CONTROLE BIOLÓGICO DA FERRUGEM DO CAFEEIRO CONILON: EFICÁCIA E MECANISMOS DE AÇÃO DE *Bacillus* spp.

Bruno Barros Goulart, Otavio Brandão Oliosi, Lucas Jordão Santana Tigre, João Pedro Martins Marconsine, Lorenzo Acre Egidio Gonçalves, Simone de Paiva Caetano Bucker Moraes, Willian Bucker Moraes.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000 – Alegre – ES, Brasil, barrosgoulartbruno4@gmail.com, oliosib07@gmail.com, lucasjst01@gmail.com, marconsine2407@gmail.com, lorenzoegidiogoncalves@gmail.com, simonepaivabucker@gmail.com, willian.moraes@ufes.br.

Resumo

A ferrugem do cafeeiro, causada pelo fungo biotrófico *Hemileia vastatrix*, é a principal doença fúngica do café e ameaça crescentemente o *Coffea canephora*, espécie predominante no Espírito Santo. O controle químico convencional apresenta limitações relacionadas a incompatibilidades de mistura, impacto ambiental e risco de seleção de resistência, justificando a busca por alternativas biológicas. Objetivou-se com este trabalho sintetizar as evidências sobre a eficácia e os mecanismos de ação de *Bacillus* spp. no controle biológico de *H. vastatrix*. Foi conduzida busca utilizando descritores relacionados a *Hemileia vastatrix*, *Bacillus* e controle biológico. Os resultados evidenciam que isolados de *Bacillus* e do gênero *Paenibacillus* inibem a germinação de urediniósporos e reduzem a severidade da ferrugem por antibiose via lipopeptídeos, mecanismo diretamente demonstrado em H. vastatrix, enquanto a colonização competitiva e a indução de resistência sistêmica são inferidas da literatura geral sobre Bacillus. Conclui-se que *Bacillus* spp. possui alternativa promissora para o manejo integrado da ferrugem no cafeeiro Conilon, embora estudos conduzidos em *C. canephora* ainda sejam escassos.

Palavras-chave: *Hemileia vastatrix*. Café. *Coffea canephora*. Lipopeptídeos.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias – Agronomia

Introdução

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, sustentado pelo cultivo de *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (Conilon). O Espírito Santo é o maior produtor nacional de Conilon, respondendo por cerca de 70% da produção da espécie, com centenas de milhares de hectares cultivados. Doenças fúngicas que comprometem a produtividade do cafeeiro representam ameaça direta à economia da cadeia produtiva (INCAPER, 2026).

A ferrugem, causada pelo fungo *Hemileia vastatrix*, é a doença mais estudada da cultura (Talhinhas et al., 2017). Patógeno biotrófico da ordem *Pucciniales*, coloniza o mesofilo foliar e produz urediniósporos, causando desfolha precoce e enfraquecimento da planta. Sua epidemiologia depende de temperatura amena e água livre na superfície foliar; a dispersão ocorre por vento e chuva, incluindo redistribuição a partir de folhas infectadas no solo (Li et al., 2023). Embora historicamente associada ao café arábica, a doença já atinge lavouras de Conilon no Espírito Santo (INCAPER, 2026).

Epidemias de ferrugem já causaram perdas de 30% a 50% em lavouras mal manejadas (Costa et al., 2019). O manejo baseia-se em fungicidas cúpricos, triazóis e estrobilurinas, mas a mistura em tanque de cobre com ciproconazol ou piraclostrobina reduz a eficácia de controle, além do risco de seleção de populações resistentes e de impactos ambientais associados ao uso intensivo desses produtos (Costa et al., 2019).

O controle biológico com rizobactérias do gênero *Bacillus* surge como alternativa: espécies como *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* e *B. velezensis* antagonizam fungos fitopatogênicos por antibiose via lipopeptídeos, competição, colonização da rizosfera/filosfera e indução de resistência sistêmica (ISR), com a vantagem de formarem endósporos estáveis para formulação de bioprodutos (Kloepper et al., 2004; Saiyam et al., 2024).

