

SOPHIA SILVEIRA SALES

OCORRÊNCIA DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS EM SOLOS COM CULTIVO DE
CAFEEIRO EM AGRICULTURA REGENERATIVA

Monte Carmelo - MG

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

SOPHIA SILVEIRA SALES

OCORRÊNCIA DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS EM SOLOS COM CULTIVO DE
CAFEIEIRO EM AGRICULTURA REGENERATIVA

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como requisito necessário para a obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa Andalo Mendes de Carvalho

Monte Carmelo

2026

SOPHIA SILVEIRA SALES

OCORRÊNCIA DE FUNGOS ENTOMOPATOGÊNICOS EM SOLOS COM CULTIVO DE
CAFEEIRO EM AGRICULTURA REGENERATIVA

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de
Agronomia da Universidade Federal de
Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como
requisito necessário para a obtenção do grau de
Engenheiro Agrônomo.

Monte Carmelo, 20 de março de 2026

Banca Examinadora

Profª. Dra. Vanessa Andaló Mendes de Carvalho
Orientadora

Ms. Fernando Garcia
Membro da Banca

Ms. Jéssyca Gonçalves Duarte
Membro da Banca

Monte Carmelo
2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por ter me concedido saúde, força e sabedoria ao longo de toda esta caminhada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio incansável e por sempre acreditarem nos meus sonhos. Ao meu namorado, pela compreensão e por estar sempre ao meu lado, tornando essa trajetória mais leve.

À minha orientadora, Profa. Dra. Vanessa Andaló Mendes de Carvalho, pela orientação dedicada, pelos ensinamentos valiosos, pela paciência e por todas as contribuições que foram essenciais para a realização e o sucesso deste trabalho.

À minha querida parceira de laboratório, Victória, por toda a parceria, troca de conhecimentos, auxílio nos experimentos e pela amizade que tornou os dias no laboratório mais agradáveis. Aos demais amigos de laboratório em nome do Prof. Dr. Lucas Silva de Faria, por todo o apoio no dia a dia, que de forma direta ou indireta contribuiu para este trabalho, tornando essa jornada acadêmica mais rica e colaborativa.

A Juliana Rezende Mello e todos os funcionários da Fazenda Santa Bárbara, pela receptividade, pelo apoio logístico e pela indispensável contribuição na coleta das amostras, que foram a base para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro por meio da bolsa de iniciação científica, cujo suporte foi fundamental para a dedicação e execução deste estudo.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), especialmente ao curso de Agronomia, pela estrutura oferecida, pelas oportunidades de aprendizado e pelo ambiente acadêmico que foram fundamentais para meu crescimento profissional e pessoal ao longo da graduação.

Por fim, agradeço aos membros da banca avaliadora pela disponibilidade, pelo tempo dedicado à leitura deste trabalho e pelas valiosas contribuições que certamente o enriquecerão.

SUMÁRIO

RESUMO	6
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVO	10
3. REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1. Cultura do cafeeiro	10
3.2. Cafeicultura regenerativa.....	11
3.3. Solos.....	11
3.4. Fungos entomopatogênicos	13
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1. Criação de <i>Tenebrio molitor</i> L.	15
4.2. Obtenção e manutenção dos fungos entomopatogênicos	16
4.3. Classificação	19
4.4. Análise estatística.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
6. CONCLUSÃO.....	23
REFERÊNCIAS	29

RESUMO

A cafeicultura representa um dos pilares fundamentais da economia agrícola brasileira, sendo não apenas uma commodity de expressiva relevância no mercado internacional, mas também um elemento profundamente enraizado na cultura e no cotidiano do país. No entanto, os sistemas de produção convencionais frequentemente enfrentam desafios significativos relacionados à degradação do solo, perda de biodiversidade e dependência excessiva de insumos sintéticos. Neste contexto, a agricultura regenerativa emerge como um paradigma inovador, que transcende o conceito de sustentabilidade ao buscar ativamente a recuperação e o fortalecimento dos ecossistemas agrícolas. Este modelo de manejo prioriza a saúde do solo como um organismo vivo, implementando práticas que elevam o teor de matéria orgânica, melhoram a estrutura edáfica e promovem a biodiversidade microbiana, condições essenciais para o estabelecimento de um agroecossistema equilibrado e resiliente. Dentro desse ecossistema complexo, os fungos entomopatogênicos destacam-se como agentes de controle biológico de extraordinária importância. Organismos naturalmente presentes no solo, como *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*, possuem a capacidade única de infectar e causar doenças em insetos-praga, atuando como reguladores naturais. Para analisar a relação entre o manejo regenerativo e a presença desses microrganismos benéficos, este trabalho teve como objetivo verificar a ocorrência e distribuição de fungos entomopatogênicos em solos de cafeicultura que utilizam o sistema regenerativo. Este estudo foi desenvolvido em talhões de café da Fazenda Santa Bárbara, localizada em Monte Carmelo, MG. A metodologia adotada compreende a coleta de amostras de solo em pontos georreferenciados, abrangendo áreas com diferentes históricos de cultivo e práticas de manejo. A detecção e o isolamento dos fungos entomopatogênicos foi realizado por meio de bioensaios sensíveis, nos quais larvas de *Tenebrio molitor* foram expostas às amostras de solo. Indivíduos que vierem a óbito serão transferidos para câmara úmida, procedimento que favorece a esporulação fúngica e subsequentemente permite o isolamento dos patógenos em meio de cultura Ágar Batata-Dextrose (BDA), garantindo a obtenção de culturas puras para análise. Os resultados revelaram que a ocorrência de fungos entomopatogênicos é significativamente influenciada pela sazonalidade e pelo histórico de manejo dos talhões. Observou-se que o restabelecimento da umidade no solo após o período seco atua como o principal gatilho para a atividade fúngica, enquanto o manejo regenerativo, através do aporte de biomassa e plantas de cobertura, demonstrou ser eficaz na mitigação da compactação e na manutenção da biodiversidade microbiana em talhões mais antigos. Notavelmente, a probabilidade de ocorrência dos fungos não apresentou variações significativas entre os sistemas de aplicação de insumos em taxa fixa ou variável, sugerindo que a estabilidade do microclima edáfico, promovida pela cobertura vegetal, é o fator determinante para a resiliência desses agentes de controle biológico no agroecossistema cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea* spp., controle biológico, *Metarhizium* spp., agricultura regenerativa.

1. INTRODUÇÃO

O café possui papel de destaque na economia agrícola brasileira, sendo cultivado em diversas regiões do país, com forte presença em propriedades de pequeno, médio e grande porte. Mais do que um produto de exportação ou um item do cotidiano, o café representa uma cultura tradicional que sustenta milhares de famílias e molda paisagens e dinâmicas sociais (CONAB, 2023). Além disso, é a segunda bebida mais consumida no Brasil, perdendo apenas para a água (ABIC, 2023), mas últimos anos, tem-se observado um crescimento expressivo no consumo de cafés especiais, com foco na valorização da qualidade, da rastreabilidade e da origem do produto (VILELA et al., 2023). O café é, portanto, um verdadeiro símbolo da identidade brasileira, presente na rotina das pessoas, na cultura popular e na própria história do país (MARCONDES, 2019)., e tem papel significativo na geração de empregos, impulsionando o agronegócio nacional (CNA, 2022).

A produção cafeeira enfrenta desafios crescentes, como mudanças climáticas, degradação do solo, perda de biodiversidade e manejo inadequado dos recursos naturais (MARTINS; SILVA, 2020). Nesse contexto, a agricultura regenerativa surge como paradigma transformador do sistema produtivo. De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2024), esse modelo propõe práticas que mantenham ou melhorem a capacidade produtiva do solo, assegurando aumento da matéria orgânica, menor emissão de gases de efeito estufa e segurança alimentar. A instituição reforça que práticas como plantio direto, rotação de culturas, cobertura vegetal permanente e controle da erosão são essenciais para regenerar o solo e restaurar os serviços ecossistêmicos do agroecossistema.

A agricultura regenerativa propõe um manejo focado na restauração da saúde do solo, tratando-o como um ecossistema vivo e funcional, e não apenas como um substrato para insumos químicos (MONTGOMERY, 2017). Nesse sistema, o aumento da biodiversidade fúngica é um indicador de resiliência. Por meio de práticas como o plantio direto, a rotação de culturas e a eliminação de fungicidas sistêmicos, busca-se favorecer a simbiose entre plantas e Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs). Esses microrganismos atuam na interface solo-planta, aumentando a eficiência na absorção de fósforo e água (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Sob a ótica regenerativa, a relação entre o solo e os fungos vai além da nutrição vegetal, abrangendo a própria estruturação física do terreno. A produção de glomalina, uma glicoproteína excretada pelas hifas fúngicas, atua como um agente cimentante, promovendo a

formação e estabilidade de agregados (MONTGOMERY, 2017). Esse processo não apenas previne a erosão, mas também potencializa o sequestro de carbono no solo, mitigando perdas e promovendo a sustentabilidade do agroecossistema a longo prazo (PRIMAVESI, 2002).

