

AVANÇOS NO CONTROLE MICROBIANO COM O USO DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.6031225230514>

Data de submissão: 17/07/2025

Data de aceite: 22/07/2025

Mateus Correia Lima

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/0729944080647671>

Naiane Franciele Barreira de Melo

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/5700555888530272>

Claudio Roberto Cutrim Carvalho

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/1525302200040895>

Lizandra Maria Maciel Siqueira

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém - PA
<http://lattes.cnpq.br/1873978142719959>

Nayarley Sabá Castelo Branco

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém - PA
<http://lattes.cnpq.br/3562042676368745>

Thalia Maria de Sousa Dias Castro

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias

Belém - PA

<http://lattes.cnpq.br/1297850445240834>

Ivy Laura Siqueira Saliba Machado

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<https://orcid.org/0000-0001-6732-4112>

Telma Fátima Vieira Batista

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<https://orcid.org/0000-0001-6638-4578>

RESUMO: Os fungos entomopatogênicos são microrganismos que atuam como controladores de populações de insetos, com grande potencial para o manejo biológico de pragas na agricultura. Pertencentes a diversos filos, como Ascomycota e Entomophthoromycota, os gêneros *Beauveria* spp., *Metarhizium* spp., *Isaria* spp. e *Lecanicillium* spp. são os mais estudados, destacando-se por sua versatilidade e capacidade de adaptação a diferentes ambientes. Esses fungos são influenciados por fatores como pH, umidade, matéria orgânica e práticas agrícolas, podendo atuar também como

endófitos, onde promovem o crescimento vegetal e resistência a doenças. Pesquisas genômicas têm contribuído para o aprimoramento de cepas mais eficientes. A diversidade dos FEP's é maior em áreas de vegetação nativa, sendo negativamente afetada por práticas agrícolas intensivas. O processo de infecção dos FEP envolve a adesão dos esporos à cutícula do inseto, penetração com uso de enzimas e estruturas especializadas, proliferação no interior do hospedeiro e posterior esporulação. Esse mecanismo é o que garante sua eficácia como bioinseticidas. O mercado global de biopesticidas, que inclui os FEP's, está em expansão, impulsionado pela demanda por soluções sustentáveis. Empresas vêm investindo em pesquisa e produção, inclusive com uso de biorreatores e fermentações sólidas, líquidas e bifásicas, além disso, os FEP's têm aplicações industriais, como produção de enzimas. Tecnologias emergentes como IoT, robótica, inteligência artificial e biomateriais estão transformando a forma como esses fungos são produzidos, monitorados e aplicados. Armadilhas inteligentes, sensores fúngicos e dispositivos impressos em 3D com fungos mostram novas possibilidades para a agricultura de precisão. Automação laboratorial e engenharia genética também aceleram o desenvolvimento de novas cepas mais eficazes. Os FEP's são promissores para uma agricultura mais sustentável, aliando eficácia no controle de pragas à redução de impactos ambientais. Seu uso depende do avanço tecnológico, produção de qualidade, aceitação dos agricultores e políticas públicas de incentivo. A integração entre ciência, tecnologia e práticas agrícolas sustentáveis é essencial para consolidar os FEP's como ferramentas-chave importante na agricultura moderna e do futuro presente.

PALAVRAS CHAVE: Biocontrole, Sustentabilidade, Inovação tecnológica.

ADVANCES IN MICROBIAL CONTROL WITH THE USE OF ENTOMOPATHOGENIC FUNGI

ABSTRACT: Entomopathogenic fungi are microorganisms that act as controllers of insect populations, with great potential for the biological management of pests in agriculture. Belonging to several phyla, such as Ascomycota and Entomophthoromycota, the genera *Beauveria* spp., *Metarhizium* spp., *Isaria* spp. and *Lecanicillium* spp. are the most studied, standing out for their versatility and ability to adapt to different environments. These fungi are influenced by factors such as pH, humidity, organic matter and agricultural practices, and can also act as endophytes, where they promote plant growth and resistance to diseases. Genomic research has contributed to the improvement of more efficient strains. The diversity of FEP's is greater in areas of native vegetation, being negatively affected by intensive agricultural practices. The PEF infection process involves the adhesion of spores to the insect's cuticle, penetration with the use of enzymes and specialized structures, proliferation inside the host and subsequent sporulation. This mechanism is what guarantees their effectiveness as bioinsecticides. The global biopesticide market, which includes FEP's, is expanding, driven by the demand for sustainable solutions. Companies have been investing in research and production, including the use of bioreactors and solid, liquid and biphasic fermentations, in addition, FEP's have industrial applications, such as enzyme production. Emerging technologies such as IoT, robotics, artificial intelligence and biomaterials are transforming the way these fungi are produced, monitored and applied. Smart traps, fungal sensors and 3D printed devices with fungi show new possibilities for precision agriculture. Laboratory automation and genetic engineering also accelerate the development of new, more effective strains. FEP's are

