



UnB

Departamento de Farmácia

Caio Franco de Oliveira

**Formulações à base de nanopartículas de carbono e óleos
essenciais para aplicações pesticidas**

Brasília - DF

2025

Universidade de Brasília

Caio Franco de Oliveira

Formulações a base de nanopartículas de carbono e óleos essenciais para aplicações pesticidas

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Farmácia pelo Departamento de Farmácia da Universidade de Brasília

Orientadora: Kaline Amaral Wanderley

Co-Orientadora: Haline Gerica Alvim

Brasília-DF

2025

AGRADECIMENTOS

A vida acadêmica é uma travessia, e eu não a fiz sozinho. Cada página deste trabalho carrega não apenas conhecimento, mas também os ecos de vozes que me sustentaram quando fraquejei, as mãos que me ergueram quando o peso parecia insuportável.

À minha namorada, companheira de jornada, que segurou minha mão nas tempestades e iluminou meus dias mais escuros, sendo alicerce quando o chão parecia ruir.

À minha mãe, cujo amor e apoio inabaláveis foram abrigo seguro, prova de que a força nem sempre precisa ser barulhenta para ser imensa.

Às professoras doutoras Kaline, Haline e Renata, pela porta aberta à Lazutech e a imensidão de aprendizados que ali encontrei, pela confiança depositada e pelos horizontes que me ajudaram a enxergar.

Aos amigos Igor, Gustavo, Kainã e Anselmo, companheiros de risos, debates e noites universitárias, por tornarem a vida na UnB mais leve e menos monótona.

A todos os professores que me lecionaram, com um agradecimento especial ao Prof. Dr. Rafael Santana e ao Prof. Dr. Rodrigo Fonseca, que, nos minutos finais desta caminhada, me levaram a abrir os olhos para o que é o fascinante universo da Assistência Farmacêutica e da Farmácia Clínica. E à Profa. Dra. Tanise Vendruscolo, que, com sua didática, me faz cogitar todos os dias se não quero seguir as análises clínicas.

Aos preceptores que cruzaram meu caminho, que me mostraram, em cada cenário de estágio, que ser farmacêutico é mais do que profissão — é missão, é encanto, é cuidado.

A cada um que, de alguma forma, fez parte desta travessia, minha mais sincera gratidão. Este trabalho é, em partes, de vocês também.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, cuja força e resiliência esculpiram cada degrau desta jornada. Na batalha silenciosa dos dias, encontrei em sua coragem o alicerce dos meus sonhos. Se hoje chego até aqui, é porque seus passos abriram o caminho, e sua fé inabalável sustentou minhas asas.

Cada sacrifício seu floresce neste momento, e nesta conquista, vejo refletida sua luta, seu amor, sua essência.

Que este trabalho seja um tributo à sua história, e que, através dele, eu possa honrar tudo o que você me ensinou a ser.

RESUMO

O crescimento contínuo da demanda por alimentos, aliado à preocupação com o impacto ambiental dos defensivos sintéticos, motiva a busca por soluções mais sustentáveis no controle de pragas agrícolas. Neste trabalho, avaliou-se o potencial de óleos essenciais em conjunto com nanopartículas de carbono como alternativa aos pesticidas convencionais. A revisão bibliográfica evidenciou as vantagens de cada componente: enquanto os óleos essenciais apresentam biodegradabilidade e menor toxicidade a organismos não-alvo, as nanopartículas de carbono podem estabilizar e prolongar a ação desses compostos, viabilizando menor aplicação de insumos e reduzindo o risco de resistência. Na etapa experimental, foram testados seis óleos essenciais inicialmente quanto à estabilidade em formulações contendo um carbon-dot comercial, selecionando-se aqueles menos suscetíveis à separação de fases. Em seguida, verificou-se a eficácia inseticida dos óleos frente a lagartas de *Helicoverpa zea* e *Spodoptera eridania*, porém não se registrou mortalidade após 24 horas de exposição. As limitações metodológicas — larvas em ínstares mais avançados (L3–L4), curto tempo de observação e possíveis variações na composição dos óleos — indicam a necessidade de estudos complementares. Conclui-se que, embora não haja evidência de mortalidade nas condições testadas, as formulações nanoestruturadas de óleos essenciais permanecem promissoras. Pesquisas futuras devem incorporar ajustes no delineamento experimental, testes de campo e análises cromatográficas mais detalhadas, visando à otimização e ao escalonamento industrial desses nanobiopesticidas.

Palavras-chave: nanotecnologia, nanopartículas de carbono, óleos essenciais, pesticidas, formulações nanoestruturadas, liberação controlada, sustentabilidade agrícola, resistência de pragas, impacto ambiental, segurança alimentar.

ABSTRACT

The ongoing increase in global food demand and growing environmental concerns about conventional synthetic pesticides have led to a search for more sustainable pest control approaches. In this study, we explored the potential of essential oils combined with carbon nanoparticles as alternatives to conventional pesticides. A literature review underscored the unique contributions of each component: while essential oils are biodegradable and pose less toxicity to non-target organisms, carbon nanoparticles can stabilize and prolong their insecticidal action, thus minimizing input usage and reducing resistance risks. Experimentally, we first assessed six essential oils for stability when formulated with a commercially available carbon dot, selecting those that were less prone to phase separation. Next, we tested their insecticidal efficacy of the oils against *Helicoverpa zea* and *Spodoptera eridania* larvae, but observed no mortality within 24 hours of exposure. Methodological constraints — advanced larval stages (L3–L4), a limited observation window, and potential variability in essential oil composition — highlight the need for further investigations. Although no evidence of larval mortality was observed under these conditions, nanoformulations of essential oils remain a promising avenue. Future research should include adjustments to experimental design, field trials, and more rigorous chemical profiling, aiming to optimize and industrially scale these nanobiopesticides.

Keywords: nanotechnology, carbon nanoparticles, essential oils, pesticides, nanoformulations, controlled release, agricultural sustainability, pest resistance, environmental impact, food security.

SUMÁRIO

Agradecimentos	1
Dedicatória	2
Resumo	3
Abstract	4
Sumário	
Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	8
Lista de Tabelas	8
1 Introdução	9
2 Revisão da Literatura	11
2.1 Pesticidas convencionais e seus impactos ambientais	11
2.2 Óleos essenciais como pesticidas	15
2.3 Nanotecnologia aplicada à agricultura	18
2.4 Nanoformulações como defensivos agrícolas	25
3 Metodologia da Revisão Bibliográfica	29

3.1	Estratégia de busca e bases consultadas	29
3.2	Construção da Search Query	29
3.3	Critérios de Inclusão e Exclusão	30
3.3.1	Critérios de Inclusão	30
3.3.2	Critérios de Exclusão	30
3.4	Processo de Triagem e Seleção	31
4	Metodologia Experimental	32
4.1	Delineamento Experimental	32
4.2	Materiais e reagentes	34
4.3	Resultados e Discussão	35
5	Conclusão	40

LISTA DE FIGURAS

2.1	Estruturas químicas de compostos presentes em óleos essenciais.	16
2.2	Mecanismo de adesão proposto para Av-pH-cat@CS nanoencapsuladas.	19
2.3	Mecanismos de liberação controlada em diferentes tipos de nanocarreadores.	20
4.1	Fluxograma resumindo o delineamento experimental para avaliação de estabilidade e ensaios de eficácia inseticida.	32
4.2	Exemplo de (esquerda) formulação estável, sem separação de fases visível, e (direita) formulação instável, onde se observa segregação da fase oleosa.	37
4.3	Monitoramento do nível de dano e momento ideal para controle de <i>Spodoptera frugiperda</i> na cultura do milho.	38
4.4	Pote contendo lagartas em contato com os óleos testados. Cada pote continha 3 indivíduos, submetidos à avaliação por até 24 horas.	39

LISTA DE TABELAS

2.1	Pesticidas clássicos, mecanismo de ação e riscos de exposição.	13
2.2	Principais estratégias de nanoencapsulamento para defensivos agrícolas.	26
4.1	Tratamentos testados no experimento.	33
4.2	Composição e custo dos óleos essenciais	36

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos permanece em evidência em todo o mundo. De acordo com o *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024* (Relatório Estatístico Mundial de Alimentos e Agricultura 2024), a prevalência de subnutrição atingiu 9,1% da população mundial em 2023, correspondendo a aproximadamente 733 milhões de pessoas, o que representa um aumento de 152 milhões em relação a 2019. [1]. A insegurança alimentar, definida como a falta de acesso físico, social e econômico a alimentos seguros, nutritivos e em quantidade suficiente para satisfazer as necessidades dietéticas, também figura como um desafio global [1]. No mesmo relatório, estimou-se que a insegurança alimentar severa atingiu 10,7% da população mundial em 2023, evidenciando a necessidade de soluções urgentes para ampliar a oferta de alimentos e garantir que essas populações vulneráveis tenham acesso a uma nutrição adequada.

Ainda segundo esse relatório, a produção anual de culturas e produtos derivados em 2023 ultrapassou 9,6 bilhões de toneladas, ilustrando o crescimento contínuo da oferta para atender à demanda global. Em paralelo, o uso global de pesticidas cresceu 70% entre 2000 e 2022, chegando a 3,7 milhões de toneladas no período; o Brasil se destaca como o maior consumidor em 2021 (0,8 milhão de toneladas, 22% do total mundial) [1].

A aplicação intensiva de pesticidas químicos, embora eficaz no controle de pragas, gera impactos multifacetados ao meio ambiente e à saúde humana no longo prazo, incluindo riscos de bioacumulação, contaminação de recursos hídricos e potenciais agravos neurológicos e oncológicos [2]. Além disso, muitas pragas desenvolvem resistência aos compostos sintéticos, o que exige doses cada vez maiores ou o uso de ingredientes ativos mais tóxicos, acarretando custos econômicos e ambientais significativos [3].

Nesse contexto, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas ganham relevância, pois visam equilibrar crescimento

econômico, proteção ambiental e bem-estar social. Em especial, o ODS 2 (Erradicação da Fome) ressalta a necessidade de garantir segurança alimentar para todas as populações, ao passo que o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) destaca a importância de práticas agrícolas que minimizem o uso de insumos químicos e reduzam o desperdício. Portanto, a busca por soluções inovadoras que aliem eficiência produtiva e sustentabilidade.[4].

Na tentativa de minimizar os danos causados, surge a busca por alternativas ou complementos aos insumos tradicionais, como pesticidas à base de produtos naturais sendo os óleos essenciais (OEs) objeto do estudo. Os OEs apresentam características como biodegradabilidade, menor toxicidade aos organismos não-alvo e eficácia contra microrganismos e insetos. [5]. Ainda assim, fatores como volatilidade, instabilidade química e altos custos de produção tornam desafiadora a ampla adoção comercial dessas substâncias, de modo que ainda há poucos produtos baseados em óleos essenciais disponíveis no mercado [6].

Para contornar tais limitações, a nanotecnologia vem sendo pesquisada como ferramenta promissora, sobretudo por meio do uso de nanopartículas de carbono [7]. Essa abordagem tem o potencial de reduzir a quantidade de defensivos químicos necessários, mitigar problemas de resistência em artrópodes e minimizar impactos ambientais ligados à contaminação de água e solo [7]. Apesar disso, persistem lacunas na compreensão sobre o comportamento e o destino ambiental dessas nanopartículas, indicando a necessidade de regulamentações mais claras e de uma avaliação robusta de sua segurança [7].

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo revisar criticamente a literatura e realizar um experimento inicial acerca das formulações à base de nanopartículas de carbono e óleos essenciais destinadas ao controle de pragas. Busca-se analisar avanços e desafios na área, contribuindo para a discussão sobre estratégias inovadoras de proteção agrícola que aliem eficiência, sustentabilidade e segurança ambiental, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas, especialmente no que se refere à erradicação da fome (ODS 2) e à promoção de padrões de consumo e produção responsáveis (ODS 12) [4].

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Pesticidas convencionais e seus impactos ambientais

Os pesticidas convencionais (ou clássicos) consistem em compostos químicos sintéticos amplamente utilizados no controle de pragas agrícolas, abrangendo grupos como os organofosforados, carbamatos, piretróides e organoclorados. Além disso, novas alternativas vêm sendo pesquisadas e aplicadas para substituir ou complementar o uso de defensivos convencionais, tais como os neonicotinóides (pesticidas sistêmicos de desenvolvimento mais recente)[8], e o controle biológico (baseado em inimigos naturais ou microrganismos benéficos)[9].

