Oil Improves Toxicity of Rotenone to *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) Larvae. **Florida Entomologist**, [s. l.], v. 100, n. 3, p. 515–521, 2017. Disponível em: <https://bioone.org/journals/florida-entomologist/volume-100/issue-3/024.100.0304/Addition-of-Cinnamon-Oil-Improves-Toxicity-of-Rotenone-to-Spodoptera/10.1653/024.100.0304.full>. Acesso em: 20 maio 2025.

LORENZETTI, E. R. *et al.* Bioatividade de óleos essenciais no controle de *Botrytis cinerea* isolado de morangueiro. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, [s. l.], v. 13, n. spe, p. 619–627, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-05722011000500019&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 13 maio 2025.

LU, Y.-P. *et al.* A integração do transcriptoma, da microbiota intestinal e da fisiologia revela respostas tóxicas do lagostim vermelho (*Cherax quadricarinatus*) ao imidaclopride. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 470, p. 134293, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389424008720>. Acesso em: 13 maio 2025.

MABUBU, J. I. *et al.* Ecotoxicity of the Neonicotinoid Insecticides Imidacloprid and Thiacloprid to the Soil-Dwelling Arthropod *Folsomia candida* (Collembola). **Journal of the Kansas Entomological Society**, [s. l.], v. 90, n. 4, p. 323–333, 2017. Disponível em: <http://www.bioone.org/doi/10.2317/1736.1>. Acesso em: 21 abr. 2025.

MATIAS, R. S. **Como agem os inseticidas nos insetos**. 2016. Disponível em: <http://www.ifcursos.com.br/sistema/admin/arquivos/17-38-11-c0m0agem0sinseticidasn0sinset0s.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2025.

MILHOME, M. A. L. *et al.* Avaliação do potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas aplicados na agricultura do Baixo Jaguaribe, CE. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 14, p. 363–372, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/zSLfBtgKMpx9njsXhKf39t/>. Acesso em: 13 maio 2025.

MOTAUNG, T. E. Chloronicotinyl insecticide imidacloprid: Agricultural relevance, pitfalls and emerging opportunities. **Crop Protection**, [s. l.], v. 131, p. 105097, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219420300302>. Acesso em: 13 maio 2025.

NENAAH, G. E. Composição química, toxicidade e atividades inibitórias do crescimento de óleos essenciais de três espécies de *Achillea* e suas nanoemulsões contra *Tribolium castaneum* (Herbst). **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 53, p. 252–260, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669013007322>. Acesso em: 22 abr. 2025.

NWANADE, C. F. *et al.* The acaricidal activity of cinnamon essential oil: current knowledge and future perspectives. **International Journal of Acarology**, [s. l.], v. 47, n. 5, p. 446–450, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01647954.2021.1936632>. Acesso em: 22 abr. 2025.

OLIVEIRA, J. V.; VENDRAMIM, J. D. Repelência de óleos essenciais e pós vegetais sobre adultos de *Zabrotes subfasciatus* (Boh.) (Coleoptera: *Bruchidae*) em sementes de feijoeiro. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, [s. l.], v. 28, p. 549–555, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aseb/a/CQyLj987QdyJMRNYkpkycVG/>. Acesso em: 13 maio 2025.

PAULIQUEVIS, C. F.; FAVERO, S. Atividade insetistática de óleo essencial de *Pothomorphe umbellata* sobre *Sitophilus zeamais*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 19, p. 1192–1196, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xQVkh4bvQfY4MQmFy4CFSrg/?lang=pt>. Acesso em: 13 maio 2025.

PAVELA, R. Essential oils for the development of eco-friendly mosquito larvicides: A review. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 76, p. 174–187, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015302144>. Acesso em: 13 maio 2025.

REGNAULT-ROGER, C.; VINCENT, C.; ARNASON, J. T. Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. **Annual Review of Entomology**, [s. l.], v. 57, p. 405–424, 2012. Disponível em: Acesso em: 28 maio 2025.

RENAUD, M. *et al.* Effects of the neonicotinoids acetamiprid and thiacloprid in their commercial formulations on soil fauna. **Chemosphere**, [s. l.], v. 194, p. 85–93, 2018. Disponível em: Acesso em: 28 maio 2025.

SON, L. C. *et al.* Study on *Cinnamomum* oils: compositional pattern of seven species grown in Vietnam. **Journal of Oleo Science**, [s. l.], v. 63, n. 10, p. 1035–1043, 2014. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25274473>. Acesso em: 28 maio 2025.

SOUZA, L.; DA SILVA, A. G. Influência do Uso de Imidacloprido na Qualidade das Águas e Sedimentos da Micro-bacia do Rio do Carmo. **Orbital - The Electronic Journal of Chemistry**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 240–249, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/orbital/article/view/16743>. Acesso em: 13 maio 2025.