promising for more sustainable agriculture, combining effectiveness in pest control with the reduction of environmental impacts. Its use depends on technological advancement, quality production, acceptance of farmers and public incentive policies. The integration between science, technology and sustainable agricultural practices is essential to consolidate the FEP's as important key tools in modern and future-present agriculture.

KEYWORDS: Biocontrol, Sustainability, Technological innovation.

INTRODUÇÃO

Os fungos entomopatogênicos são compostos por um grupo de microrganismos com papel importante na dinâmica das populações de insetos, atuando como agentes reguladores e sendo encontrados em diferentes ambientes. A capacidade desses microrganismos de parasitar e eliminar insetos credenciam seu uso estratégico no controle microbiano de pragas agrícolas (Humber, 2008).

A diversidade desses fungos pertence à diversos filos, como Ascomycota, Basidiomycota e Entomophthoromycota. Os gêneros como *Beauveria* spp., *Metarhizium* spp., *Isaria* spp. e *Lecanicillium* spp. são os mais estudados devido a sua variabilidade de hospedeiros e aplicação em programas de manejo integrado (Vega, 2018), nos sistemas agrícolas mundiais.

Os fatores como teores de pH, textura, matéria orgânica e alguns processos agrícolas influenciam a ocorrência e a distribuição desses organismos no solo. Ambientes com pH moderado e presença da matéria orgânica tendem a favorecer esses fungos. Por outro lado, altos índices de umidade podem restringir a presença (Alves et al., 2020).

Os fungos não agem de forma isolada, eles podem interagir com a biota do solo e também podem colonizar tecidos vegetais como endófitos. Espécies como *Metarhizium anisopliae* e *Beauveria bassiana* podem formar simbioses com plantas, estimulando o crescimento vegetal, e facilitar o aumento da resistência a fitopatógenos (Vega, 2018). Essa capacidade amplia sua aplicabilidade em contextos agrícolas sustentáveis.

Pesquisas em genômica e transcriptômica vêm identificando genes ligados à virulência, adaptação ao ambiente e desenvolvimento do ciclo de vida. Esses fatores têm propiciado a seleção e modificação de cepas mais eficientes e estáveis em condições naturais (Fang et al., 2021).

Para que os fungos destinados ao controle biológico tenham sucesso, fatores como habilidade de se estabelecer e resistir no ambiente tornam-se importantes. As características de adaptação ecológica e interação com a microbiota do solo são importantes, pois são influenciadas diretamente por condições como tipo de solo, disponibilidade de hospedeiros e manejo agrícola (Fernandes et al., 2015).

O entendimento da diversidade e da ecologia desses microrganismos deve ser abordado de forma multidisciplinar, interconectando o conhecimento de genética, biologia molecular, novas tecnologias e ecossistemas, para resultar em efeitos práticos de conservação ambiental e avanço da agricultura.

PRÁTICAS AGRÍCOLAS X DIVERSIDADE E ECOLOGIA DOS FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS

A composição e diversidade dos fungos entomopatogênicos nos ecossistemas são influenciadas por variáveis ambientais e pelos métodos de cultivo utilizados nas atividades agrícolas. As comparações dos sistemas de uso da terra indicam que áreas de vegetação nativa preservada apresentam maior diversidade desses microrganismos em relação a áreas agrícolas intensamente cultivadas, como por exemplo, as de plantio de eucalipto e soja (Mussi-Dias et al., 2020).

As práticas agrícolas convencionais, com uso intensivo de agrotóxicos, podem inibir o desenvolvimento e a permanência desses fungos no solo. Por outro lado, sistemas agroflorestais e técnicas de cultivo sustentáveis possuem efeito positivo na manutenção e diversificação (Silva, 2024). Desse modo, a escolha da forma de produção agrícola tem impacto direto sobre a presença e funcionalidade dos fungos entomopatogênicos.