Os sistemas regenerativos veem o solo como um organismo vivo, promovendo a interação e o funcionamento saudável da vida microbiana (LAL, 2016; BENDER; WAGG; VAN DER HEIJDEN, 2016). Isso reflete na valorização dos fungos entomopatogênicos, organismos capazes de infectar e controlar natural e biologicamente insetos-praga (VEGA et al., 2009; LACEY et al., 2015). Espécies como *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* são estudadas como alternativas viáveis aos inseticidas químicos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a segurança dos trabalhadores rurais (ALVES, 1998; MONTEIRO et al., 2020).

A utilização de fungos entomopatogênicos não apenas reduz o uso de produtos químicos, como também contribui para o equilíbrio ecológico do agroecossistema (MORAES et al., 2017). No entanto, é essencial conhecer a biodiversidade desses microrganismos no solo, especialmente em sistemas regenerativos. Em solos manejados com práticas conservacionistas, espera-se maior diversidade e abundância desses fungos, favorecendo sua atuação natural (SILVA et al., 2022). A compactação do solo, caracterizada pelo aumento da densidade aparente e redução da macroporosidade, representa um dos principais entraves à produtividade agrícola convencional, pois limita a infiltração de água e a troca gasosa na rizosfera (BRADY; WEIL, 2013).

A regeneração desses solos ocorre através do aporte contínuo de matéria orgânica e da manutenção da cobertura vegetal, que protege a superfície contra o impacto das gotas de chuva e o selamento superficial. A atividade biológica, estimulada por esse manejo, promove a formação de bioporos, canais criados por raízes em decomposição e pela macrofauna, como minhocas, que são mais estáveis e eficientes para a condutividade hidráulica do que as fendas geradas pelo revolvimento mecânico (PRIMAVESI, 2002). Esse processo de reestruturação é mediado pela vida do solo, onde os polissacarídeos bacterianos e as hifas fúngicas atuam como agentes estabilizadores dos agregados, aumentando a resistência do solo a novas compressões (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Investigar a distribuição desses fungos em cafezais regenerativos possibilita identificar seu potencial no manejo integrado de pragas, diminuindo a dependência de insumos sintéticos. Isso auxilia na manutenção da microbiota do solo e na prevenção de desequilíbrios ecológicos a longo prazo (CAMPOS et al., 2020; FERREIRA; REIS, 2018).

Ao avaliar a presença natural de fungos entomopatogênicos em solos conduzidos sob princípios regenerativos, este trabalho busca valorizar os recursos biológicos do agroecossistema. Com isso, além de reduzir custos com produtos químicos, fortalece-se a resiliência do sistema, promovendo um ciclo sustentável de regeneração, equilíbrio ambiental e produção de alimentos saudáveis (GOMES et al., 2021).

O manejo sustentável de pragas agrícolas é uma demanda crescente na agricultura moderna, especialmente em culturas de grande valor econômico e social, como a cafeicultura (PRADO et al., 2021). A adoção de práticas que reduzam o uso de defensivos químicos e ao mesmo tempo, promovam o equilíbrio ecológico dos agroecossistemas tem se mostrado essencial para garantir a produtividade, a saúde ambiental e a segurança dos trabalhadores e consumidores (ALTIERI; NICHOLLS, 2013; VILELA; ZUCCHI, 2019). Nesse cenário, os fungos entomopatogênicos se destacam como ferramentas promissoras no contexto do controle biológico (FONTES; VALADARES-INGLIS, 2020).

Fungos entomopatogênicos, como *M. anisopliae* e *B. bassiana*, são microrganismos que ocorrem naturalmente no solo e apresentam a capacidade de colonizar diversos artrópodes-praga, como insetos e ácaros de importância agrícola. Esses microrganismos atuam promovendo epizootias nas populações de pragas, levando os indivíduos à morte ou interferindo significativamente em seus comportamentos alimentares e reprodutivos (VALLIN, 2022). Tais características tornam esses fungos aliados estratégicos no controle de pragas, especialmente em sistemas de produção que buscam maior equilíbrio biológico.

A sua aplicação na cafeicultura pode trazer benefícios importantes, como a redução da pressão de pragas, como o bicho-mineiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae) e a broca-do-café (*Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae), que comprometem a produtividade e a qualidade dos grãos (PRADO et al., 2020). O uso de fungos entomopatogênicos também contribui para a diminuição da resistência de pragas aos inseticidas convencionais (ALVES, 2022), uma vez que o modo de ação desses organismos é distinto dos produtos químicos, atuando principalmente por penetração cuticular e proliferação fúngica interna no hospedeiro (LACEY et al., 2015).

Além da eficácia no controle, esses microrganismos possuem outras características desejáveis que reforçam sua importância. Uma delas é o risco mínimo que oferecem a organismos benéficos não-alvo, como abelhas, minhocas e inimigos naturais das pragas, incluindo parasitoides e predadores. Também apresentam baixa ou nenhuma toxicidade para mamíferos, sendo considerados uma alternativa segura para os trabalhadores rurais e para o ambiente (LACEY et al., 2015; FONTES; VALADARES-INGLIS, 2020).

Outro ponto relevante é que o uso desses fungos no contexto da agricultura regenerativa, onde há menor uso de insumos químicos, pode favorecer sua permanência e multiplicação natural no solo (VEGA et al., 2018). Solos com maior teor de matéria orgânica e com estrutura preservada tendem a abrigar maior diversidade microbiana (LAL, 2016), o que potencializa o papel dos entomopatógenos no sistema agrícola (MEYLING; EILENBERG, 2007).

Portanto, esta pesquisa buscou analisar como os fungos entomopatogênicos estão distribuídos em solos de cafezais regenerativos e como práticas regenerativas influenciam sua diversidade e presença. O objetivo é contribuir com um modelo agrícola mais harmônico, unindo produtividade, preservação ambiental e cuidado com o solo, base da produção agrícola.

2. OBJETIVO

O trabalho teve como objetivo verificar a ocorrência de fungos entomopatogênicos em solos de cafeicultura regenerativa na fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Cultura do cafeeiro

O cafeeiro é uma planta perene pertencente à família Rubiaceae, que abrange cerca de 500 gêneros e mais de 6.000 espécies, muitas delas tropicais. Dentre as espécies cultivadas comercialmente, destacam-se *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner (conhecida como conilon ou robusta). Estima-se que o gênero *Coffea* seja nativo da África, com origem provável na Etiópia, sendo posteriormente divulgado para diversas partes do mundo a partir do século XV. Atualmente, o café é uma das *commodities* agrícolas mais comercializadas no planeta, cultivada em mais de 70 países em regiões tropicais e subtropicais (ICO, 2024; MAPA, 2023).

O cafeeiro apresenta um ciclo de vida longo, podendo produzir economicamente por até 20 a 30 anos, com início da produção entre o segundo e o terceiro ano após o plantio. A cultura

possui critérios edafoclimáticos específicos, sendo sensíveis a extremos de temperatura, locais e déficit hídrico prolongado. O cultivo é favorecido em altitudes superiores a 600 metros para o arábica, com temperaturas ideais entre 18 e 23°C. Além disso, o cafeeiro possui metabolismo do tipo C3 e sistema radicular profundo, adaptado a solos bem drenados, ricos em matéria orgânica e com pH próximo da neutralidade. O manejo da lavoura inclui práticas como adubação equilibrada, podas, controle fitossanitário, supervisão em épocas críticas e colheita seletiva ou mecanizada, dependendo do sistema de produção (REZENDE et al., 2016; EMBRAPA, 2023).

Embora seja cultivado em todo o território brasileiro, os maiores volumes de produção se concentram nas regiões Sudeste e Norte do Espírito Santo, com destaque para os estados de Minas Gerais (responsável por cerca de 50% da produção nacional de café arábica), Espírito Santo (líder na produção de conilon), São Paulo, Bahia e Rondônia. O Brasil é, desde o século XIX, o maior produtor e segundo exportador de café do mundo, e o maior consumidor, ficando para trás apenas da água como bebida mais ingerida no país (ABIC, 2023). De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a produção brasileira de café na safra 2023/2024 foi estimada em 58,8 milhões de sacas de 60 kg, sendo 69% de café arábica e 31% de conilon.