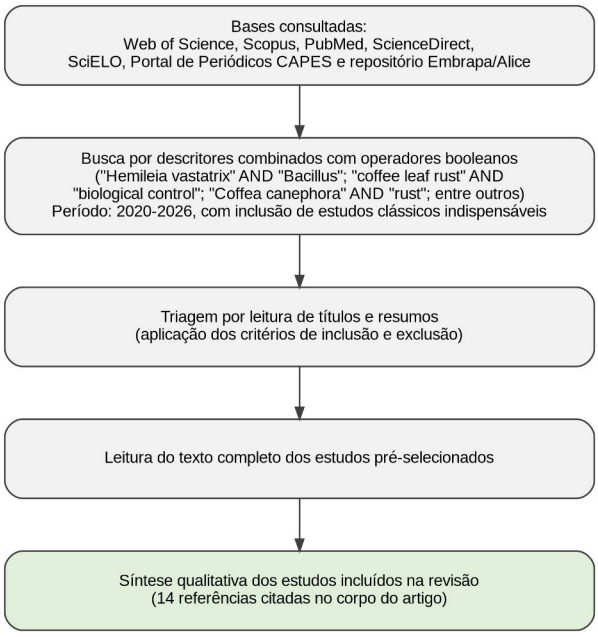
Entretanto, a maioria dos estudos disponíveis foi conduzida em *C. arabica*, havendo escassez de investigações em *C. canephora*. Diante disso, o objetivo desta revisão foi sintetizar e discutir as evidências sobre a eficácia de *Bacillus* spp. no controle biológico de *H. vastatrix*, seus mecanismos de ação, limitações práticas e aplicabilidade ao manejo integrado da ferrugem no cafeeiro Conilon.

Metodologia

A busca bibliográfica foi realizada nas bases Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, SciELO, Portal de Periódicos da CAPES e repositório Alice (Embrapa), combinando por operadores booleanos AND/OR descritores como "*Hemileia vastatrix*" AND "*Bacillus*"; "coffee leaf rust" AND "biological control"; "*Coffea canephora*" AND "rust"; "induced systemic resistance" AND "*Bacillus*". Priorizaram-se estudos publicados entre 2020 e 2026, admitindo-se clássicos indispensáveis à fundamentação histórica do tema.

Foram incluídos artigos com revisão por pares, em português e inglês, versando sobre a interação *Bacillus*–*H. vastatrix* ou fundamentação epidemiológica correlata. Após triagem por título e resumo e leitura do texto completo — processo ilustrado na Figura 1 —, foram selecionados para a síntese os estudos que apresentavam evidências diretamente relacionadas ao controle biológico de *H. vastatrix* por *Bacillus* spp. e gêneros bacterianos correlatos, bem como trabalhos fundamentais à compreensão dos mecanismos de ação envolvidos. Em razão da heterogeneidade das bases consultadas, não foi possível registrar de modo padronizado o número bruto de registros recuperados em cada etapa da triagem; essa quantificação precisa constitui limitação metodológica do presente trabalho e direção para revisões sistemáticas futuras.

Figura 1 - Fluxograma do processo de busca e seleção das referências bibliográficas utilizadas nesta revisão.



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Resultados

Isolados de *Bacillus* e do gênero correlato *Paenibacillus* exercem atividade antagônica direta sobre *H. vastatrix*. Bettiol e Várzea (1992) mostraram que suspensões de *B. subtilis* inibiram totalmente a germinação de urediniósporos de múltiplas raças em concentração-limiar, reduzindo 59–89% o número de lesões em folhas e mudas. O isolado B157 de *Bacillus*, epífito de cafeeiro orgânico de Minas Gerais, confirmou inibição da germinação *in vitro* e eficácia de campo estatisticamente comparável ao hidróxido de cobre (Haddad et al., 2013, 2014), atribuída à produção de compostos ainda não integralmente elucidados, hipótese compatível com o papel de lipopeptídeos não ribossomais.

