



Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Biologia Aplicada

Trabalho de Culminação de Estudos II (Monografia)

**Pesticidas Orgânicos como Alternativa Sustentável para o Controle de
Pragas e Preservação da Microbiota do Solo**

Autor:

Nhaca, Vânia

Maputo, Julho de 2025



Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Biologia Aplicada

Trabalho de Culminação de Estudos II (Monografia)

**Pesticidas Orgânicos como Alternativa Sustentável para o Controle de
Pragas e Preservação da Microbiota do Solo**

Autor:

Nhaca, Vânia

Supervisores:

Doutor Elías Militão

Mestre Nádia Namunaua

Maputo, Julho de 2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo Dom da vida e sabedoria.

Aos meus Pais, Sérgio David Nhaca e Laurinda Gertrudes Matuca, pelo apoio incondicional durante essa fase tão difícil da minha vida. Também, endereços os meus agradecimentos extensivos aos meus tios, especial ao tio Francisco Júnior Matuca, que de forma incansável e sem reservas de tudo fez para minha formação, aos meus irmãos e avós agradeço pelo incentivo, pela amizade e carinho.

Os meus agradecimentos também vão ao meu parceiro Manuel Marindze Júnior pelo apoio, carinho, compreensão e confiança depositada em mim.

À Universidade Eduardo Mondlane, especialmente ao Departamento de Ciências Biológicas, aos docentes do curso de licenciatura em Biologia Aplicada e técnicos que são responsáveis pela minha formação.

Os meus especiais agradecimentos vão para os meus supervisores: Doutor Elias Militão e a Mestre Nádia Namunaua pela disposição, paciência, ensinamentos e encorajamento para a realização desse trabalho.

Os meus agradecimentos estendem-se aos meus colegas Neila Mucavel, e Florinda Januário pelos momentos compartilhados acompanhados ao longo desta formação.

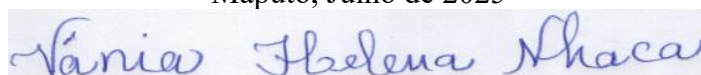
Tenho muito agradecer à muitas pessoas. Não vou citar nomes para não ser injusto com aqueles que de alguma forma me ajudaram.

DECLARAÇÃO DE HONRA

“Eu, **Vânia Helena Nhaca**, declaro por minha honra que a monografia é original e nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau ou em outro âmbito acadêmico, profissional ou científico. A pesquisa e o conteúdo aqui descritos são resultado do meu labor individual, sob orientação do meus supervisores.”

Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Biologia Aplicada na Universidade Eduardo Mondlane. Eu, assumo total responsabilidade pela autenticidade da mesma.

Maputo, Julho de 2025



(Vânia Helena Nhaca)

RESUMO

A degradação ambiental causada pelo uso indiscriminado de pesticidas inorgânicos na agricultura representa um dos maiores desafios para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres. Tais compostos, altamente tóxicos e persistentes, comprometem a biodiversidade, especialmente a microbiota do solo, afectando grupos bioindicadores como os protozoários. Nesse contexto, os pesticidas orgânicos emergem como alternativas promissoras, por apresentarem menor toxicidade, maior biodegradabilidade e menor impacto sobre organismos não-alvo. Este estudo teve como objectivo avaliar os efeitos dos pesticidas orgânicos sobre a microbiota do solo, com ênfase nos protozoários, comparando-os aos impactos dos pesticidas inorgânicos. A metodologia adotada foi uma revisão bibliográfica, estruturada a partir da busca de publicações nas bases SciELO, PubMed, ScienceDirect, Google Scholar e livros especializados, considerando o período de 2000 a 2024. Os resultados indicam que os pesticidas orgânicos, como óleos essenciais de neem, citronela, alho e cebola, além de biofertilizantes, preservam a diversidade microbiana, estimulam enzimas edáficas e mantêm os processos biogeoquímicos do solo. Em contraste, pesticidas inorgânicos, como glifosato, organofosforados e triazinas, apresentam alta persistência, reduzindo até 60% a população de protozoários e comprometendo funções essenciais do solo. Conclui-se que, embora os pesticidas orgânicos não sejam isentos de limitações, representam uma alternativa ambientalmente mais segura, capaz de promover a sustentabilidade agrícola, preservar a biodiversidade e reduzir os riscos ecotoxicológicos associados aos agroquímicos convencionais.

Palavras-chave: Pesticidas orgânicos, microbiota do solo, protozoários do solo, sustentabilidade agrícola, impacto ambiental.

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

AchE- Acetilcolinesterase

Bt- Bacillus thuringiensis

DDT- Diclorodifeniltricloroetano

DNA- Ácido desoxirribonucleico

EPSP -enolpiruvilshikimato-3-fosfato

FAO- Food and Agriculture Organization

FUNASA- Fundação Nacional de Saúde

INIA- Instituto Nacional de Investigação Agrária

LC-MS/MS- Espectrometria de Massa com Cromatografia Líquida Acoplada

POPs- Poluentes Orgânicos Persistentes

ROS- Espécies Reativas de Oxigênio (Reactive Oxygen Species)

SciELO- Scientific Electronic Library Online

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Uso de Pesticidas Orgânicos: Cenário Mundial, África e Moçambique	11
Tabela 2: Efeitos de diferentes pesticidas sobre a microbiota do solo	19
Tabela 3: Comparação entre Pesticidas Orgânicos e Inorgânicos	21

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
DECLARAÇÃO DE HONRA	iv
RESUMO	v
LISTA DE TABELAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema de Pesquisa	2
1.2. Justificativa	3
2. OBJECTIVOS	4
2.1. Objectivo Geral	4
2.2. Objectivos Específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Pesticidas: Definição, Classificação e Implicações Ambientais	5
3.1.1. Classificação dos Pesticidas	5
3.1.2. Impactos Ambientais dos Pesticidas Inorgânicos	6
3.1.3. Mecanismos de Acção dos Pesticidas Inorgânicos	7
3.1.4. Impactos Ecológicos dos Pesticidas Inorgânicos	8
3.2. Pesticidas Orgânicos	8
3.2.1. Mecanismos de Acção dos Pesticidas Orgânicos	9
3.3. Uso de Pesticidas Orgânicos: Panorama Mundial, África e Moçambique	10
3.4. Microbiota do Solo: Importância Ecológica e Sensibilidade aos Pesticidas	11
3.4.1. Protozoários como Indicadores de Qualidade do Solo	11
4. METODOLOGIA	13
4.1. Etapas da Revisão Bibliográfica	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5.1. Mecanismos de Acção dos Pesticidas	15
5.2. Efeitos na Microbiota do Solo	16

5.3.	Comparação entre Pesticidas Orgânicos e Inorgânicos	19
5.3.1.	Persistência e Degradação no Solo	20
5.3.2.	Impacto sobre a Microbiota do Solo	20
5.3.3.	Riscos Toxicológicos e Contaminação Ambiental	20
5.3.4.	Aspectos Agronômicos e Socioeconômicos	21
6.	CONCLUSÃO	21
7.	RECOMENDAÇÕES	22
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1. INTRODUÇÃO

A intensificação da agricultura nas últimas décadas resultou em um aumento significativo do uso de pesticidas inorgânicos com o objectivo de controlar pragas, doenças e ervas daninhas, garantindo assim maior produtividade e rentabilidade para os agricultores. No entanto, essa prática tem sido associada a uma série de impactos negativos, tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente. Entre esses impactos, destacam-se a contaminação de solos e recursos hídricos, a redução da biodiversidade, e a degradação da microbiota do solo, essencial para o equilíbrio ecológico e a fertilidade dos sistemas agrícolas (Ribeiro *et al.*, 2008; Moreira & Siqueira, 2006).