As ferramentas modernas como a genômica funcional e a transcriptômica têm permitido encontrar aspectos da biologia desses fungos. Esses estudos vêm revelando genes que controlam processos como adaptação a estresses do ambiente, virulência e o ciclo de vida dos fungos, oferecendo conhecimento para a criação de cepas mais eficientes para uso em campo (Fang et al., 2021).

A capacidade de colonizar e se adaptar sobre diversos tipos de ambientes permitem o sucesso desses microrganismos como agentes de controle biológico. Essa permanência depende principalmente de sua plasticidade ecológica e das relações que mantêm com organismos do solo e da rizosfera (Fernandes et al., 2015).

Para compreender plenamente o papel ecológico dos fungos entomopatogênicos e explorar todo seu potencial como bioinseticidas, é necessário combinar conhecimentos que vão desde a genética molecular até a ecologia de biomas agrícolas. Essa visão é importante para potencializar o controle de pragas, mas também para estimular uma agricultura ambientalmente equilibrada.

MECANISMOS DE INFECÇÃO DOS FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS

O processo infeccioso dos fungos entomopatogênicos envolve uma série de etapas que resultam na eliminação do inseto hospedeiro (Faria; Wraight, 2007; Agroego, 2023). Entre os fungos mais estudados para tal finalidade, estão *M. anisopliae* e *B. bassiana*, que são utilizados no controle biológico devido sua eficiência em infectar e colonizar insetos, levando a sua morte (Corteva, 2022).

O primeiro passo do processo infeccioso consiste na adesão dos conídios à cutícula do inseto. Essa adesão é facilitada por interações hidrofóbicas e por proteínas presentes na superfície dos esporos, que reconhecem as estruturas da epicutícula do hospedeiro (Ortiz-Urquiza & Keyhani, 2013). Após fixarem-se ao corpo do inseto, os conídios germinam e formam estruturas chamadas tubos germinativos. Estes tubos penetram na cutícula usando uma combinação de força mecânica e degradação enzimática (Arruda, 2005)

Os fungos produzem enzimas hidrolíticas como proteases, quitinases e lipases durante o processo de penetração, que degradam a barreira cuticular do inseto. Outras estruturas especializadas como os apressórios geram pressão física para facilitar a penetração (St. Leger et al., 1996).

Os fungos se multiplicam no hemocele após acessar internamente o inseto, invadindo os tecidos e comprometendo o sistema imunológico do hospedeiro. A ação combinada do crescimento das hifas e da liberação de toxinas causa danos irreversíveis, causando a morte do inseto num intervalo que pode variar de 3 a 14 dias em média, dependendo da espécie infectada e das condições ambientais (Fang et al., 2005).

A esporulação inicia após a morte do hospedeiro, esta etapa torna-se importante para a propagação e continuidade do ciclo de infecção. A formação de novos conídios serve para disseminação no ambiente, e são influenciadas por fatores externos como umidade e temperatura (Goettel & Inglesfield, 1992).

Esse mecanismo aprimorado de infecção é o que torna os fungos entomopatogênicos tão importantes como ferramentas de manejo sustentável de pragas. O entendimento dessas etapas tem sido úteis para o melhoramento de bioinseticidas e o desenvolvimento de formulações mais eficientes.

MERCADO DOS FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS E BIOPESTICIDAS

O mercado global de biopesticidas que incluem os fungos entomopatogênicos como *B. bassiana* e *M. anisopliae* tem tido um crescimento acelerado nas últimas décadas. Em 2023 esse mercado foi estimado em cerca de US\$ 7,75 bilhões e a projeção é que atinja US\$ 25,82 bilhões até 2032, resultando em uma média de crescimento anual de 14,07% (SNS Insider, 2025).

Esse avanço resulta de vários fatores como o aumento da demanda por práticas agrícolas mais limpas e sustentáveis, o crescimento da agricultura orgânica e a severidade das leis sobre o uso de pesticidas sintéticos (Silva e tal., 2022). Esta conscientização dos consumidores em relação aos impactos dos agroquímicos também tem ajudado o uso de alternativas biológicas (Fortune Business Insights, 2025).