O uso dos pesticidas convencionais foi impulsionado principalmente pela Revolução Verde, período no qual houve forte incentivo ao aumento da produtividade agrícola por meio da intensificação do uso de agroquímicos e novas tecnologias agrícolas [10]. Durante essa época, os pesticidas foram amplamente adotados como base das políticas de segurança alimentar em diversos países, sem que houvesse considerações aprofundadas sobre suas consequências ambientais e sanitárias a longo prazo [11]. No entanto, com o passar do tempo, observaram-se os impactos negativos do uso indiscriminado desses compostos, incentivando a busca por alternativas mais sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente [12].

O uso extensivo de defensivos químicos acarreta contaminação do solo e dos recursos hídricos, o que compromete tanto microrganismos benéficos quanto polinizadores, bem como ciclos ecológicos locais [2]. Além disso, resíduos desses compostos podem ser transportados para ambientes aquáticos, onde se acumulam ao longo da cadeia trófica, representando riscos ecotoxicológicos significativos [13]. Estudos demonstram que pesticidas persistentes podem se acumular em organismos aquáticos, elevando os riscos de bioacumulação e biomagnificação, de modo que os níveis de contaminação aumentam progressivamente em predadores de topo,

incluindo humanos [14]. Essa transferência pode impactar populações inteiras de espécies não-alvo, comprometendo o equilíbrio ecológico e resultando em perda de biodiversidade [13].

A presença de resíduos de pesticidas em alimentos é outra preocupação crítica, uma vez que a ingestão continuada dessas substâncias pode levar a efeitos adversos à saúde humana. Resíduos de compostos organoclorados e organofosforados, por exemplo, já foram detectados em amostras de frutas, verduras e cereais, ultrapassando limites de segurança estabelecidos para consumo humano [13]. Além disso, pesquisas indicam que a exposição crônica a esses resíduos pode estar associada a distúrbios endócrinos, neurodegenerativos e câncer, destacando a importância da regulação e do monitoramento contínuo dessas substâncias [14].

No que diz respeito aos mecanismos de ação, cada classe de pesticida atua de modo distinto. Os organofosforados e carbamatos, por exemplo, inibem a enzima acetilcolinesterase, levando ao acúmulo de acetilcolina e, conseqüentemente, à disfunção neuromuscular nos insetos [15][16]. Já os organoclorados, devido à sua alta lipofilicidade, tendem a se acumular nos tecidos adiposos de organismos expostos, resultando em efeitos neurotóxicos e bioacumulação na cadeia alimentar [17]. Por outro lado, os piretróides agem sobre os canais de sódio da membrana neuronal, prolongando o fluxo de íons e causando paralisia nos insetos-alvo, sendo considerados menos tóxicos para mamíferos quando comparados às demais classes [12]. Para ilustrar de modo mais estruturado, a Tabela 2.1 consolida as quatro principais classes de pesticidas convencionais, seus mecanismos de ação e os riscos associados à exposição frequente ou inadequada.

Tabela 2.1: Pesticidas clássicos, mecanismo de ação e riscos de exposição.

Classe de Pesticida	Mecanismo de Ação	Riscos de Exposição
Organofosforados	Inibem a enzima acetilcolinesterase, acumulando acetilcolina nas sinapses neurais, provocando hiperestimulação dos impulsos nervosos.	• Efeitos neurotóxicos agudos (vertigem, náuseas, paralisia); • <i>Possível</i> relação com doenças neurodegenerativas; • Risco de intoxicação ocupacional em trabalhadores rurais.
Carbamatos	Semelhante aos organofosforados, inibem acetilcolinesterase, porém de modo geralmente reversível.	• Toxicidade aguda moderada a alta; • Efeitos respiratórios e neurológicos; • Potencial contaminação de solos e águas superficiais.
Piretroides	Agem sobre canais de sódio da membrana neuronal, prolongando o fluxo de íons e causando paralisia no inseto.	• Menor persistência no ambiente (quando comparados a organoclorados); • Podem afetar peixes e organismos aquáticos; • Exposição crônica associada a reações alérgicas.
Organoclorados	Interferem na condução de impulsos nervosos; muitos são	• Alta estabilidade e

Alguns mecanismos de toxicidade incluem interferências enzimáticas (p.ex. inibição da acetilcolinesterase ou modulação de canais iônicos), bioacumulação lipídica em organismos aquáticos e a disrupção endócrina em mamíferos [18]. Ademais, pesquisas recentes apontam que certos compostos, como organofosforados, podem desencadear danos neurológicos a longo prazo, enquanto organoclorados podem persistir por décadas no solo, afetando sucessivas gerações de fauna e flora [11, 2]. Por isso, há consenso crescente sobre a urgência de estratégias mais sustentáveis, que conciliem a proteção das lavouras com a preservação do ecossistema.

Os efeitos tóxicos dos pesticidas sobre a saúde humana podem ser classificados como agudos, quando a exposição ocorre em doses elevadas por um curto período, ou crônicos, resultantes de exposições frequentes a doses menores. Os impactos incluem distúrbios neurológicos, como tremores e alterações cognitivas, distúrbios endócrinos e potenciais efeitos carcinogênicos [19]. Certos organofosforados e organoclorados demonstraram efeito cumulativo no sistema nervoso, aumentando o risco de doenças como Parkinson e alterações nos neurotransmissores [20]. Além disso, piretroides podem afetar a neurotransmissão, ainda que de forma menos agressiva, mas não isenta de riscos para populações vulneráveis.

No panorama econômico, os custos associados às intoxicações são significativos, englobando despesas com hospitalizações, tratamentos médicos e o desenvolvimento de novos ingredientes ativos para combater a resistência crescente das pragas [20]. Adicionalmente, resíduos de pesticidas acima dos limites internacionais podem resultar em barreiras comerciais, afetando exportadores e reduzindo a produtividade agrícola [19].

Casos concretos de resistência evidenciam insetos e fungos que, diante do uso recorrente de um mesmo princípio ativo, passam a demandar doses cada vez maiores ou misturas mais tóxicas para controle efetivo [21]. Esse fenômeno está relacionado à forte pressão seletiva exercida pelo uso intensivo de pesticidas, levando à evolução de linhagens resistentes que não são controladas por concentrações anteriormente eficazes.

No caso de insetos, a resistência pode ser atribuída a mutações genéticas que resultam na modificação de alvos bioquímicos, maior expressão de enzimas de detoxificação ou redução da penetração dos compostos ativos [2]. Essa resistência crescente não apenas compromete a eficácia dos pesticidas, mas também intensifica os impactos ambientais, devido ao aumento das aplicações e consequente acúmulo de resíduos no solo e nos recursos hídricos. Além disso, há

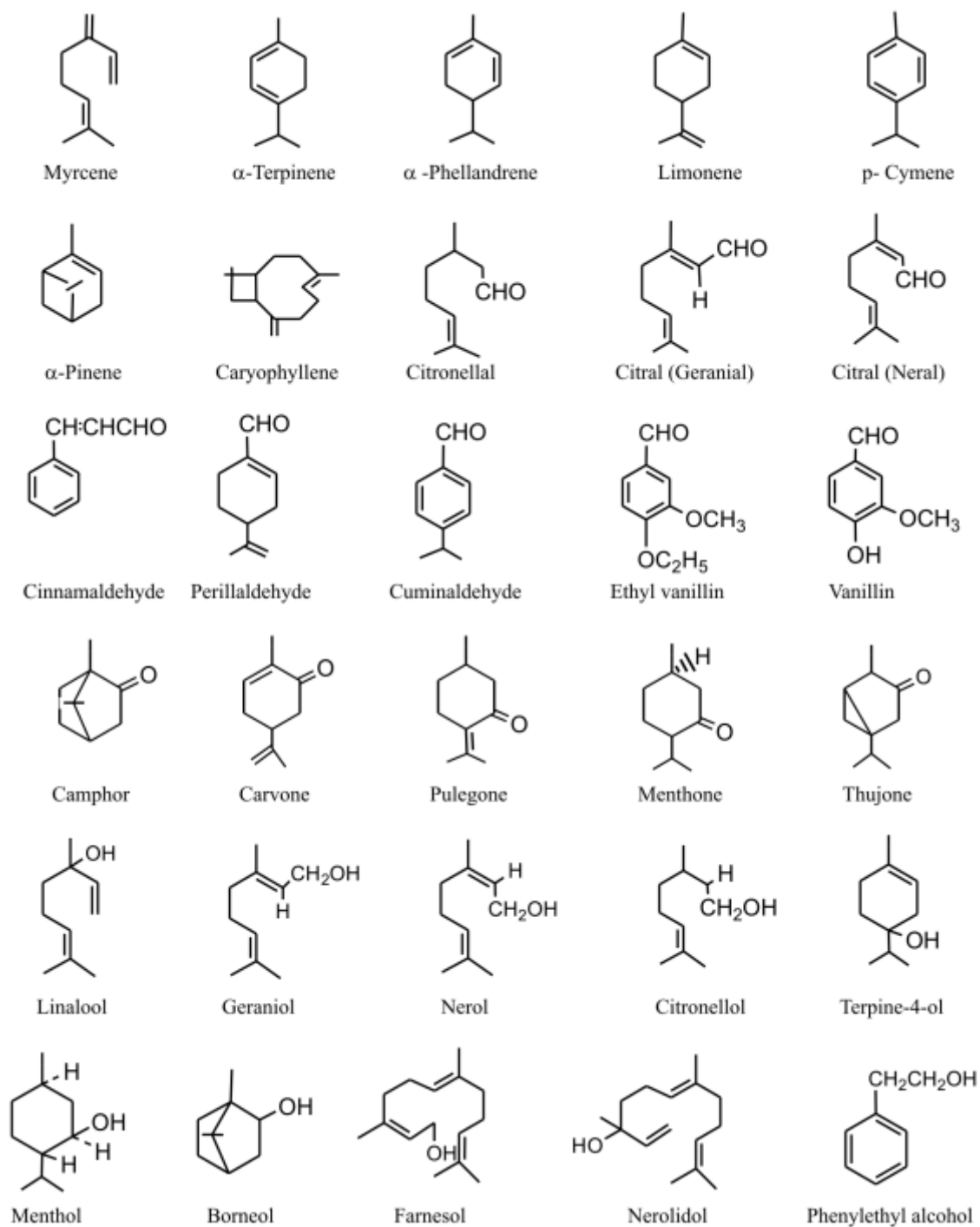
um impacto econômico significativo, pois os produtores enfrentam custos elevados para manter a eficácia do manejo de pragas, muitas vezes recorrendo a misturas de pesticidas ou à introdução de moléculas mais potentes e potencialmente mais tóxicas [22].

Diante desse cenário, estratégias sustentáveis têm sido propostas como alternativas viáveis para mitigar os efeitos da resistência. A rotação de princípios ativos e o manejo integrado de pragas (MIP) são abordagens promissoras, pois reduzem a pressão seletiva sobre populações de insetos e microrganismos patogênicos, diminuindo a necessidade de aplicações intensivas de pesticidas [2]. Além disso, a introdução de biopesticidas, como extratos de óleos essenciais, tem demonstrado potencial para reduzir os impactos negativos da resistência, uma vez que esses compostos possuem múltiplos alvos bioquímicos e dificultam a adaptação dos organismos-alvo [2]. Paralelamente, a nanotecnologia surge como um aliado promissor, permitindo a liberação controlada de compostos ativos e melhorando a biodisponibilidade dos pesticidas, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes [21]. Assim, a busca por alternativas mais seguras e eficazes torna-se essencial para garantir a sustentabilidade da agricultura, minimizando os riscos ambientais e econômicos associados à resistência dos pesticidas.

2.2 Óleos essenciais como pesticidas

Os óleos essenciais são misturas complexas de vários compostos (conforme ilustrado na Figura 2.1) destacando que suas bioatividades contra organismos são principalmente devido ao sinergismo entre seus múltiplos constituintes majoritariamente terpênicos, fenólicos e outros metabólitos secundários, extraídas de estruturas vegetais como folhas, sementes, cascas e flores [23]. A composição específica de cada óleo pode apresentar variações substanciais, influenciadas pela espécie vegetal, condições edafoclimáticas e métodos de extração, o que explica diferenças de coloração, odor, bem como de potência inseticida e fungicida [24]. Por exemplo, *Piper aduncum* distingue-se pela alta concentração de compostos fenólicos e monoterpenos, podendo inibir o crescimento de fungos fitopatogênicos, além de exibir atividade inseticida [25]. Já espécies do gênero *Cymbopogon*, como citronela e capim-limão, são reconhecidas por propriedades repelentes a mosquitos, besouros e lepidópteros, enquanto algumas espécies de *Eucalyptus* reúnem compostos que exercem forte ação de desorientação no sistema nervoso de pragas [24].