Os protozoários, assim como outros microrganismos do solo, exercem funções ecológicas fundamentais, como a decomposição de matéria orgânica, o controle biológico de patógenos e a disponibilização de nutrientes para as plantas e uso indiscriminado de pesticidas químicos pode comprometer a diversidade e densidade destes (Araújo & Monteiro, 2007).

Pesticidas orgânicos, também conhecidos como bioinsumos ou defensivos naturais, são substâncias extraídas de plantas, microrganismos ou minerais, utilizadas para o controle de pragas e doenças de forma menos agressiva ao ambiente. Esses compostos têm sido apontados como promissoras ferramentas na agricultura sustentável, por apresentarem menor toxicidade, menor persistência no ambiente e menores riscos à saúde humana e aos organismos não-alvo (Isman, 2006; Czarneski & Henriques, 2004). No entanto, apesar dos benefícios potenciais, ainda há lacunas no conhecimento científico sobre a eficácia desses produtos e seus reais efeitos sobre a microbiota do solo.

Considerando a importância de práticas agrícolas sustentáveis e a necessidade de preservar os serviços ecossistêmicos do solo. O presente estudo tem como objectivo analisar, por meio de uma revisão da literatura, os efeitos do uso de pesticidas orgânicos sobre a diversidade e funcionamento da microbiota do solo, especialmente os protozoários. Através dessa análise, busca-se contribuir com informações relevantes para a adoção de tecnologias agrícolas mais seguras e eficientes, que promovam a conservação ambiental e a saúde do solo.

1.1.Problema de Pesquisa

O uso extensivo e indiscriminado de pesticidas inorgânicos na agricultura tem contribuído de forma significativa para a degradação ambiental, afectando negativamente a qualidade do solo, a biodiversidade e os processos ecológicos fundamentais (Aktar, Sengupta & Chowdhury, 2009; Silva *et al.*, 2019). Devido à sua alta toxicidade, baixa selectividade e persistência no ambiente, os pesticidas inorgânicos comprometem directamente a microbiota do solo, com destaque para os protozoários, que desempenham papel crucial na regulação das populações bacterianas, na mineralização de nutrientes e na estabilidade dos ecossistemas edáficos (Geisen *et al.*, 2018; Cycoń, Mrozik & Piotrowska-Seget, 2019).

Os pesticidas orgânicos têm sido promovidos como alternativas mais sustentáveis, por apresentarem menor toxicidade, maior biodegradabilidade e menor impacto sobre organismos não-alvo (Moraes *et al.*, 2020; Roy *et al.*, 2021). No entanto, apesar da crescente adopção desses compostos em sistemas agrícolas, persistem lacunas significativas na literatura científica quanto à real eficácia dos pesticidas orgânicos, bem como aos seus efeitos sobre a biodiversidade do solo, especialmente no que diz respeito à comunidade de protozoários, que é sensível a alterações químicas e desempenha funções importantes nos processos biogeoquímicos (Geisen *et al.*, 2018).

Essa ausência de informações consolidadas limita a compreensão dos riscos ecológicos e dos benefícios potenciais associados ao uso de pesticidas orgânicos em comparação aos inorgânicos, particularmente no contexto da conservação da biodiversidade microbiana do solo e da manutenção da sua funcionalidade.

Diante dessas premissas, surge a seguinte questão de pesquisa:

Quais são os efeitos do uso de pesticidas orgânicos sobre a diversidade e funcionamento da microbiota do solo em comparação com os pesticidas inorgânicos?

1.2. Justificativa

A degradação ambiental resultante das práticas agrícolas convencionais, especialmente pelo uso intensivo e indiscriminado de pesticidas inorgânicos, tem gerado impactos significativos sobre a saúde humana, a biodiversidade e a qualidade dos ecossistemas terrestres, particularmente na fertilidade dos solos (Aktar, Sengupta & Chowdhury, 2009; Silva *et al.*, 2019). A microbiota do solo, essencial para processos ecológicos fundamentais como a mineralização de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica, a reciclagem biogeoquímica e o controle biológico de patógenos, tem sido gravemente afectada pela persistência e toxicidade desses compostos (Cycoń, Mrozik & Piotrowska-Seget, 2019).

Nesse cenário, os pesticidas orgânicos têm emergido como alternativas sustentáveis e reduzido impacto sobre organismos não-alvo (Moraes *et al.*, 2020; Roy *et al.*, 2021). Apesar dos avanços na utilização desses compostos, ainda persiste uma lacuna científica no que diz respeito à sua eficácia ecológica e aos possíveis efeitos colaterais sobre a comunidade microbiana do solo, especialmente os protozoários, que desempenham papel crucial na regulação das populações bacterianas e na dinâmica da matéria orgânica (Geisen *et al.*, 2018). Desta forma, o presente estudo responde a necessidade de consolidar o conhecimento existente sobre pesticidas orgânicos e seus impactos no solo, de modo a contribuir para a construção de práticas agrícolas mais sustentáveis, seguras e ambientalmente responsáveis em especial para países em desenvolvimento, como Moçambique, onde o uso de pesticidas químicos ainda predomina.

2. OBJECTIVOS

2.1.Objectivo Geral

- ✓ Avaliar o uso de pesticidas orgânicos como alternativa sustentável para o controle de pragas e preservação da microbiota do solo.

2.2.Objectivos Específicos

- ✓ Descrever os mecanismos de acção dos pesticidas orgânicos;
- ✓ Identificar os efeitos de pesticidas orgânicos na diversidade da microbiota do solo;
- ✓ Comparar os impactos ambientais dos pesticidas orgânicos com os inorgânicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Pesticidas: Definição, Classificação e Implicações Ambientais

Os pesticidas são definidos como substâncias ou misturas de substâncias desenvolvidas para prevenir, repelir, destruir ou mitigar a ação de organismos considerados pragas nas culturas agrícolas, como insectos, fungos, plantas daninhas, ácaros e outros agentes nocivos (Ribeiro *et al.*, 2008). Desde sua introdução em larga escala, especialmente após a Revolução Verde, os pesticidas desempenharam um papel crucial no aumento da produtividade agrícola, contribuindo para o controle efetivo de pragas e doenças que comprometem a produção de alimentos (Ribeiro *et al.*, 2008; Moreira & Siqueira, 2006). Estudos evidenciam que resíduos de pesticidas são frequentemente detectados no solo, na água, nos alimentos e até no ar, apresentando risco potencial para a biodiversidade e para os processos ecológicos fundamentais (Sanches *et al.*, 2003).

3.1.1. Classificação dos Pesticidas

Os pesticidas podem ser classificados com base em dois critérios principais: o organismo-alvo e a composição química.

a) Classificação segundo o organismo-alvo

Inseticidas: destinados ao controle de insectos; **Fungicidas:** atuam no controle de fungos patogênicos; **Herbicidas:** controlam ou eliminam plantas daninhas; **Acaricidas:** específicos para ácaros; **Nematicidas:** combatem nematoides; **Bactericidas:** atuam contra bactérias fitopatogênicas; **Rodenticidas:** usados no controle de roedores. Essa classificação facilita o direcionamento do uso dos pesticidas de acordo com a praga ou organismo indesejado, porém não impede os efeitos colaterais sobre organismos não-alvo (Ribeiro *et al.*, 2008)

b) Classificação segundo a composição química:

Organoclorados: compostos altamente persistentes, lipofílicos e bioacumulativos, como DDT, aldrin, dieldrin e heptacloro. Esses pesticidas são reconhecidos como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) devido à sua longa permanência no ambiente e capacidade de se acumular na cadeia alimentar (Moreira & Siqueira, 2006).

