

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

DAVI JACINTO FERREIRA

**EXPANSÃO E DIVERSIFICAÇÃO DE BIOFUNGICIDAS NO MERCADO
BRASILEIRO COMO ESTRATÉGIA INDIRETA PARA MITIGAR A SELEÇÃO
AMBIENTAL DE RESISTÊNCIA ANTIFÚNGICA EM ASPERGILLUS FUMIGATUS**

Ilha Solteira

2026

DAVI JACINTO FERREIRA

**EXPANSÃO E DIVERSIFICAÇÃO DE BIOFUNGICIDAS NO MERCADO
BRASILEIRO COMO ESTRATÉGIA INDIRETA PARA MITIGAR A SELEÇÃO
AMBIENTAL DE RESISTÊNCIA ANTIFÚNGICA EM ASPERGILLUS FUMIGATUS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Ceresini.

Ilha Solteira

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

- F383e Ferreira, Davi Jacinto.
Expansão e diversificação de biofungicidas no mercado brasileiro como estratégia indireta para mitigar a seleção ambiental de resistência antifúngica em *aspergillus fumigatus* / Davi Jacinto Ferreira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026 43 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2026
- Orientador: Paulo Cezar Ceresini
Inclui bibliografia
1. Resistência a azóis. 2. Bioinsumos. 3. Controle biológico. 4. Saúde única. 5. Fungicidas agrícolas. 6. Manejo de resistência.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa integra dados de mercado, fitossanidade e saúde pública para avaliar como a diversificação de biofungicidas pode contribuir, de forma indireta, para reduzir a pressão seletiva associada ao uso agrícola de azóis. O trabalho oferece uma base técnica para que produtores, assistência técnica, órgãos reguladores e programas de vigilância distingam expansão de bioinsumos, diversidade de ingredientes ativos e substituição efetiva de fungicidas químicos. Ao explicitar os limites dos dados e propor indicadores de uso, resíduos e resistência, contribui para o manejo integrado de doenças, a preservação da eficácia dos antifúngicos clínicos e o desenvolvimento de políticas de Saúde Única. Em escala local e nacional, o estudo pode orientar pesquisas em agroecossistemas brasileiros, aprimorar a formação de profissionais de Engenharia Agrônômica e estimular inovação responsável em bioinsumos, com potencial de reduzir impactos ambientais sem comprometer a proteção dos cultivos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research integrates market data, plant health and public health to assess how biofungicide diversification may indirectly reduce the selection pressure associated with agricultural azole use. It provides a technical basis for growers, extension services, regulatory agencies and surveillance programs to distinguish market expansion, active-ingredient diversity and effective replacement of chemical fungicides. By making the limitations of the available data explicit and proposing indicators for use, residues and resistance, the study contributes to integrated disease management, preservation of clinically important antifungals and development of One Health policies. At local and national levels, it may guide research in Brazilian agroecosystems, strengthen the education of agronomy professionals and promote responsible innovation in biological inputs, with the potential to reduce environmental impacts without compromising crop protection.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Expansão e diversificação de biofungicidas no mercado brasileiro como estratégia indireta para mitigar a seleção ambiental de resistência antifúngica em *Aspergillus fumigatus*

ALUNO: *Davi Jacinto Ferreira*

RA: 172053838

ORIENTADOR: *Paulo Cezar Ceresini*

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 9.5

Comissão Examinadora:

*Prof. Dr. Paulo Cezar Ceresini
Presidente (Orientador)*

Prof. Dr. Gabriel Madoglio Favara

Dra. Tatiane Carla Silva

Davi Jacinto Ferreira

Ilha Solteira, 10 de agosto de 2026.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Estadual Paulista (UNESP), à Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira e ao Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos pelo suporte acadêmico e institucional. Agradece, em especial, à Coordenadoria de Ações Afirmativas e Diversidade da UNESP (CAADI) pela concessão de bolsa no âmbito do Edital nº 02/2023, que contribuiu para sua formação acadêmica e para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

A resistência aos azóis em *Aspergillus fumigatus* constitui um problema de Saúde Única porque pode emergir tanto durante a terapia prolongada quanto no ambiente, onde fungicidas agrícolas inibidores da desmetilação exercem pressão seletiva sobre populações saprofíticas. Este estudo avaliou a expansão e a diversificação dos biofungicidas no mercado brasileiro e discutiu seu potencial como estratégia indireta de mitigação da seleção ambiental associada ao uso agrícola de triazóis. Realizou-se revisão narrativa estruturada da literatura, complementada por análise documental de dados secundários de comercialização e registro de fungicidas químicos, produtos microbianos e semioquímicos no Brasil entre 2014 e 2023. Foram analisados volume comercializado, taxa de crescimento anual composta, índice de crescimento com base em 2014, número de ingredientes ativos únicos, composição funcional e identidade taxonômica dos agentes biológicos. O segmento microbiano e semioquímico apresentou taxa de crescimento anual composta de 26,50%, superior aos 14,76% do grupo químico empregado na comparação. O volume comercializado cresceu de aproximadamente 462 t em 2014 para 3.832 t em 2023, aumento de 8,3 vezes. O número de ingredientes ativos únicos aumentou de cinco em 2014 para 72 em 2023, com mudança acentuada de patamar a partir de 2020. Na base completa padronizada para 2014–2023, 17 de 78 ingredientes ativos apresentavam função biofungicida, correspondendo a 21,8% do portfólio, com predominância de agentes à base de *Bacillus* e *Trichoderma*. A expansão do portfólio biológico não demonstra causalmente redução da frequência de *A. fumigatus* resistente, mas cria condições concretas para substituição parcial de fungicidas sítio-específicos, diversificação de modos de ação e redução da persistência de resíduos seletivos em hotspots ambientais. A efetividade sanitária dessa transição dependerá de adoção agrônômica consistente, qualidade dos produtos e vigilância integrada de uso, resíduos e resistência.

Palavras-chave: resistência a azóis; bioinsumos; controle biológico; saúde única; fungicidas agrícolas; manejo de resistência.

ABSTRACT

Azole resistance in *Aspergillus fumigatus* is a One Health problem because it may emerge during prolonged antifungal therapy and in environmental reservoirs, where agricultural demethylation-inhibiting fungicides impose selection on saprophytic populations. This study evaluated the expansion and diversification of biofungicides in the Brazilian market and discussed their potential as an indirect strategy to mitigate environmental selection associated with agricultural triazole use. A structured narrative review was integrated with documentary analysis of secondary data on sales and registrations of chemical fungicides, microbial products and semiochemicals in Brazil from 2014 to 2023. The variables comprised sales volume, compound annual growth rate, indexed growth using 2014 as baseline, number of unique active ingredients, functional composition and taxonomic identity of biological agents. The microbial and semiochemical segment showed a compound annual growth rate of 26.50%, compared with 14.76% for the chemical group used as reference. Sales increased from approximately 462 tonnes in 2014 to 3,832 tonnes in 2023, an 8.3-fold expansion. Unique active ingredients increased from five in 2014 to 72 in 2023, with a marked shift from 2020 onward. In the complete standardized dataset for 2014–2023, 17 of 78 active ingredients were classified as biofungicides, corresponding to 21.8% of the portfolio, with *Bacillus*- and *Trichoderma*-based agents predominating. Portfolio expansion does not causally demonstrate a reduction in the frequency of resistant *A. fumigatus*. Nevertheless, it provides practical conditions for partial replacement of site-specific fungicides, diversification of modes of action and reduction of persistent selective residues in environmental hotspots. The public-health value of this transition will depend on consistent agronomic adoption, reliable product quality and integrated surveillance of fungicide use, environmental residues and antifungal resistance.

Keywords: azole resistance; biological inputs; biological control; One Health; agricultural fungicides; resistance management.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Modelo conceitual da rota agricultura-ambiente-clínica da resistência antifúngica em *Aspergillus fumigatus* 21
- Figura 2 - Indicadores da expansão e diversificação do segmento microbiano e semioquímico no mercado brasileiro (2014-2023) 27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evidências sobre a seleção de <i>Aspergillus fumigatus</i> resistente em diferentes contextos ambientais	16
Quadro 2 - Mecanismos, vantagens e limitações de agentes biofungicidas	18
Quadro 3 - Variáveis empregadas na análise documental e alcance interpretativo	24
Quadro 4 - Indicadores recomendados para testar a efetividade da mitigação	33
Quadro A1 - Campos e regras empregados na construção da base analítica	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais indicadores quantitativos do levantamento de mercado brasileiro (2014-2023)	27
Tabela A1 - Série anual dos indicadores empregados na análise de mercado (2014–2023)	39
Tabela A2 - Ingredientes ativos classificados como biofungicidas na base completa (2014–2023)	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGROFIT	Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários
CAADI	Coordenadoria de Ações Afirmativas e Diversidade
CAGR	Compound annual growth rate - taxa de crescimento anual composta
DMI	Inibidor da desmetilação
IA	Ingrediente ativo
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MIC	Concentração inibitória mínima
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA	14
1.1 Resistência antifúngica em <i>Aspergillus fumigatus</i> sob a abordagem Saúde Única	14
1.2 Hotspots ambientais e heterogeneidade da seleção	15
1.3 Biofungicidas e diversificação do mercado brasileiro	17
2 MATERIAL E MÉTODOS	22
2.1 Delineamento do estudo	22
2.2 Revisão narrativa estruturada	22
2.3 Fontes e tratamento dos dados de mercado	23
2.4 Indicadores e consistência interna	23
2.5 Limitações analíticas	24
3 RESULTADOS	25
3.1 Crescimento comparativo do mercado	25
3.2 Diversificação de ingredientes ativos	25
3.3 Participação dos biofungicidas no conjunto de bioinsumos fitossanitários	26
4 DISCUSSÃO	28
4.1 Transição do mercado: capacidade disponível não equivale a substituição	28
4.2 Biofungicidas: manejo da pressão seletiva, não “cura” da resistência	28
4.3 Hotspots e coldspots: risco ambiental heterogêneo	29
4.4 Manejo integrado: condição para a mitigação	30
4.5 Regulação e qualidade: condições de efetividade	31
4.6 Limitações e agenda de validação	32
5 CONCLUSÕES	34
DECLARAÇÃO SOBRE OS DADOS	35
REFERÊNCIAS	36
APÊNDICE A - BASE DE DADOS E SÍNTESE DAS VARIÁVEIS ANALISADAS	39
APÊNDICE B - SCRIPT EM R UTILIZADO NAS ANÁLISES	41