O café é a segunda bebida mais consumida no Brasil, estando presente em aproximadamente 98% dos lares brasileiros (ABIC; CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ; EMBRAPA CAFÉ, 2015). Além de sua relevância econômica e produtiva, o café é um símbolo da identidade nacional, marcando presença no cotidiano, na cultura e na história do país, bem como desempenhando papel social em interações como encontros, reuniões e visitas (JACOBS DOUWE EGBERTS, 2019). Atualmente, observa-se ainda o crescimento do consumo de cafés especiais, acompanhado pela valorização da qualidade e da rastreabilidade, fatores que impulsionam o agronegócio e geram oportunidades.

3.2. Cafeicultura regenerativa

A cafeicultura convencional, historicamente pautada pelo paradigma da revolução verde, frequentemente se apoia no monocultivo, na mecanização intensiva e no uso de insumos sintéticos, resultando em significativa degradação ambiental, com perda de biodiversidade, erosão do solo e contaminação de recursos hídricos (PRADO et al., 2021). Em contrapartida a

esse modelo, surge a cafeicultura regenerativa, um paradigma agroecológico que transcende o conceito de sustentabilidade. Seu objetivo não é apenas minimizar os danos, mas ativamente restaurar e regenerar os ecossistemas agrícolas, promovendo serviços ecossistêmicos essenciais e aumentando a resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Os princípios da cafeicultura regenerativa são fundamentados no manejo do solo como um organismo vivo. Práticas como a adoção de coquetéis de adubos verdes para cobertura permanente do solo, a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e a aplicação de compostos orgânicos e biofertilizantes visam incrementar continuamente o teor de matéria orgânica edáfica. Este processo é crucial, pois recupera a estrutura física do solo, aumenta sua capacidade de retenção de água e nutrientes e sequestra carbono atmosférico, mitigando os efeitos das mudanças climáticas (LAL, 2020). Nesse sistema, a fertilidade é construída biologicamente, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais.

A diversificação da paisagem é outro pilar central. A introdução de árvores de sombreamento, quebra-ventos e a criação de sistemas agroflorestais (SAFs) multifuncionais transformam a lavoura de café em um ecossistema complexo e estratificado. Essa abordagem restaura a conectividade ecológica, fornece habitat para polinizadores e inimigos naturais de pragas, estabelecendo o controle biológico natural (ALTIERI; NICHOLLS, 2012). Consequentemente, a regeneração do ecossistema confere maior estabilidade produtiva à lavoura, amortecendo os impactos de estresses abióticos, como veranicos e geadas, comuns em regiões cafeeiras.

Do ponto de vista econômico e social, a cafeicultura regenerativa abre novas frentes de valor no mercado, atendendo a uma demanda crescente por produtos que carregam atributos de ética ambiental e rastreabilidade. Cafés produzidos sob esse modelo podem acessar nichos de mercado premium, como certificações orgânicas e de comércio justo, gerando maior renda e agregando valor à propriedade rural (TEIXEIRA; FONSECA, 2019). Além disso, ao reduzir a dependência de insumos externos, promove-se uma maior autonomia do produtor e melhoria das condições de saúde e segurança no trabalho no campo.

Em conclusão, a cafeicultura regenerativa consolida-se como um paradigma agrícola fundamental para o século XXI, integrando a produtividade à regeneração ativa dos ecossistemas (MAZOYER; ROUDART, 2010). Ao priorizar a construção da saúde do solo (LAL, 2020), a diversificação da paisagem (ALTIERI; NICHOLLS, 2012) e a resiliência bioclimática, este modelo demonstra ser viável técnica e economicamente (TEIXEIRA; FONSECA, 2019), respondendo simultaneamente aos desafios ambientais e mercadológicos.

Portanto, sua adoção e ampliação representam um passo crucial na transição para sistemas agroalimentares verdadeiramente sustentáveis, capazes de garantir a perenidade da cafeicultura e a conservação dos recursos naturais para as futuras gerações, revertendo o ciclo de degradação associado às práticas convencionais (PRADO et al., 2021).

3.3. Solos

O solo predominante na região de Monte Carmelo e no Cerrado mineiro é classificado majoritariamente como Latossolo Vermelho de textura argilosa a muito argilosa, caracterizando-se por ser profundo, altamente intemperizado e bem drenado (EMBRAPA, 2018). Do ponto de vista químico, esses solos apresentam acidez acentuada e baixa saturação por bases, o que exige correções via calagem e adubação para viabilizar a cafeicultura (PRIMAVESI, 2002). No entanto, sua estrutura física granular proporciona excelente porosidade, embora seja vulnerável à compactação superficial pelo tráfego de máquinas, fator que altera o microclima edáfico e pode suprimir a microbiota fúngica (BRADY; WEIL, 2013)

A integração entre o manejo físico e biológico, portanto, torna-se o pilar para a recuperação de solos degradados, visando um sistema produtivo resiliente às variações climáticas e menos dependente de intervenções mecânicas agressivas (MONTGOMERY, 2017). Para além do papel específico no controle biológico de pragas, os fungos constituem a base de um ecossistema subterrâneo complexo e interconectado, cuja saúde é diretamente proporcional à qualidade do solo e, por extensão, à resiliência de todo o agroecossistema. Na perspectiva da agricultura regenerativa, que enxerga o solo como um organismo vivo (ALTIERI; NICHOLLS, 2003).

3.4. Fungos entomopatogênicos

Os fungos entomopatogênicos são microrganismos que atuam como agentes naturais de controle de pragas, infectando e causando doenças letais em insetos e outros artrópodes. Sua importância na agricultura está relacionada ao potencial que possuem para substituir ou

complementar o uso de inseticidas químicos, contribuindo com sistemas de manejo mais sustentáveis e seguros (ALVES, 1998; LACEY et al., 2015).

Esses fungos são encontrados naturalmente em solos agrícolas, ambientes florestais, restos de matéria orgânica, fezes de animais e até na superfície de folhas (FONTES; VALADARES-INGLIS, 2020). Sua presença é favorecida em solos com bom teor de matéria orgânica, estrutura preservada e ausência de contaminantes químicos, características comuns em áreas manejadas com princípios da agricultura regenerativa. Em ambientes equilibrados, esses microrganismos podem agir de forma espontânea sobre populações de pragas, controlando-as por meio de epizootias (VALLIN, 2022).

Entre os gêneros mais estudados e utilizados na agricultura destacam-se *Beauveria*, *Metarhizium*, *Cordyceps* e *Lecanicillium*, sendo *B. bassiana* e *M. anisopliae* os mais amplamente aplicados no controle biológico de pragas agrícolas. Essas espécies possuem alta capacidade de infecção, ampla gama de hospedeiros e facilidade de multiplicação em laboratório, o que favorece seu uso em formulações comerciais.

O modo de ação dos fungos entomopatogênicos é distinto dos inseticidas químicos. Ao contrário de produtos que precisam ser ingeridos pelo inseto, esses fungos atuam por contato: seus esporos (conídios) aderem à cutícula do hospedeiro e, em condições favoráveis de umidade e temperatura, iniciam o processo de germinação. O tubo germinativo proveniente do esporo se diferencia em uma estrutura especializada de infecção denominada apressório. Esta estrutura, geralmente inchada e de paredes espessadas, adere-se firmemente à cutícula do inseto por meio de mucilagem e permite que o fungo exerça pressão mecânica para a penetração (ROBERTS; HUMBER, 1981).

A partir do apressório, forma-se uma hifa de penetração extremamente fina, que atua como um grampo de penetração. A força física desse "grampo", combinada com a ação de enzimas cuticulares líticas (como quitinases, proteases e lipases), degrada a camada externa do corpo do inseto, permitindo que o fungo atravesse a cutícula e alcance a hemocèle (ST. LEGER et al., 1989). Uma vez no interior, o fungo se propaga na forma de corpos hifais ou blastósporos, proliferando-se e invadindo os tecidos internos, levando à morte do hospedeiro por desequilíbrio fisiológico, ação de toxinas ou desidratação (ALVES, 1998; LACEY et al., 2015). Após a morte do hospedeiro, o fungo reconquista o tegumento, esporula sobre o cadáver, liberando novos esporos no ambiente e reiniciando o ciclo.

Essa capacidade de multiplicação e propagação natural torna os fungos entomopatogênicos uma ferramenta eficaz no controle de pragas a longo prazo, principalmente quando integrados a sistemas de manejo agroecológico. Além disso, apresentam vantagens

como seletividade (baixo impacto sobre organismos benéficos), ausência de resíduos tóxicos nos alimentos e segurança para seres humanos e animais (FONTES; VALADARES-INGLIS, 2020).

