

O USO DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO DE PLANTAS

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6031225230513>

Data de submissão: 17/07/2025

Data de aceite: 22/07/2025

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>

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>

Ivy Laura Siqueira Saliba Machado

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/7917119821946050>

Telma Fátima Vieira Batista

Universidade Federal Rural da Amazônia,
Instituto de Ciências Agrárias
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/8251281115341075>

RESUMO: A comunidade científica tem demonstrado crescente interesse nas múltiplas funções dos fungos entomopatogênicos (FEPs) em sistemas agrícolas e florestais, que vão além do controle biológico de pragas. Os microrganismos do gênero *Beauveria spp.* e *Metarhizium spp.* têm a capacidade de colonizar endofiticamente tecidos vegetais, promovendo o crescimento das plantas e aumentando a resistência a insetos-praga e aos estresses ambientais. Este capítulo

teve como objetivo explorar o potencial dos fungos entomopatogênicos como agentes duais, capazes de atuar simultaneamente na promoção do crescimento vegetal e no fortalecimento das plantas contra estresses bióticos e abióticos. Para fundamentar a abordagem, foi realizada uma revisão bibliográfica na base de dados *Google Scholar*. A busca utilizou as palavras-chave “Fungi”, “Entomopathogenic” e “Plant Growth Promotion” (com base nos títulos dos artigos), priorizando publicações dos últimos 10 anos e abrangendo as categorias “Entomology”, “Microbiology”, “Biotechnology Applied Microbiology” e “Plant Sciences”. Os FEP’s estabelecem relações mutualísticas com as plantas, promovendo vigor vegetativo, eficiência nutricional e maior tolerância a estresses, posicionando-os como ferramentas cruciais para a agricultura sustentável e a redução da dependência de insumos químicos. Apesar do grande potencial no Brasil e da sua adaptabilidade a condições adversas, a ampla adoção desses bioinoculantes ainda enfrenta desafios como baixa persistência em climas tropicais e interações complexas com agroquímicos, demandando o aprimoramento de formulações e o aprofundamento da compreensão ecológica. *B. bassiana* e *M. anisopliae* dominam o mercado de bioinsumos, promovendo o crescimento e a produtividade de diversas culturas, como milho, soja e café, através da produção de fitormônios e solubilização de nutrientes. Esses fungos oferecem benefícios econômicos e ambientais, incluindo a redução de custos com fertilizantes, a proteção contra pragas e doenças, e a diminuição de resíduos químicos. Diante do exposto, os fungos entomopatogênicos são bioinoculantes multifuncionais essenciais para a agricultura sustentável, promovendo o crescimento vegetal e aumentando a resistência das plantas, embora desafios como baixa persistência exijam mais pesquisa para otimizar seu uso em sistemas modernos.

PALAVRAS-CHAVE: Bioestimulantes, endofíticos, agricultura sustentável.

THE USE OF ENTOMOPATHOGENIC FUNGI IN PROMOTING PLANT GROWTH

ABSTRACT: The scientific community has shown growing interest in the multiple functions of entomopathogenic fungi (EPFs) in agricultural and forestry systems, extending beyond pest biological control. Microorganisms of the genera *Beauveria* spp. and *Metarhizium* spp. can endophytically colonize plant tissues, promoting plant growth and increasing resistance to insect pests and environmental stresses. This chapter aims to explore the potential of entomopathogenic fungi as dual agents, capable of simultaneously promoting plant growth and strengthening plants against biotic and abiotic stresses. To support this approach, a literature review was conducted using the Google Scholar database. The search employed the keywords “Fungi,” “Entomopathogenic,” and “Plant Growth Promotion” (based on article titles), prioritizing publications from the last 10 years and covering the categories “Entomology,” “Microbiology,” “Biotechnology Applied Microbiology,” and “Plant Sciences.” EPFs establish mutualistic relationships with plants, promoting vegetative vigor, nutritional efficiency, and greater stress tolerance, positioning them as crucial tools for sustainable agriculture and reducing dependence on chemical inputs. Despite their great potential in Brazil and adaptability to adverse conditions, the widespread adoption of these bioinoculants still faces challenges such as low persistence in tropical climates and complex interactions with agrochemicals, requiring formulation improvements and deeper ecological understanding. *B. bassiana* and *M. anisopliae* dominate the bioinput market, promoting growth and productivity in various crops such as maize, soybean, and coffee through the production of phytohormones and nutrient

solubilization. These fungi offer economic and environmental benefits, including reduced fertilizer costs, protection against pests and diseases, and decreased chemical residues. Given the above, entomopathogenic fungi are multifunctional bioinoculants essential for sustainable agriculture, promoting plant growth and increasing plant resistance, although challenges such as low persistence require further research to optimize their use in modern systems.

KEYWORDS: Biostimulants, endophytes, sustainable agriculture.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a comunidade científica tem voltado sua atenção para as múltiplas funções dos fungos entomopatogênicos (FEPs) nos sistemas agrícolas, revelando um potencial que vai muito além do controle biológico de pragas. Os fungos do gênero *Beauveria* spp. e *Metarhizium* spp. são capazes de colonizar endofiticamente tecidos vegetais acima do solo, promovendo não apenas o crescimento das plantas, mas também aumentando sua resistência a insetos-praga, como observado em cultivos de diversas culturas, incluindo soja, mandioca e videira, contra pragas como *Aphis gossypii* (BEHIE; JONES; BIDOCHKA, 2015; SHAALAN et al., 2021).