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Resistência antifúngica em *Aspergillus fumigatus* sob a abordagem Saúde Única

A resistência antifúngica deixou de ser um problema restrito aos serviços de saúde. Fungos com relevância médica mantêm ciclos ecológicos extensos no ambiente e podem ser expostos a compostos antifúngicos antes mesmo de entrarem em contato com um hospedeiro humano, tornando a resistência fúngica uma questão de Saúde Única (BASTOS et al., 2021; FISHER et al., 2022; VERWEIJ et al., 2020). *Aspergillus fumigatus* exemplifica de maneira particularmente clara essa interface. Trata-se de um fungo saprofítico, termotolerante e cosmopolita, amplamente distribuído em solos, matéria vegetal em decomposição, compostagem, resíduos orgânicos e no ar (BERGER et al., 2017; BURKS et al., 2021). A produção de conídios aerodispersáveis conecta seus reservatórios ambientais a ambientes agrícolas, ocupacionais, urbanos e hospitalares. Esses conídios são continuamente inalados e, em indivíduos imunocompetentes, são normalmente eliminados pelas defesas do hospedeiro. Em pacientes imunocomprometidos ou portadores de doenças pulmonares crônicas, entretanto, a exposição pode resultar em manifestações que variam de aspergilose broncopulmonar alérgica e aspergilose pulmonar crônica até aspergilose invasiva (BERGER et al., 2017; BURKS et al., 2021).

A resistência em *A. fumigatus* pode surgir por duas rotas não excludentes. Na rota clínica, a exposição prolongada durante o tratamento seleciona variantes no hospedeiro, sobretudo em quadros crônicos. Na rota ambiental, populações saprofíticas são expostas a fungicidas ou biocidas antes da infecção humana. Essa segunda rota explica a ocorrência de aspergilose resistente em pacientes sem terapia prévia com azóis e a presença de genótipos semelhantes em amostras ambientais e clínicas (VERWEIJ et al., 2009; VERWEIJ et al., 2020).

Os triazóis são essenciais ao tratamento e à profilaxia da aspergilose. Voriconazol, itraconazol, posaconazol e isavuconazol inibem a lanosterol 14 α -desmetilase, codificada principalmente por *cyp51A*, alvo bioquímico também explorado por fungicidas agrícolas inibidores da desmetilação. Essa sobreposição favorece resistência cruzada; a detecção dos genótipos TR34/L98H e TR46/Y121F/T289A em isolados ambientais e clínicos consolidou a hipótese de seleção fora do hospedeiro (VERWEIJ et al., 2009; BERGER et al., 2017; VERWEIJ et al., 2020).

A relevância sanitária dessa rota decorre da redução das opções terapêuticas, em um cenário de arsenal antifúngico limitado, e da associação da resistência com falha de tratamento e maior mortalidade. Por isso, revisões internacionais enquadram a resistência fúngica como ameaça emergente à saúde global (BASTOS et al., 2021; FISHER et al., 2022). Em 2025, uma avaliação conjunta de agências europeias concluiu que usos não médicos de azóis provavelmente ou muito provavelmente contribuem para a seleção de *A. fumigatus* resistente, embora a contribuição relativa de cada uso e ambiente ainda precise ser quantificada (EFSA et al., 2025).

A preocupação com sobreposição de alvos ultrapassou os azóis. Van Rhijn et al. (2024) demonstraram que a exposição in vitro ao fungicida agrícola ipflufenquin pode selecionar alterações em di-hidroorotato desidrogenase que conferem resistência cruzada ao olorofim, antifúngico clínico de mecanismo semelhante. Bottery et al. (2024) mostraram ainda que linhagens multiazol-resistentes podem apresentar taxas de mutação elevadas e acelerar a aquisição de resistência adicional. Esses achados não significam que todo novo fungicida gerará resistência médica, mas reforçam a necessidade de avaliação antecipada de risco quando moléculas agrícolas e clínicas compartilham alvo ou arquitetura química.

A abordagem Saúde Única trata a resistência como propriedade do sistema: a agricultura precisa controlar doenças, a medicina depende de poucas classes químicas e o ambiente atua como habitat, filtro seletivo e via de dispersão. A resposta deve combinar preservação de moléculas essenciais, redução de usos evitáveis, diversificação do manejo e vigilância dos ambientes com maior probabilidade de seleção e exposição (CERESINI et al., 2024; EFSA et al., 2025).

1.2 Hotspots ambientais e heterogeneidade da seleção

O risco ambiental não é uniforme. A seleção exige crescimento e reprodução de *A. fumigatus*, exposição a concentrações discriminatórias e persistência suficiente do composto. Resíduos vegetais, pilhas de compostagem, biomassa armazenada e materiais lenhosos podem reunir essas condições com maior frequência do que solos agrícolas em geral, o que explica a coexistência de hotspots com áreas convencionais de baixa prevalência ou sem sinal genômico robusto de seleção sazonal (SCHOUSTRA et al., 2019; BARBER et al., 2020; BURKS et al., 2021; ARENDRUP et al., 2024).

A resistência distribui-se de forma desigual. Resíduos de plantas ornamentais, flores, compostagem e outros materiais orgânicos concentram evidências de seleção, embora a concentração instantânea de fungicidas nem sempre se correlacione linearmente com a

resistência. A história de exposição, a degradação dos compostos, a heterogeneidade espacial e o momento da amostragem também condicionam o resultado (BURKS et al., 2021; ARENDRUP et al., 2024).

Em contraste, Barber et al. (2020) encontraram prevalência relativamente baixa de resistência em campos agrícolas amostrados na Alemanha e não observaram impacto genômico robusto da aplicação sazonal de fungicidas naquele contexto. Resultados desse tipo são essenciais para evitar generalizações. Eles não invalidam a rota ambiental; indicam que o risco é condicionado pelo nicho e pelo manejo. Áreas com baixa densidade de *A. fumigatus*, remoção rápida de resíduos, menor persistência de fungicidas ou concentrações não seletivas podem funcionar como coldspots. A unidade adequada de vigilância, portanto, não é apenas a lavoura, mas o continuum que inclui cultivo, colheita, armazenamento, resíduos, compostagem e dispersão aérea.

A heterogeneidade também é relevante para a interpretação de resultados negativos. No Brasil, o estudo de Buri et al. (2026) encontrou elevada diversidade genética de *A. fumigatus* em alimentos secos, mas não detectou fenótipos resistentes aos azóis no conjunto avaliado. A ausência de resistência nesse nicho não elimina risco em outros ambientes; fornece um ponto de referência e mostra a necessidade de amostragem estratificada. Vigilância efetiva deve comparar diferentes sistemas produtivos, épocas, matrizes e intensidades de uso, evitando extrapolar um resultado local para todo o território.

Quadro 1 - Síntese das evidências sobre a ocorrência e a seleção de *Aspergillus fumigatus* resistente a azóis em diferentes contextos ambientais e suas implicações para a interpretação do risco

Contexto ambiental	Evidência predominante	Implicação para este estudo	Referências de suporte
Resíduos vegetais, pilhas de material orgânico e compostagem	Esses ambientes podem constituir hotspots quando reúnem crescimento e reprodução de <i>A. fumigatus</i> e resíduos de fungicidas azólicos. Pilhas de resíduos vegetais apresentaram altas proporções de isolados resistentes, enquanto a compostagem aeróbia ativa pode reduzir a abundância do fungo.	Priorizar vigilância e manejo de resíduos nas etapas de pós-colheita, armazenamento e compostagem.	Schoustra et al. (2019); Burks et al. (2021); Arendrup et al. (2024)
Flores, resíduos de bulbos e materiais ornamentais	Resíduos da produção de bulbos florais foram identificados como hotspots de seleção. Amostras associadas a flores, vasos, canteiros e compostagem apresentaram algumas das maiores proporções de <i>A. fumigatus</i> resistente nos estudos europeus.	Relacionar o risco ao sistema de produção, à frequência de aplicações e ao destino da biomassa tratada.	Schoustra et al. (2019); Burks et al. (2021); Arendrup et al. (2024)
Campos agrícolas convencionais	A prevalência de resistência é variável. Em campos agrícolas alemães, 1%-3% dos isolados foram resistentes, sem	Evitar atribuir risco uniforme a toda área agrícola; a seleção depende do nicho, da exposição e da capacidade de	Barber et al. (2020); Arendrup et al. (2024)

Contexto ambiental	Evidência predominante	Implicação para este estudo	Referências de suporte
	alteração robusta da estrutura populacional após o uso sazonal de fungicidas. Em experimento de campo na Dinamarca, também não houve aumento estatisticamente significativo da proporção de resistentes após as aplicações.	crescimento e reprodução do fungo.	
Cavacos de madeira e resíduos lenhosos	Cavacos de madeira foram identificados como hotspots quando apresentavam crescimento de <i>A. fumigatus</i> , isolados resistentes e resíduos de azóis. O armazenamento de resíduos orgânicos e lenhosos pode criar condições para manutenção e multiplicação do fungo.	Incluir resíduos lenhosos e locais de armazenamento na vigilância ambiental, sem generalizar o risco para toda madeira ou biomassa.	Schoustra et al. (2019); Burks et al. (2021)
Alimentos secos	<i>A. fumigatus</i> foi detectado em alimentos secos brasileiros com elevada diversidade genética, mas os isolados avaliados permaneceram suscetíveis aos azóis testados.	Interpretar resultados negativos como específicos do nicho, da amostragem e do período analisado, sem extrapolação para outros compartimentos ambientais.	Buri et al. (2026)

Fonte: elaborado pelo autor com base nos estudos indicados na última coluna.

Nota: As implicações da terceira coluna constituem síntese interpretativa do autor a partir dos resultados dos estudos citados.