Organofosforados: caracterizados pela presença de fósforo na estrutura, como malationa, parationa e clorpirifós. Apresentam menor persistência que os organoclorados, porém elevada toxicidade aguda, principalmente por inibição da enzima acetilcolinesterase (Ribeiro *et al.*, 2008).

Carbamatos: derivados do ácido carbâmico, como carbofurano e metomil, também atuam na inibição da acetilcolinesterase, sendo tóxicos para insectos e outros animais, incluindo humanos (Ribeiro *et al.*, 2008; Moreira & Siqueira, 2006).

Piretroides: inspirados nos piretros naturais, são inorgânicos, como cipermetrina e deltametrina. Apresentam menor persistência ambiental, porém elevada toxicidade para organismos aquáticos e insectos benéficos (Ribeiro *et al.*, 2008; Moreira & Siqueira, 2006).

Triazinas: herbicidas como a atrazina, largamente utilizada e frequentemente detectada na água, com potenciais efeitos desreguladores endócrinos. Outros grupos incluem ditiocarbamatos, sulfonilureias, feniluréias e neonicotinóides (Ribeiro *et al.*, 2008; Moreira & Siqueira, 2006).

c) **Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs)**

Dentre os pesticidas, os POPs são particularmente preocupantes do ponto de vista ambiental e toxicológico. Estes compostos são caracterizados por: alta persistência no ambiente, permanecendo por décadas no solo, na água e nos sedimentos; elevada capacidade de bioacumulação, acumulando-se nos tecidos adiposos de organismos; biomagnificação na cadeia alimentar, aumentando sua concentração em níveis tróficos superiores; toxicidade crônica, mesmo em baixíssimas concentrações, afectando sistemas endócrino, nervoso, imunológico e reprodutivo. Compostos como DDT, aldrin, heptacloro, dieldrin, endrina e mirex foram amplamente utilizados no século passado e, embora banidos ou restritos em muitos países, ainda são detectados em diversos compartimentos ambientais, evidenciando sua resistência à degradação (Ribeiro *et al.*, 2008; Moreira & Siqueira, 2006).

3.1.2. Impactos Ambientais dos Pesticidas Inorgânicos

Segundo Aktar *et al.* (2009); Silva *et al.* (2019), o uso excessivo de pesticidas inorgânicos impacta directamente os componentes bióticos e abióticos dos ecossistemas, especialmente: degradação da qualidade do solo: alteração na composição e na abundância da microbiota, redução da atividade enzimática e prejuízos à ciclagem de nutrientes; contaminação das águas superficiais e subterrâneas: transporte por lixiviação e escoamento superficial; perda da biodiversidade: mortalidade de organismos não-alvo, incluindo insectos polinizadores, predadores naturais, microrganismos benéficos e fauna aquática; riscos à saúde humana: exposição ocupacional, resíduos nos alimentos e contaminação da água, associados a câncer, desregulação hormonal, neurotoxicidade e efeitos genotóxicos

3.1.3. Mecanismos de Acção dos Pesticidas Inorgânicos

Os pesticidas inorgânicos actuam interferindo em processos bioquímicos e fisiológicos fundamentais dos organismos-alvo, levando-os à morte ou à inibição do seu desenvolvimento. Seus mecanismos de acção são diversos, abrangendo desde a inibição de enzimas essenciais até o bloqueio de vias metabólicas críticas (Duke & Powles, 2008; Costa, 2006; Arora & Sahni, 2016).

No caso dos herbicidas, como o glifosato, o mecanismo de acção envolve a inibição da enzima EPSP sintase (5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintase), que é fundamental na via do shikimato, responsável pela biossíntese de aminoácidos aromáticos, essenciais para o crescimento das plantas (Duke & Powles, 2008; Júnior *et al.*, 2006). Isso leva à interrupção da síntese proteica e à morte da planta.

Os paraquats e diquats, herbicidas bipyridílicos, atuam induzindo a formação de espécies reactivas de oxigênio (ROS) nas células vegetais. Isso resulta em estresse oxidativo severo, destruição das membranas celulares e rápida necrose dos tecidos foliares (Santos *et al.*, 2021; Jacobsén & Hjelmsø, 2014).

No grupo dos insecticidas, os organofosforados e carbamatos compartilham um mecanismo principal: a inibição da enzima acetilcolinesterase (AChE) no sistema nervoso dos insectos e, muitas vezes, também em vertebrados, incluindo humanos, o que leva ao acúmulo de acetilcolina nas sinapses, resultando em hiperestimulação nervosa, paralisia e morte (Costa, 2006; Hernández *et al.*, 2013).

Os piretroides, outro grupo de insecticidas, agem alterando a dinâmica dos canais de sódio nas membranas neuronais, prolongando seu estado aberto. Isso gera descargas nervosas contínuas, espasmos, paralisia e morte (Soderlund, 2012).

No caso dos fungicidas inorgânicos, como os triazóis, a acção se dá pela inibição da enzima lanosterol 14 α -desmetilase, envolvida na biossíntese de ergosterol, um componente essencial da membrana plasmática dos fungos (De Souza *et al.*, 2015).

Embora eficazes contra os organismos-alvo, esses mecanismos geralmente apresentam baixa selectividade, afectando também organismos não-alvo, incluindo insectos benéficos, microrganismos do solo e fauna aquática (Arora & Sahni, 2016; Silva *et al.*, 2019).

3.1.4. Impactos Ecológicos dos Pesticidas Inorgânicos

O uso continuado e intensivo de pesticidas inorgânicos tem sido associado a uma série de efeitos negativos sobre os ecossistemas terrestres e aquáticos. Esses compostos afectam profundamente a biodiversidade, as funções ecológicas do solo e os ciclos biogeoquímicos (Ribeiro *et al.*, 2008; Silva, 2015).

No solo, os impactos mais evidentes incluem: redução da diversidade microbiana, afectando principalmente fungos micorrízicos, bactérias fixadoras de nitrogénio e protozoários (Arora & Sahni, 2016; Foissner, 1999); inibição de processos microbiológicos essenciais, como a nitrificação, fixação biológica de nitrogénio e decomposição da matéria orgânica (Jacobsén & Hjelmsø, 2014; Sun *et al.*, 2020); acúmulo de resíduos tóxicos, que podem persistir por décadas, especialmente em solos pobres em matéria orgânica e com baixa atividade biológica (Ribeiro *et al.*, 2008).

Além dos impactos directos no solo, estudos demonstram que pesticidas inorgânicos atingem sistemas aquáticos por meio do escoamento superficial e lixiviação. Andrea (1998) e Carvalho (2017) relatam que esses compostos bioacumulam na biota aquática, afectando macroinvertebrados, peixes e anfíbios, comprometendo o desenvolvimento, a reprodução e os comportamentos essenciais dessas espécies.