Os FEPs estabelecem relações mutualísticas com plantas, promovendo crescimento e resistência através de múltiplos mecanismos. Essas interações resultam em: (1) aumento do vigor vegetativo, mediado pela produção de fitormônios como auxinas e giberelinas, conforme demonstrado por Chaudhary et al. (2023); (2) eficiência nutricional elevada pela solubilização de fosfatos, como o fosfato de cálcio $[Ca_3(PO_4)_2]$ - como demonstrado em *Beauveria brongniartii* (TOSCANO-VERDUZCO et al., 2019) e síntese de sideróforos (KRASNOFF et al., 2020); e (3) tolerância a estresses ambientais e maior virulência contra pragas, mediada pela plasticidade fenotípica (RANGEL et al., 2015) e ativação de defesas contra seca (FERUS; BARTA; KONÔPKOVÁ, 2019).

Esses efeitos multifuncionais, observados em culturas como soja e milho, posicionam esses fungos como ferramentas-chave para agricultura sustentável (FARIAS et al., 2018; LIU; YANG; WANG, 2022;). Os mecanismos por trás desse efeito promotor de crescimento são complexos e multifatoriais. Pesquisas com abordagens moleculares demonstram que os fungos entomopatogênicos modulam a expressão gênica em plantas, ativando vias metabólicas relacionadas ao desenvolvimento vegetal (SAMAL et al., 2023; GARCÍA-ESPINOZA et al., 2023).

Além desses benefícios, os fungos entomopatogênicos atuam como indutores de resistência sistêmica, ativando precocemente os mecanismos de defesa das plantas contra patógenos e estresses abióticos. Essa proteção é mediada pela regulação de enzimas antioxidantes e pela síntese de compostos de defesa, conforme observado em culturas como soja e milho (BATOOL et al., 2022). Complementarmente, estudos destacam seu potencial para reduzir a dependência de insumos químicos, integrando promoção de crescimento e proteção vegetal em sistemas agrícolas sustentáveis (BAMISILE et al., 2021).

Essa multifuncionalidade dos fungos entomopatogênicos - como promotores de crescimento - mostra especial relevância nos sistemas agrícolas brasileiros. Embora o país lidere o uso de *Metarhizium* spp. para biocontrole na cana-de-açúcar, por exemplo, seu potencial como bioinoculante permanece subutilizado, com apenas 4 isolados representando 5% da diversidade disponível nos 91 produtos registrados (MESQUITA et al., 2023). Em culturas como soja e milho, a inoculação com *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Pochonia chlamydosporia*, *Purpureocillium lilacinum* e *Trichoderma asperellum* têm demonstrado redução no uso de fertilizantes fosfatados em solos, mantendo a produtividade (FARIAS et al., 2018), reforçando seu papel estratégico para sistemas integrados sustentáveis. Além disso, sua capacidade de tolerar temperaturas elevadas (em torno de 35°C) e solos com baixa matéria orgânica os tornam ideais para regiões com limitações edáficas (MORA; CASTILHO; FRAGA, 2016; SHARMA et al., 2021). Essa adaptação a condições extremas, combinada com sua interação sinérgica com a microbiota do solo, potencializa sua aplicação em sistemas integrados de produção, como o sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF), onde a sustentabilidade e eficiência no uso de recursos são fundamentais (MURINDANGABO et al., 2024).

Embora promissora, a ampla adoção desta tecnologia enfrenta obstáculos técnicos significativos, como destacado por Bamisile et al. (2021). Análises comparativas destacam alguns gargalos principais: (i) a baixa persistência de conídios em formulações comerciais sob condições tropicais (RANGEL et al., 2015), (ii) interações antagônicas com agroquímicos convencionais (ZIBAE, 2019), e (iii) interações não previstas com microrganismos do solo, que podem limitar a eficácia (VANDENKOORNHUYSE et al., 2025). Essas limitações exigem o desenvolvimento de formulações mais estáveis, estratégias de aplicação compatíveis e uma melhor compreensão da ecologia microbiana do solo para otimizar o uso em campo (BAMISILE et al., 2021).

A revisão tem como objetivo, explorar o potencial dos fungos entomopatogênicos como agentes duais, capazes de atuar simultaneamente na promoção do crescimento vegetal e no fortalecimento das plantas contra estresses bióticos e abióticos. Para embasar esta abordagem, foi realizada uma busca na base de dados *Google Scholar*, utilizando as palavras-chave “Fungi”, “Entomopathogenic” e “Plant Growth Promotion” (com base em títulos de artigos), priorizando artigos publicados nos últimos 10 anos e contemplando as categorias “Entomology”, “Microbiology”, “Biotechnology Applied Microbiology” e “Plant Sciences”.

MECANISMOS DE AÇÃO DOS FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO VEGETAL

Os FEPs, tradicionalmente conhecidos por seu papel no controle biológico de insetos-praga (BARELI et al., 2015), vêm demonstrando notável capacidade de promover o crescimento vegetal através de diversos mecanismos fisiológicos e bioquímicos (BAMISILE et al., 2023). Evidências científicas consolidam vias de atuação desses microrganismos como bioestimulantes, influenciando as vias biológicas das plantas e modulando seu desenvolvimento (HAJJI-HEDFI et al., 2025).