No caso da cafeicultura em que pragas como a broca-do-café e o bicho-mineiro causam grandes prejuízos, o uso de fungos entomopatogênicos representa uma alternativa promissora e alinhada aos princípios da agricultura regenerativa.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no laboratório de Entomologia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Monte Carmelo, no município de Monte Carmelo, MG, localizado nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 18° 44' 5'' Sul, Longitude: 47° 29' 47'' Oeste e altitude média de 890 metros, em relação ao nível do mar. Os fungos analisados no experimento foram obtidos através de amostras de solos recolhidas da Fazenda Santa Bárbara, situada no município de Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas de aproximadamente 18°47'17.52" S de latitude e 47°33'42.19" O de longitude e apresenta uma altitude de aproximadamente 990 m.

4.1. Criação de *Tenebrio molitor* L.

Os indivíduos de *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) utilizados no experimento foram obtidos a partir da colônia de criação mantida sob condições controladas no laboratório de Entomologia da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo. Os insetos eram criados em recipientes plásticos contendo substrato composto por farelo de trigo, que servia como fonte de alimento e abrigo, e suplementados com fontes de umidade, como batata, que são fornecidas constantemente.

4.2. Obtenção e manutenção dos fungos entomopatogênicos

A coleta das amostras de solo foi realizada em pontos previamente georreferenciados, totalizando doze pontos amostrais por talhão, os quais são constituídos por uma combinação de pontos fixos e variáveis para uma melhor representatividade espacial. O estudo foi conduzido em três talhões distintos, selecionados com base em seus diferentes anos de plantio e cultivares (Figura 1).

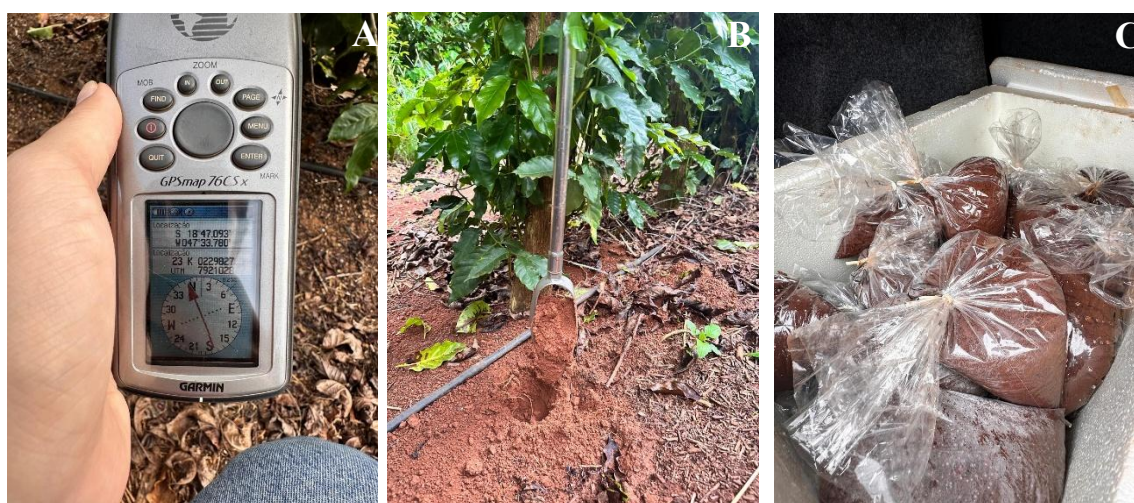


Figura 1. Materiais usados na obtenção das amostras solo para isolamento de fungos entomopatogênicos. A) GPS; B) Trado; C) Amostras de solo.

O talhão implantado em 2015 possui a cultivar Mundo Novo e está subdividido em dois setores: o S01, com 7,85 hectares, que foi conduzido com coberturas de braquiária (*uruchloa.*) e milheto (*Pennisetum glaucum*), e o S02, com 7,96 hectares, que recebeu um *mix* de espécies vegetais de cobertura. O talhão de 2016, por sua vez, é composto pela cultivar Topázio, reconhecida por seu potencial produtivo e uniformidade de maturação, mas com maior suscetibilidade à broca-do-café, um fator considerado relevante para a análise fitossanitária. Este talhão está subdividido nos setores S03 (8,26 ha) e S04 (7,89 ha). Por fim, o talhão de 2018 é formado novamente pela cultivar Mundo Novo, subdividido em três setores de 7,46 hectares cada (S06, S07 e S08), com destaque para o setor S07 (Figuras 2, 3 e 4), o qual recebeu adubação diferenciada no âmbito de um projeto conduzido pela Yara.

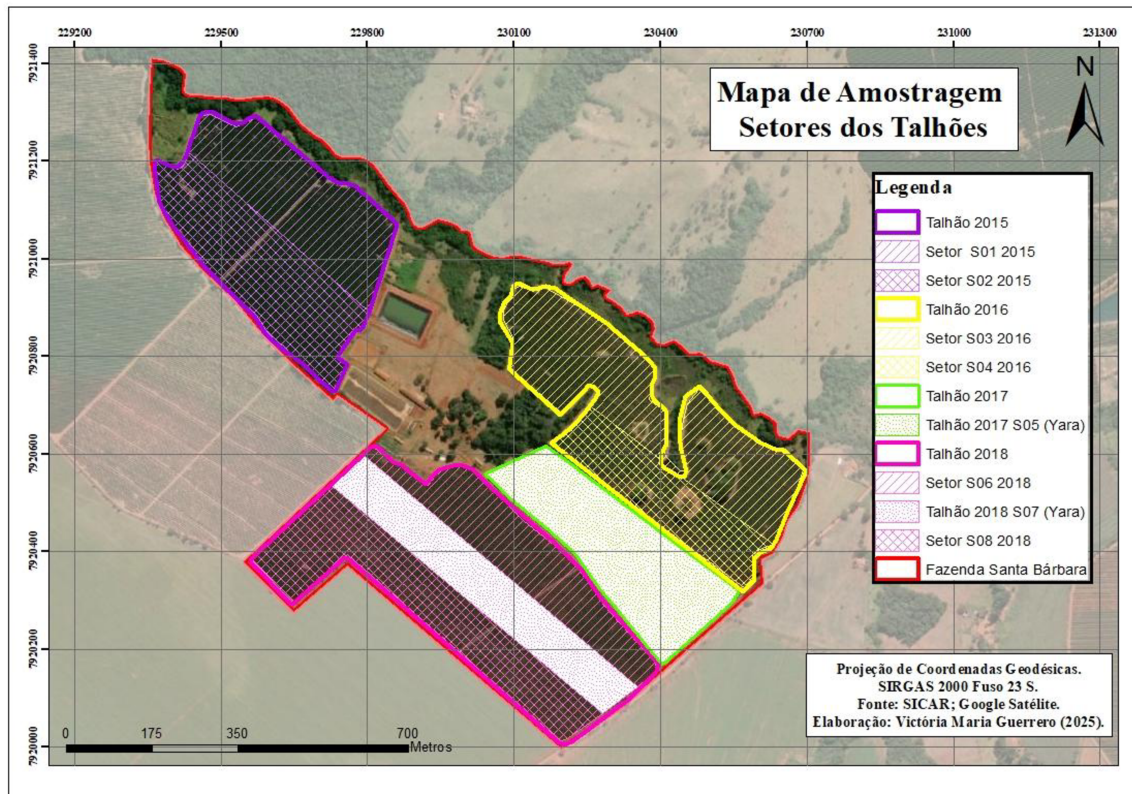


Figura 2. Mapa indicativo dos talhões da área amostrada. Fonte : Victoria Maria Guerreiro (2025)



Figura 3. Área experimental da Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG. A) Talhão 2015; B) Talhão 2016; C) Talhão 2018.



Figura 4. A) Ponto fixo (2016); B) Milheto (2015).

No laboratório, cada amostra de solo foi transferida para um recipiente de plástico esterilizado para a realização do bioensaio com larvas de *T. molitor*. O método utilizado visou alocar porções do solo, preenchendo aproximadamente dois terços do volume de recipientes de 500 mL, e subsequentemente inoculados com oito a doze larvas. Os recipientes foram mantidos em condições controladas, a uma temperatura de 25 °C e no escuro, por um período de sete dias. Decorrido esse período, foi analisado o índice de mortalidade das larvas.

Os indivíduos mortos foram então transferidos para placas de Petri contendo papel filtro umedecido com água esterilizada em seu fundo e acondicionados em câmara úmida para favorecer a proliferação e esporulação de eventuais fungos entomopatogênicos. Após um intervalo de cinco a sete dias, quando as estruturas reprodutivas fúngicas se tornam evidentes, foi realizado o isolamento dos fungos. Esta etapa foi realizada em fluxo laminar, mediante a transferência de fragmentos de micélio ou esporos para placas de Petri contendo meio de cultura Ágar Batata Dextrose (BDA), previamente autoclavado. Os procedimentos de isolamento foram repetidos sucessivamente, por meio de repicagens, até que obtivemos culturas puras de cada isolado fúngico para as análises de classificação (Figura 5).