Os processos de bioacumulação e biomagnificação são bem documentados, especialmente para pesticidas persistentes como os organoclorados (DDT, aldrin, heptacloro), que, apesar de banidos em muitos países, ainda são detectados em solos e corpos de água, impactando cadeias tróficas inteiras (Moreira & Siqueira, 2006; Silva, 2015).

Estudos de Sun *et al.* (2020) utilizando sequenciamento de DNA ambiental demonstraram que em solos tratados com herbicidas como glifosato e paraquat por mais de cinco anos, houve uma redução significativa na abundância de genes associados à nitrificação, fosforilação e degradação da matéria orgânica.

Fungos micorrízicos, essenciais para a simbiose com plantas e a absorção de fósforo e outros nutrientes, também são extremamente sensíveis à exposição a pesticidas, levando à redução da produtividade agrícola a médio e longo prazo (Arora & Sahni, 2016; Hernández *et al.*, 2013).

3.2. Pesticidas Orgânicos

Os pesticidas orgânicos, também chamados de biopesticidas ou bioinsumos, são substâncias derivadas de fontes naturais, como extratos de plantas, microrganismos (bactérias, fungos,

vírus) e minerais naturais, empregados no controle de pragas, doenças e plantas daninhas (Isman, 2006; Dionísio *et al.*, 2016).

Diferentemente dos pesticidas inorgânicos, os biopesticidas apresentam características ecologicamente favoráveis como: alta biodegradabilidade, com rápida decomposição no ambiente; baixa toxicidade para organismos não-alvo, incluindo polinizadores, fauna edáfica e seres humanos; alta selectividade, atuando especificamente sobre o organismo-praga; menor probabilidade de bioacumulação e biomagnificação (Fernandes *et al.*, 2017).

Esses compostos possuem modos de acção que interferem no desenvolvimento, comportamento ou reprodução das pragas, reduzindo os riscos de resistência e os impactos ambientais negativos. Entre os biopesticidas mais estudados estão: Óleo de neem (*Azadirachta indica*), com acção inseticida, fungicida e repelente; Óleos essenciais (citronela, eucalipto, cravo, alecrim), que atuam como repelentes e larvicidas; Extratos vegetais de alho, pimenta e cebola; *Bacillus thuringiensis* (Bt), bactéria entomopatogênica que produz toxinas específicas para larvas de insectos; Vírus entomopatogênicos, como os baculovírus (Isman, 2006; Ghannem *et al.*, 2024).

3.2.1. Mecanismos de Acção dos Pesticidas Orgânicos

Os pesticidas orgânicos apresentam mecanismos de acção geralmente mais específicos, físicos e bioquímicos, que diferem significativamente dos pesticidas inorgânicos (Isman, 2006; Fernandes *et al.*, 2017). Entre os principais mecanismos, destacam-se: ruptura da cutícula dos insectos, levando à desidratação e morte (Isman, 2006); interferência hormonal, afectando os processos de desenvolvimento, muda, oviposição e reprodução dos insectos (Czarneski & Henriques, 2004); acção antibacteriana e antifúngica, que impede o crescimento de patógenos de plantas, sem afectar organismos benéficos do solo (Dionísio *et al.*, 2016); efeito repelente e deterrente, alterando o comportamento de alimentação, pouso e oviposição das pragas (Devi *et al.*, 2018); indução de resistência nas plantas, estimulando a produção de compostos secundários naturais que aumentam a defesa contra patógenos e pragas (Ghannem *et al.*, 2024).

Ghannem *et al.* (2024) também reforçam que os pesticidas orgânicos, devido à sua menor toxicidade, possuem impacto reduzido sobre a microbiota do solo, promovendo a manutenção da biodiversidade microbiana e dos processos ecológicos do solo. Além disso, Devi *et al.* (2018) ressaltam que a combinação de pesticidas orgânicos com aditivos naturais, como biofertilizantes, potencializa seu efeito e reduz riscos ecológicos.

3.3. Uso de Pesticidas Orgânicos: Panorama Mundial, África e Moçambique

No contexto mundial, os pesticidas orgânicos estão em uma fase de uso consolidado e com crescimento constante. Este crescimento se deve, em grande parte, à crescente demanda por alimentos mais saudáveis e livres de resíduos tóxicos, além das políticas rigorosas de muitos países, sobretudo da União Europeia, Estados Unidos e Canadá, que restringem cada vez mais o uso de pesticidas inorgânicos (Isman, 2006; Arora & Sahni, 2016). A eficácia de compostos como o *Bacillus thuringiensis*, piretrinas e extratos de neem tem sido comprovada tanto no controle de pragas quanto na preservação da microbiota do solo (Ghannem *et al.*, 2024). Contudo, os principais desafios enfrentados estão relacionados ao custo relativamente mais elevado dos biopesticidas e à necessidade de desenvolver formulações mais estáveis e de fácil aplicação. As informações sistematizadas na tabela 1 oferecem uma síntese comparativa dos principais aspectos relacionados ao uso de pesticidas orgânicos no cenário mundial, africano e moçambicano.

Na África, o uso de pesticidas orgânicos cresce em ritmo considerável, porém enfrenta barreiras estruturais significativas. A falta de investimentos em pesquisa, ausência de regulamentações específicas e dificuldades logísticas impedem que esses insumos sejam amplamente adotados (Devi *et al.*, 2018; Carvalho, 2017). Além disso, muitos agricultores africanos ainda dependem de práticas tradicionais ou do uso de pesticidas inorgânicos devido ao baixo custo e à disponibilidade no mercado informal. Entretanto, iniciativas em países como Quênia, África do Sul e Uganda têm mostrado avanços, com utilização de biofungicidas, extratos vegetais e práticas agroecológicas que começam a ganhar espaço, especialmente em pequenas propriedades e na agricultura familiar (FAO, 2022).

No cenário específico de Moçambique, o uso de pesticidas orgânicos é emergente, refletindo tanto as oportunidades quanto os desafios que o país enfrenta. Dados do Instituto Nacional de Investigação Agrária (INIA) e da FAO (2022) indicam que, embora existam projectos piloto e esforços de organizações não-governamentais para promover a agricultura sustentável, o país carece de uma política robusta que incentive o desenvolvimento e a utilização dos biopesticidas. Conforme ilustrado na Tabela 1, o caso moçambicano destaca-se por esforços pontuais e emergentes que carecem de institucionalização e apoio sistemático.

Tabela 1: Uso de Pesticidas Orgânicos: Cenário Mundial, África e Moçambique

Região	Situação Atual	Desafios Principais	Exemplos de Uso	Referências
Mundial	Uso consolidado e crescente	Custo, desenvolvimento de formulações eficientes	Neem, <i>Bacillus thuringiensis</i> , piretrinas, vírus	Isman (2006); Arora & Sahni (2016); Ghannem <i>et al.</i> (2024)
África	Uso crescente, mas ainda limitado	Falta de padronização, pouca pesquisa, capacitação	Neem, biofungicidas, extratos de plantas locais	Devi <i>et al.</i> (2018); Carvalho (2017); FAO (2022)
Moçambique	Uso emergente em projectos de agricultura sustentável	Falta de dados, pesquisa incipiente, políticas frágeis	Neem, piretrinas, práticas agroecológicas pontuais	Instituto Nacional de Investigação Agrária (INIA); FAO (2022); Dados de campo e ONGs locais

3.4. Microbiota do Solo: Importância Ecológica e Sensibilidade aos Pesticidas

A microbiota do solo compreende uma vasta gama de organismos vivos, incluindo bactérias, fungos, actinomicetos, algas e protozoários. Esses organismos são responsáveis por processos ecológicos fundamentais, como a reciclagem de nutrientes, decomposição de matéria orgânica, formação da estrutura do solo e proteção das plantas contra patógenos (Moreira & Siqueira, 2006).