1.3 Biofungicidas e diversificação do mercado brasileiro

O Brasil combina agricultura tropical intensiva, safras sucessivas e alta pressão de doenças, condições que tornam o manejo de resistência especialmente relevante. Paralelamente, o mercado de bioinsumos cresce com o avanço da inovação empresarial, da demanda dos produtores e dos instrumentos regulatórios. A expansão de bioinseticidas, bionematicidas, inoculantes e biofungicidas mostra que soluções microbianas podem alcançar escala quando integradas aos sistemas produtivos (TOGNI et al., 2019; FISCHER et al., 2023; DE LIMA ANDREATA et al., 2025).

Biofungicida é uma categoria funcional, não taxonômica. Um mesmo gênero microbiano pode originar produtos para fungos, nematoides, insetos ou promoção de crescimento, conforme linhagem, formulação e indicação de uso. Para este estudo, interessam os agentes capazes de substituir ou complementar tratamentos contra fitopatógenos fúngicos, com destaque para *Bacillus* e *Trichoderma* no mercado brasileiro (DE LIMA ANDREATA et al., 2025).

Trichoderma atua por um conjunto de processos que inclui colonização rápida da rizosfera ou de tecidos vegetais, competição por nutrientes, reconhecimento e enrolamento sobre hifas do patógeno, secreção de quitinases e glucanases, antibiose e ativação de respostas de defesa da planta. A importância relativa de cada mecanismo varia entre espécies, linhagens

e patossistemas. Revisões recentes descrevem *Trichoderma* como plataforma versátil de controle, mas enfatizam que seu desempenho depende de adaptação ambiental, viabilidade do inóculo, compatibilidade com agroquímicos e qualidade da formulação (MUKHOPADHYAY; KUMAR, 2020; MANZAR et al., 2022; GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023; RODRIGUES; DE MIO; SOCCOL, 2023; AWAL et al., 2024; OYESOLA; KINGE; OBEMBE, 2025).

Bacillus apresenta vantagens industriais relacionadas à formação de endósporos e à estabilidade de determinadas formulações. Seus mecanismos incluem competição, produção de sideróforos, enzimas líticas e lipopeptídeos, como surfactinas, iturinas e fengicinas, além de indução de resistência sistêmica. A multiplicidade de efeitos reduz a dependência de uma interação única entre molécula e sítio-alvo, mas não garante eficácia constante. A expressão de metabólitos pode ser afetada por temperatura, umidade, pH, radiação, matéria orgânica, microbioma nativo e condições de armazenamento. Seleção de linhagens, controle de qualidade e posicionamento agrônomo são tão importantes quanto a identidade do gênero (VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ et al., 2025).

Consórcios de *Trichoderma*, *Bacillus*, *Pseudomonas* e outros agentes podem ampliar o espectro funcional, mas acrescentam desafios de compatibilidade, produção, estabilidade e registro. Da mesma forma, formulações líquidas, pós molháveis, grânulos e encapsulamento só convertem atividade laboratorial em eficácia de campo quando preservam viabilidade, dose efetiva e desempenho durante armazenamento e aplicação (POVEDA; EUGUI, 2023; O'CALLAGHAN, 2016; VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ et al., 2025).

A vantagem dos biofungicidas para a resistência médica é indireta: seus mecanismos não se sobrepõem ao alvo dos azóis clínicos e seu uso pode reduzir aplicações químicas. Isso não significa risco evolutivo zero, pois fitopatógenos podem adaptar-se a metabólitos ou interações ecológicas; significa um perfil de seleção diferente daquele de compostos persistentes e sítio-específicos.

Seu valor estratégico reside, portanto, em diversificar intervenções e integrar agentes biológicos, cultivares resistentes, medidas culturais e uso racional de fungicidas. Reduzir o tamanho populacional do patógeno e a exposição a compostos de alto risco é um princípio central do manejo de resistência (CORKLEY; FRAAIJE; HAWKINS, 2022; CERESINI et al., 2024).

Quadro 2 - Principais mecanismos de agentes biofungicidas, vantagens estratégicas, limitações e referências de suporte

Grupo	Mecanismos recorrentes	Vantagem estratégica	Limitações principais	Referências
<i>Trichoderma</i> spp.	Competição por espaço e nutrientes, micoparasitismo,	Atuação por múltiplos processos e ampla utilização experimental e	Desempenho condicionado pela espécie e linhagem, temperatura,	Mukhopadhyay e Kumar (2020); Manzar et al. (2022); Guzmán-Guzmán

Grupo	Mecanismos recorrentes	Vantagem estratégica	Limitações principais	Referências
	antibiose, produção de enzimas hidrolíticas e indução de respostas de defesa da planta.	comercial contra diferentes fitopatógenos.	disponibilidade de água, pH, compatibilidade com outros insumos, viabilidade e estabilidade da formulação.	et al. (2023); Villavicencio-Vásquez et al. (2025)
<i>Bacillus</i> spp.	Produção de lipopeptídeos, como surfactinas, iturinas e fengicinas, sideróforos e enzimas líticas; competição por nutrientes e indução de resistência sistêmica.	Diversidade de metabólitos antimicrobianos sem sobreposição direta com o alvo dos azóis; a formação de endósporos pode favorecer produção, formulação, armazenamento e aplicação.	A eficácia depende da linhagem, do fitopatógeno-alvo, da produção de metabólitos, da capacidade de colonização, das condições ambientais e da formulação.	Villavicencio-Vásquez et al. (2025); Kairatkyzy e Arystanova (2025); O'Callaghan (2016)
Consórcios microbianos	Combinação de microrganismos com diferentes nichos, mecanismos de antagonismo, capacidade de colonização e efeitos sobre a planta.	Potencial para ampliar o espectro de ação, complementar mecanismos e aumentar a robustez do controle sob condições ambientais variáveis.	Compatibilidade entre componentes, competição ou antagonismo interno, manutenção da proporção das linhagens, estabilidade, produção, padronização e registro mais complexos.	Poveda e Eugui (2023); Maciag et al. (2023)
Metabólitos microbianos e sobrenadantes livres de células	Antibiose, produção de enzimas degradativas, interferência em processos fisiológicos do organismo-alvo e ativação de respostas de defesa vegetal.	Possibilidade de desenvolver produtos baseados em compostos bioativos sem depender da sobrevivência e do estabelecimento do microrganismo no ambiente.	Necessidade de caracterizar identidade química, concentração biologicamente efetiva, estabilidade, persistência, toxicidade, consistência entre lotes e forma de aplicação.	Prabhu, Poorniammal e Dufossé (2025)

Fonte: elaborado pelo autor com base nas referências indicadas na última coluna.

Nota: As vantagens e limitações apresentadas representam uma síntese interpretativa do autor e devem ser avaliadas para cada linhagem, formulação e sistema de produção.

Apesar do entusiasmo comercial e da rápida expansão do mercado brasileiro de biopesticidas, permanece uma lacuna analítica entre a disponibilidade crescente desses produtos e sua efetiva incorporação aos programas de manejo de doenças (FISCHER et al., 2023; DE LIMA ANDREATA et al., 2025). O crescimento agregado das vendas de produtos biológicos não equivale automaticamente à redução do uso de triazóis, assim como o aumento do número de registros expressa ampliação da oferta regulatória, mas não comprova adoção nas culturas, doses, épocas ou condições epidemiológicas necessárias para substituir aplicações químicas.

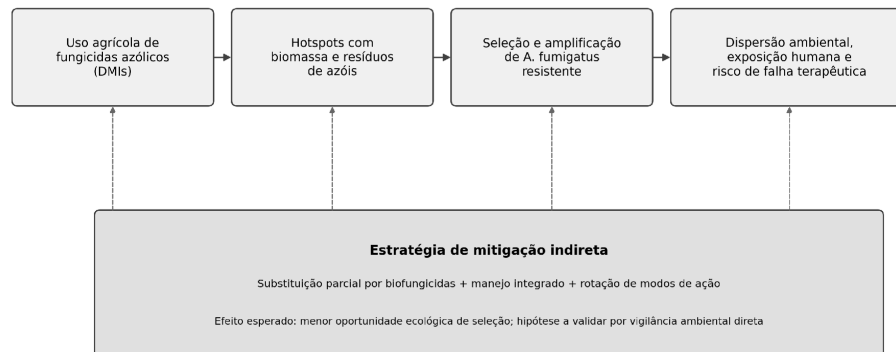
Essa limitação decorre da própria natureza das bases consultadas: os relatórios do IBAMA consolidam quantidades comercializadas principalmente por ingrediente ativo e classe de uso, enquanto o AGROFIT reúne informações sobre produtos registrados, marcas comerciais, ingredientes ativos, culturas e alvos, sem fornecer, isoladamente, o número de aplicações realizadas ou os tratamentos químicos efetivamente evitados (IBAMA, 2025; BRASIL, 2025). Além disso, as séries de produtos microbianos, semioquímicos e agentes biológicos de controle abrangem funções distintas, incluindo bioinseticidas, bionematicidas e biofungicidas, e não podem ser interpretadas integralmente como expansão do controle biológico de doenças (DE LIMA ANDREATA et al., 2025; IBAMA, 2025). É necessário,

portanto, distinguir volume comercializado, número de produtos comerciais, número de ingredientes ativos únicos, indicação agrônômica e composição taxonômica do portfólio. Somente a partir dessa separação é possível discutir de forma metodologicamente consistente a contribuição potencial dos biofungicidas para a mitigação da pressão seletiva associada à resistência antifúngica ambiental.

Em síntese, a literatura sustenta com **evidência forte** a existência da rota ambiental de resistência e a concentração do risco em determinados hotspots; oferece **evidência moderada** para o potencial dos biofungicidas de reduzir indiretamente a pressão seletiva quando substituem aplicações químicas; e ainda **não demonstra causalmente** que a expansão do mercado biológico tenha reduzido a frequência ambiental de *A. fumigatus* resistente. Essa hierarquia de evidências orientou a interpretação dos resultados.

Com base nessa perspectiva, o objetivo deste estudo foi avaliar a expansão e a diversificação dos biofungicidas no mercado brasileiro entre 2014 e 2023 e discutir seu potencial como estratégia indireta de mitigação da pressão seletiva associada ao uso agrícola de fungicidas triazóis sobre populações ambientais de *A. fumigatus*. A hipótese de trabalho foi que a ampliação do portfólio de agentes microbianos, especialmente *Bacillus* e *Trichoderma*, cria capacidade técnica e comercial para reduzir parcialmente a dependência de fungicidas sítio-específicos. A análise foi deliberadamente limitada à plausibilidade e às condições necessárias para a mitigação: não se buscou demonstrar causalmente queda da prevalência de resistência, pois não foram produzidas séries temporais de isolados ambientais nem medições de resíduos azólicos. A relação conceitual entre o uso agrícola de fungicidas, a seleção ambiental de resistência e o ponto de intervenção atribuído aos biofungicidas é sintetizada na Figura 1.