Entre os mecanismos de promoção de crescimento, a produção de fitormônios destaca-se como um dos mais bem caracterizados. Os fungos *B. bassiana* e *M. robertsii* sintetizam auxinas, citocininas e giberelinas, modulando processos fisiológicos essenciais nas plantas (AHSAN et al., 2024). Em *Arabidopsis thaliana*, estudos metabolômicos demonstraram que *M. robertsii* induziu a proliferação radicular e o desenvolvimento de pelos absorventes através de mecanismos dependentes de auxina e ácido indol-3-acético (AIA) (LIAO et al., 2017).

Além da modulação hormonal, esses fungos destacam-se pela capacidade de incrementar a disponibilidade de nutrientes essenciais (GONZÁLEZ-GUZMÁN et al., 2020). O fungo *B. brongniartii* demonstra capacidade multifuncional na promoção do crescimento vegetal através da solubilização eficiente de fosfatos inorgânicos e produção de sideróforos. Em *Capsicum chinense*, *B. brongniartii* solubilizou 158,95 mg L⁻¹ de fósforo a partir de Ca₃(PO₄)₂, desempenho 5 vezes superior ao observado com FePO₄ (31,7 mg L⁻¹), mediante excreção de ácidos orgânicos. Paralelamente, o fungo produziu sideróforos (degradando 59,8% do complexo Fe e AIA em concentrações de até 44,9 mg L⁻¹), mecanismos que explicam os incrementos de 37,56 cm na altura de plantas e 6,767 g no peso médio de frutos em *C. chinense* (TOSCANO-VERDUZCO et al., 2020).

Além desses benefícios, o fungo *B. brongniartii* induziu resistência sistêmica em plantas, ativando genes de defesa e reduzindo a incidência de patógenos em até 60%. Simultaneamente, sua colonização radicular aumentou em 37% o volume de raízes, potencializando a absorção dos nutrientes solubilizados, um efeito sinérgico que integra proteção fitossanitária e eficiência nutricional (TOSCANO-VERDUZCO et al., 2020).

A formação de relações mutualísticas na rizosfera apresenta destaque, já que alguns fungos colonizaram com eficiência o sistema radicular, formando estruturas especializadas que facilitam a troca de nutrientes (HU; BIDOCKA, 2019). Essa colonização promoveu alterações na arquitetura radicular, com aumento de biomassa das raízes e melhora na absorção de nutrientes, como fósforo e ferro, em condições de baixa disponibilidade no solo em plantas de feijão (MOHAMED et al., 2019).

A compreensão desses mecanismos tem permitido o desenvolvimento de formulações mais eficientes, com aplicações que variam de 10^6 a 10^8 conídios/mL⁻¹, dependendo da cultura e das condições edafoclimáticas (ALVES; FARIAS, 2010). Contudo, pesquisas adicionais são necessárias para elucidar as interações específicas entre diferentes isolados de fungos e cultivares vegetais, visando maximizar os benefícios dessa promissora tecnologia agrícola.

PRINCIPAIS ESPÉCIES DE FUNGOS COM POTENCIAL BIOESTIMULANTE

Dentre a diversidade de fungos entomopatogênicos, as espécies *B. bassiana* e *M. anisopliae* destacam-se por dominarem o mercado brasileiro de bioinsumos, sendo os princípios ativos mais utilizados nos produtos comerciais (BOAVENTURA; QUINTELA, 2025). O amplo uso dessas espécies, que representam a maioria dos produtos microbianos registrados no país, evidencia seu duplo potencial como agentes de controle biológico e promotores de crescimento vegetal (LIU; YANG; WANG, 2022).

B. bassiana emerge como a espécie mais versátil, com estudos demonstrando sua capacidade de promover incrementos de 17,9% a 85,5% na biomassa aérea e de 81,5% nas raízes de milho (*Zea mays*) em sistema hidropônico. Seu mecanismo de ação está associado à colonização endofítica sistêmica (com taxas de recuperação de 100% em caules e folhas no 7º dia pós-inoculação), conforme comprovado por PCR e isolamento em meio seletivo (LIU; YANG; WANG, 2022).

Além disso, espécies do gênero *Metarhizium* spp. destacam-se não apenas pelo controle de pragas, mas também por seu potencial bioestimulante em milho. As estruturas de resistência e sobrevivência produzidas por *M. anisopliae*, *M. robertsii* e *M. humberti*, quando aplicados como revestimento de sementes, promovem aumentos significativos na área foliar, altura da planta, comprimento radicular e biomassa seca. Ainda, esses fungos demonstraram eficácia contra *Spodoptera frugiperda* (mortalidade >55% em 7 dias), integrando proteção vegetal e promoção de crescimento em uma única aplicação (LIRA; MASCARIN; DELIBERA JÚNIOR, 2020).

Além disso, *Isaria fumosorosea* tem demonstrado efeitos positivos no desenvolvimento vegetal sob condições de estresse. Em estudo com plantas de couve, sua aplicação foi associada ao aumento da altura, número de folhas e massa seca, especialmente em condições de restrição hídrica, indicando seu potencial como bioestimulante (DARA; DARA; DARA, 2017). De forma semelhante, *Akanthomyces lecanii* apresenta propriedades relevantes para a mitigação de estresses abióticos, mostrando-se promissor como agente de suporte fisiológico em plantas expostas a ambientes adversos (GOWTHAM et al., 2024).

A aplicação de fungos bioestimulantes como *I. fumosorosea* e *A. lecanii* apresenta desafios significativos devido à variabilidade natural entre linhagens. Apesar da ampla disponibilidade de produtos comerciais à base de *I. fumosorosea*, sua eficácia no campo

varia significativamente devido a fatores como métodos de aplicação, condições ambientais adversas (CUELLAR-SANDOVAL et al., 2018). Essa especificidade exige a seleção cuidadosa de linhagens adaptadas a cada sistema de cultivo, além do desenvolvimento de protocolos de manejo adequados para garantir sua eficácia como promotores de crescimento vegetal (MANTZOUKAS; ELIOPOULOS, 2020; SHANG et al., 2022).