Os protozoários, em particular, exercem importante papel na regulação das populações bacterianas, contribuindo para a mineralização de nutrientes e a estabilidade da rede trófica edáfica (Araújo & Monteiro, 2007). No entanto, devido à sua sensibilidade, são considerados bioindicadores da qualidade do solo, sendo fortemente afectados por contaminantes químicos, incluindo pesticidas (Childs, 2007).

Diversos estudos demonstram que os pesticidas inorgânicos, especialmente herbicidas e inseticidas de longa persistência, reduzem significativamente a diversidade e a densidade da microbiota do solo, comprometendo sua funcionalidade (Júnior *et al.*, 2006; Martins, 2010). Por outro lado, os pesticidas orgânicos tendem a preservar a composição e a atividade microbiana, desde que utilizados com critérios técnicos adequados (Fernandes *et al.*, 2017; Dionísio *et al.*, 2016).

3.4.1. Protozoários como Indicadores de Qualidade do Solo

Os protozoários representam um grupo ecológico fundamental nos ecossistemas edáficos, desempenhando papéis cruciais na regulação das populações bacterianas e na reciclagem de nutrientes. Sua alta sensibilidade a alterações físico-químicas no solo os torna excelentes

bioindicadores da qualidade ambiental. Araújo e Monteiro (2007) destacam que a presença e diversidade de protozoários em solos agrícolas refletem directamente o grau de perturbação ecológica e a sustentabilidade do manejo adoptado.

Esses microrganismos atuam como predadores selectivos de bactérias, promovendo o equilíbrio da comunidade microbiana e acelerando os processos de mineralização do nitrogénio e fósforo. Reduções em sua densidade populacional têm sido frequentemente atribuídas ao uso intensivo de pesticidas inorgânicos, que afectam directa ou indirectamente seu habitat, tornando o ambiente menos propício à sua sobrevivência (Childs, 2007; Moreira & Siqueira, 2006).

Foissner (1999) defende o uso sistemático de protozoários ciliados e testáceos como bioindicadores padronizados em estudos de impacto ambiental, dada a sua ampla distribuição, fácil cultivo e resposta rápida às alterações químicas no ambiente. Em estudo conduzido por Rao *et al.* (2020), observou-se uma correlação negativa entre a densidade de protozoários e a concentração de pesticidas organofosforados, indicando sua aplicabilidade como ferramenta de monitoramento ambiental.

4. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica, que consiste em uma pesquisa teórica, sistemática e rigorosa, que visa o levantamento, análise, interpretação e integração de conhecimentos já produzidos sobre determinado tema, com o objectivo de construir uma síntese crítica, actualizar informações, identificar lacunas e orientar práticas e futuras investigações (Gil, 2008; Lakatos & Marconi, 2010).

Segundo Gil (2008), uma revisão bibliográfica é uma técnica metodológica amplamente utilizada em pesquisas acadêmicas, especialmente em monografias, dissertações e teses, por permitir a construção de conhecimento a partir de material já publicado.

A metodologia permitiu reunir, analisar e comparar informações dispersas na literatura sobre os efeitos dos pesticidas orgânicos na microbiota do solo, com ênfase nos protozoários como bioindicadores da qualidade edáfica.

4.1. Etapas da Revisão Bibliográfica

A elaboração da revisão seguiu as seguintes etapas metodológicas, descritas a seguir:

a) Definição do Tema e dos Descritores (Palavras-chave)

Inicialmente, delimitou-se claramente o tema central da pesquisa: os impactos dos pesticidas orgânicos na microbiota do solo, com foco nos protozoários. Para orientar as buscas, foram selecionados os seguintes descritores: *Pesticidas orgânicos*; *Pesticidas inorgânicos*; *Microbiota do solo*; *Protozoários do solo*; *Sustentabilidade agrícola*; *Bioinsumos*; *Impacto ambiental de pesticidas*

Os termos foram utilizados isoladamente e em combinação usando operadores booleanos, tanto em português quanto em inglês (*organic pesticides*, *soil microbiota*, *soil protozoa*, *agricultural sustainability*, *bio-inputs*, *environmental impact*).

b) Seleção das Fontes e Bases de Dados

As buscas foram realizadas nas principais bases de dados científicas reconhecidas pela comunidade acadêmica, incluindo: *SciELO (Scientific Electronic Library Online)*, *Google Scholar*, *PubMed*, *ScienceDirect*.

Foram também consultados livros especializados nas áreas de microbiologia do solo, ecotoxicologia, agroecologia e sustentabilidade ambiental, bem como documentos institucionais. A seleção foi realizada em duas etapas, onde primeiro, os títulos e resumos

dos artigos foram usados para determinar a relevância inicial dos estudos tendo em consideração os critérios de inclusão. Em seguida, os estudos seleccionados foram avaliados em sua plenitude para verificar se atendiam aos critérios de inclusão pré-estabelecidos.

c) Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram adotados os seguintes critérios de seleção dos materiais:

Período: publicações entre os anos de **2000 e 2024**, priorizando os estudos mais recentes e relevantes.

Tipo de documento: artigos científicos, revisões sistemáticas, livros acadêmicos, dissertações, teses, relatórios técnicos e documentos oficiais.

Abrangência temática: materiais que abordem directamente os efeitos de pesticidas orgânicos e/ou inorgânicos sobre a microbiota do solo, com especial ênfase em protozoários, bem como estudos sobre sustentabilidade agrícola e bioinsumos.

Idioma: trabalhos publicados em português, inglês e espanhol.

Foram excluídos materiais de divulgação não científica, artigos de opinião, notícias e publicações sem revisão por pares.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após uma análise exaustiva da literatura científica, foi possível reunir e sistematizar informações robustas sobre os efeitos dos pesticidas orgânicos e inorgânicos na microbiota do solo, com ênfase nos protozoários como indicadores da saúde edáfica. Estes organismos desempenham funções ecológicas essenciais, como a mineralização de nutrientes, o controle biológico de patógenos e a promoção da fertilidade do solo. A seguir, apresenta-se uma discussão detalhada sobre os mecanismos de acção, os impactos ecológicos e as implicações agronômicas dos pesticidas.

5.1. Mecanismos de Acção dos Pesticidas

A. Pesticidas inorgânicos

Os pesticidas inorgânicos são compostos de origem sintética, desenvolvidos para atuar de maneira agressiva sobre organismos-alvo. No entanto, seu baixo grau de seletividade frequentemente compromete organismos não-alvo, incluindo microrganismos essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos do solo.

Segundo Duke & Powles (2008), Costa (2006) e Júnior *et al.* (2006), os mecanismos de acção dos pesticidas inorgânicos incluem:

- ✓ **Herbicidas** (ex.: Glifosato): Inibição da enzima EPSP sintase, essencial na via do shikimato, bloqueando a síntese de aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano), afectando plantas e diversos microrganismos.
- ✓ **Inseticidas Organofosforados e Carbamatos**: Inibição da acetilcolinesterase, resultando na acumulação de acetilcolina nas sinapses, levando à hiperestimulação, paralisia e morte dos insectos. Contudo, esses compostos também impactam vertebrados e microrganismos sensíveis.
- ✓ **Herbicidas Triazínicos** (ex.: Atrazina): Bloqueiam o transporte de elétrons no **fotossistema II**, interrompendo a fotossíntese.
- ✓ **Piretroides e Clorados**: Atuam sobre os canais de sódio nas membranas neuronais, levando à despolarização contínua e morte do organismo.