Figura 1 - Modelo conceitual da rota agricultura-ambiente-clínica da resistência antifúngica em *Aspergillus fumigatus* e do ponto de intervenção atribuído aos biofungicidas



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Nota: A mitigação proposta é indireta e precisa ser validada por monitoramento integrado de uso, resíduos e resistência.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento do estudo

O estudo combinou revisão narrativa estruturada e análise documental descritiva de dados secundários. A revisão foi utilizada para construir o nexos conceitual entre uso não médico de fungicidas, seleção ambiental de resistência em *A. fumigatus*, hotspots ecológicos e mecanismos de ação de biofungicidas. A análise documental caracterizou a evolução do mercado brasileiro de fungicidas químicos e do conjunto de produtos microbianos e semioquímicos no período de 2014 a 2023. Não foi realizada meta-análise nem inferência causal entre crescimento do mercado biológico e prevalência de resistência.

A pergunta analítica foi formulada em dois níveis. No nível descritivo, perguntou-se se o segmento biológico se expandiu e se diversificou em ritmo suficiente para oferecer alternativas aos fungicidas convencionais. No nível interpretativo, discutiu-se em que condições essa expansão poderia reduzir a pressão seletiva sobre populações ambientais de *A. fumigatus*. A unidade de inferência foi o potencial de mitigação indireta, e não a redução observada de resistência.

2.2 Revisão narrativa estruturada

A literatura foi organizada a partir de artigos científicos, revisões, relatórios técnicos e documentos institucionais publicados principalmente entre 2009 e julho de 2026. Foram priorizados trabalhos indexados que abordassem: (i) resistência a azóis em *A. fumigatus*; (ii) uso agrícola ou ambiental de fungicidas com potencial de resistência cruzada; (iii) identificação de hotspots e coldspots; (iv) mecanismos de controle biológico por *Bacillus*, *Trichoderma* e consórcios; (v) mercado e regulação de bioinsumos no Brasil; e (vi) manejo integrado de resistência. Termos equivalentes em português e inglês foram combinados, incluindo "*Aspergillus fumigatus*", "azole resistance", "agricultural fungicides", "environmental hotspots", "biofungicides", "microbial pesticides", "*Bacillus*", "*Trichoderma*", "Brazilian market" e "One Health".

Foram excluídos documentos duplicados e estudos sem relação com a interface agricultura-ambiente-saúde ou com os mecanismos e o mercado de biofungicidas. Fontes não revisadas por pares foram mantidas quando representavam bases oficiais, legislação, sistemas de registro ou o conjunto de dados que fundamentou as figuras de mercado. A síntese foi temática, com atenção explícita à força e aos limites da evidência. Estudos que detectaram

resistência em hotspots e estudos que encontraram baixa frequência em campos convencionais foram apresentados conjuntamente para reduzir viés de confirmação.

2.3 Fontes e tratamento dos dados de mercado

Os indicadores de comercialização e diversificação foram obtidos de uma base consolidada construída a partir de dados públicos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis para 2014–2023 e de informações de registro disponíveis no Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários do Ministério da Agricultura e Pecuária. A análise comparou o grupo “fungicidas químicos” com o agregado “produtos microbianos e semioquímicos”. As informações do AGROFIT foram consultadas como base documental oficial (BRASIL, 2025).

Foram consideradas cinco variáveis: volume anual comercializado em toneladas; índice de vendas com 2014 igual a 100; taxa de crescimento anual composta; número de ingredientes ativos únicos por ano; e composição funcional do portfólio microbiano e semioquímico. Produto comercial e ingrediente ativo foram tratados como unidades diferentes. Um mesmo agente presente em múltiplas marcas foi contabilizado uma única vez na análise de diversidade, enquanto a comercialização refletiu o volume agregado informado na base.

Para a classificação funcional, foram considerados todos os ingredientes ativos microbianos e semioquímicos presentes na base completa. Registros sem identificação do ingrediente ativo foram excluídos das contagens de diversidade. Os ingredientes ativos com indicação explícita de controle de doenças fúngicas foram classificados como biofungicidas; os demais foram agrupados em outras funções, incluindo semioquímicos, agentes virais, fungos entomopatogênicos, nematicidas e outros agentes de controle biológico. A composição taxonômica dos biofungicidas foi descrita por grupo predominante, com destaque para *Bacillus* e *Trichoderma*.

2.4 Indicadores e consistência interna

A taxa de crescimento anual composta foi calculada pela expressão:

$$\text{CAGR} = (V_f / V_i)^{(1/n)} - 1 \quad (1)$$

em que V_i corresponde ao valor no início da série, V_f ao valor final e n ao número de intervalos anuais. O índice de crescimento foi calculado por $I_t = (V_t / V_{2014}) \times 100$. As proporções funcionais foram obtidas pela divisão do número de ingredientes ativos de cada categoria pelo total de 78 ingredientes ativos únicos da base completa padronizada.

A base completa padronizada reuniu 78 ingredientes ativos únicos no período de 2014 a 2023. Desses, 17 apresentavam função biofúngica, equivalentes a 21,8% do portfólio. A distribuição taxonômica do subconjunto biofúngica foi composta por oito ingredientes ativos associados a *Bacillus*, sete a *Trichoderma* e dois a outros fungos, *Clonostachys rosea* e *Hirsutella thompsonii*. A base consolidada, o dicionário das variáveis e o script em R são apresentados nos apêndices e acompanham a versão digital do trabalho.

2.5 Limitações analíticas

Os dados de mercado medem disponibilidade, diversidade e comercialização agregada, não aplicação por cultura, dose, número de tratamentos ou substituição efetiva de triazóis. O estudo também não incluiu quantificação de resíduos, isolamento de *A. fumigatus*, testes de sensibilidade ou marcadores moleculares ao longo da série temporal. Por isso, a relação entre expansão de biofúngicas e resistência ambiental foi interpretada como plausibilidade mecanística e oportunidade de manejo, e não como demonstração causal. Alterações regulatórias, mudanças na forma de declaração das vendas e revisões futuras da nomenclatura taxonômica podem influenciar comparações históricas.

Quadro 3 - Variáveis empregadas na análise documental e alcance interpretativo

Variável	Unidade	O que demonstra	O que não demonstra
Volume comercializado	Toneladas por ano	Expansão material do segmento.	Substituição de um fungicida específico ou área tratada.
CAGR	% ao ano	Velocidade média de crescimento entre os extremos.	Regularidade anual ou causalidade.
Índice 2014 = 100	Índice relativo	Comparação de crescimento entre grupos de escalas diferentes.	Volume absoluto equivalente.
Ingredientes ativos únicos	Número de agentes ou substâncias	Diversificação tecnológica do portfólio.	Número de produtos, vendas ou eficácia.
Função primária	Biofúngica versus outras funções	Participação dos fungicidas biológicos no conjunto.	Uso exclusivo ou desempenho no campo.
Fonte: elaborado pelo autor (2026).			

3 RESULTADOS

3.1 Crescimento comparativo do mercado

O segmento de produtos microbianos e semioquímicos apresentou expansão mais rápida que o grupo de fungicidas químicos utilizado como referência. Entre 2014 e 2023, a taxa de crescimento anual composta foi de 26,50% para microbianos/semioquímicos e de 14,76% para fungicidas químicos. A diferença de 11,74 pontos percentuais representa quase o dobro da velocidade anual média de crescimento do segmento biológico agregado, embora a base inicial de vendas fosse muito menor.

O volume de produtos microbianos e semioquímicos aumentou de aproximadamente 462 t em 2014 para 3.832 t em 2023. A razão entre os extremos foi 8,29, correspondente a aumento acumulado de cerca de 729%. Em termos de índice, 2014 = 100 resultou em valor próximo de 829 em 2023. O grupo químico alcançou índice aproximado de 345 na série apresentada, equivalendo a crescimento acumulado em torno de 245%. Portanto, os biológicos ganharam escala de forma acelerada, mas permaneceram menores em volume absoluto do que os fungicidas químicos.

A trajetória não foi monotônica. O painel original indicou forte aceleração do índice microbiano/semioquímico nos anos finais, com pico anterior a 2023 e posterior acomodação. Esse comportamento pode refletir variação de demanda, estoques, critérios de declaração, entrada de novos produtos e diferenças na unidade física de produtos com formulações distintas. A CAGR resume a tendência entre extremos e não deve ser interpretada como taxa constante em todos os anos.

3.2 Diversificação de ingredientes ativos

A diversidade de ingredientes ativos permaneceu baixa na primeira parte da série. Foram identificados cinco ingredientes ativos únicos em 2014, quatro por ano entre 2015 e 2018 e cinco em 2019. Em 2020 ocorreu mudança acentuada de patamar, com 53 ingredientes ativos. O total alcançou 61 em 2021, permaneceu em 61 em 2022 e chegou a 72 em 2023. A inflexão posterior a 2019 indica expansão expressiva do portfólio e também pode refletir mudanças regulatórias e documentais na organização das bases públicas.

O crescimento do número de ingredientes ativos é diferente do aumento de produtos comerciais. Diversas marcas podem compartilhar o mesmo microrganismo ou substância, e produtos com combinações de agentes podem aumentar a quantidade de registros sem ampliar na mesma proporção os modos de ação disponíveis. A contagem de ingredientes ativos únicos

empregada neste estudo buscou aproximar a diversidade biológica e funcional, reduzindo duplicação por marca. Ainda assim, linhagens diferentes de uma mesma espécie podem apresentar propriedades distintas, de modo que a diversidade taxonômica nominal subestima parte da diversidade funcional.