Os fungos entomopatogênicos se destacam por seu sucesso no combate contra pragas que já desenvolveram resistência a inseticidas convencionais. Estudos apontam que o uso desses agentes pode contribuir de forma importante para a redução das perdas agrícolas causadas por insetos que representam cerca de 10,8% da produção agrícola mundial (Kumar et al., 2023).

Empresas do setor agroindustrial têm ampliado seus investimentos em pesquisa e desenvolvimento de soluções baseadas em FEP. Um exemplo é a empresa Bayer AG, que vem fortalecendo seu portfólio de proteção biológica de cultivos com novos produtos que combinam produtividade e sustentabilidade ambiental (SNS Insider, 2025).

O uso de defensivos agrícolas químicos no Brasil ainda é elevado. Em 2021 foram aplicadas aproximadamente 720 mil toneladas de ingredientes ativos no país (FAO, 2023). Os biopesticidas surgem como uma opção estratégica para reduzir a dependência dos produtos químicos e estimular uma agricultura mais equilibrada ecologicamente.

Os fungos entomopatogênicos representam solução técnica moderna para o controle de pragas e também oportunidade econômica alinhada com as demandas de um mercado global cada vez mais voltado para o ecológico.

PRODUÇÃO INDUSTRIAL DOS FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS

A produção em escala industrial dos fungos entomopatogênicos como *B. bassiana* e *M. anisopliae* é uma etapa importante para o desenvolvimento de bioinseticidas eficientes e com menos custos. Diversos métodos de fermentação têm sido melhorados para maximizar o rendimento e a qualidade dos esporos.

A fermentação em estado sólido (FES) utiliza substratos agroindustriais como arroz, farelo de trigo ou bagaço de cana para o cultivo dos fungos. Essa abordagem é simples, de baixo custo e eficiente na produção de conídios viáveis. Esta abordagem também pode ser sustentável, pois aproveita resíduos agrícolas (Alves & Pereira, 1998; Vicente, 2021).

A fermentação submersa (FSub) que utiliza meio líquido agitado permite um controle mais rigoroso dos parâmetros de cultivo, como pH, oxigenação e temperatura. Essa técnica é mais indicada para a obtenção de blastosporos que possuem germinação acelerada e são destinadas muitas vezes para aplicações em ambientes com alta umidade (Capalbo et al., 1999).

Ao unir os métodos de fermentação sólida e submersa temos o sistema bifásico, que aproveita as vantagens de ambos para melhorar a produção de esporos. Nesse caso o crescimento inicial ocorre em meio líquido e depois o material é transferido para substratos sólidos para induzir a esporulação. Essa estratégia associa as vantagens de ambas as técnicas com objetivo de aumentar a produtividade de esporos (Mascarin & Jaronski, 2016).

O aumento de escala de produção envolve diversas etapas como, por exemplo, a escolha de linhagens com alta virulência até a formulação do produto final. Primeiro, temos a otimização das condições de cultivo em pequena escala para depois ampliar para biorreatores maiores. O uso de modelagem de mecânica dos fluidos e simulação em biorreatores tem sido útil para prever e controlar o comportamento dos fungos em diferentes condições operacionais (Souza, 2015).

Os fungos também podem servir para a produção de enzimas. Um exemplo é a produção de lipases por *M. anisopliae*, que podem ser utilizadas na fabricação de biodiesel e na síntese de compostos bioativos (McNeil, 2007).

A biotecnologia aplicada aos fungos entomopatogênicos tem evoluído não apenas para atender às exigências do setor agrícola, mas também para explorar seu potencial em mercados industriais e ampliando sua aplicabilidade.

INTERNET DAS COISAS

As novas tecnologias, como a Internet das Coisas (IoT), tem melhorado o controle biológico. A inteligência artificial e robótica tem modificado a forma como fungos entomopatogênicos são pesquisados, monitorados e aplicados no campo.

Os sistemas de tecnologias em IoT vêm sendo utilizados para detectar a presença de pragas com precisão e em tempo real, permitindo a aplicação estratégica dos FEP. Um exemplo é a armadilha inteligente, desenvolvida por Figueiredo et al. (2020), equipada com visão computacional capaz de identificar automaticamente insetos em lavouras de café, otimizando o uso de fungos no controle biológico e reduzindo a dependência de pesticidas convencionais.