B. Pesticidas Orgânicos

Os pesticidas orgânicos, também conhecidos como biopesticidas ou bioinsumos, apresentam mecanismos de ação predominantemente físicos, bioquímicos e comportamentais, que os tornam seletivos e menos agressivos ao ambiente. Segundo Isman (2006), seus modos de acção incluem:

- ✓ **Destruição da integridade da cutícula dos insectos**, levando à desidratação;
- ✓ **Interferência nos sistemas hormonais**, afectando crescimento, desenvolvimento e reprodução das pragas;
- ✓ **Bloqueio do comportamento alimentar**, reduzindo danos culturais;
- ✓ **Acção antifúngica e antibacteriana**, seletiva contra patógenos de plantas, sem afectar organismos benéficos.

Fernandes *et al.* (2017) demonstraram que o uso de extrato de *Aloe vera* contribui para a preservação da diversidade de protozoários no solo, enquanto Czarneski & Henriques (2004) destacam que óleos essenciais de alho, cebola e pimenta controlam pragas sem impactos deletérios sobre a biomassa microbiana.

Dionísio *et al.* (2016) reforçam que biofertilizantes e defensivos naturais não apenas controlam pragas, mas também aumentam a atividade de enzimas edáficas, como desidrogenase, fosfatase e urease, fundamentais para os ciclos do nitrogênio e do fósforo.

Além disso, Ghannem *et al.* (2024) apontam que biopesticidas promovem estabilidade estrutural da microbiota do solo, favorecendo a manutenção dos ciclos biogeoquímicos e da saúde edáfica. Essa atuação seletiva e a alta biodegradabilidade dos compostos naturais reduzem significativamente os riscos de bioacumulação e contaminação de recursos hídricos (Moreira & Siqueira, 2006; Ribeiro *et al.*, 2008; Andrea, 1998).

5.2. Efeitos na Microbiota do Solo

A microbiota do solo representa um componente essencial dos ecossistemas terrestres, desempenhando funções vitais como a mineralização de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, regulação de patógenos e manutenção da estrutura física do solo (Moreira & Siqueira, 2006; Arora & Sahni, 2016). O uso indiscriminado de pesticidas inorgânicos têm causado sérios impactos sobre a comunidade microbiana, com destaque para a redução da diversidade de protozoários e a inibição de actividades enzimáticas (Childs, 2007; Sun *et al.*, 2020). Em contraste, os pesticidas orgânicos ou biopesticidas vêm sendo promovidos como alternativas mais sustentáveis, uma vez que tendem a apresentar menor toxicidade para os

microrganismos do solo e menor risco de bioacumulação (Isman, 2006; Ghannem *et al.*, 2024). A Tabela 2, apresentada ao final desta secção, resultados apresenta a síntese das evidências científicas disponíveis sobre os efeitos comparativos de pesticidas orgânicos e inorgânicos na microbiota do solo.

A. Pesticidas Inorgânicos

A análise da literatura demonstra de forma consistente que o uso contínuo de pesticidas inorgânicos está fortemente associado a uma série de impactos negativos sobre a microbiota e a saúde do solo. Estes compostos, amplamente utilizados na agricultura convencional, apresentam baixa seletividade e elevada persistência ambiental, o que resulta em múltiplos efeitos ecológicos adversos.

Childs (2007) e Martins (2010) evidenciaram que a aplicação prolongada de herbicidas e inseticidas inorgânicos pode provocar uma redução de até 60% na população de protozoários do solo, organismos-chave na mineralização da matéria orgânica e na supressão de patógenos. Essa perda de biodiversidade compromete directamente os ciclos biogeoquímicos essenciais, como os do nitrogénio e do carbono, uma vez que enzimas vitais como urease, desidrogenase e nitrato redutase apresentam redução significativa de atividade em solos contaminados por pesticidas inorgânicos (Sun *et al.*, 2020).

Além disso, a literatura aponta que os pesticidas inorgânicos favorecem a bioacumulação e biomagnificação de substâncias tóxicas ao longo das cadeias tróficas, afectando não apenas organismos terrestres, mas também a fauna aquática e, indirectamente, a saúde humana (Carvalho, 2017; Ribeiro *et al.*, 2008). Compostos amplamente utilizados, como glifosato, atrazina e DDT, destacam-se por sua elevada solubilidade e persistência, aumentando o risco de contaminação de lençóis freáticos e corpos de água (Silva, 2015).

Outro impacto significativo do uso indiscriminado desses pesticidas está relacionado aos desequilíbrios ecológicos que promovem o surgimento de pragas secundárias e o desenvolvimento de resistência em espécies alvo, o que acaba demandando doses cada vez maiores ou misturas de diferentes compostos, exacerbando os danos ambientais (Arora & Sahni, 2016).

B. Pesticidas Orgânicos

Em contraste com os pesticidas inorgânicos, os pesticidas orgânicos, também denominados biopesticidas ou bioinsumos, vêm ganhando destaque como alternativas sustentáveis e ecologicamente compatíveis no manejo de pragas e doenças agrícolas. Derivados de extratos

vegetais, microrganismos ou minerais naturais, esses compostos têm sido amplamente reconhecidos por sua seletividade e biodegradabilidade, características que minimizam os impactos adversos sobre a microbiota do solo e os ecossistemas (Isman, 2006; Fernandes *et al.*, 2017).

Múltiplos estudos confirmam que os pesticidas orgânicos preservam ou até estimulam a biodiversidade edáfica. Ghannem *et al.* (2024) demonstraram que a aplicação de biopesticidas não altera significativamente a estrutura bacteriana nem afecta negativamente protozoários, organismos fundamentais na ciclagem de nutrientes e na supressão natural de patógenos. Devi *et al.* (2018) relataram que o uso desses produtos pode aumentar a atividade de enzimas-chave, como desidrogenase, urease e fosfatase, contribuindo para a melhoria da saúde do solo e da produtividade agrícola de forma sustentável.

Além dos benefícios ecológicos, os pesticidas orgânicos apresentam riscos toxicológicos substancialmente reduzidos quando comparados aos inorgânicos. Por apresentarem rápida degradação e menor persistência ambiental, esses compostos minimizam o risco de bioacumulação e contaminação de corpos hídricos, protegendo, assim, tanto a saúde humana quanto a fauna aquática (Dionísio *et al.*, 2016; Moreira & Siqueira, 2006).

Arora & Sahni (2016) ressaltam ainda que os pesticidas orgânicos são compatíveis com os ciclos biogeoquímicos naturais, favorecendo o equilíbrio ecológico e a resiliência dos agroecossistemas. Plantas tratadas com extratos de neem, citronela, alho ou cebola não apenas apresentam controle efetivo de pragas, como também preservam a microbiota benéfica, especialmente fungos micorrízicos e rizóbios essenciais para a fixação de nitrogênio e absorção de nutrientes (Czarneski & Henriques, 2004; Fernandes *et al.*, 2017).