SUZUKI, H. *et al.* Assessment of toxic effects of imidacloprid on freshwater zooplankton: An experimental test for 27 species. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 927, p. 172378, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724025245>. Acesso em: 13 maio 2025.

VAN GESTEL, C. A. M. *et al.* Multigeneration toxicity of imidacloprid and thiacloprid to *Folsomia candida*. **Ecotoxicology (London, England)**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 320–328, 2017.

Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10646-017-1765-8.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

VINEESH, P. J. *et al.* Óleos essenciais de canela, cúrcuma e nim como potenciais agentes de controle contra moscas ácidas invasoras (*Paederus fuscipes*) e besouros escuros (*Luprops tristis*). **Journal of King Saud University - Science**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 102363, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364722005444>. Acesso em: 17 abr. 2025.

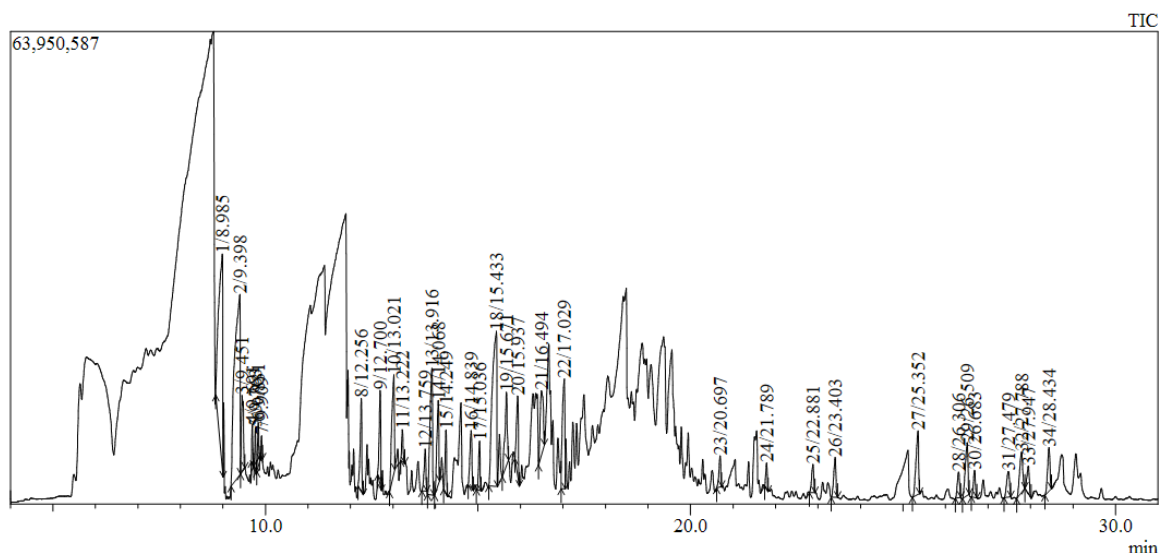
VOLPATO, A *et al.* Efeito larvicida e inseticida do óleo de *Cinnamomum zeylanicum* (puro e nanoestruturado) contra a larva da farinha (*Alphitobius diaperinus*) e seus possíveis efeitos ambientais. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 1159–1165, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226861516303338>. Acesso em: 26 jun. 2024.

VOLPATO, A. *et al.* Melaleuca alternifolia Essential Oil against the Lesser Mealworm (*Alphitobius diaperinus*) and Its Possible Effect on the Soil Fauna. **Brazilian Journal of Poultry Science**, [s. l.], v. 18, p. 41–46, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbca/a/CzpLJLLYzrLvDtcB7tWFp5t/?lang=en>. Acesso em: 16 maio 2025.

ZHOU, Y. *et al.* The synergistic effects of rosehip oil and matrine against *Icerya aegyptiaca* (Douglas) (Hemiptera: Coccoidea) and the underlying mechanisms. **Pest Management Science**, [s. l.], v. 78, n. 8, p. 3424–3432, 2022. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35545955>. Acesso em: 16 maio 2025.

APÊNDICE A – Cromatografia óleo de canela (VOCs)

Perfil de compostos orgânicos voláteis obtidos no óleo de Canela (*Cinnamomum verum*), extraído da casca da planta a partir do método de Clevenger. Os compostos químicos representados por códigos na figura estão descritos na Tabela.