Para superar os atuais desafios de aplicação e variabilidade entre linhagens, as pesquisas futuras devem apresentar uma caracterização molecular detalhada dos mecanismos de promoção de crescimento vegetal, o desenvolvimento de formulações inovadoras e a integração com outras tecnologias sustentáveis. Esses avanços permitirão transformar os fungos com dupla-ação em soluções agrícolas mais eficientes e previsíveis, ampliando sua adoção em sistemas de produção modernos.

APLICAÇÕES PRÁTICAS EM DIFERENTES CULTIVOS AGRÍCOLAS

A utilização de fungos entomopatogênicos como promotores de crescimento vegetal tem apresentado resultados promissores em diversos sistemas agrícolas, com respostas variáveis conforme a cultura e as condições ambientais. Em cultivos de soja, a inoculação foliar com *B. bassiana* (cepa LPSc 1098) estabeleceu colonização endofítica eficiente e promoveu aumento significativo no crescimento e produtividade das plantas em condições de campo, conforme demonstrado por parâmetros como altura da planta, número de vagens e peso de sementes (RUSSO et al., 2019).

De modo similar, no cultivo do milho, *M. anisopliae* tem demonstrado potencial como promotor de crescimento, com estudos reportando aumentos significativos na produtividade de grãos e eficiência no uso de nutrientes (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2022). Os benefícios da inoculação com estes fungos, estão associados à capacidade de colonização endofítica, que modula processos fisiológicos nas plantas, incluindo a absorção de nutrientes (KHAN et al., 2012). Esses efeitos são particularmente relevantes em sistemas de plantio direto, onde a interação entre o fungo e a matéria orgânica do solo potencializa seus benefícios (MURINDANGABO et al., 2024).

Em culturas perenes como o café, a inoculação de fungos entomopatogênicos ainda na fase de viveiro tem se mostrado estratégia promissora. Ao utilizar *M. robertsii* em mudas de café, houve um aumento de 30% na área foliar em comparação com plantas não tratadas. Ainda, foi possível identificar uma proteção contra o bicho-mineiro-do-cafeeiro (*Leucoptera coffeella*), com redução significativa na área foliar minerada e aumento no tempo de desenvolvimento do inseto. Além da proteção, *M. robertsii* mostrou efeitos significativos no crescimento das mudas, destacando seu potencial como agente duplo, promotor de crescimento e protetor contra pragas (FRANZIN et al., 2022).

Em citros, os fungos entomopatogênicos exercem dupla função, atuando tanto na estimulação do crescimento vegetal quanto no controle de vetores como *Diaphorina citri*, conforme demonstrado por Maluta, Castro e Lopes (2022). Os autores relatam que o fungo *Cordyceps fumosorosea* foi capaz de reduzir em 60 a 70% a transmissão do HLB (*greening*), ao alterar significativamente o comportamento de alimentação do inseto, especialmente a atividade estilete-floema, entre 30 e 96 horas após a aplicação. Essa ação combinada permite substituir até 40% dos inseticidas químicos, sendo uma estratégia crucial para o manejo de populações resistentes do psílideo.

Na cana-de-açúcar, a aplicação de *Metarhizium* spp. demonstra resultados expressivos no campo, com melhorias significativas no desenvolvimento inicial das plantas. Em condições controladas, as plantas tiveram aumentos de 15 a 20% na altura e incrementos de 25 a 30% na matéria seca radicular e aérea, aos 91 dias após o plantio, independentemente das doses de fertilizante NPK aplicadas (OBA et al., 2023). Esses resultados evidenciam o potencial do fungo como promotor de crescimento vegetal, com vantagens adicionais como a redução na dependência de fertilizantes químicos e maior eficiência no uso de nutrientes.

Em cultivos de tomate, Barra-Bucarei et al. (2020) demonstraram que a aplicação de *B. bassiana* proporcionou duplo benefício ao cultivo, com redução significativa na população de mosca-branca (*Trialeurodes vaporariorum*) e promoção do crescimento vegetal. Os autores observaram que as plantas tratadas apresentaram maior vigor, melhor aproveitamento dos nutrientes do solo e controle natural da infestação por *T. vaporariorum*.

Os resultados da bioestimulação com FEPs são animadores, mas é importante lembrar que o sucesso dessa técnica depende de alguns cuidados especiais. Assim como cada planta tem suas particularidades — influenciando fatores como espécies cultivadas, solo e estágio de desenvolvimento —, o uso destes fungos precisa ser ajustado conforme o tipo de cultivo, as condições do local e o estágio de desenvolvimento da planta (GONZÁLEZ-GUZMÁN et al., 2020). Portanto, é necessário continuar trabalhando para aperfeiçoar as melhores formas de aplicação, garantindo que esses aliados naturais possam expressar todo seu potencial em campo.

Apesar dos benefícios comprovados, como a redução da dependência de fertilizantes químicos e a mitigação de impactos ambientais, a adoção em larga escala enfrenta desafios. A baixa persistência dos conídios em condições tropicais, interações antagônicas com agroquímicos e complexidades nas interações com a microbiota do solo limitam sua eficácia em campo (QUESADA-MORAGA et al., 2024; SHARMA; SHARMA; YADAV, 2023).

