



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

RAIANA DE OLIVEIRA CARNEIRO

**FUNGOS COMO AGENTES DE CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS
AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**AREIA
2023**

RAIANA DE OLIVEIRA CARNEIRO

**FUNGOS COMO AGENTES DE CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS
AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Agronomia, do
Centro de Ciências Agrárias, da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do título de Engenheira Agrônoma.

Orientadora: Profa. Dra. Loise Araujo
Costa

**AREIA
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C289f Carneiro, Raiana de Oliveira.

Fungos como agentes de controle biológico de pragas agrícolas: uma revisão bibliográfica / Raiana de Oliveira Carneiro. - Areia:UFPB/CCA, 2023.

36 f. : il.

Orientação: Loise Araujo Costa.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Agricultura sustentável. 3. Preservação do meio ambiente. 4. Inimigos naturais. I. Costa, Loise Araujo. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)

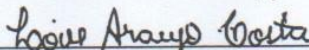
RAIANA DE OLIVEIRA CARNEIRO

FUNGOS COMO AGENTES DE CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS
AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de graduação apresentado
à Coordenação do Curso de
Agronomia, do Centro de Ciências
Agrárias, da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Engenheira Agrônoma.

Aprovado em: 16/06/2023

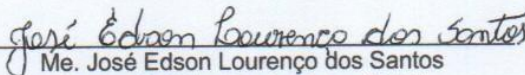
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Loise Araujo Costa (Orientadora)
Centro de Ciências Agrárias (CCA)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dra. Ylma Valdes Vazquez
Centro de Ciências Agrárias (CCA)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Me. José Edson Lourenço dos Santos
Centro de Ciências Agrárias (CCA)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Dedico à minha Família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus que me permite existir e além de me conceder essa oportunidade, porque sem ELE não conseguiria chegar até aqui. Ele é o meu porto seguro, está presente nos momentos mais difíceis da minha vida, dando-me forças para alcançar os meus objetivos e sendo sempre meu guia para superar as dificuldades da vida.

Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba.

À minha família, em especial aos meus pais Ruth do Carmo Oliveira e Emanuel Francisco Alves Carneiro, meus irmãos Pedro Augusto e Felipe de Oliveira, que mesmo com todas as dificuldades presentes na caminhada acadêmica sempre estiveram ao meu lado dando força, apoio, incentivo e amor.

Aos familiares, em especial a minha avó, pelo amor e presença, sempre acreditando no meu potencial.

Aos meus amigos que conheci ao longo da vida acadêmica, Edna Soraia, Ana Cláudia Medeiro, Edson Lourenço, Carlos Augusto, Mirian Rufino, Wellington Melo, entre outros, pelo apoio, preocupação e companheirismo.

Aos meus professores do CCA/UFPB, em especial, Flávio Pereira, Robson de Souza, Guttemberg da Siva, Heritiano (*in memoriam*), Cauby Dantas, Laís Borges, Lenyneves Duarte, Adailson Pereira, Bruno de Oliveira, Elizanilda Ramalho, Helder Farias, Djail Santos, Edna Ursulino, Jacinto Luna, Guilherme Podestá, Rosivaldo Gomes e Silvanda Silva, os quais de certa forma contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

A Pedro Gadelha, técnico do Laboratório de Ecologia e Reprodução Vegetal do Departamento de Biociências (CCA-UFPB).

Ao Laboratório de Microbiologia do Departamento de Biociências (CCA-UFPB).

À minha orientadora Loise Costa, pela oportunidade, paciência, ajuda, incentivos a melhorar e crescer de forma positiva, acreditando na minha capacidade de superação e por fazer parte da minha formação acadêmica. Seu profissionalismo, cuidado, competência e calma, muito me ensinaram.

Ao meu esposo José Roque Batista da Silva, pela paciência e amor dedicados, sempre dando força para não desistir dos meus objetivos.

A meu filho Gael Carneiro Batista meu amor maior, razão da minha vida.