Entretanto, apesar dessas vantagens, a adoção em larga escala de pesticidas orgânicos ainda enfrenta desafios socioeconômicos importantes. O custo de produção e aquisição desses insumos, a menor disponibilidade comercial e o conhecimento limitado dos agricultores sobre sua aplicação adequada podem limitar sua utilização, especialmente em países em desenvolvimento (Dionísio *et al.*, 2016; FAO, 2022). A eficácia variável, influenciada por fatores climáticos e ambientais, também exige maior investimento em capacitação técnica e pesquisas para garantir resultados consistentes.

Tabela 2: Efeitos de diferentes pesticidas sobre a microbiota do solo

Composto/Pesticida Avaliado	Resultado Principal	Referência
Extratos botânicos (neem, citronela)	Baixa toxicidade ambiental; efeitos mínimos sobre microfauna do solo.	Isman (2006)
Extrato de <i>Aloe vera</i>	Manutenção da diversidade de protozoários.	Fernandes <i>et al.</i> (2017)
Óleos vegetais (alho, cebola, pimenta)	Controle eficaz de pragas sem redução da biomassa microbiana.	Czarneski & Henriques (2004)
Biofertilizantes e defensivos naturais	Estímulo à atividade microbiana e melhoria da estrutura do solo.	Dionísio <i>et al.</i> (2016)
Comparação geral entre pesticidas	Microrganismos indicadores não afectados por insumos orgânicos.	Araújo & Monteiro (2007)
Herbicidas inorgânicos	Redução de até 60% da população de protozoários.	Childs (2007)
Visão geral de insumos agrícolas	Menor alteração na respiração microbiana e diversidade biológica.	Moreira & Siqueira (2006)
POPs (orgânicos persistentes)	Alta persistência e efeitos deletérios prolongados.	Ribeiro <i>et al.</i> (2008)

5.3.Comparação entre Pesticidas Orgânicos e Inorgânicos

A crescente preocupação com os impactos ambientais e agrônômicos do uso contínuo de pesticidas tem motivado a busca por alternativas mais sustentáveis e seguras para o meio ambiente e a saúde humana. A literatura científica evidencia que os pesticidas orgânicos e inorgânicos apresentam diferenças marcantes não apenas em sua composição e modo de acção, mas também nos efeitos de longo prazo sobre os ecossistemas agrícolas e a microbiota do solo (Isman, 2006; Arora & Sahni, 2016; Dionísio *et al.*, 2016). Essa comparação torna-se essencial para orientar práticas agrícolas mais responsáveis e para promover a conservação da biodiversidade edáfica, fundamental para a manutenção da fertilidade do solo e da produtividade agrícola (Silva, 2015; Carvalho, 2017).

Autores como Ribeiro *et al.* (2008) e Moreira & Siqueira (2006) ressaltam que, enquanto os pesticidas inorgânicos estão associados a impactos ambientais severos e cumulativos, os pesticidas orgânicos oferecem uma abordagem mais compatível com os princípios da agroecologia e da sustentabilidade. No entanto, Ghannem *et al.* (2024) e Devi *et al.* (2018) destacam a importância de considerar aspectos como persistência ambiental, toxicidade, impactos socioeconômicos e viabilidade agrônômica na escolha e aplicação desses compostos. Com base nisso, os próximos tópicos apresentam uma análise comparativa detalhada entre pesticidas orgânicos e inorgânicos, abordando aspectos-chave para uma gestão ambientalmente adequada.

5.3.1. Persistência e Degradação no Solo

Pesticidas orgânicos apresentam curta meia-vida (de dias a poucas semanas), sendo facilmente degradados por processos bióticos (ação da microbiota) e abióticos (luz, temperatura, umidade) (Isman, 2006; Dionísio *et al.*, 2016). Este comportamento reduz drasticamente o risco de bioacumulação e contaminação de recursos hídricos, tornando-os mais adequados para práticas agrícolas sustentáveis.

Por outro lado, pesticidas inorgânicos e inorgânicos, como glifosato, atrazina, carbamatos e organofosforados, possuem alta persistência no solo, podendo permanecer ativos por meses ou anos, acumulando-se nos horizontes do solo e até contaminando os lençóis freáticos (Silva, 2015; Ribeiro *et al.*, 2008). Essa persistência prolongada aumenta os riscos ecológicos e compromete a saúde dos ecossistemas agrícolas a longo prazo.

5.3.2. Impacto sobre a Microbiota do Solo

Os pesticidas inorgânicos causam efeitos negativos directos na biodiversidade microbiana, afectando fungos micorrízicos, bactérias fixadoras de nitrogênio e protozoários. Isso compromete funções ecológicas essenciais, como a ciclagem de nutrientes, a estrutura do solo e o controle biológico de patógenos (Martins, 2010; Childs, 2007; Sun *et al.*, 2020).

Em contraste, os pesticidas orgânicos tendem a preservar ou mesmo estimular a diversidade microbiana. Compostos naturais, como o óleo de neem e o extrato de Aloe vera, têm demonstrado promover a saúde do solo, mantendo ou aumentando a atividade de enzimas-chave para os ciclos de nitrogênio e fósforo, como desidrogenase e fosfatase (Fernandes *et al.*, 2017; Czarneski & Henriques, 2004). Estes resultados sugerem que os pesticidas orgânicos são mais compatíveis com a manutenção da fertilidade do solo e da produtividade agrícola sustentável.

5.3.3. Riscos Toxicológicos e Contaminação Ambiental

Pesticidas inorgânicos e inorgânicos estão entre os principais agentes de contaminação ambiental, sendo frequentemente detectados em corpos de água, sedimentos e tecidos de organismos aquáticos, evidenciando processos de bioacumulação e biomagnificação (Carvalho, 2017; Foissner, 1999). Essas substâncias podem afectar a saúde humana e provocar desequilíbrios ecológicos duradouros.

Em contraste, os pesticidas orgânicos apresentam rápida degradação no ambiente e baixo potencial de contaminação de recursos hídricos e fauna edáfica e aquática (Ghannem *et al.*,

2024; Isman, 2006). Quando utilizados de forma adequada, estes compostos oferecem uma alternativa segura e ambientalmente responsável para o manejo de pragas.

5.3.4. Aspectos Agronômicos e Socioeconômicos

Pesticidas Orgânicos: Os pesticidas de origem natural contribuem para sistemas agrícolas sustentáveis ao manterem a fertilidade do solo, favorecerem a biodiversidade microbiana e reduzirem os custos ambientais. Contudo, desafios como custo, disponibilidade e falta de conhecimento técnico por parte dos agricultores ainda limitam sua ampla adoção (Dionísio *et al.*, 2016).

Pesticidas Inorgânicos: Embora sejam mais acessíveis e apresentem resultados imediatos no controle de pragas, o uso contínuo de pesticidas inorgânicos pode comprometer a sustentabilidade agrícola a médio e longo prazo, além de acarretar riscos toxicológicos para humanos e o meio ambiente (Silva, 2015; Ribeiro *et al.*, 2008). Por isso, a transição para práticas agroecológicas, incluindo o uso de pesticidas orgânicos, é cada vez mais recomendada em prol da saúde ambiental e da segurança alimentar. A Tabela 3, apresentada a seguir, sintetiza as principais diferenças entre pesticidas orgânicos e inorgânicos com base em critérios agronômicos, ecológicos e toxicológicos, facilitando a compreensão dos benefícios e limitações de cada abordagem no manejo agrícola.