Figura 2.1: Estruturas químicas de compostos presentes em óleos essenciais.



Fonte: Adaptado de [26].

Do ponto de vista mecanístico, os óleos essenciais podem alterar a permeabilidade da membrana celular em microrganismos, resultando em perda de conteúdo intracelular e consequente inibição do crescimento fúngico [27]. Esse efeito ocorre devido à interferência nos lipídios da membrana plasmática e à redução da biossíntese de ergosterol, conforme demonstrado em estudo com *Aspergillus flavus*, onde a exposição ao óleo essencial de endro (*Anethum graveolens*) resultou em lesões estruturais na membrana celular e disfunção mitocondrial [27].

No controle de insetos, há evidências de interrupção do sistema nervoso por meio da inibição de enzimas fundamentais, como a acetilcolinesterase, bem como bloqueio de receptores neuromoduladores, culminando em paralisia e morte [28]. Estudo de 2012 confirma alta eficácia *in vitro* de óleos essenciais de espécies do gênero *Eucalyptus* contra fungos fitopatogênicos, incluindo *Sclerotium rolfsii* e *Fusarium oxysporum*. [28]. Tais efeitos reforçam o potencial dos óleos essenciais como alternativas promissoras aos pesticidas sintéticos, combinando múltiplos mecanismos de ação e reduzindo o risco de resistência adquirida por pragas e patógenos agrícolas.

A adoção prática desses óleos essenciais enfrenta desafios de padronização, uma vez que a concentração dos princípios ativos pode oscilar amplamente devido a fatores como origem botânica, condições ambientais e métodos de extração [23]. Além disso, aspectos como alta volatilidade e instabilidade exigem formulações diferenciadas, incluindo técnicas de microencapsulação e uso de nanopartículas para prolongar a persistência em campo e assegurar resultados consistentes [29]. Apesar dessas limitações, estudos indicam que a diversidade de compostos dentro de um mesmo óleo pode dificultar o desenvolvimento de resistência por parte de pragas, uma vez que múltiplos mecanismos de ação são ativados simultaneamente, reduzindo a probabilidade de adaptação [29]. Essas evidências reforçam o potencial de aplicação dos óleos essenciais como alternativas viáveis aos pesticidas sintéticos, especialmente em sistemas agrícolas que priorizam menor impacto ambiental e maior segurança alimentar.

Também é importante destacar algumas limitações na aplicação direta de óleos essenciais como pesticidas, especialmente sua elevada volatilidade, que pode comprometer a persistência do produto em condições de campo, bem como a variação química inerente a fatores como local de cultivo, estágio fenológico e métodos de extração [5]. Essas variações

tornam complexa a padronização, pois o teor dos compostos majoritários pode oscilar significativamente de um lote para outro, dificultando a consistência de resultados [30].

Para superar tais desafios, pesquisas recentes apontam para o uso de nanoformulações em conjunto com os óleos essenciais, de modo a reduzir a volatilização e aumentar a estabilidade dos compostos bioativos [31]. Nesse sentido, estudos comparativos já demonstraram que a ação antifúngica e inseticida dos óleos essenciais, sobretudo quando formulados de maneira adequada, pode equiparar-se ou mesmo superar certos pesticidas sintéticos, desde que se estabeleça o devido manejo de dose e frequência de aplicação [5]. Como consequência, esperam-se menores impactos ambientais, haja vista a redução de resíduos tóxicos persistentes e a menor probabilidade de surgimento de resistência, graças à diversidade química contida nesses extratos vegetais.

Contudo, ainda são necessários mais ensaios de campo e avanços na definição de protocolos padronizados para que esses produtos conquistem competitividade em larga escala frente aos defensivos químicos tradicionais [30].

2.3 Nanotecnologia aplicada à agricultura

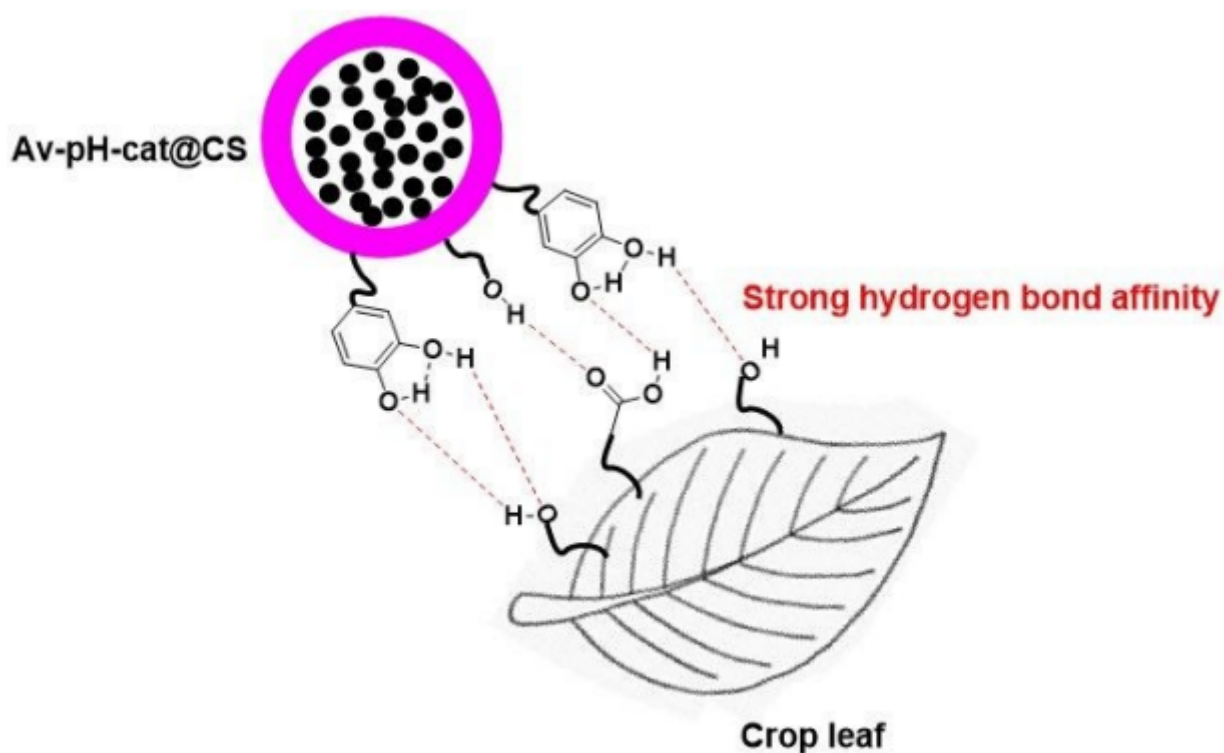
A nanotecnologia aplicada à agricultura refere-se ao desenvolvimento e uso de nanomateriais (na faixa de 1 a 100 nm) para otimizar processos produtivos, promovendo maior eficiência e sustentabilidade no manejo agrícola [32]. A nanotecnologia se apresenta como uma abordagem inovadora para o manejo agrícola, oferecendo alternativas para aumentar a eficiência dos insumos, reduzir impactos ambientais e prolongar a eficácia dos compostos ativos ao longo do tempo.

Aplicações envolvendo nanopesticidas e nanofertilizantes demonstram potencial para mitigar os problemas associados ao uso excessivo de agroquímicos, promovendo maior sustentabilidade no setor agrícola [33]. Esses nanomateriais incluem nanopartículas metálicas (como prata, cobre e zinco), polímeros nanoestruturados, nanoemulsões, nanotubos de carbono e pontos quânticos de carbono, os quais apresentam propriedades físico-químicas diferenciadas, como maior reatividade superficial, maior adsorção de moléculas e capacidade de transporte direcionado de princípios ativos [34]. Tais características permitem aplicações avançadas no setor agrícola, desde o fortalecimento da aderência foliar e a liberação controlada

de defensivos agrícolas até a redução das doses necessárias para o controle de pragas e doenças [34, 35].

A adesão foliar aprimorada é uma das vantagens mais exploradas em formulações de nanopesticidas, pois minimiza perdas por lavagem e volatilização, aumentando a absorção dos compostos ativos [34]. Estudos demonstram que modificações na carga superficial das nanopartículas e ajustes na hidrofobicidade da formulação permitem maior interação com a superfície cerosa das folhas, conforme ilustrado na 2.3, garantindo retenção prolongada e melhor aproveitamento dos princípios ativos.

Figura 2.2: Mecanismo de adesão proposto para Av-pH-cat@CS nanoencapsuladas.



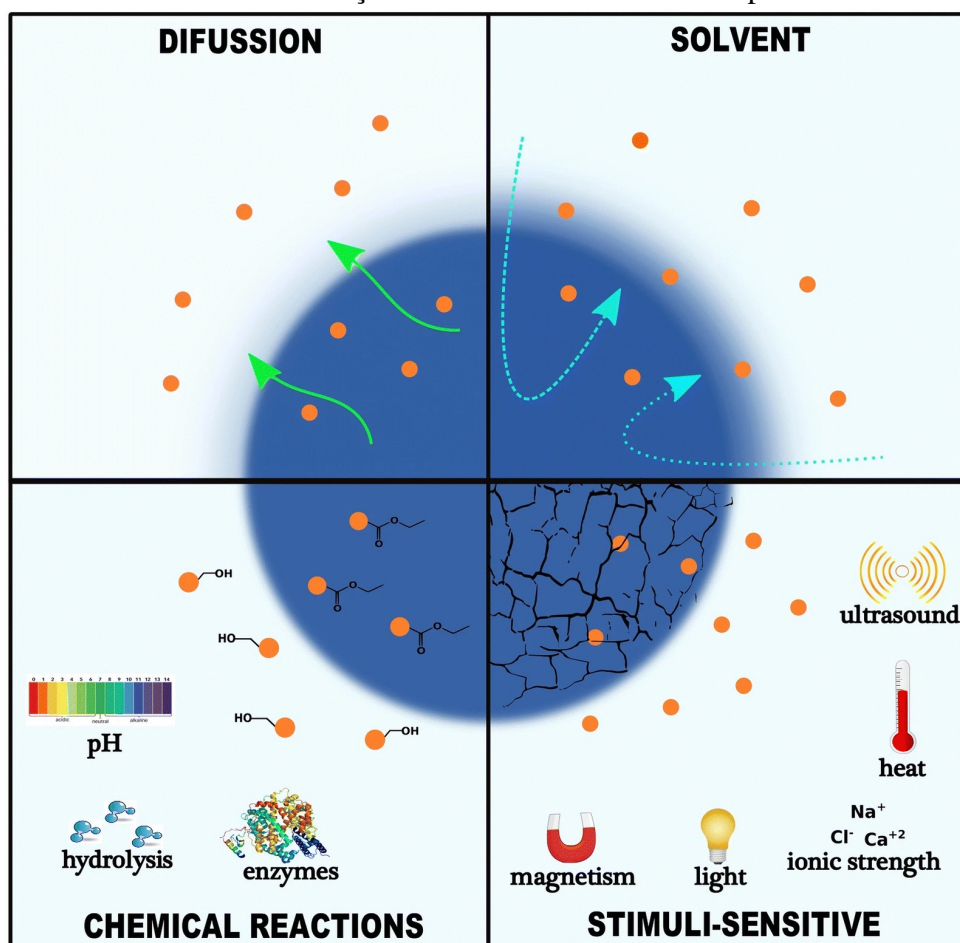
Fonte: [34].

Nanocápsulas adesivas com liberação controlada, por exemplo, mostraram-se altamente eficazes na retenção foliar, reduzindo significativamente a necessidade de reaplicações e otimizando a eficiência da proteção das culturas [35]. Essa característica é particularmente vantajosa para o controle de pragas agrícolas que atacam a parte aérea das plantas, garantindo maior tempo de contato do pesticida com o alvo biológico e reduzindo o

impacto ambiental da dispersão descontrolada [34].

Outro aspecto relevante é a liberação controlada dos ingredientes ativos encapsulados em nanocarreadores, permitindo que pesticidas e fertilizantes sejam liberados de maneira gradual, conforme estímulos externos, como variação de pH, umidade, temperatura e ação enzimática [36], na 2.3, há uma representação dos diferentes mecanismos utilizados. Isso reduz perdas por lixiviação e volatilização, diminuindo impactos ambientais e melhorando a eficiência de absorção das plantas. Nanocápsulas e sistemas mesoporosos baseados em sílica e biopolímeros têm sido amplamente estudados para formulações inteligentes de agroquímicos [36].