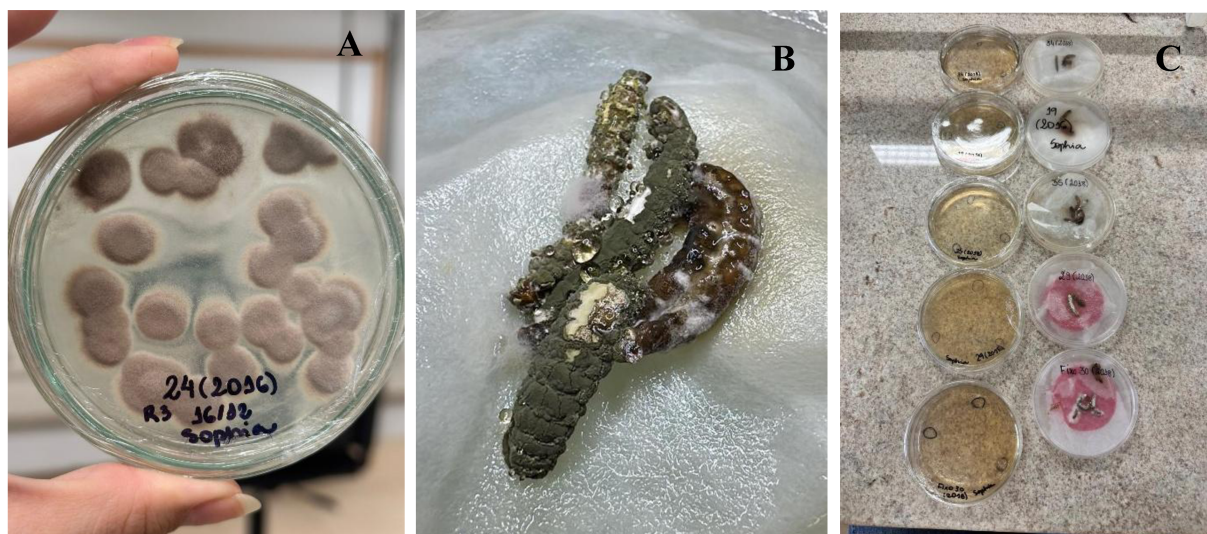


Figura 5. A) Placa contendo meio BDA com fungo *M. anisopliae*; B) Tenébrios mortos por *M. anisopliae*; C) Fungos isolados de larvas de *Tenebrio molitor*.

4.3. Classificação

Após a obtenção de cultivos puros em meio de cultura BDA procedemos para a etapa fundamental de caracterização morfológica para identificação do gênero fúngico. A análise microscópica de estruturas reprodutivas e vegetativas é um método clássico, eficaz e indispensável na taxonomia fúngica, permitindo a categorização dos isolados com base em características morfoestruturais únicas de cada gênero (ALEXOPOULOS; MIMS; BLACKWELL, 1996).

Para cada colônia fúngica pura, foram confeccionadas lâminas contendo suas estruturas a fim de realizarmos a classificação por gênero de cada colônia por meio do microscópio óptico composto, utilizando-se as objetivas de 10x, 40x e, quando necessário, 100x (com imersão em óleo). A análise focou nas estruturas taxonômicas chave para a identificação de gêneros de fungos entomopatogênicos, notadamente os da divisão *Ascomycota* e da ordem *Hypocreales* (HUMBER, 2012).

4.4. Análise estatística

A incidência de fungo (presença ou ausência) foi analisada por meio de um Modelo Lineares Generalizados Mistos (GLMM) com distribuição binomial e função de ligação logit, seguindo um processo de Bernoulli. O modelo estatístico incluiu como efeitos fixos as variáveis: tipo de coleta, data de avaliação, setor e talhão. Para acomodar a estrutura de dependência espacial e temporal das observações, foi incluído um efeito aleatório de intercepto para a interação entre data, talhão e setor, permitindo controlar a variabilidade intrínseca das unidades experimentais aninhadas nessas condições. A significância dos fatores isolados foi avaliada por meio da análise de *deviance* (Teste de Wald), utilizando a distribuição de Chi-quadrado ao nível de 5% de probabilidade. Após o ajuste, as médias marginais estimadas foram calculadas e comparadas pelo teste de Tukey também a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas no ambiente computacional R, utilizando os pacotes lme4 para o ajuste do modelo e emmeans para a extração das médias e comparações múltiplas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método de isca biológica com larvas de *T. molitor* foi empregado para isolar fungos entomopatogênicos no solo, com um total de 216 amostras de solo georreferenciadas. Das amostras realizadas, trinta e sete placas apresentaram crescimento fúngico e posteriormente, por meio de isolamentos, obtivemos 90 isolados sendo esses: 20 isolados do primeiro talhão que foi cultivado em 2015 com as cultivares Topázio e Mundo Novo, 24 isolados no segundo que foi cultivado em 2016 com a cultivar Topázio, e 46 no terceiro talhão cultivado em 2018 com a cultivar Mundo Novo. Foi realizada a identificação dos gêneros, por meio de características morfológicas e das colônias dos fungos cultivados em meio BDA, sendo identificados os gêneros *Metarhizium*, *Isaria*, *Beauveria* e *Fusarium*.

Em relação à presença dos fungos entomopatogênicos no solo de cafeeiros estabelecidos na Fazenda Santa Bárbara, observou-se uma variação significativa ao longo do período amostral, entre outubro de 2024 e fevereiro de 2025. A maior incidência foi registrada em 30 de outubro de 2024, com 86,0%, enquanto o menor valor ocorreu em 9 de dezembro de 2024, com apenas 2,0%. Essa oscilação expressiva pode ser interpretada considerando as condições

meteorológicas características da região do Cerrado mineiro. Dados climatológicos do INMET para a região do Alto Paranaíba indicam que outubro apresenta temperaturas médias entre 18,6°C e 29,4°C e precipitação média de 117 mm, enquanto novembro registra aumento significativo das chuvas (200 mm) e dezembro atinge o pico pluviométrico anual, com 266 mm (INMET, 2022).

O declínio acentuado na presença fúngica em dezembro (2,0%) pode estar associado ao excesso de chuvas nesse período, resultando em encharcamento do solo. Esse excesso hídrico leva à redução da disponibilidade de oxigênio (hipoxia), criando um ambiente anaeróbico desfavorável à sobrevivência e propagação desses microrganismos aeróbios, além de favorecer a lixiviação de seus propágulos para camadas mais profundas do solo, conforme discutido por Alves e Pereira (1998).

Os fungos entomopatogênicos, como *B. bassiana* e *M. anisopliae*, necessitam de condições adequadas de aeração e umidade para germinação e infecção de hospedeiros, sendo o oxigênio um fator crítico para seu metabolismo (MASCARIN; GOLO, 2024). A recuperação observada em janeiro (37,0%) e fevereiro (32,0%), com posterior elevação em 27 de fevereiro (41,0%) (Figura 6), ocorre em meses com temperaturas igualmente elevadas (médias de 18,8-27,9°C), mas com volumes de precipitação decrescentes (janeiro: 256 mm; fevereiro: 195 mm) (INMET, 2022), condições que podem favorecer o restabelecimento populacional dos fungos. Lacey et al. (2015) destacam que a presença de fungos entomopatogênicos no solo está diretamente relacionada às condições edafoclimáticas e ao uso de práticas conservacionistas, como a cafeicultura regenerativa, que favorece a biodiversidade edáfica.

A oscilação observada reforça a necessidade de monitoramentos contínuos para compreender os padrões ecológicos desses agentes de controle biológico natural em sistemas agroecológicos.