*“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento”
(Frederick Herzberg)*

RESUMO

À medida que a atividade agrícola expande, o mundo enfrenta problemas para sustentar esse crescimento devido, principalmente, ao aumento do número de pragas e, consequentes, perdas e prejuízos nesse setor. O uso de agrotóxicos para combater essas pragas nem sempre é eficiente, pois podem levar ao desenvolvimento de resistência e à redução da população de inimigos naturais. Dentro das alternativas de controle de pragas, o controle biológico apresenta-se como uma das melhores opções por desenvolver técnicas sustentáveis e saudáveis minimizando os danos ao meio ambiente e à saúde animal e humana. Por esta razão, o uso do controle biológico está se tornando cada vez mais importante e faz parte do manejo de várias culturas agrícolas e florestais em todo o mundo. Dentre os microrganismos com esse potencial, destacam-se fungos, tais como os fungos entomopatogênicos, nematófagos, micoparasitas e os fitopatogênicos produtores de toxinas (herbicidas). Esse amplo potencial dos fungos como agentes de controle biológico deve-se às características inerentes a esse grupo de organismos, como a ampla distribuição no ambiente e persistência; especificidade de hospedeiros; eficiência na dispersão de propágulos; além da facilidade de serem cultivados e mantidos em laboratórios. Nesse contexto, o presente trabalho trata de uma revisão bibliográfica sobre o potencial dos fungos como agentes de controle biológico, com o intuito de direcionar uma perspectiva futura para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-Chave: agricultura sustentável; preservação do meio ambiente; inimigos naturais.

ABSTRACT

As agricultural activity expands, the world faces problems to sustain this growth, mainly due to the increase in the number of pests and, consequently, losses and damages in this sector. The use of pesticides to combat these pests is not always efficient, as they can lead to the development of resistance and a reduction in the population of natural enemies. Within the pest control alternatives, biological control is one of the best options for developing sustainable and healthy techniques, minimizing damage to the environment and animal and human health. For this reason, the use of biological control is becoming increasingly important and is part of the management of various agricultural and forestry crops around the world. Among the microorganisms with this potential, the use of fungi stands out, such as entomopathogenic fungi, nematophagous, mycoparasites and toxin-producing phytopathogenic fungi (herbicides). This broad potential of fungi as biological control agents is due to the inherent characteristics of this group of organisms, such as wide distribution in the environment and persistence; host specificity; efficiency in the dispersion of propagules; in addition to the ease of being cultivated and maintained in laboratories. In the context, the present work deals with a bibliographic review on the potential of fungi as biological control agents, with the aim of directing a future perspective for more sustainable agricultural practices.

Keywords: sustainable agriculture; preservation of the environment; natural enemies.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Características macro e micromorfológicas de fungos filamentosos e leveduras. (A), visão geral de uma colônia de fungo filamentoso. (B), hifas formando o micélio. (C), visão geral de colônia de leveduras. (D), células de leveduras 14
- Figura 2** - Colonização de inseto hospedeiro por ascomiceto com ciclo de vida assexuado: adesão e germinação; penetração; colonização; reprodução; e disseminação16
- Figura 3** - Fungos entomopatogênicos *Beauveria bassiana* (A) e *Metarhizium anisopliae* (B) crescendo sobre meio de cultivo. Pragas colonizadas por *B. bassiana* (C) e *M. anisopliae* (D).....17
- Figura 4** - Representação ilustrativa dos tipos e modos de ação dos fungos nematófagos.....20
- Figura 5** - Fungos nematófagos predadores, *Arthrobotrys* sp. (A); endoparasitas, *Hirsutella rhossiliensis* (B); parasitas de ovos, *Pochonia chlamydosporia* (C), e de fêmea, *Verticillium* sp. (D), de nematoide21
- Figura 6** - Armadilhas de captura de fungos predadores.21
- Figura 7** - Visão geral da colônia de *Trichoderma* sp. (A); micrografia eletrônica do parasitismo de *Trichoderma* sobre o fungo hospedeiro *Aspergillus* (B); e parasitismo de escleródios de *Sclerotinia sclerotiorum* por *Trichoderma*, em campo (C e D) 25
- Figura 8** - Crescimento do micoparasita *Trichoderma* ao redor da hifa do fungo patogênico, com a formação do apressório e a produção de enzimas hidrolíticas. 25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Controle biológico: definição e fundamentos.....	11
2.2 Fungos como agentes de controle biológico	13
2.2.1 <i>Controle biológico de artrópodes por fungos</i>	15
2.2.2 <i>Controle biológico de nematoides por fungos</i>	19
2.2.3 <i>Controle biológico de fungos patógenos de plantas por fungos.....</i>	23
2.2.4 <i>Controle biológico de plantas daninhas por fungos</i>	26
3 METODOLOGIA	29
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2022 a população mundial alcançou o quantitativo de 8 bilhões de pessoas e estima-se chegar a 9 bilhões em 2037, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) (NAÇÕES UNIDAS, 2022). Para atender as necessidades de toda a população global, a agricultura mundial terá que ampliar em 70% a produção de alimentos até 2050 (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA – FAO, 2018). Nessas circunstâncias, exigirá o crescimento e intensificação da produção agrícola para abastecer essa crescente demanda por quantidade de alimentos.