Figura 2.3: Mecanismos de liberação controlada em diferentes tipos de nanocarreadores.



Fonte:[37]

A redução da dose necessária para obter o mesmo nível de controle fitossanitário é uma das vantagens significativas da nanotecnologia. A alta relação superfície-volume dos nanomateriais permite um contato mais eficiente com os alvos biológicos, otimizando a ação

dos pesticidas e reduzindo a quantidade aplicada sem comprometer a eficácia [38]. Entre as soluções nanotecnológicas, nanopartículas metálicas, como prata e cobre, demonstram atividade antimicrobiana intrínseca, possibilitando o controle eficaz de fitopatógenos e insetos sem a necessidade de grandes concentrações de agentes químicos adicionais [39]. Além disso, estudo recente indica que formulações nanoestruturadas podem reduzir significativamente o uso de defensivos agrícolas, melhorando a estabilidade e liberação controlada dos compostos, o que leva a um impacto ambiental reduzido e maior eficiência no campo [40].

Desafios na regulamentação, segurança ambiental e viabilidade econômica ainda precisam ser superados. A falta de padronização em protocolos de avaliação de risco, aliada à incerteza sobre os efeitos de longo prazo dos nanomateriais no solo e na biota, levanta preocupações sobre sua adoção em larga escala [33]. Além disso, há necessidade de diretrizes regulatórias mais específicas para garantir a segurança e eficácia dessas tecnologias antes de sua ampla utilização no campo.

Destaca-se que as aplicações da nanotecnologia na agricultura abrangem diversas frentes, incluindo a monitorização inteligente de pragas e o nanoencapsulamento de fertilizantes e pesticidas, visando maior eficiência e redução dos impactos ambientais. Uma das inovações mais promissoras são os nanossensores, dispositivos capazes de detectar pragas e doenças em tempo real, utilizando princípios ópticos, eletroquímicos ou eletrônicos [41]. Esses sensores podem identificar a presença de compostos voláteis liberados por plantas sob estresse biótico, permitindo a detecção precoce de infestações e possibilitando a tomada de decisão antes que o dano econômico se agrave [42]. Alguns modelos de nanossensores utilizam nanopartículas metálicas funcionalizadas para reconhecimento molecular, proporcionando um diagnóstico rápido e sensível de infecções fúngicas e bacterianas em culturas de interesse agrícola [43].

Segundo Catani *et al.* [6] a literatura demonstra um crescimento exponencial no número de publicações sobre nanotecnologia aplicada à agricultura nos últimos anos, refletindo o aumento do interesse global por soluções tecnológicas que combinem alta produtividade e sustentabilidade.

Entretanto, a implementação da nanotecnologia na agricultura enfrenta desafios regulatórios significativos, principalmente relacionados à toxicidade potencial de certos nanomateriais para organismos não-alvo e à persistência ambiental dessas substâncias [33].

Muitos nanomateriais possuem propriedades físico-químicas distintas de suas contrapartes convencionais, o que pode afetar sua biodisponibilidade, transporte no solo e bioacumulação em organismos [21]. Estudos demonstram que nanopartículas metálicas, como prata (AgNPs) e óxido de zinco (ZnO NPs), podem interferir na microbiota do solo e afetar organismos aquáticos, enquanto nanocarregadores poliméricos podem ter persistência prolongada [21].

A ausência de protocolos padronizados para avaliar a segurança a longo prazo dessas tecnologias representa um obstáculo crítico para a regulamentação e comercialização. Em grande parte, isso se deve ao fato de que as estruturas regulatórias foram originalmente concebidas para compostos químicos convencionais, sem levar em conta as propriedades físico-químicas específicas das nanopartículas. Assim, a complexidade das interações desses nanomateriais no meio ambiente, especialmente em relação à sua persistência e potencial toxicidade, ainda não está totalmente compreendida, exigindo métodos de análise mais detalhados [44].

Além disso, os modelos de testes ecotoxicológicos atualmente utilizados para pesticidas convencionais podem não ser adequados para caracterizar o comportamento dinâmico das nanopartículas, uma vez que elas apresentam características como agregação, dissolução e interações diferenciadas com componentes bióticos do solo e da água [45]. Variações na formulação, tipo de revestimento superficial e mecanismos de liberação controlada também podem influenciar significativamente os efeitos toxicológicos de um mesmo nanomaterial, reforçando a necessidade de diretrizes regulatórias específicas para avaliação de sua segurança e impacto ambiental [46].

Os avanços observados sustentam a discussão de que a nanotecnologia agrícola pode compor estratégias inovadoras rumo a uma agricultura mais sustentável. Contudo, segundo Kumari *et al.* [47] há a necessidade de avaliações criteriosas para cada contexto produtivo, considerando variáveis como características do solo, condições climáticas e culturas específicas, além de aprofundar estudos sobre segurança ambiental e toxicidade para organismos não-alvo [47]. A regulamentação da nanotecnologia aplicada à agricultura ainda está em desenvolvimento globalmente, com diretrizes diferenciadas entre os países. De acordo com Kumari *et al.* [47], diversas nações estabeleceram estruturas regulatórias para produtos agrícolas baseados em nanotecnologia, incluindo pesticidas, fertilizantes e aditivos para ração animal. Entretanto, a falta de padronização internacional dificulta a harmonização do mercado

global, criando desafios tanto para a comercialização quanto para a avaliação de risco desses produtos.

A ausência de uma estrutura regulatória consolidada impacta diretamente os investimentos na área, uma vez que empresas e instituições de pesquisa enfrentam incertezas quanto aos requisitos de segurança necessários para a aprovação de produtos nanoestruturados. Segundo Kumari *et al.* [47] a implementação de regulamentações claras e diretrizes de boas práticas será essencial para garantir que os benefícios da nanotecnologia sejam explorados de maneira ética e segura, sem comprometer a biodiversidade e a saúde humana.

Segundo He et al [48] estudos comparativos demonstram que nanopesticidas podem elevar a eficácia de controle em 20–30% quando comparados às formulações convencionais, especialmente devido à liberação controlada e ao aumento da adesão foliar, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes e minimizando a contaminação ambiental. Essas formulações também possibilitam uma melhor interação com a superfície do inseto, aumentando a taxa de absorção dos princípios ativos e reduzindo a lixiviação para o solo e a água [49].

No caso dos nanofertilizantes, pesquisas indicam que sua adoção pode resultar em um expressivo aumento de produtividade devido à melhor biodisponibilidade dos nutrientes e à redução de perdas por volatilização e lixiviação [31]. Estudo demonstrou que nanopartículas de ferro, zinco e fósforo, quando aplicadas de forma controlada, promovem um crescimento vegetal superior, além de reduzirem a necessidade de fertilizantes convencionais em até 40% sem comprometer o rendimento das culturas [50].

Outro benefício associado às formulações nanoestruturadas é a possibilidade de desenvolver sistemas de liberação inteligente, onde os compostos ativos são liberados em resposta a estímulos externos, como variações de pH, umidade ou enzimas específicas [31]. Esse mecanismo permite que os insumos sejam utilizados de forma mais eficiente e apenas quando necessários, reduzindo o desperdício e a presença de resíduos químicos em solos agrícolas.

Por outro lado, embora os nanofertilizantes apresentem benefícios na eficiência de uso de nutrientes, seu impacto ambiental ainda precisa ser mais estudado. Segundo Subhash Babu *et al* [51], o uso indiscriminado dessas tecnologias pode gerar efeitos adversos, como a liberação excessiva de nanopartículas no solo e na cadeia alimentar, o que pode representar riscos para a

biota e a saúde humana. Além disso, doses supraótimas de nanofertilizantes podem prejudicar o crescimento das culturas e afetar negativamente a qualidade do solo, reforçando a necessidade de um controle rigoroso sobre sua aplicação e estudos adicionais para avaliar sua toxicidade a longo prazo.

Apesar dessas vantagens, o impacto ambiental das nanopartículas utilizadas como nanofertilizantes ainda precisa ser amplamente estudado. De acordo com [52], a interação dessas partículas com a microbiota do solo pode alterar a estrutura e função das comunidades microbianas, afetando processos essenciais como o ciclo do nitrogênio e a fixação de carbono. Além disso, há evidências de que certos nanofertilizantes podem induzir a liberação de espécies reativas de oxigênio, resultando em efeitos ecotoxicológicos para organismos do solo. Dessa forma, é essencial que novas pesquisas busquem avaliar os impactos de longo prazo desses produtos, garantindo sua segurança ambiental e eficácia agronômica.

Os *carbon dots* (CDs) ou pontos quânticos de carbono são nanopartículas com tamanho inferior a 10 nm, constituídas majoritariamente por átomos de carbono em arranjos híbridos (sp^2 e sp^3), frequentemente dopados com heteroátomos, como nitrogênio e oxigênio. Graças ao efeito de confinamento quântico, os CDs apresentam propriedades ópticas peculiares, como fotoluminescência intensa e estável, alta solubilidade em água e notável biocompatibilidade. Essas características distintivas fomentam seu uso em aplicações variadas, indo desde biossensoriamento e bioimagem até a veiculação de princípios ativos[53].

No cenário agrícola, os CDs despontam como ferramenta promissora para a formulação de bioestimulantes, devido à sua fotoluminescência, possuem a capacidade de aumentar a fotossíntese, aumentando a produtividade dos cultivares[54]. No contexto desse estudo, a presença de grupos funcionais (por exemplo, carboxílicos, hidroxílicos e amino) na superfície dos CDs possibilita a ancoragem de moléculas inseticidas, fungicidas ou fertilizantes.[55]. Além disso, a baixa citotoxicidade e o perfil biodegradável dos CDs os tornam especialmente atrativos para o desenvolvimento de agroinsumos mais seguros e sustentáveis [53].

Os avanços observados sustentam a discussão de que a nanotecnologia agrícola pode compor estratégias inovadoras rumo a uma agricultura mais sustentável. Todavia, segundo Sharma *et al.*[56] são necessárias avaliações criteriosas para cada contexto produtivo, considerando variáveis como características do solo, condições climáticas e culturas específicas, além de aprofundar estudos sobre segurança ambiental e toxicidade para

organismos não-alvo. A implementação de regulamentações claras e diretrizes de boas práticas será essencial para garantir que os benefícios da nanotecnologia sejam explorados de maneira ética e segura, sem comprometer a biodiversidade e a saúde humana [46].

2.4 Nanoformulações como defensivos agrícolas

O termo nanoformulação designa a incorporação de um ou mais princípios ativos — sejam compostos sintéticos ou naturais — em uma matriz nanoestruturada, com o objetivo de aprimorar características como solubilidade em meio aquoso, redução da volatilidade e liberação controlada [57]. Essas melhorias ocorrem devido à maior relação superfície-volume das partículas nanométricas, que favorece a interação com o alvo biológico e, muitas vezes, confere maior estabilidade química, prolongando a atividade do defensivo agrícola em campo [58].

Dentre as estratégias de encapsulamento, destacam-se lipossomas (vesículas lipídicas), polímeros biodegradáveis e materiais mesoporosos de sílica, que permitem o controle da taxa de liberação do princípio ativo [59]. O uso dessas nanoestruturas melhora a solubilidade em meio aquoso e reduz a volatilidade dos compostos bioativos, promovendo maior eficiência e estabilidade das formulações [36]. Além disso, formulações baseadas em nanocristais de celulose demonstraram capacidade de aprimorar a adesão foliar, proporcionando maior tempo de permanência do defensivo na superfície vegetal e reduzindo perdas por evaporação ou lixiviação [60]. Essa característica é particularmente importante para aumentar a eficiência dos pesticidas naturais, que tendem a sofrer rápida degradação no ambiente [2].

Ensaio com nanoformulações à base de polímeros indicam que a veiculação do ingrediente ativo nesse tipo de partícula permitiu uma redução de dose de até 50% sem comprometer a eficácia no controle de pragas [31]. Esse efeito é atribuído à capacidade de liberação controlada, que evita picos de concentração do composto ativo e prolonga sua disponibilidade no campo [60]. Além disso, o encapsulamento tem demonstrado grande potencial na proteção contra degradação por radiação UV, essencial para aumentar a estabilidade dos compostos bioativos sob condições ambientais adversas [36].