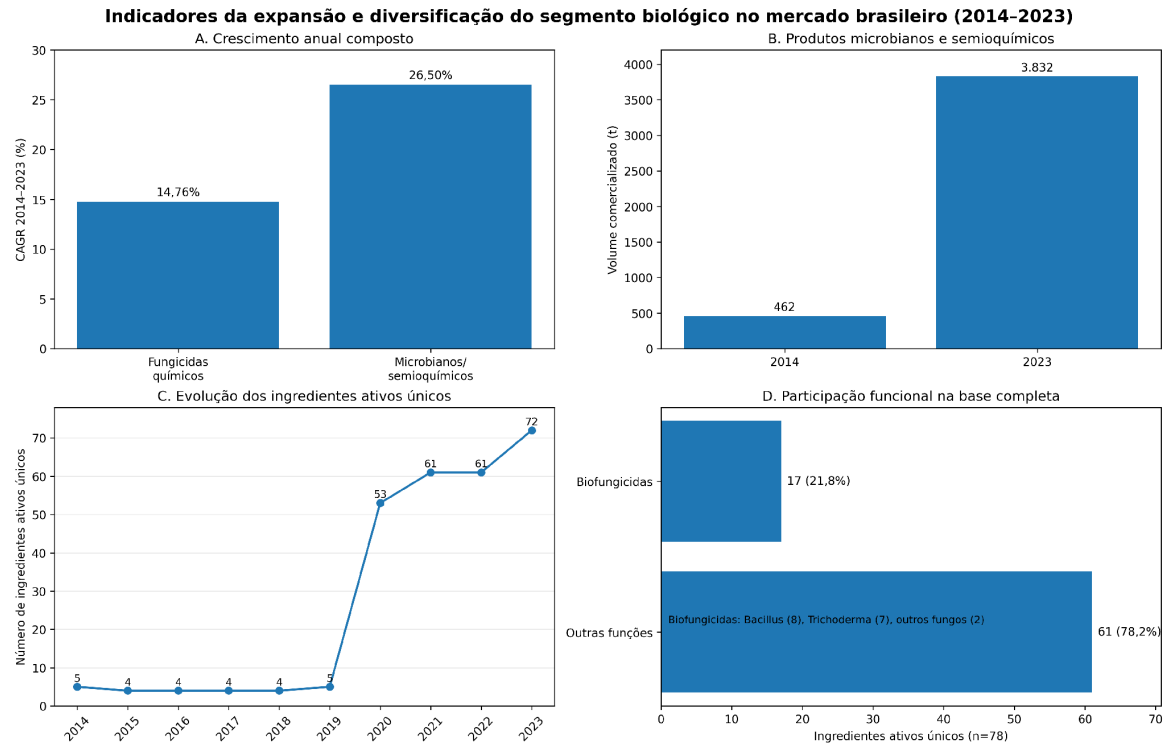
3.3 Participação dos biofungicidas no conjunto de bioinsumos fitossanitários

Na base completa padronizada para 2014–2023, foram identificados 78 ingredientes ativos únicos no conjunto microbiano e semioquímico. Desses, 17 apresentavam função biofungicida, correspondendo a 21,8% do total. Os outros 61 ingredientes ativos estavam associados a semioquímicos, agentes virais, fungos entomopatogênicos, nematicidas e outros agentes de controle biológico. O resultado demonstra que o crescimento dos bioinsumos em geral não pode ser usado como sinônimo de expansão dos biofungicidas: aproximadamente quatro quintos do portfólio pertenciam a outras finalidades.

Entre os 17 biofungicidas, oito ingredientes ativos estavam associados a *Bacillus*, sete a *Trichoderma* e dois a outros fungos — *Clonostachys rosea* e *Hirsutella thompsonii*. *Bacillus* e *Trichoderma* responderam, portanto, por 15 dos 17 ingredientes ativos biofungicidas, equivalentes a 88,2% do subconjunto. A concentração revela maturidade tecnológica dessas plataformas, mas também evidencia espaço para ampliar a diversidade taxonômica e funcional do portfólio.

A literatura de mercado brasileira complementa esse resultado ao apontar elevada participação de *Trichoderma* no número de registros comerciais de biofungicidas, enquanto *Bacillus* ocupa posição central em biofungicidas e bionematicidas. A aparente diferença entre predominância por registro e por ingrediente ativo decorre das unidades de análise: um mesmo agente pode originar diversas marcas e formulações. A interpretação adequada é que ambos os gêneros estruturam o mercado, sem que um único indicador determine liderança absoluta em todas as métricas.

Figura 2 - Indicadores da expansão e diversificação do segmento microbiano e semioquímico no mercado brasileiro entre 2014 e 2023



Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base em dados do IBAMA (2025) e do AGROFIT (BRASIL, 2025).

Nota: As contagens consideram a base completa padronizada. Dos 78 ingredientes ativos únicos identificados entre 2014 e 2023, 17 apresentavam função biofungicida, correspondendo a 21,8%.

Tabela 1 - Principais indicadores quantitativos do levantamento de mercado brasileiro, 2014-2023

Indicador	Valor observado	Interpretação
CAGR de microbianos/semioquímicos	26,50% ao ano	Expansão rápida a partir de base reduzida.
CAGR de fungicidas químicos	14,76% ao ano	Crescimento relevante, porém mais lento.
Volume microbiano/semioquímico	462 t (2014) a 3.832 t (2023)	Aumento de 8,29 vezes.
Ingredientes ativos únicos	5 em 2014; 72 em 2023	Mudança acentuada de patamar a partir de 2020.
Biofungicidas no portfólio funcional	17 de 78 (21,8%)	Subconjunto relevante, mas minoritário no portfólio de bioinsumos fitossanitários.
Composição dos biofungicidas	Bacillus: 8; Trichoderma: 7; outros fungos: 2	Concentração de 88,2% nos dois gêneros dominantes.

Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base em IBAMA (2025) e Brasil (2025).

4 DISCUSSÃO

4.1 Transição do mercado: capacidade disponível não equivale a substituição

Os resultados demonstram expansão estrutural do mercado brasileiro de proteção biológica: o segmento microbiano/semioquímico cresceu 8,3 vezes e o número de ingredientes ativos aumentou acentuadamente após 2019. O movimento é coerente com análises que descrevem o Brasil como mercado dinâmico para pesticidas microbianos, impulsionado por demanda por sustentabilidade, integração ao manejo e ambiente regulatório favorável (TOGNI et al., 2019; FISCHER et al., 2023; DE LIMA ANDREATA et al., 2025).

Essa expansão deve ser interpretada em escala correta. O segmento biológico partiu de base muito menor, enquanto o grupo químico também cresceu 14,76% ao ano. Portanto, aumento percentual de biológicos não comprova substituição equivalente de fungicidas: a mitigação depende de reduzir o número, a frequência ou a duração da exposição a compostos com potencial seletivo.

É necessário distinguir crescimento de mercado de transição de manejo. Um biofungicida adicionado sem retirar ou reposicionar tratamentos químicos pode melhorar o controle, mas pouco alterar a pressão seletiva. O indicador relevante é a fração de aplicações químicas efetivamente evitadas por programas integrados, e não apenas o volume de biológicos vendido.

4.2 Biofungicidas: manejo da pressão seletiva, não “cura” da resistência

O argumento central é ecológico: a seleção em *A. fumigatus* depende da exposição em ambientes onde o fungo cresce e se reproduz. Biofungicidas podem contribuir quando substituem tratamentos, controlam o fitopatógeno antes de sucessivas pulverizações ou permitem combinar mecanismos sem sobreposição com antifúngicos médicos.

Bacillus e *Trichoderma* são particularmente relevantes porque dominam o subconjunto de biofungicidas identificado. Em vez de depender exclusivamente de uma interação com enzima-alvo, esses agentes interferem na colonização, disponibilidade de nutrientes, integridade da parede celular e resposta da planta. Essa multiplicidade é compatível com o primeiro pilar do manejo de resistência descrito por Corkley, Fraaije e Hawkins (2022): reduzir o crescimento populacional e a necessidade de fungicidas por métodos não químicos. No contexto brasileiro, Ceresini et al. (2024) também defendem estratégias evolutivamente informadas que integrem biocontrole, resistência varietal, monitoramento e uso racional de fungicidas.

Essa vantagem não implica eficácia universal. O desempenho de biofungicidas depende do momento de aplicação, das condições ambientais, da qualidade da formulação e da compatibilidade com outros insumos. Sem recomendações regionais e qualidade assegurada, produtores podem manter o programa químico completo, anulando parte do benefício esperado (MUKHOPADHYAY; KUMAR, 2020; VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ et al., 2025).

A diversificação também não deve reproduzir dependência de poucos agentes. A concentração de 88,2% dos ingredientes ativos biofungicidas em *Bacillus* e *Trichoderma* revela maturidade tecnológica, mas a rotação de marcas baseadas em mecanismos semelhantes não constitui diversidade funcional. O portfólio deve incluir linhagens distintas, outros gêneros, consórcios validados, metabólitos, resistência varietal e manejo cultural.

4.3 Hotspots e coldspots: risco ambiental heterogêneo

A literatura mostra que a redução de pressão seletiva será mais eficiente quando direcionada a hotspots. Em uma lavoura, a aplicação foliar pode ser apenas a primeira etapa da trajetória do fungicida. Parte do composto e seus metabólitos permanece nos tecidos; depois da colheita, folhas, caules, flores, frutos descartados e outros resíduos podem ser concentrados em pilhas, compostagem ou estoques de biomassa. Se o material sustenta crescimento de *A. fumigatus* e contém resíduos em concentração seletiva, o período pós-colheita pode ser mais importante para amplificação da resistência do que a superfície da cultura durante a aplicação. Essa interpretação é sustentada pela caracterização de hotspots em resíduos orgânicos e materiais de pós-colheita (SCHOUSTRUP et al., 2019; BURKS et al., 2021; ARENDRUP et al., 2024).

Essa interpretação modifica a estratégia de mitigação. Substituir parte das aplicações por biofungicidas é relevante, mas precisa ser combinado com manejo de resíduos: separação de materiais tratados, condições de compostagem que promovam degradação adequada, redução do tempo de estocagem, monitoramento de resíduos e controle da dispersão de poeira e conídios. A avaliação conjunta de 2025 das agências europeias destacou estoques de resíduos agrícolas e madeira recém-cortada como ambientes de preocupação. O princípio é transferível ao Brasil, embora as culturas, clima e práticas locais exijam estudos específicos (EFSA et al., 2025).