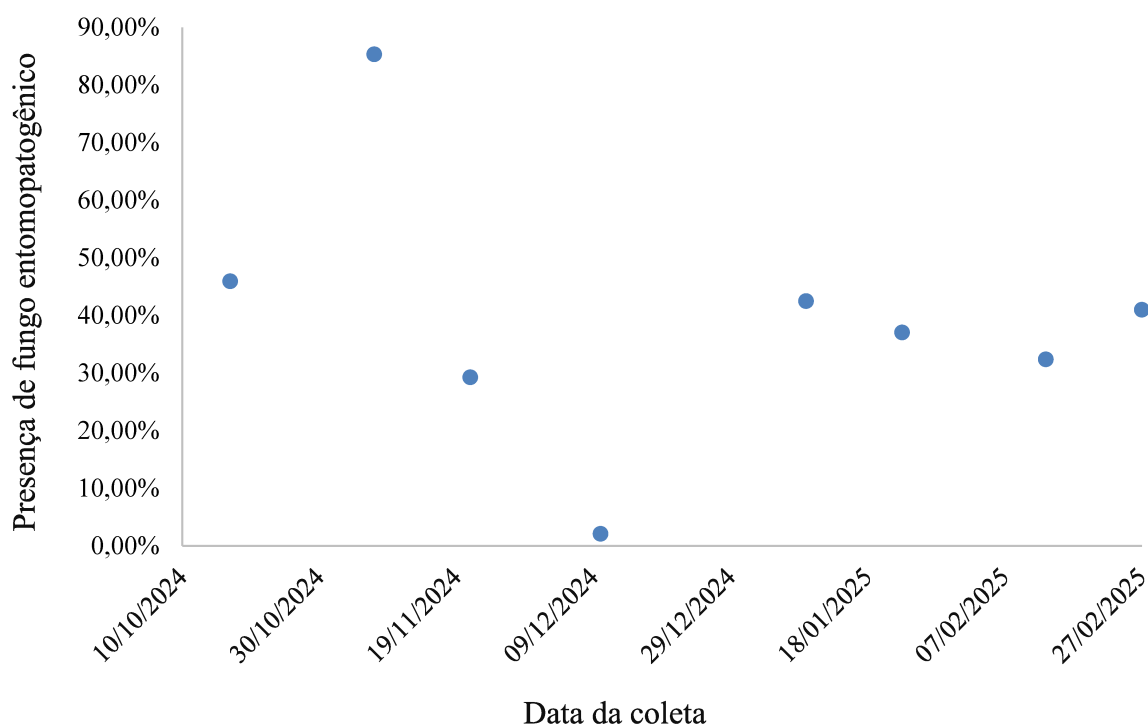


Figura 6. Presença de fungos entomopatogênicos obtidos em solo de cafeicultura regenerativa na Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG.

A análise da ocorrência fúngica segmentada pelas áreas de cultivo revelou que o tempo de implantação e o histórico de manejo dos talhões exercem influência direta na saúde biológica do solo. A área 2018 destacou-se com a maior probabilidade de detecção (47,5%), diferenciando-se estatisticamente da área 2016, que registrou o menor índice (22,6%), enquanto a área 2015 apresentou um comportamento intermediário (35,6%).

A maior presença de fungos da área 2015 (35,6%) em relação à área 2016 (22,6%) pode ser atribuída ao histórico de manejo cultural, especificamente à prática de podas e ao uso intensivo de plantas de cobertura. A poda, ao promover a renovação da copa do cafeeiro, resulta em um aporte significativo de biomassa lignificada depositada sobre a linha e entrelinha. Esse material, ao entrar em decomposição, atua como um anteparo físico que reduz a temperatura superficial do solo e mantém a umidade por períodos mais prolongados, criando um microclima ideal para a persistência de fungos entomopatogênicos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Essa heterogeneidade da área de 2018 para a 2016 sugere que, embora a área esteja sob manejo de agricultura regenerativa, fatores intrínsecos como o histórico de tráfego de máquinas e a variação na cobertura morta criam microclimas distintos. Segundo Siqueira et al. (2010), a distribuição de fungos no solo não é uniforme, sendo concentrada em locais com maior

estabilidade de agregados e menor resistência à penetração (menor compactação). Portanto, o Setor 2016 pode representar uma área crítica que necessita de intervenções para descompactação biológica e aumento do aporte de carbono para atingir os níveis de resiliência observados no Setor 2018 (Tabela 1).

Tabela 1. Probabilidade estimada média ($\pm$ erro-padrão) de ocorrência de fungos entomopatogênicos em solos de cafeeiro para áreas avaliadas na Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG.

Área	Probabilidade $\pm$ EP	IC 95%
2018	0,475 $\pm$ 0,0775 b	0,290–0,660
2015	0,362 $\pm$ 0,0726 ab	0,189–0,536
2016	0,226 $\pm$ 0,0588 a	0,085–0,366

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($\alpha = 0,05$).

Média $\pm$ Erro Padrão da Média.

De acordo com os resultados (Tabela 2) observa-se a formação de dois grupos distintos: a coleta de 07 de novembro de 2024 destacou-se com a maior probabilidade de ocorrência ($0,853 \pm 0,068$ c), diferindo estatisticamente de todas as demais datas, enquanto a coleta de 10 de dezembro de 2024 apresentou a menor probabilidade ($0,021 \pm 0,022$ a), também isolada estatisticamente. As demais datas (17/10/2024, 21/11/2024, 09/01/2025, 23/01/2025, 13/02/2025 e 27/02/2025) formaram um grupo intermediário homogêneo (letra b), com probabilidades variando entre 0,293 e 0,459.

Essa oscilação expressiva pode ser interpretada com o mesmo raciocínio da Figura 4, com base nas condições meteorológicas características da região do Cerrado mineiro. O pico observado em 07 de novembro de 2024 (85,3%) coincide com o período de transição entre o final da estação seca e o início do período chuvoso na região. Dados do INMET (2022) indicam que outubro e novembro apresentam temperaturas médias entre 18,6°C e 29,4°C e precipitações crescentes (117 mm em outubro; 200 mm em novembro), condições que favorecem a ativação e proliferação de fungos entomopatogênicos no solo, os quais respondem positivamente ao aumento da umidade após um período de estresse hídrico. O declínio abrupto registrado em 10 de dezembro de 2024 (2,1%) coincide com o pico pluviométrico anual da região, que atinge 266 mm em dezembro (INMET, 2022). Esse excesso de chuvas pode ter resultado em encharcamento do solo, reduzindo a disponibilidade de oxigênio.

A recuperação gradual observada a partir de janeiro e fevereiro de 2025 (probabilidades entre 32,4% e 42,5%) acompanha a redução dos volumes pluviométricos (janeiro: 256 mm; fevereiro: 195 mm) e o restabelecimento de condições de aeração no solo (INMET, 2022). A formação de um grupo intermediário homogêneo para a maioria das coletas sugere que, fora dos extremos representados pelo pico de novembro e pelo vale de dezembro, a comunidade fúngica mantém-se relativamente estável, embora sujeita a flutuações determinadas por eventos climáticos pontuais. A amplitude dos intervalos de confiança (IC 95%), especialmente nas coletas com menores probabilidades, reflete a variabilidade espacial e temporal inerente à distribuição de fungos entomopatogênicos em agroecossistemas, reforçando a necessidade de monitoramentos contínuos e de amostragens robustas para a compreensão aprofundada de sua dinâmica ecológica em sistemas de cafeicultura regenerativa.

Tabela 2. Probabilidade estimada média ($\pm$ erro-padrão) de ocorrência de fungos entomopatogênicos em solos de cafeeiro em função das datas de coleta na Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG.

Data	Probabilidade $\pm$ SE	IC 95%
10/12/2024	0,021 $\pm$ 0,022 a	-0,038–0,080
21/11/2024	0,293 $\pm$ 0,088 b	0,054–0,532
13/02/2025	0,324 $\pm$ 0,092 b	0,072–0,575
23/01/2025	0,371 $\pm$ 0,095 b	0,112–0,629
27/02/2025	0,410 $\pm$ 0,099 b	0,141–0,679
09/01/2025	0,425 $\pm$ 0,089 b	0,181–0,668
17/10/2024	0,459 $\pm$ 0,088 b	0,218–0,700
07/11/2024	0,853 $\pm$ 0,068 c	0,669–1,037

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($\alpha = 0,05$).

Média $\pm$ Erro Padrão da Média.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, observa-se uma variação espacial significativa na distribuição desses microrganismos entre os diferentes setores amostrados. A análise estatística revela que o setor S08 apresentou a maior probabilidade de ocorrência (0,632 $\pm$ 0,091 b), diferindo estatisticamente do setor S03 (0,239 $\pm$ 0,060 a), que registrou a menor probabilidade. Os demais setores (S01, S02, S04 e S06) formaram um grupo intermediário homogêneo (ab), com probabilidades variando entre 0,292 e 0,429, não diferindo estatisticamente entre si nem dos extremos.

Essa heterogeneidade espacial pode ser interpretada devido as características específicas de cada talhão e setor, considerando os diferentes anos de plantio, cultivares e práticas de manejo adotadas. O setor S08, pertencente ao talhão implantado em 2018 com a cultivar Mundo Novo, destacou-se com a maior probabilidade de ocorrência fúngica. Este talhão mais jovem (2018) é subdividido em três setores de 7,46 hectares cada (S06, S07 e S08), com a particularidade de que o setor S07 recebeu adubação diferenciada no âmbito de um projeto conduzido pela Yara. A ausência de diferença estatística entre os setores S06, S07 e S08 (todos classificados como ab ou b) sugere que, embora o S08 tenha se destacado numericamente, a variabilidade dentro do talhão de 2018 não foi suficientemente acentuada para gerar diferenciação estatística generalizada, possivelmente em razão da uniformidade relativa de idade e manejo de base.