VANTAGENS COMPARATIVAS EM RELAÇÃO A FERTILIZANTES CONVENCIONAIS

Os FEPs, quando utilizados como promotores de crescimento vegetal, oferecem vantagens multifacetadas em comparação com fertilizantes convencionais, apresentando-se como uma alternativa sustentável para os desafios da agricultura moderna. Aliás, estes fungos demonstram capacidade de reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados enquanto estimulam o desenvolvimento vegetal, mesmo em condições adversas como solos calcários (GONZALEZ-GUZMAN et al., 2021).

De acordo com Sharma, Sharma e Yadav (2023), esses microrganismos atuam como agentes multifuncionais, promovendo não apenas a eficiência nutricional das plantas, mas também estimulando mecanismos fisiológicos que elevam seu potencial produtivo. A aplicação sistemática proporciona vantagens econômicas expressivas, como a redução de até 30% nos custos com fertilizantes químicos e menor necessidade de reaplicações, devido à sua persistência no ambiente agrícola. Tais características tornam os fungos entomopatogênicos componentes-chave para sistemas agrícolas mais sustentáveis e rentáveis, consolidando-os como pilares estratégicos na transição para uma agricultura de base ecológica.

Do ponto de vista ecológico, esses organismos proporcionam ganhos adicionais significativos. Os bioinoculantes podem mitigar significativamente os impactos ambientais da agricultura intensiva, reduzindo a contaminação de corpos hídricos por nutrientes e defensivos agrícolas. Seu modo de ação específico, atuando preferencialmente sobre organismos-alvo, preserva polinizadores e outros provedores de serviços ecossistêmicos, contrastando com os efeitos deletérios de agroquímicos convencionais sobre a biodiversidade (O'CALLAGHAN; BALLARD; WRIGHT, 2022).

Além dos benefícios ecológicos, esses bioinoculantes são vistos com potencial para aumentar a resiliência agrícola frente às mudanças climáticas. A inoculação com fungos entomopatogênicos, como *B. bassiana* e *P. lilacinum*, têm se mostrado eficaz em manter a produtividade de culturas como milho, mesmo sob condições de déficit hídrico (KUZHUPILLYMYAL-PRABHAKARANKUTTY et al., 2020). Essa prática promove o crescimento vegetal e assegura a qualidade e o rendimento dos frutos, fortalecendo a resiliência dos sistemas produtivos frente aos desafios ambientais (CHAN-CUPUL et al., 2025).

Do ponto de vista da segurança alimentar e regulatória, os bioinoculantes à base de fungos entomopatogênicos oferecem vantagens significativas, como a ausência de períodos de carência e um baixo risco de resíduos nos alimentos, o que é corroborado por estudos que destacam a segurança desses produtos em sistemas agrícolas (SINGH; RAINA; SINGH, 2017; SHARMA; SHARMA; YADAV, 2023). Essa característica os torna especialmente adequados para a produção orgânica e para mercados com exigências rigorosas de qualidade, como a União Europeia, onde a avaliação dos riscos associados à persistência de fungos entomopatogênicos como agentes de controle biológico é fundamental (SCHEEPMAKER; BUTT, 2010).

Em síntese, os FEPs oferecem uma alternativa sustentável aos fertilizantes convencionais, promovendo o crescimento vegetal e reduzindo a dependência de insumos nitrogenados (VIVEKANANDHAN et al., 2024). Eles mitigam impactos ambientais, preservam a biodiversidade e garantem segurança alimentar, com baixo risco de resíduos (AMMAR et al., 2023). Assim, sua adoção fortalece a resiliência agrícola frente às mudanças climáticas e contribui para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

CONCLUSÃO

Os FEPs, tradicionalmente reconhecidos pelo controle de insetos-praga, emergem como bioinoculantes multifuncionais cruciais para a agricultura sustentável. Sua capacidade de colonizar endofiticamente plantas e promover o crescimento vegetal, aumentar a resistência a estresses bióticos e abióticos, e otimizar a absorção de nutrientes, como fósforo e ferro, demonstra um potencial além do controle biológico.

As espécies *B. bassiana* e *M. anisopliae* lideram o mercado brasileiro de bioinsumos, atuando por meio da produção de fitormônios e da solubilização de fosfatos, beneficiando diversas culturas, incluindo soja, milho, café, citros, cana-de-açúcar e tomate.

A superação desses obstáculos exige aprofundamento na caracterização molecular, desenvolvimento de formulações mais estáveis e a integração com outras tecnologias agrícolas sustentáveis, visando maximizar o potencial desses fungos como promotores de crescimento e indutores de resistência em sistemas agrícolas modernos.

REFERÊNCIAS

AHSAN, S. M.; INJAMUM-UL-HOQUE, M.; DAS, A. K.; RAHMAN, M. M.; MOLLAH, M. M. I.; PAUL, N. C.; CHOI, H. W. **Plant–Entomopathogenic fungi interaction: recent progress and future prospects on endophytism-mediated growth promotion and biocontrol**. *Plants*, v. 13, n. 10, p. 1420, 2024.

ALVES, R. T.; FARIA, M. **Pequeno manual sobre fungos entomopatogênicos**. Planaltina (DF), Embrapa Cerrados, p. 50, 2010.

AMMAR, E. E.; RADY, H. A.; KHATTAB, A. M.; AMER, M. H.; MOHAMED, S. A.; ELODAMY, N. I.; AL-FARGA, A.; AIOUB, A. A. A. **A comprehensive overview of eco-friendly bio-fertilizers extracted from living organisms**. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 53, p. 113119-113137, 2023.