O clima tropical pode produzir efeitos opostos. Temperaturas elevadas e atividade microbiana aceleram degradação de alguns compostos, mas safras sucessivas e produção contínua geram fluxo permanente de biomassa. Chuvas, irrigação e alta umidade favorecem

decomposição, ao passo que períodos secos aumentam aerodispersão de conídios e poeira. A vigilância deve ser desenhada por sistema produtivo, incluindo cana-de-açúcar, café, frutas, flores, hortaliças, grãos armazenados e compostagem. A ausência de resistência em um compartimento não permite concluir segurança em outro.

A priorização de hotspots também torna a vigilância mais viável. Amostragem aleatória de solos em grande escala pode diluir sinais e consumir recursos. Estratégias baseadas em risco podem combinar histórico de aplicações, tipo e volume de resíduo, presença de matéria orgânica, temperatura, umidade, concentração de *A. fumigatus* e detecção de resíduos. Métodos de cultivo em meios seletivos, microdiluição, sequenciamento de *cyp51A*, PCR específica para repetições em tandem e genotipagem podem ser empregados de forma escalonada. Estudos como Schoustra et al. (2019), Burks et al. (2021) e Arendrup et al. (2024) fornecem modelos para essa abordagem.

4.4 Manejo integrado: condição para a mitigação

A substituição parcial por biofungicidas deve ocorrer dentro do manejo integrado de doenças, não como troca isolada de insumos. O desempenho de um agente biológico aumenta quando o sistema reduz a pressão inicial de inóculo, utiliza sementes e mudas saudáveis, cultivares com resistência, rotação de culturas, equilíbrio nutricional, irrigação adequada e monitoramento epidemiológico. Essas medidas reduzem tamanho populacional e taxa de crescimento do fitopatógeno, diminuindo a probabilidade de epidemias que exigem tratamentos repetidos. Essa integração é coerente com os princípios de manejo de resistência propostos por Corkley, Fraaije e Hawkins (2022) e Ceresini et al. (2024).

Quando fungicidas químicos permanecem necessários, princípios de manejo de resistência devem orientar dose, momento, número de aplicações, mistura e alternância. Dose abaixo da recomendada não é automaticamente mais segura: dependendo da estrutura genética e do perfil de sensibilidade, pode manter populações expostas a concentrações seletivas. Misturas também não são solução por si mesmas; cada componente precisa ter eficácia, persistência compatível e risco conhecido. Biofungicidas podem entrar como componentes preventivos e redutores de inóculo, enquanto químicos são reservados para momentos de maior risco epidemiológico. A definição desses programas deve considerar risco intrínseco, eficácia dos componentes e intensidade de seleção (CORKLEY; FRAAIJE; HAWKINS, 2022; CERESINI et al., 2024).

A avaliação de sucesso deveria incorporar indicadores fitossanitários e sanitários. No campo, interessam severidade da doença, produtividade, retorno econômico e número de

aplicações evitadas. No ambiente, interessam resíduos de azóis, abundância de *A. fumigatus*, proporção de isolados resistentes e diversidade de genótipos. Na saúde, interessam prevalência clínica, mecanismo de resistência e ligação genômica com fontes ambientais. A integração desses níveis permitiria testar a hipótese que o presente estudo apenas sustenta teoricamente.

4.5 Regulação e qualidade: condições de efetividade

O aumento abrupto de ingredientes ativos após 2019 sugere efeito combinado de inovação e mudanças institucionais. O Programa Nacional de Bioinsumos, a expansão de empresas e o interesse de grandes grupos agrícolas contribuíram para a visibilidade do setor. O ambiente regulatório brasileiro é frequentemente descrito como mais ágil para agentes biológicos do que o de algumas jurisdições europeias, embora a rapidez de registro precise ser acompanhada por avaliação de identidade, pureza, concentração, estabilidade e eficácia (BALOG et al., 2017; DAMALAS; KOUTROUBAS, 2018; TOGNI et al., 2019).

A nova legislação brasileira de pesticidas alterou procedimentos e responsabilidades regulatórias (CIONE et al., 2024). Essas mudanças podem acelerar a disponibilização de produtos, mas também tornam importante preservar transparência e rastreabilidade. Para fins de Saúde Única, a avaliação de um novo fungicida deveria considerar não apenas toxicologia e eficácia agrônômica, mas também sobreposição de alvo com antifúngicos médicos, atividade contra fungos ambientais não alvo, persistência em biomassa e potencial de resistência cruzada. O caso ipflufenquin-olorofim demonstra que esse princípio não se limita aos azóis.

No setor biológico, qualidade inconsistente pode comprometer confiança e induzir retorno a programas químicos intensivos. Produtos com baixa viabilidade, contaminação, concentração diferente do rótulo ou estabilidade insuficiente geram falhas que são atribuídas ao controle biológico como um todo. Programas de monitoramento pós-registro, métodos padronizados de quantificação e orientação técnica são essenciais. A expansão quantitativa só se converterá em mitigação se os produtos entregarem desempenho previsível nas condições de uso. Identidade, viabilidade, estabilidade e desempenho são, portanto, dimensões centrais da qualidade de bioinsumos (O'CALLAGHAN, 2016; VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ et al., 2025).

Também é necessário diferenciar produção industrial registrada de produção própria na fazenda. Ambas podem ter papel nos sistemas produtivos, mas apresentam desafios distintos de biossegurança, identidade microbiana, contaminação e controle de qualidade. A

discussão da resistência antifúngica amplia a responsabilidade: introduzir microrganismos ou metabólitos sem caracterização não deve ser tratado como inerentemente seguro. O princípio de diversificação precisa ser acompanhado por governança baseada em evidências. A expansão do mercado brasileiro também exige governança específica para diferentes formas de produção e uso de agentes microbianos (DE LIMA ANDREATA et al., 2025).

4.6 Limitações e agenda de validação

A principal limitação é a natureza agregada dos dados. O grupo microbiano/semioquímico reúne produtos com funções e unidades de dose diferentes, enquanto toneladas não representam diretamente área tratada ou intensidade biológica. Um feromônio empregado em pequena quantidade e um produto microbiano aplicado em maior massa ocupam escalas físicas distintas. Comparações de volume são úteis para descrever tendência interna, mas não medem equivalência de tratamento.

A segunda limitação é a ausência de dados de substituição. O mercado pode crescer por adição, expansão de área agrícola ou entrada em alvos antes não tratados. Para estimar redução de pressão seletiva, seria necessário vincular vendas a culturas, regiões, calendários de aplicação e fungicidas químicos evitados. Pesquisas com produtores, receituários agrônômicos, dados de distribuição e ensaios de manejo poderiam preencher essa lacuna.

A terceira limitação é microbiológica. Não existem, no conjunto analisado, séries de prevalência de *A. fumigatus* resistente antes e depois da expansão dos biofungicidas. A confirmação da hipótese exigiria desenho longitudinal em hotspots, com quantificação de resíduos e isolamento em paralelo. A comparação entre propriedades com programas predominantemente químicos, integrados e biológicos seria informativa, desde que controlasse cultura, clima, biomassa e histórico de aplicação.

A quarta limitação envolve a classificação funcional e taxonômica dos ingredientes ativos. Linhagens, combinações, indicações de uso e nomenclatura podem mudar ao longo do tempo, exigindo atualização periódica da base e registro explícito das regras de padronização. A disponibilização do banco completo, do dicionário das variáveis e do código de análise permite reproduzir as contagens e atualizar os resultados quando novas informações forem incorporadas.

Uma agenda de pesquisa aplicada pode ser organizada em cinco frentes. A primeira é mapear hotspots brasileiros e estabelecer uma rede de aerobiologia e resíduos. A segunda é quantificar exposição a triazóis e a outros fungicidas com alvos de interesse médico. A terceira é avaliar, em ensaios de campo, quantas aplicações químicas podem ser evitadas por

programas com biofungicidas. A quarta é desenvolver indicadores de qualidade e persistência dos agentes biológicos. A quinta é integrar dados ambientais e clínicos por genômica e epidemiologia. A expansão do mercado oferece a oportunidade de realizar essa avaliação enquanto a transição ainda está em curso.

Quadro 4 - Indicadores recomendados para testar a efetividade da mitigação em estudos futuros

Dimensão	Indicadores mínimos	Pergunta respondida
Uso agrônomico	Produto, ingrediente ativo, dose, número de aplicações, cultura, área e aplicação química evitada.	Houve substituição efetiva ou apenas adição de bioinsumo?
Resíduos	Concentração e persistência de azóis em plantas, solo, composto e biomassa.	A janela de exposição seletiva foi reduzida?
Microbiologia ambiental	Abundância de <i>A. fumigatus</i> , MICs, mecanismos de resistência e genótipos.	A frequência de resistência mudou?
Desempenho fitossanitário	Severidade, produtividade, estabilidade e retorno econômico.	A estratégia é agronomicamente viável?
Saúde Única	Integração com isolados clínicos, dados de exposição e vigilância ocupacional.	Existe conexão entre fontes ambientais e casos humanos?
Fonte: elaborado pelo autor (2026).		

5 CONCLUSÕES

O mercado brasileiro apresentou expansão acelerada e diversificação expressiva de produtos microbianos e semioquímicos entre 2014 e 2023. A taxa de crescimento anual composta de 26,50%, o aumento de aproximadamente 462 para 3.832 t e a mudança de cinco ingredientes ativos únicos em 2014 para 72 em 2023 demonstram capacidade comercial crescente para ampliar o uso de soluções biológicas. Na base completa padronizada, os biofungicidas representaram 17 de 78 ingredientes ativos únicos, equivalentes a 21,8%, com forte concentração em *Bacillus* e *Trichoderma*.

Esses resultados sustentam a diversificação de biofungicidas como estratégia indireta e plausível para mitigar a seleção ambiental de resistência em *A. fumigatus*. O mecanismo esperado é a redução parcial da dependência de fungicidas sítio-específicos, associada a menor carga residual em ambientes nos quais o fungo cresce e se reproduz. A expansão do mercado, isoladamente, não comprova esse efeito e não deve ser apresentada como evidência de queda da resistência.