Propostas como a de Albanese et al. (2021), que criaram um sistema embarcado de baixo consumo de energia com aprendizado de máquina, contribuíram para a identificação de infestações em pomares de forma contínua e sem a necessidade de intervenção humana.

A robótica também tem sua aplicação nas pesquisas com fungos entomopatogênicos, cientistas da Universidade de Cornell criaram robôs bio-híbridos que utilizam micélios fúngicos como sensores biológicos que são capazes de responder autonomamente a estímulos ambientais (Nutt, 2024). Esse avanço aponta para um novo tipo de integração entre agentes vivos e sistemas eletrônicos, podendo expandir as possibilidades de uso dos fungos em tecnologias agrícolas automatizadas.

Além disso, os avanços na robótica de exploração têm sido aplicados para mapear redes subterrâneas de fungos micorrízicos, que são importantes para a transferência de nutrientes entre plantas e fungos. De acordo com SPUN (2025), foi empregado robôs para traçar essas redes, mostrando a complexidade dos “corredores fúngicos” que transportam carbono e outros nutrientes essenciais no solo.

Essas inovações tecnológicas contribuem para a ampliação da eficiência dos fungos entomopatogênicos no campo, e promovem práticas agrícolas mais inteligentes e sustentáveis. A tendência é que, com o avanço contínuo dessas ferramentas, o uso dos fungos entomopatogênicos no manejo integrado de pragas se torne cada vez mais frequente, preciso e automatizado.

BIOMATERIAIS

A aplicação de biomateriais no desenvolvimento e uso de fungos entomopatogênicos tem sido usado como uma abordagem inovadora no controle biológico de pragas. Biomateriais de origem natural oferecem matrizes compatíveis com o crescimento e a aplicação desses microrganismos (Friuli et al., 2023).

Algumas pesquisas têm explorado a combinação de hidrogéis de micélio com fungos para criar estruturas vivas e responsivas. Gantenbein et al. (2022) utilizaram a técnica de impressão 3D para fabricar hidrogéis com o fungo *Ganoderma lucidum*, obtido de materiais vivos capazes de se regenerar e se adaptar às condições ambientais. Essa tecnologia abre caminho para a criação de dispositivos inteligentes com base em fungos.

Outro uso promissor é a colonização de tecidos vegetais por fungos entomopatogênicos atuando como endófitos. De acordo com as pesquisas de Vega (2018), essa estratégia oferece uma proteção contínua contra insetos e estimula o crescimento das plantas. Nesta situação, os fungos tornam-se parte do sistema vegetal funcionando como uma forma de “biomaterial vivo”.

A produção de bioinseticidas também vem experimentando os biomateriais. A incorporação dos fungos em suportes biodegradáveis como indicado por Mantzoukas e Eliopoulos (2021), ocasiona maior estabilidade aos esporos e permite uma liberação controlada no ambiente, resultando na redução da frequência das aplicações e minimizando os impactos indesejados ao ecossistema.

Tecidos fúngicos têm sido testados como sensores biológicos, de acordo com Adamatzky et al. (2020), alguns materiais colonizados por fungos respondem a estímulos químicos e físicos, podendo ser utilizados em sistemas bioeletrônicos para monitoramento ambiental.

A utilização de biomateriais associados a fungos entomopatogênicos aponta para um futuro promissor. A convergência entre biologia fúngica e engenharia de materiais promete gerar soluções sustentáveis tanto para a agricultura quanto para outras áreas da biotecnologia.

AUTOMAÇÃO LABORATORIAL

O avanço da bioengenharia tem transformado a forma como os fungos entomopatogênicos são estudados, selecionados e aplicados na agricultura. Ferramentas automatizadas, biologia molecular e inteligência artificial vêm sendo incorporadas para otimizar tanto a produção quanto o desenvolvimento de novas cepas.

O processo de isolamento de fungos feito a partir de solo ou insetos infectados, tem sido substituído por plataformas automatizadas que aceleram a seleção de microrganismos. Um exemplo é o sistema QPix 400, que é capaz de processar milhares de colônias microbianas por hora, permitindo a triagem precisa de cepas com alto potencial patogênico (Molecular Devices, 2023).

Técnicas de inteligência artificial estão sendo aplicadas para automatizar e melhorar a avaliação da virulência fúngica. Brown et al. (2020) desenvolveram um sistema óptico que utiliza aprendizado profundo (deep learning) para testes de suscetibilidade antimicrobiana, este método pode ser adaptado para analisar o desempenho de fungos contra diferentes espécies de insetos.