Gómez-de la Cruz et al. (2024) avaliaram *Paenibacillus* sp. NMA1017, obtendo redução de até 94% na germinação de urediniósporos e de até 90% na incidência da ferrugem em *Coffea arabica* em casa de vegetação, com inibição também de outras espécies de ferrugem, sugerindo espectro de ação amplo. Mecanisticamente, a literatura converge para três frentes: (1) antibiose por lipopeptídeos cíclicos (iturina, fengicina, surfactina), que se inserem na membrana plasmática fúngica promovendo lise celular, com sinergismo entre as famílias (Saiyam et al., 2024; Romero et al., 2007); (2) indução de resistência sistêmica (ISR), sensibilizando vias de defesa vegetal para resposta mais rápida a desafios patogênicos subsequentes (Kloepper et al., 2004); e (3) colonização do filoplano, dependente de motilidade e biofilme, determinante do antagonismo direto e da persistência a campo, sendo a colonização radicular relevante sobretudo como via indireta de indução de resistência sistêmica (Blake et al., 2021).

A Tabela 1 sintetiza as principais evidências experimentais localizadas.

Tabela 1 - Síntese de estudos sobre o antagonismo de *Bacillus* spp. e *Paenibacillus* sp. a *Hemileia vastatrix*.

Estudo	**Isolado/espécie**	**Condição experimental**	**Principal resultado**
Bettiol; Várzea (1992)	*Bacillus subtilis* (AP-3, AP-150)	*In vitro*; folhas destacadas; mudas	Inibição total da germinação de urediniósporos em concentração-limiar; redução de 59–89% no número de lesões
Shiomi et al. (2006)	*Bacillus* sp. (23 isolados endofíticos)	*In vitro*; folhas destacadas; mudas em vaso	Redução de 10–73% na germinação de urediniósporos; isolados selecionados com controle da ferrugem acima de 50%
Haddad et al. (2009)	*Bacillus* sp. (isolado B157)	Campo (Brasil)	Redução da intensidade da ferrugem; eficácia comparável ao hidróxido de cobre
Silva et al. (2012)	234 cepas endofíticas, incl. *Bacillus megaterium* (isolado 109G)	*In vitro*; discos foliares; mudas	Redução significativa da severidade da ferrugem pelos isolados 109G e 119G; promoção de crescimento por isolados distintos
Haddad et al. (2013, 2014)	*Bacillus* sp. (isolado B157)	*In vitro*; campo (múltiplos ciclos)	Eficácia de campo estatisticamente similar ao hidróxido de cobre
Gómez-de la Cruz et al. (2024)	*Paenibacillus* sp. NMA1017	*In vitro*; casa de vegetação	Redução de até 94% na germinação e até 90% na incidência da ferrugem

Fonte: elaborado pelos autores com base em Bettiol e Várzea (1992), Shiomi et al. (2006), Haddad et al. (2009, 2013, 2014), Silva et al. (2012) e Gómez-de la Cruz et al. (2024).

Discussão

A convergência entre os estudos reforça a plausibilidade científica do uso de *Bacillus* spp. no manejo da ferrugem: independentemente da origem do isolado ou da metodologia, observa-se inibição relevante da germinação de urediniósporos e redução da severidade, compatíveis com mecanismos

conservados no gênero, sobretudo a produção de lipopeptídeos (Romero et al., 2007; Saiyam et al., 2024). Há, porém, divergências na magnitude do efeito, de valores intermediários (Bettiol; Várzea, 1992) a superiores a 90% (Gómez-de la Cruz et al., 2024), consistentes com a natureza cepa-específica da produção de metabólitos antagônicos, o que impede extrapolação direta entre isolados, cultivares e condições edafoclimáticas.