A contribuição sanitária dos biofungicidas dependerá de uma transição de manejo: produtos eficazes e padronizados, integração com métodos culturais e resistência varietal, redução mensurável de aplicações químicas, manejo de resíduos e vigilância de hotspots. O Brasil reúne escala agrícola, biodiversidade e mercado para liderar essa agenda, mas o benefício para a Saúde Única precisa ser demonstrado por estudos que conectem uso, resíduos, microbiologia ambiental e dados clínicos.

DECLARAÇÃO SOBRE OS DADOS

Os resultados quantitativos foram derivados da base consolidada pelos autores a partir de dados públicos de comercialização do IBAMA e de informações oficiais de registro. A base completa padronizada, o dicionário de variáveis e o script em R utilizados para produzir os indicadores e a Figura 2 são apresentados nos apêndices e acompanham a versão digital deste trabalho, permitindo reprodução e atualização das análises.

REFERÊNCIAS

- ARENDRUP, M. C.; HARE, R. K.; JØRGENSEN, K. M. et al. Environmental hot spots and resistance-associated application practices for azole-resistant *Aspergillus fumigatus*, Denmark, 2020-2023. *Emerging Infectious Diseases*, v. 30, n. 8, p. 1531-1541, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3201/eid3008.240096>.
- AWAL, M. A.; ABDULLAH, N. S.; PRISMANTORO, D. et al. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against *Fusarium* in horticultural crops. *Cogent Food & Agriculture*, v. 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2394685>.
- BALOG, A.; HARTEL, T.; LOXDALE, H. D.; WILSON, K. Differences in the progress of the biopesticide revolution between the EU and other major crop-growing regions. *Pest Management Science*, v. 73, n. 11, p. 2203-2208, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.4596>.
- BARBER, A. E.; RIEDEL, J.; SAE-ONG, T. et al. Effects of agricultural fungicide use on *Aspergillus fumigatus* abundance, antifungal susceptibility, and population structure. *mBio*, v. 11, e02213-20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1128/mBio.02213-20>.
- BASTOS, R. W.; ROSSATO, L.; GOLDMAN, G. H.; SANTOS, D. A. Fungicide effects on human fungal pathogens: cross-resistance to medical drugs and beyond. *PLOS Pathogens*, v. 17, n. 12, e1010073, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1010073>.
- BERGER, S.; EL CHAZLI, Y.; BABU, A. F.; COSTE, A. T. Azole resistance in *Aspergillus fumigatus*: a consequence of antifungal use in agriculture? *Frontiers in Microbiology*, v. 8, 1024, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01024>.
- BOTTERY, M. J.; VAN RHIJN, N.; CHOWN, H. et al. Elevated mutation rates in multi-azole resistant *Aspergillus fumigatus* drive rapid evolution of antifungal resistance. *Nature Communications*, v. 15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54568-5>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. AGROFIT: Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: <https://agrofit.agricultura.gov.br/>. Acesso em: 3 ago. 2026.
- BURI, M. S. C.; CASTRO-RÍOS, K.; CRUZ, A. D. R.; CLAUDIO, T. M.; CERESINI, P. C. A One Health perspective on *Aspergillus fumigatus* in Brazilian dry foods: high genetic diversity and azole susceptibility. *Journal of Fungi*, v. 12, n. 1, 72, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof12010072>.
- BURKS, C.; DARBY, A.; GÓMEZ LONDOÑO, L.; MOMANY, M.; BREWER, M. T. Azole-resistant *Aspergillus fumigatus* in the environment: identifying key reservoirs and hotspots of antifungal resistance. *PLOS Pathogens*, v. 17, n. 7, e1009711, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1009711>.
- CERESINI, P. C.; SILVA, T. C.; VICENTINI, S. N. C. et al. Strategies for managing fungicide resistance in the Brazilian tropical agroecosystem: safeguarding food safety, health, and the environmental quality. *Tropical Plant Pathology*, v. 49, p. 36-70, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40858-023-00632-2>.
- CIONE, A.; SANTOS, G. S.; DEL GIUDICE PANIAGO, M.; SALES, M.; CASALLANOVO, F. A new regulatory paradigm for pesticide registration in Brazil: comments on recent legislative amendments (Law 14.785/2023). *Integrated*

- Environmental Assessment and Management, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.4923>.
- CORKLEY, I.; FRAAIJE, B.; HAWKINS, N. Fungicide resistance management: maximizing the effective life of plant protection products. *Plant Pathology*, v. 71, n. 1, p. 150-169, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppa.13467>.
- DAMALAS, C. A.; KOUTROUBAS, S. D. Current status and recent developments in biopesticide use. *Agriculture*, v. 8, n. 1, 13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture8010013>.
- DE LIMA ANDREATA, M. F.; MIAN, S.; ANDRADE, G. et al. The current increase and future perspectives of the microbial pesticides market in agriculture: the Brazilian example. *Frontiers in Microbiology*, v. 16, 1574269, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1574269>.
- EFSA; ECDC; ECHA; EEA; EMA; JRC. Impact of the use of azole fungicides, other than as human medicines, on the development of azole-resistant *Aspergillus* spp. *EFSA Journal*, v. 23, n. 1, e9200, 2025. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9200>.
- FISCHER, H.; DE ALMEIDA, J. E. M.; LIMBERGER, C. et al. The rise of bioinputs in the Brazilian agri-industry: trends, cases and hurdles. *Outlooks on Pest Management*, v. 34, 2023. DOI: https://doi.org/10.1564/v34_jun_04.
- FISHER, M. C.; ALASTRUEY-IZQUIERDO, A.; BERMAN, J. et al. Tackling the emerging threat of antifungal resistance to human health. *Nature Reviews Microbiology*, v. 20, p. 557-571, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00720-1>.
- GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S. et al. *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases - a review. *Plants*, v. 12, n. 3, 432, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030432>.
- IBAMA. Relatórios de comercialização de agrotóxicos e afins no Brasil: séries anuais 2014-2023. Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2025.
- KAIRATKYZY, K.; ARYSTANOVA, Sh. E. Mechanisms of action of microbial biopesticides (*Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas*). *Biological Sciences of Kazakhstan*, n. 4, p. 36-44, 2025. DOI: <https://doi.org/10.52301/1684-940X-2025-4-36-44>.
- MACIAG, T.; KOZIEŁ, E.; RUSIN, P.; OTULAK-KOZIEŁ, K.; JAFRA, S.; CZAJKOWSKI, R. Microbial consortia for plant protection against diseases: more than the sum of its parts. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 24, n. 15, 12227, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241512227>.
- MANZAR, N.; KASHYAP, A. S.; GOUTAM, R. S. et al. *Trichoderma*: advent of versatile biocontrol agent, its secrets and insights into mechanism of biocontrol potential. *Sustainability*, v. 14, 12786, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912786>.
- MUKHOPADHYAY, R.; KUMAR, D. *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 30, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00333-x>.
- O'CALLAGHAN, M. Microbial inoculation of seed for improved crop performance: issues and opportunities. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 100, p. 5729-5746, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7590-9>.

- OYESOLA, O. L.; KINGE, R. T.; OBEMBE, O. O. *Trichoderma*: a review of its mechanisms of action in plant sustainable disease control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1492, 012008, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1492/1/012008>.
- POVEDA, J.; EUGUI, D. Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria (mainly *Bacillus* and *Pseudomonas*): development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. Biological Control, v. 176, 105100, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105100>.
- PRABHU, S.; POORNIAMMAL, R.; DUFOSSÉ, L. Microbial metabolites: a sustainable approach to combat plant pests. Metabolites, v. 15, n. 6, 418, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/metabo15060418>.
- RODRIGUES, A. O.; DE MIO, L. L. M.; SOCCOL, C. R. *Trichoderma* as a powerful fungal disease control agent for a more sustainable and healthy agriculture: recent studies and molecular insights. Planta, v. 257, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04053-4>.
- SCHOUSTRA, S. E.; DEBETS, A. J. M.; RIJS, A. J. M. M. et al. Environmental hotspots for azole resistance selection of *Aspergillus fumigatus*, the Netherlands. Emerging Infectious Diseases, v. 25, n. 7, p. 1347-1353, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3201/eid2507.181625>.
- TOGNI, P. H. B.; VENZON, M.; LAGÔA, A. C. G.; SUJII, E. R. Brazilian legislation leaning towards fast registration of biological control agents to benefit organic agriculture. Neotropical Entomology, v. 48, p. 175-185, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13744-019-00675-8>.
- VAN RHIJN, N.; STORER, I. S.; BIRCH, M. et al. *Aspergillus fumigatus* strains that evolve resistance to the agrochemical fungicide ipflufenquin in vitro are also resistant to olorofim. Nature Microbiology, v. 9, p. 29-34, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01542-4>.
- VERWEIJ, P. E.; CHOWDHARY, A.; MELCHERS, W. J. G.; MEIS, J. F. Azole resistance in *Aspergillus fumigatus*: a side-effect of environmental fungicide use? The Lancet Infectious Diseases, v. 9, p. 789-795, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(09\)70265-8](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(09)70265-8).
- VERWEIJ, P. E.; LUCAS, J. A.; ARENDRUP, M. C. et al. The One Health problem of azole resistance in *Aspergillus fumigatus*: current insights and future research agenda. Fungal Biology Reviews, v. 34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2020.10.003>.
- VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ, M.; ESPINOZA-LOZANO, F.; ESPINOZA-LOZANO, L.; CORONEL-LEÓN, J. Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. Frontiers in Agronomy, v. 7, 1578915, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915>.

APÊNDICE A - BASE DE DADOS E SÍNTESE DAS VARIÁVEIS ANALISADAS

A base completa empregada no estudo foi construída a partir das séries públicas utilizadas no levantamento de mercado e contém registros anuais de produtos químicos, microbianos e semioquímicos. Para as análises apresentadas no TCC, foram selecionados os anos de 2014 a 2023. Registros sem identificação do ingrediente ativo foram excluídos das contagens de diversidade, e a variante ortográfica *Bacillus linheninformis* foi padronizada como *Bacillus licheniformis*. O arquivo completo em formato CSV acompanha a versão digital do trabalho.