O uso de microfluídica tem possibilitado a miniaturização dos ensaios biológicos ocasionando a melhor reprodutibilidade dos testes e reduzindo o consumo de reagentes. Esses sistemas viabilizam experimentos mais rápidos e precisos, com menor impacto ambiental (Fair et al., 2007).

A plataforma iBioFAB tem mostrado eficiência na clonagem automatizada de genes biossintéticos, abrindo espaço para a criação de linhagens fúngicas com características melhoradas como maior virulência e resistência ao estresse ambiental (IGB, 2023).

A empresa de biotecnologia chamada Ginkgo Bioworks já vem utilizando algoritmos e robótica para projetar microrganismos com funções específicas, incluindo a customização de fungos entomopatogênicos para atender as necessidades da agricultura moderna (WIRED, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por métodos agrícolas sustentáveis tem colocado os fungos entomopatogênicos como alternativas ao uso de pesticidas químicos. Seu papel como agentes naturais de controle de pragas tem sido cada vez mais valorizado na promoção da segurança alimentar e na preservação ambiental.

Os avanços na biotecnologia, o desenvolvimento de biomateriais e a integração de novas tecnologias como IoT, robótica e inteligência artificial, têm ampliado o potencial de uso desses fungos. Essas inovações permitem aplicações mais precisas, maior eficiência no campo e redução dos impactos ambientais negativos.

Existem desafios para o uso dos fungos entomopatogênicos em larga escala. A produção em massa com qualidade, a formulação de produtos com boa estabilidade e a aceitação dos agricultores são pontos para o sucesso do uso das técnicas de controle biológicos. O apoio de políticas públicas, investimentos em pesquisa e a colaboração entre instituições são fundamentais para ampliação do uso do controle biológico.

A aplicação dos fungos entomopatogênicos nos sistemas agrícolas modernos depende de uma abordagem colaborativa e interdisciplinar. Deve combinar conhecimento técnico, inovação científica e práticas sustentáveis. É Nesse cenário que esses microrganismos se estabelecem como ferramentas importantes que aliam produtividade e conservação ambiental.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. B.; SILVA, J. E. B.; TAVARES, R. M. **Fungos entomopatogênicos: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020.

ALVES, S. B.; PEREIRA, R. M. **Produção de fungos entomopatogênicos**. In: ALVES, S. B. (Ed.). *Controle Microbiano de Insetos*. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 845-873.

AGROEGO. **Fungos entomopatogênicos no controle de pragas: atuação e utilização**. AgronoEdge Blog, 2023.

ARRUDA, W. **Caracterização molecular e morfofisiológica de diferentes isolados do fungo entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* e análise morfológica do processo de infecção em *Boophilus microplus***. 2005. Tese (Doutorado em Biologia Celular e Molecular) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular e Molecular, Centro de Biotecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BROWN, C. et al. **An Automated, Cost-Effective Optical System for Accelerated Anti-microbial Susceptibility Testing (AST) using Deep Learning**. *arXiv preprint arXiv:2005.11454*, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.11454>

CAPALBO, D. M. F. et al. **Produção de fungos entomopatogênicos**. In: ALVES, S. B. (Ed.). Controle Microbiano de Insetos. Piracicaba: FEALQ, 1999. p. 845-873.

CORTEVA. **Inseticida Biológico: Fungos no Controle de Pragas**. Corteva Agriscience, 2022.

FANG, W. et al. **Cloning of *Beauveria bassiana* chitinase gene Bbchit1 and its application to improve fungal strain virulence**. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 71, n. 1, p. 363–370, 2005.

FAO. **World Food and Agriculture** - Statistical Yearbook 2023. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/statistics/yearbook>

FARIA, J.R.; WRAIGHT, S.P. **Fungal entomopathogens: a systematic review**. *Biochemical and Pathogenesis*, oct.2024. Revisão sistemática que contextualiza os mecanismos de ação e as etapas da infecção, desde a adesão até a proliferação e morte do hospedeiro.