A Tabela 2.2 apresenta uma visão geral das principais estratégias de encapsulamento

empregadas para formulações de defensivos agrícolas, destacando seus mecanismos e vantagens.

Tabela 2.2: Principais estratégias de nanoencapsulamento para defensivos agrícolas.

Estratégia	Mecanismo	Vantagens
Lipossomas	Encapsulamento de compostos hidrofóbicos e liberação controlada via fusão com membranas biológicas	Aumenta a biodisponibilidade, reduz a toxicidade e protege contra degradação UV [36].
Polímeros Biodegradáveis	Encapsulação em nanopartículas poliméricas com liberação sustentada	Controle de liberação por estímulos ambientais, reduzindo impacto ambiental [59].
Materiais Mesoporosos de Sílica	Adsorção e liberação gradual de compostos ativos	Estabilidade térmica e proteção contra fotodegradação [36].
Nanocristais de Celulose	Interação com membranas celulares de insetos e pragas, promovendo adesão foliar	Aumenta a adesão do defensivo à superfície vegetal, reduzindo perdas [60].

Os benefícios ambientais das nanoformulações são amplamente reconhecidos. Comparações entre formulações nanoestruturadas e pesticidas convencionais demonstraram que a versão nano pode reduzir significativamente a toxicidade residual, minimizando a contaminação do solo e da água [2]. Segundo Menossi *et al.*[58] a biodegradabilidade das matrizes poliméricas pode ser ajustada para garantir que a degradação ocorra em um período adequado, evitando efeitos cumulativos no ambiente. Além disso, formulações de nanopesticidas contendo óleos essenciais encapsulados mostraram-se eficazes contra diversas pragas, apresentando níveis de toxicidade inferiores para organismos não-alvo, como abelhas e polinizadores [59].

Esses avanços reforçam o potencial das tecnologias nano para otimizar os custos de aplicação, reduzir impactos ambientais e oferecer uma alternativa sustentável aos defensivos agrícolas convencionais. Estudos indicam que a nanoencapsulação de pesticidas pode reduzir significativamente a toxicidade residual, minimizando a contaminação do solo e da água e prolongando a eficácia dos princípios ativos no ambiente [2].

Apesar disso, desafios significativos ainda precisam ser superados para viabilizar a adoção em larga escala dessas formulações. O escalonamento industrial continua sendo um dos principais entraves, pois os processos de produção de nanopesticidas frequentemente

exigem metodologias sofisticadas e equipamentos de alto custo [5]. Além disso, a aceitação pelo mercado depende não apenas da viabilidade econômica dessas tecnologias, mas também de regulamentações claras que garantam sua segurança para o meio ambiente e para os consumidores [31].

Dessa forma, a cooperação entre a academia, o setor produtivo e os órgãos reguladores será fundamental para consolidar essas inovações como uma alternativa viável e sustentável aos pesticidas convencionais.

Em relação aos mecanismos de ação, as nanoformulações exploram a liberação lenta e controlada do princípio ativo, evitando picos de concentração tóxica e prolongando sua eficácia no campo [18]. Esse efeito é alcançado por meio de sistemas de estímulo-responsividade, nos quais a liberação do composto ativo ocorre em função de mudanças ambientais, como variações de pH, umidade ou presença de enzimas específicas excretadas por determinadas pragas [31]. Sistemas inteligentes de liberação são projetados para responder a esses estímulos biológicos e ambientais, permitindo a aplicação mais eficiente de agroquímicos e reduzindo impactos ambientais [61].

Ensaio comparativos entre nanoformulações e defensivos agrícolas convencionais evidenciam um aumento significativo da eficácia na proteção de culturas, especialmente em cenários de alta infestação por pragas e doenças [32]. A formulação de nanopesticidas baseada na incorporação de ingredientes ativos em matrizes nanoestruturadas possibilita maior retenção foliar e liberação controlada, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes [34].

Além disso, formulações nanoestruturadas contendo óleos essenciais demonstraram efeito inseticida e antifúngico mais duradouro, além de demandarem doses reduzidas para alcançar os mesmos níveis de controle que pesticidas sintéticos [62]. Em experimentos de campo, nanopesticidas encapsulados em matrizes de sílica ou biopolímeros apresentaram melhor aderência foliar e menor degradação causada por intempéries, resultando em maior estabilidade do composto ativo e redução da dispersão ambiental [34]. Dessa forma, a incorporação de nanotecnologia em defensivos agrícolas pode atuar não apenas como alternativa aos produtos tradicionais, mas também como ferramenta complementar em programas de manejo integrado de pragas (MIP), promovendo a redução da dependência exclusiva de compostos químicos convencionais e mitigando riscos associados à resistência de pragas [32].

Apesar dos benefícios, persistem desafios na adoção dessas tecnologias em larga escala. O custo de produção ainda é elevado, principalmente devido à necessidade de síntese controlada das nanopartículas e às etapas de funcionalização para garantir estabilidade e eficiência [2]. O escalonamento industrial dessas formulações também representa um entrave, uma vez que a produção em grandes volumes exige infraestrutura especializada e métodos padronizados para evitar variações na qualidade do produto final [2]. Além disso, a aceitação pelo mercado depende da implementação de regulamentações claras que garantam a segurança e eficácia das nanoformulações a longo prazo, além da percepção dos agricultores quanto aos benefícios e riscos do uso dessas novas tecnologias [48].

Nesse contexto, pesquisas futuras e parcerias estratégicas entre indústrias, instituições acadêmicas e órgãos reguladores podem acelerar a transferência dessas tecnologias para o campo, viabilizando o uso sustentável das nanoformulações e garantindo sua compatibilidade com práticas agrícolas modernas. A integração dessas inovações a políticas públicas e programas de incentivo à agricultura sustentável pode ser um fator decisivo para consolidar o papel da nanotecnologia como ferramenta essencial na proteção de culturas e na mitigação dos impactos ambientais dos pesticidas convencionais.

3 METODOLOGIA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estratégia de busca e bases consultadas

Nesta pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica com enfoque em formulações à base de nanopartículas de carbono e óleos essenciais aplicadas ao controle de pragas. Inicialmente, testaram-se algumas bases de dados de grande relevância, como Scopus, PubMed e ScienceDirect, porém o número de resultados obtidos foi muito limitado para os termos específicos selecionados, não trazendo contribuições relevantes ao tema.

Assim, optou-se por concentrar a busca no Google Scholar devido à maior amplitude de cobertura em publicações acadêmicas e maior número de resultados potencialmente relacionados ao tema. A busca contemplou o período de 2014 a 2025, de modo a englobar pesquisas mais recentes.

3.2 Construção da Search Query

A estratégia de busca adotou operadores booleanos para combinar termos-chave relacionados às áreas de interesse do estudo. A busca incluiu palavras associadas a *nanopartículas de carbono*, como "*carbon nanoparticles*", "*carbon nanotubes*", "*graphene oxide*" e "*carbon quantum dots*".

Para abranger os compostos naturais investigados, foram utilizados termos como "*essential oils*", "*plant-derived volatiles*" e "*botanical pesticides*". Além disso, a busca foi refinada com palavras relacionadas ao contexto agrícola e de controle de pragas, incluindo "*pesticides*", "*biopesticides*", "*insecticides*", "*agriculture*" e "*crop protection*".

A fim de excluir estudos com aplicações distintas do foco do trabalho, como uso farmacêutico ou médico, foram adicionados filtros de exclusão para os termos "*pharmaceutical*", "*medical*" e "*drug*".

Adicionalmente, foram aplicados filtros para restringir os resultados ao período entre 2014 e 2025, além da seleção de publicações nos idiomas inglês, português e espanhol. Essa abordagem garantiu maior relevância dos artigos para o escopo da revisão bibliográfica.

3.3 Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram estabelecidos critérios claros de seleção para garantir a relevância dos resultados:

3.3.1 Critérios de Inclusão

- Artigos publicados entre 2014 e 2025.
- Artigos originais (estudos experimentais, observacionais) e revisões que abordem o uso de nanopartículas de carbono associadas a óleos essenciais em aplicações de controle de pragas.
- Disponibilidade de texto completo em inglês, português ou espanhol.

3.3.2 Critérios de Exclusão

- Publicações anteriores a 2014 ou após 2025.
- Foco restrito a aplicações médicas, cosméticas ou farmacêuticas das nanopartículas de carbono e/ou óleos essenciais.
- Trabalhos duplicados em diferentes bases.
- Falta de acesso ao texto completo.

3.4 Processo de Triagem e Seleção

A partir da estratégia de busca, obteve-se um total inicial de 418 resultados no Google Scholar. Destes, foram analisados os 100 primeiros, considerando relevância e aderência ao tema. Durante a triagem, identificou-se que 2 artigos eram duplicados, os quais foram removidos. Após a leitura de títulos e resumos, 32 artigos foram incluídos e 66 foram excluídos com base nos critérios estabelecidos. Além disso, a partir dos resultados iniciais, complementaram-se os conceitos aplicados adicionando artigos que reforçavam a base teórica do estudo.

O processo de triagem foi conduzido em etapas:

1. **Leitura de Títulos e Resumos:** Exclusão de estudos irrelevantes ou que não abordassem diretamente o tema.
2. **Leitura Completa (quando possível):** Avaliação detalhada dos artigos restantes para confirmação do atendimento aos critérios de inclusão.

Para organizar e documentar essa triagem, utilizou-se a ferramenta Rayyan, na qual cada artigo foi classificado como "incluir", "excluir" ou "talvez", de acordo com o nível de conformidade com os critérios definidos. Esse procedimento segue as recomendações de revisões sistemáticas, permitindo maior transparência e reprodutibilidade no processo de seleção dos artigos.

A partir do processo de triagem, constatou-se que os estudos e artigos selecionados evidenciam um interesse consistente e crescente na área de nanoformulações aplicadas ao controle de pragas. Esse levantamento demonstra não só a relevância do tema, mas também a viabilidade de se explorar, experimentalmente, as potencialidades dessas tecnologias. Assim, os parâmetros e a metodologia adotados no experimento exploratório foram fundamentados nas lacunas e oportunidades identificadas durante essa etapa, reforçando a pertinência de desenvolver soluções inovadoras e sustentáveis para a agricultura.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Delineamento Experimental

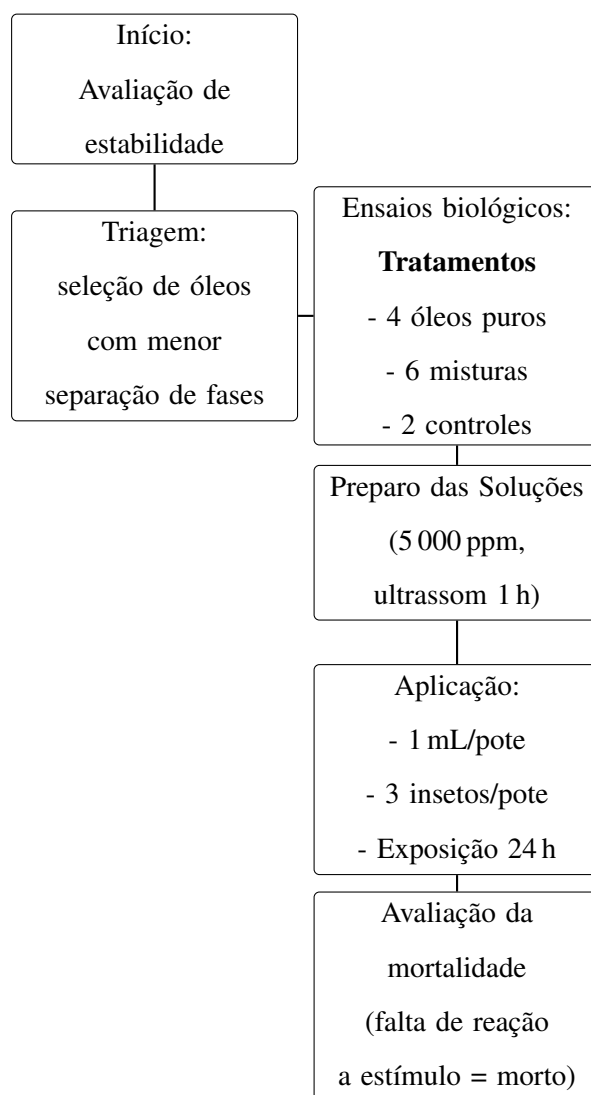


Figura 4.1: Fluxograma resumindo o delineamento experimental para avaliação de estabilidade e ensaios de eficácia inseticida.

Conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.1, este estudo foi conduzido em duas etapas principais. Na primeira, avaliou-se a estabilidade de seis óleos essenciais (*Mentha arvensis*, *Eucalyptus staigeriana*, *Eucalyptus citriodora*, *Cymbopogon martinii*, *Rosmarinus officinalis* e *D-limoneno de laranja*) em formulação com um *carbon-dot* de origem comercial, por meio de agitação em alta força de cisalhamento. Esse procedimento objetivou identificar possíveis separações de fases e verificar a compatibilidade de cada óleo com a matriz nanoestruturada, selecionando-se para a segunda etapa apenas aqueles considerados mais estáveis.

Tabela 4.1: Tratamentos testados no experimento.

Tipo	Óleos Essenciais
Óleos puros	<i>D-limoneno de laranja</i> <i>Eucalyptus staigeriana</i> (eucalipto-limão) <i>Eucalyptus citriodora</i> (eucalipto-citriodora) <i>Rosmarinus officinalis</i> (alecrim)
Misturas	<i>D-limoneno de laranja</i> + <i>E. staigeriana</i> <i>D-limoneno de laranja</i> + <i>E. citriodora</i> <i>D-limoneno de laranja</i> + <i>R. officinalis</i> <i>R. officinalis</i> + <i>E. citriodora</i> <i>R. officinalis</i> + <i>E. staigeriana</i> <i>E. staigeriana</i> + <i>E. citriodora</i>
Controle Positivo	Água destilada + pesticida convencional
Controle Negativo	Água destilada + etanol (sem óleo essencial)

Na segunda fase, realizou-se o ensaio biológico de eficácia inseticida, com foco em determinar a mortalidade dos insetos após a exposição aos óleos selecionados, isolados ou em combinação (Tabela 4.1). Cada tratamento foi acondicionado em potes de polipropileno, contendo 3 insetos e dieta comercial (pragas.com). Além dos tratamentos puros e misturados, incluiu-se um controle negativo (água + pesticida convencional) e um controle positivo (água + etanol). As soluções, preparadas a 5 000 ppm (com 1 mL aplicados por pote), permaneceram em banho de ultrassom por 1 hora para homogeneização, sendo então aplicadas diretamente sobre a dieta. Em condições laboratoriais sem controle rígido de temperatura ou umidade, os insetos foram observados por 24 horas e, ao final, avaliou-se a taxa de mortalidade,

considerando-se como mortos aqueles que não apresentavam qualquer resposta a estímulos mecânicos.

Número de unidades experimentais: Foi utilizado 1 pote (com 3 insetos) por tratamento, sendo o total de 4 tratamentos puros, 6 misturas e 2 controles.

Preparo das Soluções

Para obter soluções a 5 000 ppm de cada óleo, adicionaram-se em balão volumétrico de 100 mL:

- 500 μ L do respectivo óleo essencial;
- 1 mL de etanol;
- volume completado com água destilada.

Cada solução permaneceu por 1 hora em banho de ultrassom para garantir homogeneização. O valor de 5 000 ppm foi definido para imitar a concentração final adotada na etapa de triagem. O etanol auxilia na solubilização do óleo na fase aquosa.

Aplicação dos Tratamentos

Em cada pote, contendo a dieta previamente fornecida, adicionou-se 1 mL da solução (pura ou mistura) diretamente sobre o alimento, expondo imediatamente os insetos ao contato e à ingestão dos compostos. No caso do controle positivo, aplicou-se 1 mL de água destilada + etanol, sem a presença de óleo essencial. Os potes foram mantidos em condições de laboratório (sem controle estrito de temperatura, umidade ou fotoperíodo), mas em ambiente favorável à sobrevivência dos insetos durante o período de observação (24 h). Ao final desse intervalo, avaliou-se a mortalidade, considerando-se como mortos os indivíduos que não respondiam a estímulos mecânicos.

4.2 Materiais e reagentes

Arbolin fornecida pela Krilltech para triagem de estabilidade, e óleos essenciais fornecidos pela Destilaria Barú, levando-se em conta a composição informada pelo fornecedor.

Após essa avaliação de estabilidade, foram selecionados para os ensaios biológicos aqueles óleos que apresentaram menor separação de fases e maior compatibilidade com a matriz nanoestruturada.

Como organismos-teste, utilizaram-se *Helicoverpa zea* (lagarta-da-espiga-do-milho) e *Spodoptera eridania* (lagarta-da-soja) na fase de desenvolvimento L3–L4 (Figura 4.3), ambos adquiridos no site pragas.com.vc, juntamente com a dieta específica para criação.

Para a condução dos ensaios, empregaram-se potes de polipropileno (para alocar as lagartas e a dieta), água destilada, etanol e balões volumétricos de 100 mL. A homogeneização das soluções dos óleos foi realizada em banho de ultrassom por 1 hora, assegurando a homogeneização adequada das formulações.

4.3 Resultados e Discussão

A incorporação da nanotecnologia em formulações à base de óleos essenciais demonstra grande potencial para aprimorar o mercado de pesticidas, ao ampliar a estabilidade e a eficácia desses compostos de origem natural. No presente estudo, desenvolveu-se uma nova formulação em que os óleos essenciais foram estabilizados por nanopartículas de carbono, visando ao aumento da produtividade agrícola e à redução do impacto ambiental.

A síntese do material seguiu parâmetros técnicos específicos para assegurar segurança, biocompatibilidade e viabilidade de produção em maior escala. De maneira geral, obteve-se uma nanoemulsão aquosa contendo o óleo essencial estabilizado por nanopartículas de carbono, permitindo a liberação controlada dos compostos bioativos. Esse processo foi desenhado com ênfase na sustentabilidade, minimizando a formação de subprodutos e resíduos químicos, resultando em alto rendimento reacional e evidenciando sua viabilidade para aplicação industrial.

O emprego de nanopartículas de carbono (carbon dots) justifica-se por suas propriedades que melhoram a biodisponibilidade e a solubilidade em meio aquoso, além de apresentarem baixa citotoxicidade. No Brasil, já existem produtos comerciais à base de carbon dots voltados à agricultura, como os fertilizantes da Krilltech, reforçando a viabilidade de se transpor essa tecnologia para uma escala industrial.

Para garantir a estabilidade das nanoformulações e permitir concentrações maiores de

óleos essenciais, foram adicionados adjuvantes, incluindo tensoativos, diluentes e espessantes, que desempenham papel fundamental no desempenho e na estabilidade da formulação final.

Outro elemento-chave no desenvolvimento da nanoformulação foi a escolha criteriosa dos óleos essenciais. Além de sua composição química, também foi considerada a relação custo-benefício, de modo a tornar o processo economicamente viável — sobretudo diante da necessidade de diversas repetições experimentais. Em geral, óleos essenciais que apresentam melhor disponibilidade comercial e menor custo de aquisição tendem a ser mais atrativos para aplicações em larga escala.

Além disso, um aspecto relevante dos óleos essenciais é o fato de serem constituídos por uma mistura complexa de compostos. Dessa forma, é fundamental caracterizar o perfil químico dos óleos selecionados, a fim de compreender sua composição, propriedades e possíveis interações com os demais componentes da formulação. Essa análise é essencial para garantir a estabilidade, a eficiência e a reprodutibilidade do sistema desenvolvido. Na tabela 4.2 tem-se os óleos selecionados, seus respectivos componentes e custo por litro.

Tabela 4.2: Composição e custo dos óleos essenciais

Óleo	Composição	Custo por litro (em reais)
<i>Citrus sinensis</i> (D-limoneno de laranja)	D-limoneno (90-97%), γ -terpineno (máx. 0,21%), Terpinoleno (máx. 0,21%)	790,00
<i>Rosmarinus officinalis</i> (Alecrim)	Linalool (42,0%), Canfora (14,9%), 1,8-cineol (22,2%), Limoneno (2,8%), α -pineno (9,3%), β -pineno (7,0%), Mirceno (9,52%), Verbenona (8,6%)	730,32
<i>Eucalyptus citriodora</i> (Eucalipto-citriodora)	Linalool (42,0%), Canfora (14,9%), 1,8-cineol (22,2%), Limoneno (2,8%), α -pineno (9,3%), β -pineno (7,0%), Mirceno (9,52%), Verbenona (8,6%)	209,90
<i>Eucalyptus staigeriana</i> (Eucalipto-limão)	Teor reduzido de eucaliptol, Cerca de 40% de citral, Cerca de 20% de limoneno	325,80

A triagem de estabilidade dos óleos em conjunto com *Arbolin* na nanoemulsão baseou-se em parâmetros qualitativos, avaliando a ocorrência de separação de fases e a homogeneidade das emulsões após agitação breve. Na Figura 4.2, são mostradas formulações estável (à esquerda) e instável (à direita), evidenciando visualmente a presença ou ausência de segregação entre as fases aquosa e oleosa. Esse procedimento simples permitiu selecionar os óleos que apresentaram dispersão mais uniforme e, conseqüentemente, maior viabilidade para

uso na segunda etapa dos ensaios.

Figura 4.2: Exemplo de (esquerda) formulação estável, sem separação de fases visível, e (direita) formulação instável, onde se observa segregação da fase oleosa.

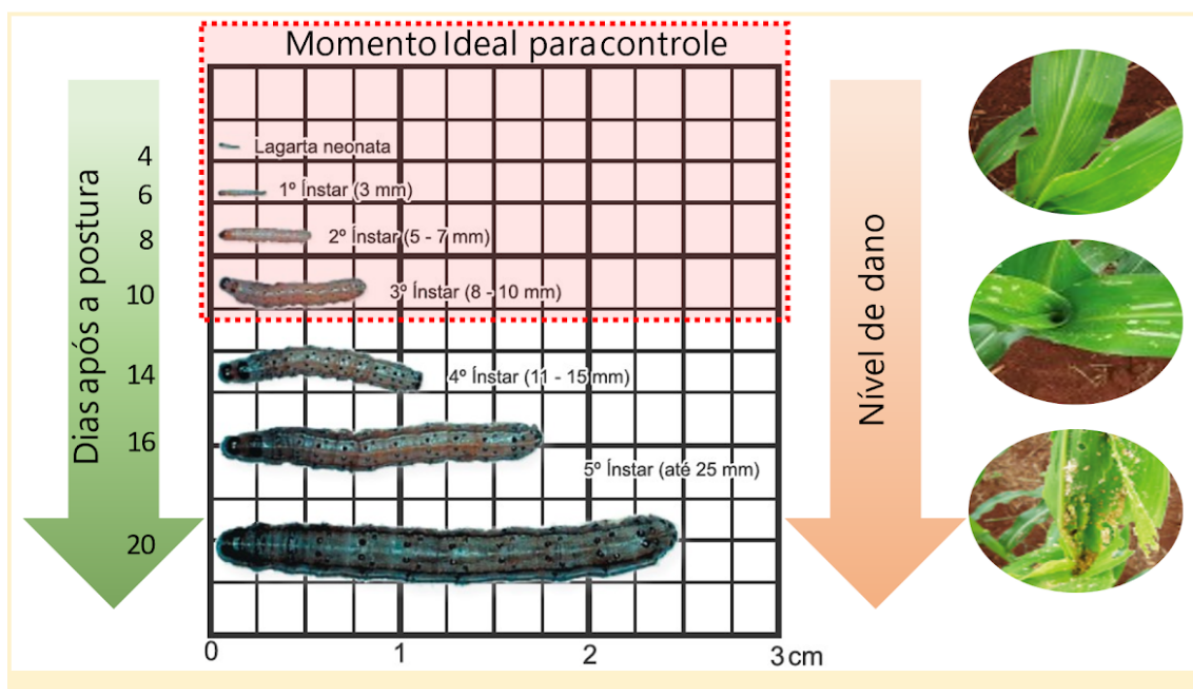


A escolha de *Helicoverpa zea* e *Spodoptera eridania* para o experimento deve-se, primordialmente, à grande relevância agrônômica dessas espécies, conhecidas por ocasionarem prejuízos em culturas de alto valor comercial (milho, soja, algodão e hortaliças). Além disso, o custo de aquisição e manutenção dessas lagartas tende a ser menor em comparação a outras pragas de impacto semelhante, viabilizando um maior número de repetições e variações nos ensaios exploratórios. Cabe destacar, entretanto, que o controle mais eficaz ocorre em ínstares iniciais (conforme ilustrado na Figura 4.3), pois a cutícula e a fisiologia das lagartas são mais suscetíveis a agentes de controle. No presente estudo, as larvas encontravam-se na transição entre L3 e L4.