BAMISILE, B. S.; SIDDIQUI, J. A.; AKUTSE, K. S.; AGUILA, L. C. R.; XU, Y. **General limitations to endophytic entomopathogenic fungi use as plant growth promoters, pests and pathogens biocontrol agents**. *Plants*, v. 10, n. 10, p. 2119, 2021.

BAMISILE, B. S.; AKUTSE, K. S.; SIDDIQUI, J. A.; XU, Y. **Model application of entomopathogenic fungi as alternatives to chemical pesticides: Prospects, challenges, and insights for next-generation sustainable agriculture**. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 741804, 2021.

- BAMISILE, B. S.; AFOLABI, O. G.; SIDDIQUI, J. A.; XU, Y. **Endophytic insect pathogenic fungi-host plant-herbivore mutualism: elucidating the mechanisms involved in the tripartite interactions.** World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 39, n. 12, p. 326, 2023.
- BARELLI, L.; MOONJELY, S.; BEHIE, S. W.; BIDOCHKA, M. J. **Fungi with multifunctional lifestyles: endophytic insect pathogenic fungi.** Plant molecular biology, v. 90, p. 657-664, 2016.
- BARRA-BUCAREI, L.; GONZÁLEZ, M. G.; IGLESIAS, A. F.; AGUAYO, G. S.; PEÑALOSA, M. G.; VERA, P. V. ***Beauveria bassiana* multifunction as an endophyte: Growth promotion and biologic control of *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae) in tomato.** Insects, v. 11, n. 9, p. 591, 2020.
- BATOOL, R.; UMER, M. J.; WANG, Y.; HE, K.; SHABBIR, M. Z.; ZHANG, T.; BAI, S.; CHEN, J.; WANG, Z. **Myco-synergism boosts herbivory-induced maize defense by triggering antioxidants and phytohormone signaling.** Frontiers in Plant Science, v. 13, p. 790504, 2022.
- BEHIE, S. W.; JONES, S. J.; BIDOCHKA, M. J. **Plant tissue localization of the endophytic insect pathogenic fungi *Metarhizium* and *Beauveria*.** Fungal Ecology, v. 13, p. 112-119, 2015.
- BOAVENTURA, H. A.; QUINTELA, E. D. **The multifunctionality of the fungus *Metarhizium* spp. and its use in Brazilian agriculture.** Bragantia, v. 84, p. e20240183, 2025.
- CHAN-CUPUL, W.; PALMA-GARCÍA, J. M.; RUIZ-SÁNCHEZ, E.; CRUZ-CRESPO, E. **Assessment of the effects of inoculation with entomopathogenic fungi on the vegetative growth and yield of *Capsicum chinense* under water stress conditions.** International journal of agriculture and natural resources, v. 52, n. 1, p. 28-39, 2025.
- CHAUDHARY, P. J.; RAGHUNANDAN, B. L.; PATEL, H. K.; MEHTA, P. V.; PATEL, N. B.; SONTI, B.; DAVE, A.; BAGUL, S. Y.; DIVYA, M.; JAIN, D.; ALSAHLI, A. A.; KAUSHIK, P. **Plant growth-promoting potential of entomopathogenic fungus *Metarhizium pinghaense* AAUBC-M26 under elevated salt stress in tomato.** Agronomy, v. 13, n. 6, p. 1577, 2023.
- CUELLAR-SANDOVAL, J. F.; ORTEGA-MARTÍNEZ, L. D.; HERNÁNDEZ-VELÁZQUEZ, V. M.; CUELLAR-ZOMETA, J. F.; TORRES-GARCÍA, G.; BARRALES-CUREÑO, H. J.; SALAZAR-MAGALLÓN, J. A. **Agroecological basis for the design of biotechnological traps based on *Isaria fumosorosea* for the biological control of *Bemisia tabaci* in strawberry crops.** Biocontrol Science and Technology, v. 29, n. 1, p. 1-18, 2019.
- DARA, S. K.; DARA, S. S. R.; DARA, S. S. **Impact of entomopathogenic fungi on the growth, development, and health of cabbage growing under water stress.** American Journal of Plant Sciences, v. 8, n. 06, p. 1224, 2017.
- FARIAS, C. P.; CARVALHO, R. C.; RESENDE, F. M. L.; AZEVEDO, L. C. B. **Consortium of five fungal isolates conditioning root growth and arbuscular mycorrhiza in soybean, corn, and sugarcane.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 90, n. 4, p. 3649-3660, 2018.
- FERUS, P.; BARTA, M.; KONÔPKOVÁ, J. **Endophytic fungus *Beauveria bassiana* can enhance drought tolerance in red oak seedlings.** Trees, v. 33, p. 1179-1186, 2019.
- FRANZIN, M. L.; MOREIRA, C. C.; SILVA, L. N. P.; MARTINS, E. F.; FADINI, M. A. M.; PALLINI, A.; ELLIOT, S. L.; VENZON, M. ***Metarhizium* associated with coffee seedling roots: positive effects on plant growth and protection against *Leucoptera coffeella*.** Agriculture, v. 12, n. 12, p. 2030, 2022.