Peak#	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area%	Height%	A/H Name
1	3.090	3.027	3.167	38608586	1.09	3.19	4.00 1R- α -Pinene
2	3.520	3.340	3.573	139379699	3.93	5.39	8.54 .beta.-Phellandrene
3	3.635	3.573	3.753	115545526	3.26	5.47	6.98 Bicyclo[3.1.1]heptane, 6,6-dimethyl-2-methyl-
4	4.007	3.753	4.087	289415492	8.17	6.59	14.49 .alpha.-Phellandrene
5	4.622	4.087	4.740	926640249	26.14	13.12	23.32 Eucalyptol
6	4.950	4.740	5.033	140358136	3.96	6.56	7.07 1,4-Cyclohexadiene, 1-methyl-4-(1-methylethyl-)
7	5.621	5.400	5.643	105045342	2.96	5.20	6.68 (+)-4-Carene
8	5.745	5.300	6.020	140432044	3.96	1.25	37.01 1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimethyl-
9	6.490	6.367	6.713	21863404	0.62	0.93	7.79 2-Cyclohexen-1-ol, 1-methyl-4-(1-methylethyl-)
10	7.940	7.673	8.100	70749812	2.00	1.35	17.26 3-Cyclohexene-1-methanol, .alpha.,.alpha.,4-tr
11	8.500	8.100	8.580	298789106	8.43	6.02	16.39 3-Cyclohexen-1-ol, 4-methyl-1-(1-methylethyl-)
12	9.048	8.580	9.140	437133521	12.33	7.22	19.98 3-Cyclohexene-1-methanol, .alpha.,.alpha.,4-tr
13	9.308	9.247	9.387	7834277	0.22	0.91	2.83 2-Cyclohexen-1-ol, 3-methyl-6-(1-methylethyl-)
14	10.282	10.080	10.343	11011546	0.31	0.79	4.59 2,6-Octadienal, 3,7-dimethyl-, (Z)-
15	10.582	10.480	10.687	6761997	0.19	0.49	4.53 5-Isopropenyl-2-methyl-7-oxabicyclo[4.1.0]he
16	11.281	11.117	11.410	12308687	0.35	0.74	5.49 2,6-Octadienal, 3,7-dimethyl-, (E)-
17	11.971	11.167	12.153	31436005	0.89	1.37	7.58 Bornyl acetate
18	12.429	12.297	12.543	9596250	0.27	0.59	5.39 Cyclohexene, 2-ethenyl-1,3,3-trimethyl-
19	13.895	13.790	13.987	12467644	0.35	0.99	4.16 Cyclohexene, 4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methyl-
20	14.193	14.083	14.290	9870874	0.28	0.84	3.89 3-Cyclohexene-1-methanol, .alpha.,.alpha.,4-tr
21	14.655	14.527	14.747	5153709	0.15	0.45	3.81 2,6-Octadien-1-ol, 3,7-dimethyl-, acetate, (Z)-
22	15.282	15.190	15.383	10397378	0.29	0.84	4.08 Copaene
23	15.807	15.703	15.923	5339019	0.15	0.41	4.27 Cyclohexane, 1-ethenyl-1-methyl-2,4-bis(1-m
24	16.845	16.660	17.007	50222896	1.42	2.95	5.62 Caryophyllene
25	17.477	17.393	17.573	7490096	0.21	0.59	4.19 3-Buten-1-ol, 3-methyl-, benzoate
26	18.707	18.597	18.763	11564990	0.33	0.86	4.46 Naphthalene, 1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydro-7-m
27	18.874	18.607	18.980	35637372	1.01	1.15	10.21 1H-Cyclopenta[1,3]cyclopropa[1,2]benzene, c
28	19.172	18.980	19.247	20192079	0.57	0.83	8.01 Naphthalene, 1,2,4a,5,8,8a-hexahydro-4,7-dim
29	19.365	19.247	19.540	38341851	1.08	1.65	7.66 Cyclohexane, 1-ethenyl-1-methyl-2-(1-methyl-
30	19.628	19.553	19.777	13555089	0.38	1.09	4.09 Oxirane, tetradecyl-
31	20.109	19.967	20.260	19271050	0.54	1.23	5.17 Naphthalene, 1,2,3,5,6,8a-hexahydro-4,7-dim
32	20.812	20.740	20.980	16658627	0.47	1.03	5.32 Cyclohexanemethanol, 4-ethenyl-.alpha.,.alpha.
33	21.752	21.647	21.860	29259524	0.83	1.51	6.39 1H-Cyclopropa[a]naphthalene, 1a,2,3,5,6,7,8a
34	22.308	21.860	22.367	144187263	4.07	4.23	11.27 Tetradecanal
35	22.723	22.367	22.900	102770334	2.90	2.67	12.73 Humulane-1,6-dien-3-ol
36	23.029	22.900	23.087	30130704	0.85	1.47	6.78 .alpha.-Cadinol
37	23.252	23.087	23.407	75648580	2.13	2.08	12.03 2-Naphthalenemethanol, decahydro-.alpha.,.a
38	23.568	23.407	23.780	45882813	1.29	2.61	5.82 5-Azulenemethanol, 1,2,3,3a,4,5,6,7-octahydr