Tabela 3. Probabilidade estimada média ($\pm$ erro-padrão) de ocorrência de fungos entomopatogênicos em solos de cafeeiro em relação aos setores de coleta na Fazenda Santa Bárbara, Monte Carmelo, MG.

Setor	Probabilidade $\pm$ SE	IC 95%
S03	0,239 $\pm$ 0,060 a	0,079–0,398
S04	0,292 $\pm$ 0,097 ab	0,036–0,548
S02	0,398 $\pm$ 0,094 ab	0,150–0,646
S06	0,422 $\pm$ 0,083 ab	0,204–0,639
S01	0,429 $\pm$ 0,080 ab	0,218–0,640
S08	0,632 $\pm$ 0,091 b	0,394–0,870

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($\alpha = 0,05$).

Média $\pm$ Erro Padrão da Média.

O setor S03, pertencente ao talhão implantado em 2016 com a cultivar Topázio, apresentou a menor probabilidade de ocorrência. Este talhão é composto pela cultivar Topázio, reconhecida por seu potencial produtivo e uniformidade de maturação, mas com maior suscetibilidade à broca-do-café. Essa característica fitossanitária pode estar indiretamente associada à menor presença de fungos entomopatogênicos, uma vez que maior suscetibilidade à broca pode levar a intervenções de manejo mais frequentes, incluindo aplicações de produtos fitossanitários que, dependendo do espectro e da seletividade, podem impactar negativamente as populações de fungos benéficos no solo (ALVES; PEREIRA, 1998; LACEY et al., 2015). O talhão de 2016 está subdividido nos setores S03 (8,26 ha) e S04 (7,89 ha), ambos com valores

numericamente baixos (0,239 e 0,292, respectivamente) e classificados estatisticamente nos grupos a e ab, indicando consistência interna na tendência de menor ocorrência fúngica nessa área de plantio mais antigo.

O talhão implantado em 2015, com a cultivar Mundo Novo, apresentou comportamento intermediário. Este talhão está subdividido em dois setores: o S01 (7,85 ha), conduzido com coberturas de braquiária (*Brachiaria* spp.) e milheto (*Pennisetum glaucum*), e o S02 (7,96 ha), que recebeu um mix de espécies vegetais de cobertura. As probabilidades estimadas para S01 ($0,429 \pm 0,080$ ab) e S02 ($0,398 \pm 0,094$ ab) foram muito próximas e estatisticamente equivalentes, sugerindo que, apesar das diferentes estratégias de plantas de cobertura, ambas as práticas conservacionistas podem sustentar níveis semelhantes de ocorrência fúngica. Estudos como os de Mascarin e Golo (2024) destacam que a manutenção de cobertura vegetal diversificada no solo contribui para a criação de micro-habitats favoráveis à sobrevivência e multiplicação de fungos entomopatogênicos, fornecendo matéria orgânica, regulando a temperatura e a umidade, e servindo como sítios de proteção contra radiação solar direta.

Essa diversidade reforça a importância de práticas agrícolas que favorecem o equilíbrio biológico e a vitalidade do solo. A presença de microrganismos em diferentes áreas de cultivo sugere que sistemas conduzidos de forma sustentável criam condições para o estabelecimento de comunidades microbianas variadas, o que contribui para a resiliência e estabilidade do agroecossistema, refletindo em produtividade e resiliência do campo.

É possível tecer considerações conclusivas sobre a dinâmica desses microrganismos em relação a fatores temporais, espaciais e de manejo. Os resultados demonstraram acentuada variação sazonal na presença de fungos entomopatogênicos ao longo do período amostral (outubro/2024 a fevereiro/2025), com pico expressivo em outubro/novembro (86,0% e 0,853 de probabilidade) e declínio abrupto em dezembro (2,0% e 0,021 de probabilidade). Essas oscilações estão fortemente associadas às condições meteorológicas da região do Cerrado mineiro: o pico coincide com a transição entre a estação seca e o início das chuvas, quando o aumento da umidade do solo associado a temperaturas adequadas cria condições favoráveis à ativação fúngica; o declínio em dezembro coincide com o pico pluviométrico anual (266 mm), cujo excesso hídrico provoca encharcamento do solo, reduzindo a disponibilidade de oxigênio e criando ambiente anaeróbico desfavorável, além de promover lixiviação de propágulos (INMET, 2022; Alves; Pereira, 1998). A recuperação gradual a partir de janeiro acompanha a redução das chuvas e o restabelecimento da aeração do solo.

A probabilidade de ocorrência também variou em função da idade dos talhões e de seus históricos de manejo. A área implantada em 2018 apresentou a maior probabilidade (0,475),

diferindo da área de 2016 (0,226), enquanto a área de 2015 (0,362) ocupou posição intermediária. Esse gradiente decrescente com o aumento da idade sugere que áreas mais jovens podem apresentar condições mais favoráveis à persistência fúngica, possivelmente em razão de menor histórico de intervenções mecânicas e químicas. No entanto, a posição intermediária do talhão de 2015 deve-se às práticas de manejo adotadas: plantas de cobertura (braquiária, milho e mix de espécies) e poda dos cafeeiros pouco antes das coletas promoveram aporte extraordinário de matéria orgânica, estimulando temporariamente a atividade microbiológica e elevando as probabilidades de detecção fúngica (MASCARIN; GOLO, 2024). A área de 2016, com cultivar Topázio e maior suscetibilidade à broca-do-café, apresentou os menores valores, sugerindo que características fitossanitárias e possíveis intervenções associadas podem impactar negativamente as populações de fungos benéficos.

A análise espacial revelou variabilidade significativa entre setores, com destaque para o setor S08 (talhão 2018), que apresentou a maior probabilidade (0,632), diferindo estatisticamente do setor S03 (talhão 2016), com a menor (0,239). Os demais setores formaram grupo intermediário homogêneo, indicando que, embora existam diferenças pontuais, a maior parte da área cultivada apresenta níveis semelhantes de ocorrência fúngica. A equivalência estatística entre os setores S01 e S02, submetidos a diferentes estratégias de plantas de cobertura, sugere que múltiplas abordagens conservacionistas podem ser igualmente eficazes na manutenção da biodiversidade funcional do solo.

Em síntese, a ocorrência de fungos entomopatogênicos em solos de cafeicultura regenerativa é governada por interações entre fatores climáticos, temporais, espaciais e de manejo. A sazonalidade exerce papel preponderante, com picos associados a condições adequadas de umidade e temperatura, e declínios relacionados a extremos pluviométricos. A idade dos talhões e práticas como plantas de cobertura e podas influenciam significativamente as populações fúngicas, podendo atenuar ou amplificar os efeitos das variações climáticas. A variabilidade espacial identificada reforça a necessidade de estratégias de amostragem representativas e de manejo localizado. Do ponto de vista aplicado, os achados subsidiam o manejo conservacionista de fungos entomopatogênicos como agentes de controle biológico natural.

Estudos recentes em cafezais regenerativos têm demonstrado resultados semelhantes, com a ocorrência desses gêneros associados a diferentes cultivares de café sob manejo sustentável (SALES et al., 2025). A presença de fungos entomopatogênicos em áreas de cultivo está diretamente relacionada a práticas conservacionistas, como o uso de plantas de cobertura

nas entrelinhas do cafeeiro, que criam microclimas favoráveis ao desenvolvimento desses microrganismos (SOUZA, 2022; MARTINS et al., 2023).

6. CONCLUSÃO

A partir da análise realizada, foi possível verificar a ocorrência e distribuição de fungos entomopatogênicos em solos de cafeicultura manejados sob princípios regenerativos. Os resultados demonstraram que as áreas conduzidas com práticas regenerativas, caracterizadas pelo aporte contínuo de matéria orgânica, cobertura vegetal permanente e mínimo revolvimento do solo, apresentaram maior diversidade e abundância de fungos entomopatogênicos, com destaque para os gêneros *Beauveria* e *Metarhizium*. Dessa forma, o estudo confirma que solos de cafezais regenerativos atuam como reservatórios ativos de fungos entomopatogênicos, evidenciando o potencial desses sistemas para o manejo integrado de pragas e para a redução da dependência de insumos químicos, contribuindo para a sustentabilidade e resiliência do agroecossistema cafeeiro.

REFERÊNCIAS

ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Relatório de consumo de café no Brasil - 2023. Rio de Janeiro: ABIC, 2023. Disponível em: <https://abic.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.

ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ; CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ; EMBRAPA CAFÉ. O café é a segunda bebida mais consumida no País, perdendo apenas para a água. Embrapa, 19 mar. 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2574254/cafe-ea-segunda-bebida-mais-consumida-no-brasil>. Acesso em: 6 ago. 2025.