Uma limitação transversal é a escassez de estudos conduzidos especificamente em *C. canephora*: quase toda a evidência disponível provém de *C. arabica*, espécie com fisiologia e manejo distintos, o que restringe a extrapolação e constitui direção prioritária de pesquisa. Soma-se a isso a discrepância frequente entre desempenho em laboratório/casa de vegetação e a campo, atribuída à dificuldade de persistência do agente de biocontrole sob radiação UV, flutuações de umidade e competição com a microbiota nativa (Blake et al., 2021), um dos principais entraves à adoção comercial de biofungicidas à base de *Bacillus*.

Comparado ao controle químico, *Bacillus* spp. tende a apresentar eficácia comparável, embora frequentemente inferior a fungicidas sistêmicos, aproximando-se do desempenho de cúpricos (Haddad et al., 2014), sugerindo seu uso como componente de manejo integrado, reduzindo a dependência de fungicidas sintéticos e a pressão de seleção de resistência sem comprometer o controle global (Ons et al., 2020). A incompatibilidade físico-química entre cobre e fungicidas sistêmicos em mistura de tanque (Costa et al., 2019) reforça a relevância de investigar a compatibilidade de aplicações combinadas entre bioprodutos de *Bacillus* e fungicidas no sistema *Bacillus*–*H. vastatrix*–Conilon.

Por fim, os mecanismos de ISR mediados por *Bacillus* (Kloepper et al., 2004) permanecem pouco explorados especificamente nesse patossistema, concentrando-se a evidência disponível em antibiose direta, lacuna adicional relevante para consolidar cientificamente o uso de *Bacillus* spp. no manejo integrado da ferrugem no cafeeiro Conilon.

Conclusão

A síntese da literatura indica que *Bacillus* spp. e gêneros correlatos como *Paenibacillus*, apresentam potencial biotecnológico consistente para o controle biológico da ferrugem do cafeeiro, com eficácia demonstrada em condições laboratoriais, de casa de vegetação e, em menor número, de campo, sobretudo por antibiose, mecanismo diretamente comprovado em H. vastatrix, complementada por colonização competitiva e indução de resistência sistêmica, cuja contribuição nesse patossistema é inferida da literatura geral sobre Bacillus. As limitações, variabilidade entre isolados e condições experimentais, dificuldade de persistência a campo e escassez de estudos em *C. canephora*, indicam que a aplicabilidade prática de *Bacillus* spp. ao manejo da ferrugem nessa espécie ainda depende de validação experimental direta, não podendo ser assumida por extrapolação de resultados obtidos em *C. arabica*. Portanto, recomenda-se a condução de ensaios de bioprospecção e eficácia de campo com isolados de *Bacillus* spp. em lavouras de Conilon do Espírito Santo, a investigação da compatibilidade com fungicidas em esquemas de manejo integrado, e a elucidação da contribuição da indução de resistência sistêmica nesse patossistema, subsidiando recomendações técnicas robustas para o manejo integrado e sustentável da ferrugem no cafeeiro Conilon.

Referências

BETTIOL, W.; VÁRZEA, V. M. P. Controle biológico da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) do cafeeiro com *Bacillus subtilis* em condições controladas. Fitopatologia Brasileira, v. 17, n. 1, p. 91-95, 1992.

BLAKE, C.; CHRISTENSEN, M. N.; KOVÁCS, Á. T. Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. Molecular Plant-Microbe Interactions, v. 34, n. 1, p. 15-25, 2021. DOI: 10.1094/MPMI-08-20-0225-CR.

COSTA, G. A.; LIRA, J. B.; FREITAS-LOPES, R. L.; LOPES, U. P. Tank mix application of copper hydroxide either with cyproconazole or pyraclostrobin fungicides reduced the control of coffee leaf rust. Crop Protection, v. 124, art. 104856, 2019.

GÓMEZ-DE LA CRUZ, I.; MARTÍNEZ-BOLAÑOS, M.; CHÁVEZ-RAMÍREZ, B.; ESTRADA-DE LOS SANTOS, P. Biocontrol of *Hemileia vastatrix*, the causal agent of coffee leaf rust, by *Paenibacillus* sp. NMA1017. Plant Disease, v. 108, n. 10, p. 3163-3169, 2024. DOI: 10.1094/PDIS-01-24-0015-RE.