- GARCÍA-ESPINOZA, F.; QUESADA-MORAGA, E.; ROSAL, M. J. G.; YOUSEF-YOUSEF, M. **Entomopathogenic fungi-mediated solubilization and induction of Fe related genes in melon and cucumber plants**. Journal of Fungi, v. 9, n. 2, p. 258, 2023.
- GONZÁLEZ-GUZMÁN, A.; SACRISTÁN, D.; QUESADA-MORAGA, E.; TORRENT, J.; DEL CAMPILLO, M. C.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A. R. **Effects of entomopathogenic fungi on growth and nutrition in wheat grown on two calcareous soils: Influence of the fungus application method**. Annals of Applied Biology, v. 177, n. 1, p. 26-40, 2020.
- GONZALEZ-GUZMAN, A.; RAYA-DIAZ, S.; SACRISTÁN, D.; YOUSEF, M.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A. R.; BARRÓN, V.; CAMPILLO, M. C.; TORRENT, J. **Effects of entomopathogenic fungi on durum wheat nutrition and growth in the field**. European Journal of Agronomy, v. 128, p. 126282, 2021.
- GONZÁLEZ-PÉREZ, E.; ORTEGA-AMARO, M. A.; BAUTISTA, E.; DELGADO-SÁNCHEZ, P.; JIMÉNEZ-BREMONT, J. F. **The entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* enhances *Arabidopsis*, tomato, and maize plant growth**. Plant Physiology and Biochemistry, v. 176, p. 34-43, 2022.
- GOWTHAM, H. G.; HEMA, P.; MURALI, M.; SHILPA, N.; NATARAJ, K.; BASAVARAJ, G. L.; SINGH, S. B.; AIYAZ, M.; UDAYASHANKAR, A. C.; AMRUTHESH, K. N. **Fungal endophytes as mitigators against biotic and abiotic stresses in crop plants**. Journal of Fungi, v. 10, n. 2, p. 116, 2024.
- HAJJI-HEDFI, L.; IBRAHIM, D. S.; OTHMEN, S. B.; EL-ABEID, S. E.; HLAOUA, W.; MOSA, M. A.; RHOUMA, A.; RIAD, S. N.; GHAREEB, S.; EL-DERINY, M. M.; HARB, H. E.; MOHAMED, Y. A.; ELMNASRI, K. **Production of Microbial Biostimulants as a Response to the Modern Agricultural Need for Productivity and Plant Health**. In: **Microbial Biostimulants**. Apple Academic Press, 2025. p. 31-78.
- HU, S.; BIDOCHKA, M. J. **Root colonization by endophytic insect-pathogenic fungi**. Journal of applied microbiology, v. 130, n. 2, p. 570-581, 2021.
- KHAN, A. L.; HAMAYUN, M.; KHAN, S. A.; KANG, S.; SHINWARI, Z. K.; KAMRAN, M.; REHMAN, S.; KIM, J.; LEE, I. **Pure culture of *Metarhizium anisopliae* LHL07 reprograms soybean to higher growth and mitigates salt stress**. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 28, p. 1483-1494, 2012.
- KRASNOFF, S. B.; HOWE, K. J.; HECK, M. L.; DONZELLI, B. G. G. **Siderophores from the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana***. Journal of natural products, v. 83, n. 2, p. 296-304, 2020.
- KUZHUPPILLYMYAL-PRABHAKARANKUTTY, L.; TAMEZ-GUERRA, P.; GOMEZ-FLORES, R.; RODRIGUEZ-PADILLA, M. C.; EK-RAMOS, M. J. **Endophytic *Beauveria bassiana* promotes drought tolerance and early flowering in corn**. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 36, n. 3, p. 47, 2020.
- LIAO, X.; LOVETT, B.; FANG, W.; ST LEGER, R. J. ***Metarhizium robertsii* produces indole-3-acetic acid, which promotes root growth in *Arabidopsis* and enhances virulence to insects**. Microbiology, v. 163, n. 7, p. 980-991, 2017.
- LIRA, A. C.; MASCARIN, G. M.; DELIBERA JÚNIOR, Í. **Microsclerotia production of *Metarhizium* spp. for dual role as plant biostimulant and control of *Spodoptera frugiperda* through corn seed coating**. Fungal Biology, v. 124, n. 8, p. 689-699, 2020.
- LIU, Y.; YANG, Y.; WANG, B. **Entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* play roles of maize (*Zea mays*) growth promoter**. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 15706, 2022.