Quadro A1 - Campos e regras empregados na construção da base analítica

Campo ou regra	Descrição
Ano	Ano de referência da comercialização ou do registro, limitado a 2014–2023.
Tipo de produto	Classificação ampla entre produtos químicos e produtos microbianos/semioquímicos.
Categoria padronizada	Função agronômica principal indicada na base, incluindo fungicida, fungicida/bactericida, inseticida, nematicida, semioquímico e outras.
Ingrediente ativo	Denominação padronizada do agente ou substância; valores ausentes foram excluídos das contagens de diversidade.
Volume comercializado	Vendas anuais de ingredientes ativos formulados, expressas em toneladas.
Ingrediente ativo único	Cada denominação padronizada foi contabilizada uma vez, independentemente do número de marcas comerciais.
Biofungicida	Ingrediente ativo com indicação explícita de controle de doença ou fitopatógeno fúngico.
Padronização taxonômica	A variante <i>Bacillus linheninformis</i> foi reunida a <i>Bacillus licheniformis</i> .

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Tabela A1 - Série anual dos indicadores empregados na análise de mercado, 2014–2023

Ano	Microbianos/semioquímicos (t)	Fungicidas químicos (t)	Ingredientes ativos únicos
2014	462,08	48.568,63	5
2015	191,61	56.109,81	4
2016	186,34	74.248,12	4
2017	196,98	76.150,90	4
2018	334,05	92.955,55	4
2019	496,95	115.268,17	5
2020	604,19	153.310,95	53
2021	1.361,54	174.374,19	61
2022	4.731,91	163.028,31	61
2023	3.831,83	167.713,02	72

Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base em IBAMA (2025) e Brasil (2025).

Tabela A2 - Ingredientes ativos classificados como biofungicidas na base completa, 2014–2023

Grupo	Ingrediente ativo
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus firmus</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus licheniformis</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus methylotrophicus</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus paralicheniformis</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus pumilus</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus velezensis</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma afroharzianum</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma asperellum</i>

Grupo	Ingrediente ativo
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma harzianum</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma koningiopsis</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma reesei</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma stromaticum</i>
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma viride</i>
Outros fungos	<i>Clonostachys rosea</i>
Outros fungos	<i>Hirsutella thompsonii</i>

Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base na classificação funcional da base completa.

Os arquivos digitais vinculados a este apêndice são: (i)
 Base_bioinsumos_2014_2023_padronizada.csv; e (ii)
 Analise_mercado_bioinsumos_base_completa.R. A base permite reproduzir os totais anuais e
 a composição funcional; o script documenta os filtros, os cálculos e a geração da Figura 2.

APÊNDICE B - SCRIPT EM R UTILIZADO NAS ANÁLISES

O código abaixo documenta o processamento da base completa, os cálculos dos indicadores, a classificação funcional e a geração do painel gráfico. O arquivo editável acompanha a versão digital do TCC.

```
# =====
# ANÁLISE DO MERCADO BRASILEIRO DE PRODUTOS MICROBIANOS E SEMIOQUÍMICOS
# Período: 2014-2023 | Base completa padronizada
# =====

library(tidyverse)
library(patchwork)
library(scales)

arquivo <- "Base_bioinsumos_2014_2023_padronizada.csv"
dados <- read_csv(arquivo, show_col_types = FALSE)

# 1. Seleção do período e padronização das variáveis -----
dados <- dados %>%
  transmute(
    Ano = as.integer(Year),
    Tipo_produto = Global_category,
    Categoria = Standardized_Category,
    Grupo_FRAC_IRAC = FRAC_IRAC_Group,
    Ingrediente_ativo = na_if(Translated_Active_Ingredient, "NA"),
    Vendas_t = as.numeric(Sales_of_formulated_AIs_tonnes)
  ) %>%
  filter(Ano >= 2014, Ano <= 2023) %>%
  mutate(
    Ingrediente_ativo = recode(
      Ingrediente_ativo,
      "Bacillus_línheninformis" = "Bacillus_licheniformis"
    ),
    Grupo_comparativo = case_when(
      Tipo_produto == "Microbial_and_Semiochemical" ~ "Microbianos/semioquímicos",
      Tipo_produto == "Chemical" & Categoria == "Fungicide" ~ "Fungicidas químicos",
      TRUE ~ "Outros"
    )
  )

# 2. Vendas anuais, índice de crescimento e CAGR -----
vendas_anuais <- dados %>%
  filter(Grupo_comparativo %in% c("Microbianos/semioquímicos", "Fungicidas químicos")) %>%
  group_by(Ano, Grupo_comparativo) %>%
  summarise(Vendas_totais_t = sum(Vendas_t, na.rm = TRUE), .groups = "drop")

vendas_indexadas <- vendas_anuais %>%
  group_by(Grupo_comparativo) %>%
  arrange(Ano) %>%
  mutate(
    Vendas_2014 = Vendas_totais_t[Ano == 2014],
    Indice_2014_100 = 100 * Vendas_totais_t / Vendas_2014
  ) %>%
  ungroup()

cagr <- vendas_anuais %>%
  filter(Ano %in% c(2014, 2023)) %>%
  pivot_wider(names_from = Ano, values_from = Vendas_totais_t, names_prefix = "V_") %>%
  mutate(CAGR = (V_2023 / V_2014)^(1/9) - 1)

# 3. Diversidade anual de ingredientes ativos -----
diversidade_anual <- dados %>%
  filter(Tipo_produto == "Microbial_and_Semiochemical") %>%
  group_by(Ano) %>%
  summarise(
    Ingredientes_ativos_unicos = n_distinct(Ingrediente_ativo, na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  )

# 4. Base completa de ingredientes ativos e classificação funcional -----
base_ingredientes <- dados %>%
  filter(Tipo_produto == "Microbial_and_Semiochemical", !is.na(Ingrediente_ativo)) %>%
  group_by(Ingrediente_ativo) %>%
  summarise(
    Categorias = paste(sort(unique(Categoria)), collapse = "; "),
    Grupo_FRAC_IRAC = paste(sort(unique(Grupo_FRAC_IRAC)), collapse = "; ")
  )
```

```

    Funcao = if_else(any(str_detect(Categoria, "Fungicide")),
                     "Biofungicida", "Outras funções"),
    .groups = "drop"
  ) %>%
  mutate(
    Base_taxonomica = case_when(
      str_detect(str_to_lower(Ingrediente_ativo), "bacillus") ~ "Bacillus",
      str_detect(str_to_lower(Ingrediente_ativo), "trichoderma") ~ "Trichoderma",
      str_detect(str_to_lower(Ingrediente_ativo), "clonostachys|hirsutella") ~ "Outros fungos
biofungicidas",
      str_detect(Categorias, "Semiochemical") ~ "Semioquímicos",
      str_detect(str_to_lower(Ingrediente_ativo), "virus") ~ "Agentes virais",
      str_detect(str_to_lower(Ingrediente_ativo), "beauveria") ~ "Beauveria",
      str_detect(str_to_lower(Ingrediente_ativo), "metarhizium") ~ "Metarhizium",
      TRUE ~ "Outros agentes microbianos/biológicos"
    )
  )

participacao_funcional <- base_ingredientes %>%
  count(Funcao, name = "n") %>%
  mutate(percentual = 100 * n / sum(n))

composicao_biofungicidas <- base_ingredientes %>%
  filter(Funcao == "Biofungicida") %>%
  count(Base_taxonomica, name = "n") %>%
  arrange(desc(n))

# 5. Resultados principais -----
print(cagr)
print(diversidade_anual)
print(participacao_funcional)
print(composicao_biofungicidas)

# 6. Paineis gráficos -----
p1 <- cagr %>%
  ggplot(aes(Grupo_comparativo, 100 * CAGR)) +
  geom_col() +
  geom_text(aes(label = percent(CAGR, accuracy = 0.01)), vjust = -0.4) +
  labs(title = "A. Crescimento anual composto", x = NULL,
       y = "CAGR 2014-2023 (%)") +
  ylim(0, 30) +
  theme_minimal(base_size = 12)

p2 <- vendas_anuais %>%
  filter(Grupo_comparativo == "Microbianos/semioquímicos", Ano %in% c(2014, 2023)) %>%
  ggplot(aes(factor(Ano), Vendas_totais_t)) +
  geom_col() +
  geom_text(aes(label = number(Vendas_totais_t, accuracy = 1,
                              big.mark = ".", decimal.mark = ",")), vjust = -0.4) +
  labs(title = "B. Produtos microbianos e semioquímicos", x = NULL,
       y = "Volume comercializado (t)") +
  ylim(0, 4200) +
  theme_minimal(base_size = 12)

p3 <- diversidade_anual %>%
  ggplot(aes(Ano, Ingredientes_ativos_unicos)) +
  geom_line(linewidth = 1) +
  geom_point(size = 2.5) +
  geom_text(aes(label = Ingredientes_ativos_unicos), vjust = -0.7) +
  scale_x_continuous(breaks = 2014:2023) +
  labs(title = "C. Evolução dos ingredientes ativos únicos", x = NULL,
       y = "Número de ingredientes ativos únicos") +
  theme_minimal(base_size = 12) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))

p4 <- participacao_funcional %>%
  ggplot(aes(reorder(Funcao, n), n)) +
  geom_col() +
  geom_text(aes(label = paste0(n, " (", number(percentual, accuracy = 0.1,
                              decimal.mark = ","), "%)")),
            hjust = -0.05) +
  coord_flip() +
  labs(title = "D. Participação funcional na base completa", x = NULL,
       y = paste0("Ingredientes ativos únicos (n=", nrow(base_ingredientes), ")")) +
  expand_limits(y = max(participacao_funcional$n) * 1.15) +
  theme_minimal(base_size = 12)

painel <- (p1 | p2) / (p3 | p4) +
  plot_annotation(
    title = "Indicadores da expansão e diversificação do segmento biológico no mercado brasileiro
(2014-2023)"
  )

```

```

ggsave("figura2_mercado_base_completa.png", painel,
       width = 14, height = 9, dpi = 300, bg = "white")
ggsave("figura2_mercado_base_completa.pdf", painel,
       width = 14, height = 9, device = cairo_pdf, bg = "white")

# 7. Exportação das tabelas de apoio -----
write_csv(diversidade_anual, "diversidade_anual_2014_2023.csv")
write_csv(base_ingredientes, "classificacao_funcional_base_completa.csv")
write_csv(vendas_anuais, "vendas_anuais_grupos_comparativos.csv")
writeLines(capture.output(sessionInfo()), "sessionInfo.txt")

```