HADDAD, F.; MAFFIA, L. A.; MIZUBUTI, E. S. G.; TEIXEIRA, H. Biological control of coffee rust by antagonistic bacteria under field conditions in Brazil. Biological Control, v. 49, n. 2, p. 114-119, 2009. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2009.02.004.

HADDAD, F.; SARAIVA, R. M.; MIZUBUTI, E. S. G.; ROMEIRO, R. S.; MAFFIA, L. A. Antifungal compounds as a mechanism to control *Hemileia vastatrix* by antagonistic bacteria. Tropical Plant Pathology, v. 38, p. 398-405, 2013. DOI: 10.1590/S1982-56762013000500004.

HADDAD, F.; SARAIVA, R. M.; MIZUBUTI, E. S. G.; ROMEIRO, R. S.; MAFFIA, L. A. Isolation and selection of *Hemileia vastatrix* antagonists. European Journal of Plant Pathology, v. 139, p. 763-772, 2014. DOI: 10.1007/s10658-014-0430-9.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Cafeicultura — Café Conilon. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/cafeicultura-conilon. Acesso em: 08 jul. 2026.

KLOEPPER, J. W.; RYU, C. M.; ZHANG, S. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. Phytopathology, v. 94, n. 11, p. 1259-1266, 2004. DOI: 10.1094/PHYTO.2004.94.11.1259.

LI, K.; HAJIAN-FOROOSHANI, Z.; VANDERMEER, J. et al. Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) is spread by rain splash from infected leaf litter in a semi-controlled experiment. Journal of Plant Pathology, v. 105, p. 667-672, 2023. DOI: 10.1007/s42161-023-01404-2.

ONS, L.; BYLEMANS, D.; THEVISSEN, K.; CAMMUE, B. P. A. Combining biocontrol agents with chemical fungicides for integrated plant fungal disease control. Microorganisms, v. 8, n. 12, art. 1930, 2020. DOI: 10.3390/microorganisms8121930.

ROMERO, D.; DE VICENTE, A.; RAKOTOALY, R. H. et al. The iturin and fengycin families of lipopeptides are key factors in antagonism of *Bacillus* subtilis toward *Podosphaera fusca*. Molecular Plant-Microbe Interactions, v. 20, n. 4, p. 430-440, 2007.

SAIYAM, D.; DUBEY, A.; MALLA, M. A.; KUMAR, A. Lipopeptides from *Bacillus*: unveiling biotechnological prospects — sources, properties, and diverse applications. Brazilian Journal of Microbiology, v. 55, n. 1, p. 281-295, 2024. DOI: 10.1007/s42770-023-01228-3.

SHIOMI, H. F.; SILVA, H. S. A.; MELO, I. S. de; NUNES, F. V.; BETTIOL, W. Bioprospecting endophytic bacteria for biological control of coffee leaf rust. Scientia Agricola, v. 63, n. 1, p. 32-39, 2006. DOI: 10.1590/S0103-90162006000100006.

SILVA, H. S. A.; TOZZI, J. P. L.; TERRASAN, C. R. F.; BETTIOL, W. Endophytic microorganisms from coffee tissues as plant growth promoters and biocontrol agents of coffee leaf rust. Biological Control, v. 63, n. 1, p. 62-67, 2012. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2012.06.005.

TALHINHAS, P.; BATISTA, D.; DINIZ, I.; VIEIRA, A.; SILVA, D. N.; LOUREIRO, A.; TAVARES, S.; PEREIRA, A. P.; AZINHEIRA, H. G.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; VÁRZEA, V.; SILVA, M. D. C. The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. Molecular Plant Pathology, v. 18, n. 8, p. 1039-1051, 2017. DOI: 10.1111/mpp.12512.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Epidemiologia e Manejo de Doenças de Plantas Agrícolas e Florestais (LEMP) e ao Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Manejo Fitossanitário de Pragas e Doenças (NUDEMAFI), da Universidade Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre, pela infraestrutura para realização deste estudo, e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.