Esse crescimento da produção agrícola ocorrerá seja pela expansão da área de plantio ou pelo ganho da produtividade através do controle das perdas agrícolas (STRANGE & SCOTT, 2005), as quais, devido à incidência de pragas, variam de 20 a 30%, para culturas potenciais de alimentos (SAVARY et al., 2019). Considerando este cenário, nos últimos anos tem sido utilizado em larga escala agrotóxicos com o intuito de controlar as pragas agrícolas. Apesar do aumento da produção de alimentos, o uso intenso de produtos químicos na agricultura trouxe sérios prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana e animal (SAVITA & SHARMA, 2019).

O emprego constante de agrotóxicos pode alterar o equilíbrio dos ecossistemas, ampliando a incidência e severidade das doenças e selecionando variantes resistentes aos químicos aplicados, além da contaminação dos solos, dos corpos d'água e de espécies não-alvo (INOBE et al., 2020). Com relação à saúde humana, os agrotóxicos afetam adversamente por antagonizar hormônios naturais no corpo e sua exposição a longo prazo e em baixas doses pode causar supressão imunológica, anormalidades reprodutivas, disfunção hormonal e câncer (LOPES & ALBUQUERQUE, 2018).

Mais recentemente, abordagens alternativas estão sendo desenvolvidas para diminuir ou mesmo substituir o uso de produtos químicos sintéticos no controle de pragas agrícolas. O controle biológico é uma alternativa, bastante viável e sustentável, ao uso de agrotóxicos, pois é um fenômeno no qual um agente biológico (vírus, bactérias, fungos, insetos, ácaros ou nematoides), regula e controla a mortalidade de pragas de forma natural (SAVITA & SHARMA, 2019). A utilização dessa técnica no manejo de doenças em plantas vem sendo estudada e aplicada, com a finalidade de atenuar o emprego descontrolado de produtos químicos, reduzindo os efeitos

nocivos ao meio ambiente assim como os custos de produção das culturas, além de promover a saúde humana e animal.

O controle biológico está se tornando cada dia mais importante e faz parte do manejo de diversas culturas agrícolas e florestais ao redor do mundo (MEDEIROS et al., 2018; GARCIA et al., 2005). A busca dos produtores por melhorias na produtividade agrícola e na qualidade de seus produtos associado com os diversos estudos realizados, são alguns dos aspectos fundamentais que os proporcionam o desenvolvimento e, o aumento da disponibilidade de agentes de controle biológico.

Os organismos vivos que são utilizados para controlar as espécies pragas, são os seus inimigos naturais, os quais são chamados de agentes de controle biológico. Os fungos podem atuar como potenciais agentes de controle biológico visto que podem ser utilizados para controlar populações de vários tipos de pragas como artrópodes (BARON et al., 2019; MORA et al., 2017), nematoides (PIRES et al. 2022; YADAV et al., 2023), patógenos de plantas (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023; MUKHERJEE et al., 2022) e plantas daninhas (NACHTIGAL et al., 2020; TREMACOLDI & SOUZA FILHO, 2006).