ALEXOPOULOS, C. J.; MIMS, C. W.; BLACKWELL, M. Introductory Mycology. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Agroecologia: resiliente a mudanças climáticas. São Paulo: Editora Expressão Popular, 2012.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Controle biológico de pragas através do manejo de agroecossistemas. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2013.

ALVES, S. B. (ed.). Controle microbiano de insetos. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 1998. 1163 p.

ALVES, S. B.; PEREIRA, R. M. Produção de fungos entomopatogênicos. In: ALVES, S. B. (ed.). Controle microbiano de insetos. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 845-869.

BENDER, S. F.; WAGG, C.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends in Ecology & Evolution, v. 31, n. 6, p. 440-452, 2016.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

CAMPOS, A. M.; REZENDE, J. M.; MARTINS, M. H. Fungos entomopatogênicos como alternativa ao uso de agrotóxicos. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 15, n. 2, p. 345-357, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café – Safra 2023. Brasília: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 6 ago. 2025.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café – Safra 2023/2024. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 16 mar. 2026.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. Café: importância socioeconômica para o Brasil. Brasília: CNA, 2022. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Agricultura regenerativa: conceitos e princípios. Brasília: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Cultivo do café arábica: aspectos fitotécnicos. Brasília: Embrapa, 2023.

FERREIRA, M. C.; REIS, M. R. Impacto dos defensivos agrícolas na microbiota do solo. *Ciência do Solo e Sustentabilidade*, v. 6, n. 1, p. 22-31, 2018.

FONTES, D. B. C.; VALADARES-INGLIS, M. C. Fungos entomopatogênicos e seus efeitos em organismos não-alvo. *Biological Control*, v. 142, 104161, 2020.

FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. (ed.). Controle biológico de pragas da agricultura. Brasília: Embrapa, 2020. 510 p.

GOMES, R. F. *et al.* Agricultura regenerativa: fundamentos e aplicações práticas. *Revista Agroecossistemas*, v. 13, n. 2, p. 55-69, 2021.

HUMBER, R. A. Identification of entomopathogenic fungi. In: LACEY, L. A. (ed.). *Manual of Techniques in Invertebrate Pathology*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 151-187.

ICO - INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. Coffee development report 2024. London: ICO, 2024. Disponível em: <https://www.ico.org>. Acesso em: 16 mar. 2026.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020: precipitação acumulada mensal e anual, temperatura máxima e mínima compensada. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 16 mar. 2026.

JACOBS DOUWE EGBERT. Café é a segunda bebida mais consumida entre os brasileiros, mostra pesquisa. *Estadão Conteúdo*, 21 maio 2019. Disponível em: <https://abics.com.br/cafe-e-segunda-bebida-mais-consumida-entre-brasileiros-mostra-pesquisa/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

LACEY, L. A. *et al.* Insect pathogens as biological control agents: back to the future. *Journal of Invertebrate Pathology*, v. 132, p. 1-41, 2015. DOI: 10.1016/j.jip.2015.07.009.

LAL, R. Managing Soils for Negative Feedback to Climate Change and Positive Impact on Food and Nutritional Security. *Soil Science Society of America Journal*, v. 84, n. 1, p. 1-24, 2020.

LAL, R. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, v. 5, n. 4, p. 212-222, 2016.

LAMAS, F. M. Agricultura regenerativa – o que significa, o que regenerar. *Embrapa Agropecuária Oeste*, 20 jun. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/->

[/noticia/90285437/artigo---agricultura-regenerativa--o-que-significa-o-que-regenerar](#). Acesso em: 6 ago. 2025.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Café no Brasil: produção e mercado. Brasília: MAPA, 2023.

MARCONDES, R. L. Café e identidade nacional: uma história cultural do Brasil. São Paulo: Editora Unesp, 2019.

MARTINS, C. A.; SILVA, R. F. Desafios socioambientais da cafeicultura moderna no Brasil. *Revista de Economia Agrícola*, v. 67, n. 2, p. 45-60, 2020.

MARTINS, J. *et al.* Associação entre fungos e café favorece o crescimento das plantas. *Diário do Comércio*, Belo Horizonte, 8 abr. 2023. *Caderno Agronegócio*. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/agronegocio/associacao-entre-fungos-e-cafe-favorece-o-crescimento-das-plantas/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

MARTINS, R. B.; SILVA, T. M. Café e sustentabilidade: desafios e estratégias para o século XXI. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 15, n. 3, p. 112-124, 2020.

MASCARIN, G.; GOLO, P. Fungos capazes de colonizar diversas pragas são essenciais para o controle biológico de pragas. *Embrapa Meio Ambiente*, 5 set. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/92279357/fungos-capazes-de-colonizar-diversas-pragas-sao-essenciais-para-o-controle-biologico-de-pragas>. Acesso em: 16 mar. 2026.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2010.

MEYLING, N. V.; EILENBERG, J. Ecology of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in temperate agroecosystems: Potential for conservation biological control. *Biological Control*, v. 43, n. 2, p. 145-155, 2007.

MONTEIRO, F. P. *et al.* Eficiência de *Metarhizium anisopliae* no controle de pragas do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 50, e63477, 2020.

MONTGOMERY, D. R. Growing a revolution: bringing our soil back to life. New York: W. W. Norton & Company, 2017.

MORAES, G. J. *et al.* Controle biológico no Brasil: panorama atual e desafios. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 12, p. 1101-1111, 2017.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006.

PRADO, E. P. *et al.* Manejo integrado de pragas na cafeicultura brasileira: desafios e perspectivas. *Revista de Agricultura Sustentável*, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2021.

PRADO, E. P. *et al.* Perdas econômicas causadas por *Leucoptera coffeella* e *Hypothenemus hampei* na cafeicultura brasileira. *Revista de Agricultura*, v. 95, n. 2, p. 132-145, 2020.

PRIMAVESI, A. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. 21. ed. São Paulo: Nobel, 2002.

REZENDE, F. C. *et al.* Ecofisiologia do cafeeiro. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. (ed.). Café arábica: do plantio à colheita. Lavras: EPAMIG, 2016. p. 45-78.

ROBERTS, D. W.; HUMBER, R. A. Entomogenous fungi. In: COLE, G. T.; KENDRICK, B. (ed.). Biology of Conidial Fungi. New York: Academic Press, 1981. v. 2, p. 201-236.

SÁ, A. V. de *et al.* Produção de conídios dos fungos *Beauveria bassiana* LCB289 e *Metarhizium anisopliae* LCB255 em diferentes condições nutricionais. In: EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 3., 2018, Petrolina. Anais [...]. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2018.

SALES, S. S. *et al.* Fungos entomopatogênicos associados a cultura do cafeeiro na agricultura regenerativa. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS, 2025, Monte Carmelo. Anais [...]. Monte Carmelo: Universidade Federal de Uberlândia, 2025.

SILVA, C. C. *et al.* Diversidade de fungos entomopatogênicos em diferentes sistemas de manejo do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 46, e0210248, 2022.

SIQUEIRA, J. O. *et al.* Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental e agrícola. In: SIQUEIRA, J. O. *et al.* (ed.). Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil. Lavras: Editora UFLA, 2010. p. 15-48.

SOUZA, N. M. O. Plantas de cobertura na entrelinha do cafeeiro e presença de microrganismos entomopatogênicos no solo. 2022. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36627>. Acesso em: 17 mar. 2026.

ST. LEGER, R. J. *et al.* The role of cuticle-degrading enzymes in fungal pathogenesis. In: COLE, G. T.; HOCH, H. C. (ed.). The Fungal Spore and Disease Initiation in Plants and Animals. New York: Plenum Press, 1989. p. 267-286.

TEIXEIRA, S. M.; FONSECA, M. F. Cadeias produtivas e mercados para produtos da sociobiodiversidade. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 57, n. 3, p. 456-472, 2019.

VALLIN, S. A. Potencial de fungos entomopatogênicos no controle de artrópodes-praga agrícolas. Revista de Proteção Vegetal, v. 35, n. 2, p. 101-110, 2022.

VEGA, F. E. *et al.* Fungal entomopathogens: new insights on their ecology. Fungal Ecology, v. 2, n. 4, p. 149-159, 2009.

VEGA, F. E. *et al.* The use of fungal entomopathogens as endophytes in biological control: a review. Biological Control, v. 121, p. 1-17, 2018.

VILELA, D. J. M. *et al.* Mercado de cafés especiais no Brasil: tendências e oportunidades. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 61, n. 1, p. 1-18, 2023.

VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A. Interações inseto-planta: perspectivas para o manejo integrado de pragas. Ribeirão Preto: Sociedade Entomológica do Brasil, 2019.