- MALUTA, N.; CASTRO, T.; LOPES, J. R. S. **Entomopathogenic fungus disrupts the phloem-probing behavior of *Diaphorina citri* and may be an important biological control tool in citrus**. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 7959, 2022.
- MANTZOUKAS, S.; ELIOPOULOS, P. A. **Endophytic entomopathogenic fungi: A valuable biological control tool against plant pests**. Applied Sciences, v. 10, n. 1, p. 360, 2020.
- MESQUITA, E.; HU, S.; LIMA, T. B.; GOLO, P. S.; BIDOCHKA, M. J. **Utilization of *Metarhizium* as an insect biocontrol agent and a plant bioinoculant with special reference to Brazil**. Frontiers in fungal biology, v. 4, p. 1276287, 2023.
- MOHAMED, I.; EID, K. E.; ABBAS, M. H.; SALEM, A. A.; AHMED, N.; ALI, M.; SHAH, G. M.; FANG, C. **Use of plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizae to improve the growth and nutrient utilization of common bean in a soil infected with white rot fungi**. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 171, p. 539-548, 2019.
- MORA, M. A. E.; CASTILHO, A. M. C.; FRAGA, M. E. **Fungos entomopatogênicos: enzimas, toxinas e fatores que afetam a diversidade**. Rev Bras Prod Agroind, v. 18, p. 335-49, 2016.
- MURINDANGABO, Y. T.; KOPECKÝ, M.; PERNÁ, K.; KONVALINA, P.; BOHATÁ, A.; KAVKOVÁ, M.; NGUYEN, T. G.; HOANG, T. N. **Relevance of entomopathogenic fungi in soil-plant systems**. Plant and Soil, v. 495, n. 1, p. 287-310, 2024.
- OBA, L. X. S.; MATTOS, L. M.; PAIVA, G. F.; CARRASCO, N. F.; SANTOS, E. F.; MOTA, L. H. C. **Planting fertilization and *Metarhizium anisopliae* inoculation in the initial growth of sugarcane**. Revista de Agricultura Neotropical, v. 11, n. 1, p. e7712-e7712, 2024.
- O'CALLAGHAN, M.; BALLARD, R. A.; WRIGHT, D. **Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities**. Soil Use and Management, v. 38, n. 3, p. 1340-1369, 2022.
- QUESADA-MORAGA, E.; GONZÁLEZ-MAS, N.; YOUSEF-YOUSEF, M.; GARRIDO-JURADO, I.; FERNÁNDEZ-BRAVO, M. **Key role of environmental competence in successful use of entomopathogenic fungi in microbial pest control**. Journal of Pest Science, v. 97, n. 1, p. 1-15, 2024.
- RANGEL, D. E. N.; BRAGA, G. U. L.; FERNADES, E. K. K.; KEYSER, C. A.; HALLSWORTH, J. E.; ROBERTS, D. W. **Stress tolerance and virulence of insect-pathogenic fungi are determined by environmental conditions during conidial formation**. Current genetics, v. 61, p. 383-404, 2015.
- RUSSO, M. L.; PELIZZA, S. A.; VIANNA, M. F.; ALLEGRUCCI, N.; CABELLO, M. N.; TOLEDO, A. V.; MOURELOS, C.; SCORSETTI, A. C. **Effect of endophytic entomopathogenic fungi on soybean *Glycine max* (L.) Merr. growth and yield**. Journal of King Saud University-Science, v. 31, n. 4, p. 728-736, 2019.
- SAMAL, I.; BHOI, T. K.; MAJHI, P. K.; MURMU, S.; PRADHAN, A. K.; KUMAR, D.; SAINI, V.; PASCHAPUR, A. U.; RAJ, M. N.; MANIK, S.; BEHERA, P. P.; MAHANTA, D. K.; KOMAL, J.; ALAM, P.; BALAWI, T. A. **Combatting insects mediated biotic stress through plant associated endophytic entomopathogenic fungi in horticultural crops**. Frontiers in Plant Science, v. 13, p. 1098673, 2023.
- SCHEEPMAKER, J. W. A.; BUTT, T. M. **Natural and released inoculum levels of entomopathogenic fungal biocontrol agents in soil in relation to risk assessment and in accordance with EU regulations**. Biocontrol Science and Technology, v. 20, n. 5, p. 503-552, 2010.

SHAALAN, R. S.; GERGES, E.; HABIB, W.; IBRAHIM, L. **Endophytic colonization by *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* induces growth promotion effect and increases the resistance of cucumber plants against *Aphis gossypii***. Journal of Plant Protection Research, v. 61, n. 4, 2021.

SHANG, J.; TANG, G.; LU, M.; WANG, C. **Host and environmental sensing by entomopathogenic fungi to infect hosts**. Current Clinical Microbiology Reports, v. 9, n. 4, p. 69-74, 2022.

SHARMA, L.; OLIVEIRA, I.; GONÇALVES, F.; RAIMUNDO, F.; SINGH, R. K.; TORRES, L.; MARQUES, G. **Effect of soil chemical properties on the occurrence and distribution of entomopathogenic fungi in Portuguese grapevine fields**. Pathogens, v. 10, n. 2, p. 137, 2021.

SHARMA, A.; SHARMA, S.; YADAV, P. K. **Entomopathogenic fungi and their relevance in sustainable agriculture: A review**. Cogent Food & Agriculture, v. 9, n. 1, p. 2180857, 2023.

SINGH, D.; RAINA, T. K.; SINGH, J. **Entomopathogenic fungi: An effective biocontrol agent for management of insect populations naturally**. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, v. 9, n. 6, p. 833, 2017.

TOSCANO-VERDUZCO, F. A.; CEDEÑO-VALDIVIA, P. A.; CHAN-CUPUL, W.; HERNÁNDEZ-ORTEGA, H. A.; RUIZ-SÁNCHEZ, E.; GALINDO-VELASCO, E.; CRUZ-CRESPO, E. **Phosphates solubilization, indol-3-acetic acid and siderophores production by *Beauveria brongniartii* and its effect on growth and fruit quality of *Capsicum chinense***. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, v. 95, n. 2, p. 235-246, 2020.

VANDENKOORNHUYSE, P.; QUAISER, A.; DUHAMEL, M.; LE VAN, A.; DUFRESNE, A. **The importance of the microbiome of the plant holobiont**. New Phytologist, v. 206, n. 4, p. 1196-1206, 2015.

VIVEKANANDHAN, P.; ALFORD, L.; KRUTMUANG, P. **Role of entomopathogenic fungi in sustainable agriculture**. Frontiers in Microbiology, v. 15, p. 1504175, 2024.

ZIBAE, A. **Entomopathogen and synthetic chemical insecticide: synergist and antagonist**. Microbes for Sustainable Insect Pest Management: An Eco-friendly Approach-Volume 1, p. 341-363, 2019.