FAIR, R. B. et al. **Chemical and biological applications of digital-microfluidic devices**. *IEEE Design & Test of Computers*, v. 24, n. 1, p. 38–47, 2007. DOI: 10.1109/MDT.2007.23

FIGUEIREDO, V. A. C.; MAFRA, S.; RODRIGUES, J. A. **Proposed IoT Smart Trap using Computer Vision**. *arXiv preprint arXiv:2004.04504*, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2004.04504>

Fortune Business Insights. **Biopesticides Market Size, Share | Growth Analysis Report, 2032**. 2025. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biopesticides-market-100073>

FRIULI, M.; PELLEGRINO, R.; LAMANNA, L.; NITTI, P.; MADAGHIELE, M.; DEMITRI, C. **Materials Engineering to Help Pest Control: A Narrative Overview of Biopolymer-Based Entomopathogenic Fungi Formulations**. *Journal of Fungi*, v.9, n. 9, p. 918, 2023.

GANTENBEIN, S. et al. **Three-dimensional Printing of Mycelium Hydrogels into Living Materials**. *arXiv preprint arXiv:2203.00976*, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2203.00976>

GOETTEL, M. S.; INGLESFIELD, C. **The effect of temperature on the virulence of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* towards the European corn borer, *Ostrinia nubilalis***. *Journal of Invertebrate Pathology*, v. 59, n. 2, p. 147–152, 1992.

IGB. **New automated method increases the efficiency of bioactive natural product discovery**. *Institute for Genomic Biology*, 2023. Disponível em: <https://www.igb.illinois.edu/article/new-automated-method-increases-efficiency-bioactive-natural-product-discovery>

Kumar, S. et al. **Entomopathogenic Fungi: An Eco-Friendly Synthesis of Sustainable Agriculture**. 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10302739/>

MANTZOUKAS, S.; ELIOPOULOS, P. A. **Entomopathogenic Fungi: Interactions and Applications**. *Encyclopedia*, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-8392/2/2/44>

MASCARIN, G. M.; JARONSKI, S. T. **The production and uses of *Beauveria bassiana* as a microbial insecticide**. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 32, n. 11, p. 177, 2016.

McNEIL, D. G. Jr. **Fungus Fatal to Mosquito May Aid Global War on Malaria**. *The New York Times*, 2007. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2007/07/31/health/31mosquito.html>

MOLECULAR DEVICES. QPix 400-Series Microbial Colony Pickers. 2023. Disponível em: <https://www.moleculardevices.com/products/clone-screening/microbial-screening/qpix-400-series-microbial-colony-pickers>

ORTIZ-URQUIZA, A.; KEYHANI, N. O. **Action on the surface: entomopathogenic fungi versus the insect cuticle.** *Insects*, v. 4, n. 3, p. 357–374, 2013.

SILVA, A.; ARAGÃO, L. O.; LORENA, S. **Impactos dos agrotóxicos na produção vegetal orgânica: uma revisão sistemática.** 2022.

SNS Insider. **Biopesticides Market to Reach USD 25.82 Billion by 2032.** 2025. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/03/27/3050657/0/en/Biopesticides-Market-to-Reach-USD-25-82-Billion-by-2032-SNS-Insider.html>

SOUZA, L. M. **Modelagem e Simulação de Biorreator Operando com Fungos Filamentosos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2015.

SPUN, J. et al. **Mapping of fungal networks using robotics.** *Phys.org*, 2025. Disponível em: <https://www.phys.org/news/2025-02-robotics-mapping-fungal-networks.html>

ST. LEGER, R. J. et al. **Cuticle-degrading proteases from entomopathogenic fungi: purification and characterization of a trypsin-like protease from *Metarhizium anisopliae*.** *Journal of Invertebrate Pathology*, v. 67, n. 2, p. 91–101, 1996.

VEGA, F. E. **The use of fungal entomopathogens as endophytes.** *Mycologia*, v. 110, n. 1, p. 4–30, 2018. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/5818/10-2018%20%20Vega%20%20The%20use%20of%20fungal%20entomopathogens%20as%20endophytes%20in%20biological%20control%20%E2%80%93%20a%20review%20-%20Mycologia.pdf>

VICENTE, I. V. **Produção de esporos do fungo *Metarhizium anisopliae* em farelo de milho.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual Paulista, 2021.

WIRED. **Ginkgo Bioworks is turning human cells into on-demand factories.** *Wired Magazine*, 2018. Disponível em: <https://www.wired.com/story/ginkgo-bioworks-is-turning-human-cells-into-on-demand-factories>