As larvas foram acompanhadas em intervalos de 1 hora e 24 horas após o tratamento, sendo classificadas como mortas quando não respondiam a estímulos mecânicos. Constatou-se mortalidade zero em todos os tratamentos avaliados, tanto nos óleos puros quanto nas misturas (Figura 4.4). Dado que não houve qualquer variação no número de óbitos, não foi realizada análise estatística comparativa. Esse resultado, por si só, não permite conclusões definitivas sobre o potencial inseticida das formulações, mas sugere a necessidade de ajustes

metodológicos — como ampliar o tempo de exposição, empregar larvas em estágios mais sensíveis ou testar as formulações nanoestruturadas desenvolvidas na primeira etapa buscando observar sua capacidade de aumentar a biodisponibilidade dos compostos.

Figura 4.3: Monitoramento do nível de dano e momento ideal para controle de *Spodoptera frugiperda* na cultura do milho.



Fonte: <https://www.brevant.com.br/blog/artigos/manejo-da-spodoptera-frugiperda-na-cultura-do-milho.html>

Esse resultado pode ser interpretado à luz de algumas limitações experimentais. Primeiramente, as *Helicoverpa zea* e *Spodoptera eridania* utilizadas encontravam-se próximas da transição para o quarto ínstar (L4), o que acarreta uma cutícula mais espessa e maior teor de esclerotina, dificultando a penetração de compostos inseticidas. Além disso, o período de exposição de apenas 24 horas não possibilita avaliar efeitos de alimentação prolongada ou efeitos subletais que poderiam se manifestar após um intervalo maior de contato com os óleos. Assim, é possível que, em tempos mais extensos de observação, parte dos indivíduos viesse a óbito ou apresentasse comprometimento fisiológico progressivo.

Outro fator relevante é a variação inerente à composição dos óleos essenciais, uma vez que seus constituintes majoritários podem oscilar conforme a origem botânica, safras e métodos de extração. Conforme discutido na revisão, essa diversidade química dificulta a padronização e pode impactar de forma significativa a atividade inseticida, sobretudo quando

Figura 4.4: Pote contendo lagartas em contato com os óleos testados. Cada pote continha 3 indivíduos, submetidos à avaliação por até 24 horas.



se avaliam misturas de diferentes óleos. Embora os laudos de pureza do fabricante tenham sido considerados, não foi possível averiguar a composição exata de cada lote.

Em síntese, os resultados obtidos não indicaram mortalidade das larvas no período investigado. Contudo, a baixa sensibilidade das lagartas em fase L4, a curta duração de exposição e a provável variabilidade composicional dos óleos limitam conclusões definitivas acerca do potencial inseticida das formulações. Ensaio futuros, com larvas em ínstares iniciais e períodos de observação mais longos, bem como análises cromatográficas que atestem a composição química real de cada óleo, podem auxiliar na compreensão mais acurada dos efeitos biológicos e na otimização das formulações.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou o potencial das nanoformulações à base de nanopartículas de carbono e óleos essenciais como alternativas aos pesticidas convencionais, considerando seus benefícios, desafios e aplicações no manejo sustentável de pragas. A revisão da literatura demonstrou que, apesar da eficácia comprovada dos pesticidas sintéticos, seu uso extensivo tem gerado preocupações ambientais e sanitárias, incluindo contaminação de solos e águas, bioacumulação, efeitos adversos à biodiversidade e resistência de pragas.

O estudo apresentou resultados que, à primeira vista, não demonstram mortalidade das larvas após 24 horas de exposição aos óleos essenciais testados, mas não permitem descartar o potencial inseticida dessas substâncias. As limitações metodológicas, como a utilização de larvas já em transição para o quarto ínstar (L4) — cuja cutícula mais espessa dificulta a absorção de compostos — e o curto intervalo de avaliação (apenas 24 horas), podem ter contribuído para a ausência de efeitos visíveis. Além disso, a natural variabilidade composicional dos óleos essenciais, dependente de fatores como origem botânica e condições de extração, dificulta a padronização e pode influenciar a eficácia inseticida.

Também é relevante notar que, embora os óleos apresentem caráter biodegradável e menor toxicidade para organismos não-alvo, seu emprego em escala industrial esbarra em desafios de rendimento e custo de produção. Nesse sentido, técnicas de cultivo especializado, melhoramento genético de espécies aromáticas e processos biotecnológicos emergem como alternativas promissoras para viabilizar a obtenção de matérias-primas em maior escala. Outro ponto importante é que os testes realizados neste trabalho não incluíram formulações nanoestruturadas prontas, o que poderia intensificar a absorção e a persistência dos óleos nas larvas.

Em suma, embora os dados não tenham evidenciado mortalidade no período observado, o cenário demanda estudos complementares que contemplem formulações nanoestruturadas,

larvas em estágios mais suscetíveis e períodos de avaliação mais longos. Nessa perspectiva, a busca por padronização na composição dos óleos e o desenvolvimento de metodologias de produção mais eficientes são passos fundamentais para consolidar o uso de óleos essenciais como ferramentas sustentáveis no manejo de pragas agrícolas.

Os achados desta pesquisa possuem importantes implicações para o desenvolvimento de novas estratégias de controle fitossanitário com menor impacto ambiental. A nanotecnologia tem se consolidado como uma ferramenta essencial na modernização da agricultura, promovendo redução no uso de defensivos químicos, menor contaminação ambiental e mitigação da resistência de pragas. No entanto, desafios regulatórios, econômicos e tecnológicos ainda limitam sua implementação em larga escala.

A necessidade de regulamentação específica para nanopesticidas e nanoformulações agrícolas foi um dos principais aspectos identificados na revisão, uma vez que a falta de protocolos padronizados dificulta a análise de segurança ambiental e toxicidade para organismos não-alvo. Assim, este estudo reforça a importância de abordagens interdisciplinares e colaborações entre academia, indústria e órgãos reguladores para viabilizar a inserção dessas tecnologias no mercado de forma responsável e segura.

Além disso, os desafios tecnológicos, como custo de produção e escalonamento industrial, ainda precisam ser superados para garantir a viabilidade econômica das nanoformulações. Portanto, investimentos em pesquisa e desenvolvimento são fundamentais para otimizar processos de síntese e encapsulamento, viabilizando soluções que conciliem eficiência agrônoma e sustentabilidade econômica.

A partir dos resultados obtidos e das lacunas identificadas na revisão da literatura, algumas direções futuras para pesquisas na área de nanoformulações agrícolas podem ser propostas:

- Estudos toxicológicos e ambientais: Investigar o impacto das nanopartículas de carbono e nanoformulações de óleos essenciais no solo, na microbiota benéfica e em organismos não-alvo para garantir a segurança ecológica dessas tecnologias.
- Ensaios de campo: Avaliar a eficácia das formulações sob condições reais de cultivo, considerando fatores como fotodegradação, interação com o microclima e efeitos sobre a produtividade agrícola.

- Avaliação da resistência de pragas: Analisar o impacto do uso contínuo das nanoformulações na evolução da resistência das pragas agrícolas aos compostos ativos, comparando com pesticidas sintéticos tradicionais.
- Viabilidade econômica e aceitação do mercado: Explorar estratégias para redução de custos de produção das nanoformulações e realizar estudos de percepção dos agricultores, visando maior adesão dessas tecnologias.

Essas investigações poderão contribuir significativamente para consolidar as nanoformulações agrícolas como uma alternativa viável e sustentável no controle de pragas, promovendo maior eficiência na proteção das culturas e minimizando os impactos ambientais associados ao uso excessivo de pesticidas sintéticos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F.A.N.D.A.O.O.F.T.H.E. UNITED, Food e
Agriculture Organization of the United Nations. *World Food and Agriculture FAO - Statistical Yearbook*. FAO Statistical Yearbook - World Food and Agriculture Series. FAO, 2024. ISBN: 978-92-5-138262-2. URL: https://books.google.com.br/books?id=S_Cb0AEACAAJ.
- [2] Wei Zhou, Mengmeng Li e Varenym Achal. “A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage”. Em: *Emerging Contaminants* 11.1 (1 de jan. de 2025), p. 100410. ISSN: 2405-6650. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100410. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405665024001112> (acesso em 18/02/2025).
- [3] Mir Washim, Priya Manda e Rakesh Das. “Pesticide resistance in insects: Challenges and sustainable solutions for modern agriculture”. Em: *International Journal of Agriculture and Food Science* 6.2 (1 de jan. de 2024), pp. 121–127. ISSN: 2664844X, 26648458. DOI: 10.33545/2664844X.2024.v6.i2b.215. URL: <https://www.agriculturaljournals.com/archives/2024.v6.i2.B.215/pesticide-resistance-in-insects-challenges-and-sustainable-solutions-for-modern-agriculture> (acesso em 11/02/2025).
- [4] Pnuma Onu. “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”. Em: *AmbientalMENTEsustentable* 25.1 (1 de jan. de 2018), pp. 171–190. ISSN: 2386-4362, 1887-2417. DOI: 10.17979/ams.2018.25.1.4655. URL: <https://revistas.udc.es/index.php/RAS/article/view/ams.2018.25.1.4655> (acesso em 18/02/2025).

- [5] Roman Pavela e Giovanni Benelli. “Essential Oils as Ecofriendly Biopesticides? Challenges and Constraints”. Em: *Trends in Plant Science* 21.12 (1 de dez. de 2016), pp. 1000–1007. ISSN: 1360-1385. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.10.005. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138516301649> (acesso em 18/02/2025).
- [6] Linda Catani et al. “Essential oils and their applications in agriculture and agricultural products: A literature analysis through VOSviewer”. Em: *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 45 (1 de out. de 2022), p. 102502. ISSN: 1878-8181. DOI: 10.1016/j.bcab.2022.102502. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818122002298> (acesso em 11/02/2025).
- [7] H Wang et al. “Emerging trends to replace pesticides with nanomaterials: Recent experiences and future perspectives for ecofriendly environment”. Em: *Journal of ...* (2024). Publisher: Elsevier Section: 0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724011642>.
- [8] PRB Fonseca et al. “Inseticidas neonicotinoides no controle do bicudo-do-algodoeiro *Anthonomus grandis* (Boheman, 1843)(Coleoptera: Curculionidae) e a falha de controle do endossulfan”. Em: *Arquivos do Instituto Biológico* 78 (2020), pp. 545–551.
- [9] Elisângela Galzer e Wilson Azevedo Filho. “Utilização do *Bacillus thuringiensis* no controle biológico de pragas”. Em: *Interdisciplinary Journal of Applied Science* 1.1 (2016), pp. 13–16.
- [10] R. E. Evenson e D. Gollin. “Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000”. Em: *Science* 300.5620 (2 de mai. de 2003). Publisher: American Association for the Advancement of Science, pp. 758–762. DOI: 10.1126/science.1078710. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1078710> (acesso em 18/02/2025).
- [11] Aishwarya Garud et al. “A Scientific Review of Pesticides: Classification, Toxicity, Health Effects, Sustainability, and Environmental Impact”. Em: *Cureus* 16.8 (ago. de 2024), e67945. ISSN: 2168-8184. DOI: 10.7759/cureus.67945.
- [12] Gheorghe Coman et al. “Pesticides Mechanisms of Action in Living Organisms”. Em: *Environmental Security Assessment and Management of Obsolete Pesticides in Southeast Europe*. Ed. por Lubomir I. Simeonov, Fliur Z. Macaev e

- Biana G. Simeonova. Series Title: NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 173–184. ISBN: 978-94-007-6460-6 978-94-007-6461-3. DOI: 10 . 1007 / 978 - 94 - 007 - 6461 - 3 _ 16. URL: https://link.springer.com/10.1007/978-94-007-6461-3_16 (acesso em 19/02/2025).
- [13] Valeriya P. Kalyabina et al. “Pesticides: formulants, distribution pathways and effects on human health – a review”. Em: *Toxicology Reports* 8 (2021), pp. 1179–1192. ISSN: 22147500. DOI: 10 . 1016 / j . toxrep . 2021 . 06 . 004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214750021001104> (acesso em 19/02/2025).
- [14] Suryapratap Ray e Sanjana Thanjan Shaju. “Bioaccumulation of pesticides in fish resulting toxicities in humans through food chain and forensic aspects”. Em: *Environmental Analysis, Health and Toxicology* 38 (28 de ago. de 2023), e2023017. ISSN: 2671-9525. DOI: 10 . 5620 / eaht . 2023017. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10613562/> (acesso em 19/02/2025).
- [15] Tina Eleršek e Metka Filipič. “Organophosphorus pesticides-mechanisms of their toxicity”. Em: *Pesticides-the impacts of pesticide exposure* (2011), pp. 243–260.
- [16] Ramesh C Gupta, Jitendra K Malik e Dejan Milatovic. “Organophosphate and carbamate pesticides”. Em: *Reproductive and developmental toxicology*. Elsevier, 2011, pp. 471–486.
- [17] Poonam Kaushik e Geetanjali Kaushik. “An assessment of structure and toxicity correlation in organochlorine pesticides”. Em: *Journal of hazardous materials* 143.1-2 (2007), pp. 102–111.
- [18] MMM Abd-Elgawad. “Nanonematicides: production, mechanisms, efficacy, opportunities and challenges”. Em: *Nematology* (2024). Publisher: brill.com Section: 0. URL: https://brill.com/view/journals/nemy/26/5/article-p479_1.xml.