Tabela 3: Comparação entre Pesticidas Orgânicos e Inorgânicos

Critério	Orgânicos	Inorgânicos
Origem	Natural (plantas, microrganismos, minerais)	Sintética (química industrial)
Persistência no solo	Baixa (dias a semanas)	Alta (meses a anos)
Toxicidade a protozoários	Baixa ou nula	Alta (até -60%)
Diversidade microbiana	Estimulada ou preservada	Reduzida
Respiração microbiana	Pouco afectada	Inibida
Risco ambiental	Baixo	Elevado
Degradação	Natural, rápida	Lenta, com bioacumulação
Segurança agrícola	Alta (com manejo adequado)	Exige controle rigoroso
Sustentabilidade do solo	Positiva	Negativa a longo prazo
Custo e acesso	Variável; pode ser Elevado	Mais baixo e mais acessível

6. CONCLUSÃO

Os dados analisados evidenciam que os pesticidas de origem orgânica, quando aplicados corretamente, tendem a preservar ou até mesmo estimular a actividade e a diversidade microbiana, contribuindo significativamente para a saúde e fertilidade do solo.

Os pesticidas orgânicos apresentam mecanismos de acção mais específicos e selectivos, como a disrupção da cutícula de insectos, interferência hormonal e indução de resistência nas plantas, o que reduz significativamente os impactos sobre organismos não-alvo e sobre a microbiota edáfica.

Os pesticidas inorgânicos, por sua vez, continuam associados à redução da biodiversidade do solo, à inibição de funções microbiológicas essenciais e à persistência ambiental prolongada, o que amplia os riscos de contaminação de ecossistemas terrestres e aquáticos.

Os pesticidas orgânicos não apenas representam uma alternativa ecologicamente viável e mais segura, mas também oferecem um modelo de acção compatível com os princípios da agroecologia. A substituição progressiva de pesticidas inorgânicos por biopesticidas naturais mostra-se como uma estratégia promissora para promover a sustentabilidade agrícola, conservar a biodiversidade do solo e mitigar os riscos ecotoxicológicos associados ao uso de agroquímicos convencionais.

7. RECOMENDAÇÕES

Incentivar políticas públicas que promovam o uso de pesticidas orgânicos em Moçambique e em outros países africanos;

Aumentar os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de formulações de biopesticidas adaptadas às condições locais;

Implementar programas de capacitação para agricultores sobre o uso e os benefícios dos pesticidas orgânicos;

Realizar mais estudos científicos focados nos impactos dos pesticidas orgânicos na microbiota do solo e nos ecossistemas agrícolas em Moçambique;

Estimular parcerias entre universidades, centros de pesquisa e organizações não-governamentais para fomentar práticas agrícolas sustentáveis.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrea, M. M. (1998). Toxicologia ambiental dos pesticidas: Avaliação de riscos. *Química Nova*, 21(2), 117-128. <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000200007>

- Araújo, A. S. F., & Monteiro, R. T. R. (2007). Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, 23(3), 66-75.
- Arora, P. K., & Sahni, N. (2016). Microbial degradation of pesticides. *Critical Reviews in Microbiology*, 42(3), 453-470. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2015.1058279>
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48-60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Childs, G. M. F. (2007). Efeitos de herbicidas na microbiota do solo em sistema fechado (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, São Paulo.
- Costa, L. G. (2006). Current issues in organophosphate toxicology. *Clinica Chimica Acta*, 366(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2005.10.008>
- Czarneski, C. M., & Henriques, J. A. P. (2004). Biopesticidas: Uma alternativa no controle de pragas. *Biotechnologia Ciência & Desenvolvimento*, (32), 44-48.
- Czarneski, C. M., & Henriques, J. A. P. (2004). Pesticidas naturais: Uso de plantas para o controle de pragas agrícolas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 2(2), 20-29.
- De Souza, J. T., Ferreira, A. V., & Rodrigues, A. A. (2015). Ação dos fungicidas triazóis na biossíntese de ergosterol. *Revista Fitos*, 9(2), 95-105.
- Devi, K. N., Deka, S., & Deka, S. (2018). Organic pesticides: Eco-friendly pest management strategy. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1), 1518-1522.
- Dionísio, J. A., Ferreira, L. R., & Freitas, M. A. (2016). Biopesticidas: Uma alternativa viável no controle de pragas agrícolas. *Revista Agro@mbiente On-line*, 10(2), 100-109. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i2.3011>
- Duke, S. O., & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319-325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- FAO. (2022). *Relatórios sobre agricultura sustentável na África*. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura.

- Fernandes, F. L., Picanço, M. C., & Silva, R. S. (2017). Uso de óleos essenciais no controle de pragas agrícolas. *Revista Brasileira de Plantas Medicinai*s, 19(3), 386-394. https://doi.org/10.1590/1983-084x/17_017
- Foissner, W. (1999). Soil protozoa as bioindicators: Pros and cons, methods, diversity, representative examples. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3), 95-112. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00033-2)
- FUNASA. (2009). *Manual prático de análise de água* (3ª ed.). Brasília: Fundação Nacional de Saúde.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (6ª ed.). São Paulo: Atlas.
- Ghannem, N., Elloumi, N., & Ayari, F. (2024). Ecological impacts of organic pesticides on soil biodiversity: A comprehensive review. *Ecological Indicators*, 158, 112345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112345>
- Hernández, A. F., Parrón, T., & Alarcón, R. (2013). Pesticides and human health: A review of epidemiological studies. *Environment International*, 60, 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.009>
- Instituto Nacional de Investigação Agrária (INIA). (2022). *Relatórios internos sobre agricultura sustentável em Moçambique*. Maputo: INIA.
- Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 45-66. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146>
- Jacobsen, C. S., & Hjelmsø, M. H. (2014). Agricultural soils, pesticides and microbial diversity. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.003>
- Júnior, W. M., Selbach, P. A., & Záchia-Ayub, M. A. (2006). Avaliação do efeito do herbicida glifosato na microbiota do solo. *Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, 16, 21-30.
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2010). *Fundamentos de metodologia científica* (7ª ed.). São Paulo: Atlas.

Marcondes, M. A. (2001). Influência de aplicação de pesticidas na degradação do herbicida 14C-2,4-D em diferentes solos (Dissertação de mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo.

Martins, G. L. (2010). Determinação de resíduos de pesticidas em solo de lavoura de arroz irrigado empregando QuEChERS modificado e LC-MS/MS (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria.

Minayo, M. C. S. (2001). *O desafio do conhecimento: Pesquisa qualitativa em saúde* (8ª ed.). São Paulo: Hucitec.

Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e bioquímica do solo* (2ª ed.). Lavras: UFLA.

Rao, M. A., Scelza, R., Scotti, R., & Gianfreda, L. (2020). Reclamation of polluted soils: Bioremediation of pesticides and heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 246, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.146>

Ribeiro, M. L., et al. (2008). Pesticidas: Usos e riscos para o meio ambiente. *Holos Environment*, 8(1), 53-71. <https://doi.org/10.14295/holos.v8i1.287>

Silva, M. A. (2015). Contaminação ambiental por pesticidas e seus efeitos na biodiversidade. *Revista de Ciências Ambientais*, 9(1), 21-34.

Sun, X., et al. (2020). Long-term impacts of pesticide application on soil microbial diversity. *Science of The Total Environment*, 712, 135662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135662>

Zhang, Y., et al. (2018). Soil microbial responses to herbicides. *Scientific Reports*, 8(1), 2114. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20456-4>