- [19] Md Faruque Ahmad et al. “Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures”. Em: *Heliyon* 10.7 (abr. de 2024), e29128. ISSN: 24058440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29128. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844024051594> (acesso em 19/02/2025).
- [20] Konstantinos Chatzimichael, Margarita Genius e Vangelis Tzouvelekas. “Pesticide use, health impairments and economic losses under rational farmers behavior”. Em: *American Journal of Agricultural Economics* 104.2 (mar. de 2022), pp. 765–790. ISSN: 0002-9092, 1467-8276. DOI: 10.1111/ajae.12244. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ajae.12244> (acesso em 19/02/2025).
- [21] Nichola J. Hawkins et al. “The evolutionary origins of pesticide resistance”. Em: *Biological Reviews* 94.1 (2019). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/brv.12440>, pp. 135–155. ISSN: 1469-185X. DOI: 10.1111/brv.12440. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/brv.12440> (acesso em 18/02/2025).
- [22] David Pimentel. ““Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States””. Em: *Environment, Development and Sustainability* 7.2 (1 de jun. de 2005), pp. 229–252. ISSN: 1573-2975. DOI: 10.1007/s10668-005-7314-2. URL: <https://doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2> (acesso em 19/02/2025).
- [23] Mohammad Moghaddam e Leila Mehdizadeh. “Chapter 13 - Chemistry of Essential Oils and Factors Influencing Their Constituents”. Em: *Soft Chemistry and Food Fermentation*. Ed. por Alexandru Mihai Grumezescu e Alina Maria Holban. Handbook of Food Bioengineering. Academic Press, 1 de jan. de 2017, pp. 379–419. ISBN: 978-0-12-811412-4. DOI: 10.1016/B978-0-12-811412-4.00013-8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114124000138> (acesso em 19/02/2025).
- [24] Cristina Danna et al. “Eucalyptus essential oils in pest control: a review of chemical composition and applications against insects and mites”. Em: *Crop Protection* 176

- (fev. de 2024), p. 106319. ISSN: 02612194. DOI: 10.1016/j.cropro.2023.106319. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261219423001424> (acesso em 19/02/2025).
- [25] Hosana M. Deboni Navickiene et al. "Composition and antifungal activity of essential oils from *Piper aduncum*, *Piper arboreum* and *Piper tuberculatum*". Em: *Química Nova* 29 (jun. de 2006). Publisher: Sociedade Brasileira de Química, pp. 467–470. ISSN: 0100-4042, 1678-7064. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000300012>. URL: <https://www.scielo.br/j/qn/a/ddgpk7d6P9SvxD4s4q4bkjf/> (acesso em 19/02/2025).
- [26] Opendar Koul, Suresh Walia e GS Dhaliwal. "Essential oils as green pesticides: potential and constraints". Em: *Biopestic. Int* 4.1 (2008), pp. 63–84.
- [27] Jun Tian et al. "The Mechanism of Antifungal Action of Essential Oil from Dill (*Anethum graveolens* L.) on *Aspergillus flavus*". Em: *PLoS ONE* 7.1 (17 de jan. de 2012), e30147. ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0030147. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3260232/> (acesso em 19/02/2025).
- [28] N.S. Kottearachchi et al. "Anti-fungal activity of essential oils of Ceylon Eucalyptus species for the control of *Fusarium solani* and *Sclerotium rolfsii*". Em: *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 45.17 (1 de out. de 2012). Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/03235408.2012.720469>, pp. 2026–2035. ISSN: 0323-5408. DOI: 10.1080/03235408.2012.720469. URL: <https://doi.org/10.1080/03235408.2012.720469> (acesso em 19/02/2025).
- [29] B. Jyotsna et al. "Essential oils from plant resources as potent insecticides and repellents: Current status and future perspectives". Em: *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 61 (out. de 2024), p. 103395. ISSN: 18788181. DOI: 10.1016/j.bcab.2024.103395. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878818124003797> (acesso em 19/02/2025).

- [30] *A renaissance for botanical insecticides? - Isman - 2015 - Pest Management Science - Wiley Online Library*. URL: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.4088> (acesso em 18/02/2025).
- [31] M Kah et al. “A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues”. Em: *Nature nanotechnology* (2018). Publisher: nature.com
Section: 0. URL: <https://www.nature.com/articles/s41565-018-0131-1>.
- [32] Mahendra Rai e Avinash Ingle. “Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests”. Em: *Applied Microbiology and Biotechnology* 94.2 (abr. de 2012), pp. 287–293. ISSN: 0175-7598, 1432-0614. DOI: 10.1007/s00253-012-3969-4. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00253-012-3969-4> (acesso em 18/02/2025).
- [33] Muhammad Usman et al. “Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities”. Em: *Science of the total environment* 721 (2020), p. 137778.
- [34] Hongyan Chen et al. “Development of leaf-adhesive pesticide nanocapsules with pH-responsive release to enhance retention time on crop leaves and improve utilization efficiency”. Em: *Journal of Materials Chemistry B* 9.3 (28 de jan. de 2021). Publisher: The Royal Society of Chemistry, pp. 783–792. ISSN: 2050-7518. DOI: 10.1039/D0TB02430A. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/tb/d0tb02430a> (acesso em 18/02/2025).
- [35] SB Manjunatha, DP Biradar, Yallappa R Aladakatti et al. “Nanotechnology and its applications in agriculture: A review”. Em: *J farm Sci* 29.1 (2016), pp. 1–13.
- [36] Li Hao et al. “Carboxymethyl cellulose capsulated zein as pesticide nano-delivery system for improving adhesion and anti-UV properties”. Em: *Carbohydrate Polymers* 231 (mar. de 2020), p. 115725. ISSN: 01448617. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115725. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0144861719313931> (acesso em 18/02/2025).

- [37] Nazila Kamaly et al. “Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: mechanisms of controlling drug release”. Em: *Chemical reviews* 116.4 (2016), pp. 2602–2663.
- [38] Bhupinder Singh Sekhon. “Nanotechnology in agri-food production: an overview”. Em: *Nanotechnology, science and applications* (2014), pp. 31–53.
- [39] Anastasios A Malandrakis, Nektarios Kavroulakis e Constantinos V Chrysikopoulos. “Use of copper, silver and zinc nanoparticles against foliar and soil-borne plant pathogens”. Em: *Science of the total environment* 670 (2019), pp. 292–299.
- [40] Iqra Mubeen et al. “Nanopesticides in comparison with agrochemicals: Outlook and future prospects for sustainable agriculture”. Em: *Plant Physiology and Biochemistry* 198 (mai. de 2023), p. 107670. ISSN: 09819428. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.107670. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S098194282300181X> (acesso em 18/02/2025).
- [41] Douglas A Dias et al. “Nanosensors for Detecting Volatile Compounds in Pest Management: A Focus on Agricultural Sustainability”. Em: *ACS Agricultural Science & Technology* 4.11 (2024), pp. 1250–1259.
- [42] Muhammad Zain et al. “Nanotechnology based precision agriculture for alleviating biotic and abiotic stress in plants”. Em: *Plant Stress* 10 (2023), p. 100239.
- [43] Kuber Shivashakarappa et al. “Nanotechnology for the detection of plant pathogens”. Em: *Plant Nano Biology* 2 (2022), p. 100018.
- [44] Nienke Ruijter et al. “The state of the art and challenges of in vitro methods for human hazard assessment of nanomaterials in the context of safe-by-design”. Em: *Nanomaterials* 13.3 (2023), p. 472.
- [45] Analía Ale et al. “Nanotechnology-based pesticides: Environmental fate and ecotoxicity”. Em: *Toxicology and Applied Pharmacology* 471 (2023), p. 116560.
- [46] AR Ribeiro et al. “Challenges on the toxicological predictions of engineered nanoparticles”. Em: *NanoImpact* 8 (2017), pp. 59–72.

- [47] Ritika Kumari et al. "Regulation and safety measures for nanotechnology-based agri-products". Em: *Frontiers in Genome Editing* 5 (2023), p. 1200987. DOI: 10 . 3389 / fgeed.2023.1200987.
- [48] J He et al. "Nano-based smart formulations: A potential solution to the hazardous effects of pesticide on the environment". Em: *Journal of Hazardous Materials* (2023). Publisher: Elsevier Section: 0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389423008828>.
- [49] Yifen Shang et al. "Applications of Nanotechnology in Plant Growth and Crop Protection: A Review". Em: *Molecules* 24.14 (jan. de 2019). Number: 14 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2558. ISSN: 1420-3049. DOI: 10 . 3390 / molecules24142558. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/24/14/2558> (acesso em 19/02/2025).
- [50] M Jafir et al. "The global trend of nanomaterial usage to control the important agricultural arthropod pests: A comprehensive review". Em: *Plant Stress* (2023). Publisher: Elsevier Section: 0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667064X23000751>.
- [51] Subhash Babu et al. "Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability". Em: *Chemosphere* 292 (2022), p. 133451.
- [52] Mohneesh Kalwani et al. "Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives". Em: *Chemosphere* 287 (2022), p. 132107.
- [53] Anju Maholiya et al. "An insight into the role of carbon dots in the agriculture system: a review". Em: *Environmental Science: Nano* 10.4 (2023), pp. 959–995.
- [54] Albert Guirguis et al. "Boosting plant photosynthesis with carbon dots: a critical review of performance and prospects". Em: *Small* 19.43 (2023), p. 2300671.
- [55] Linbo Li e Tao Dong. "Photoluminescence tuning in carbon dots: surface passivation or/and functionalization, heteroatom doping". Em: *Journal of Materials Chemistry C* 6.30 (2018), pp. 7944–7970.
- [56] R Sharma et al. "Applications of nanostructured materials in agriculture: A review". Em: *Materials Today ...* (2022). Publisher: Elsevier Section: 0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322061284>.

- [57] A Hazarika et al. “An overview of the role of nanoparticles in sustainable agriculture”. Em: *Biocatalysis and Agricultural ...* (2022). Publisher: Elsevier Section: 0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818122001268>.
- [58] Matías Menossi et al. “Essential oil-loaded bio-nanomaterials for sustainable agricultural applications”. Em: *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 96.8 (2021). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jctb.6705>, pp. 2109–2122. ISSN: 1097-4660. DOI: 10.1002/jctb.6705. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.6705> (acesso em 18/02/2025).
- [59] T Pirzada et al. “Recent advances in biodegradable matrices for active ingredient release in crop protection: Towards attaining sustainability in agriculture”. Em: *Current opinion in ...* (2020). Publisher: Elsevier Section: 0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359029420300479>.
- [60] Asem Elabasy et al. “Cellulose Nanocrystals Loaded with Thiamethoxam: Fabrication, Characterization, and Evaluation of Insecticidal Activity against *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae)”. Em: *Nanomaterials* 10.4 (abr. de 2020). Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 788. ISSN: 2079-4991. DOI: 10.3390/nano10040788. URL: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/4/788> (acesso em 18/02/2025).
- [61] Marcela Candido Camara et al. “Development of stimuli-responsive nano-based pesticides: emerging opportunities for agriculture”. Em: *Journal of Nanobiotechnology* 17.1 (21 de set. de 2019), p. 100. ISSN: 1477-3155. DOI: 10.1186/s12951-019-0533-8. URL: <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0533-8> (acesso em 18/02/2025).
- [62] Nurmansyah et al. “The effect of various essential oil and solvent additives on the botanical pesticide of Piper Aduncum essential oil on formulation antifungal activity”. Em: *Results in Engineering* 16 (dez. de 2022), p. 100644. ISSN: 25901230. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100644. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590123022003140> (acesso em 18/02/2025).