A aplicação dos fungos em áreas de produção agrícola gera um baixo custo e apresenta um baixo impacto ambiental, além disso proporciona uma alta mortalidade das pragas-alvo, demonstrando, portanto, a sua eficiência para os programas de controle biológico de pragas (BARON et al., 2019). Assim, o presente trabalho de revisão de literatura tem como objetivo apresentar o potencial dos fungos como agentes de controle biológico, buscando reforçar a perspectiva futura para práticas agrícolas mais sustentáveis.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Controle biológico: definição e fundamentos

Segundo Fontes et al. (2020), o controle biológico é caracterizado por relações ecológicas que envolvem a competição do homem com as pragas por recursos naturais, como as plantas cultivadas e produção agrícola, e a presença do agente de controle biológico como aliado do homem e inimigo natural da praga. Os agentes de controle podem ser outros insetos benéficos, predadores, parasitoides e microrganismos como fungos, vírus, bactérias e nematoides, os quais controlam ou suprimem, de maneira assertiva, as populações de pragas (plantas, animais ou

fitopatológico), atuando assim, como alternativa ao uso de agrotóxicos de amplo espectro.

Um considerável esforço de pesquisa tem sido realizado ao longo do último século para entender como os agentes naturais podem ser manipulados para a sua utilização de forma eficaz e segura no controle de pragas (FONTES et al., 2020). Embora as pesquisas tenham se intensificado recentemente, os efeitos de predadores e parasitoides no controle de insetos-praga são conhecidos e utilizados há milhares de anos (HEIMPEL & MILLS, 2017). Um exemplo disso são os chineses, que já faziam uso do controle biológico no século III a.C., com o emprego de formigas predadoras (*Oecophylla smaragdina*) para redução das populações de pragas dos citros (lepidópteros desfolhadores e coleobrocas) (PARRA et al., 2002). Entretanto, somente no ano de 1888 na Califórnia, foi que apareceu o primeiro caso de sucesso desse método de controle de pragas, onde houve a liberação de uma espécie de joaninha da Austrália que promoveu o controle da praga pulgão-branco-dos-citros (SIMONATO et al., 2014).

O controle biológico ocorre de forma natural em todos os ecossistemas sem a necessidade da intervenção humana. Os humanos, por sua vez, podem perturbar, manipular e facilitar a ação do agente de controle biológico. Van Driesche & Bellows (1996) descreveram três formas de manipulação do controle biológico, que podem ser utilizadas individualmente ou em combinação, sendo eles: importação, conservação e aumento de inimigos naturais.

O controle biológico por importação, também é conhecido como controle biológico clássico, este método é utilizado para conter uma praga exótica, ou seja, uma espécie invasora que se estabeleceu em uma nova região na ausência de fatores que limitam a sua abundância, e, então, a sua população cresce e ocupa todos os recursos disponíveis. Desta forma, o controle envolve a introdução de inimigos naturais, coletados na área de origem da espécie invasora, na região onde a mesma foi introduzida (FONTES et al., 2020; BUENO et al., 2016; GREATHEAD; GREATHEAD, 1992; PARRA, 2014).

O controle biológico por conservação baseia-se no uso de medidas que preservem os inimigos naturais em um agroecossistema, ou seja, o manejo adequado desses ambientes visando a manutenção e o aumento dos inimigos naturais e, desta forma, o controle das populações de pragas. Para que esses inimigos naturais sejam atraídos e mantidos em um agroecossistema, é necessário fornecer alimentos

alternativos, como fontes de carboidratos, como néctar, e de proteínas, como pólen, para parasitoides e predadores. Além desses recursos complementares é necessário também criar e manter locais de refúgio que, além de fornecer as condições físicas do ambiente favoráveis, protejam os parasitoides e predadores de seus próprios inimigos naturais (FONTES et al., 2020; TOGNI et al., 2021; BUENO et al., 2016; RIDGWAY et al., 1998; GREATHEAD & GREATHEAD, 1992; PARRA, 2014).

No controle biológico aumentativo o inimigo natural, previamente selecionado, é multiplicado massivamente em laboratório e, então, muitos indivíduos são liberados nas áreas de cultivo com o intuito de reduzir as populações de pragas em um período relativamente curto. A produção em massa do inimigo natural, em geral, ocorre em fábricas comerciais altamente especializadas, sendo os microrganismos os agentes mais apropriados para essa estratégia de controle biológico (FONTES et al., 2020; BUENO et al., 2016; GREATHEAD & GREATHEAD, 1992; PARRA, 2014).

2.2 Fungos como agentes de controle biológico

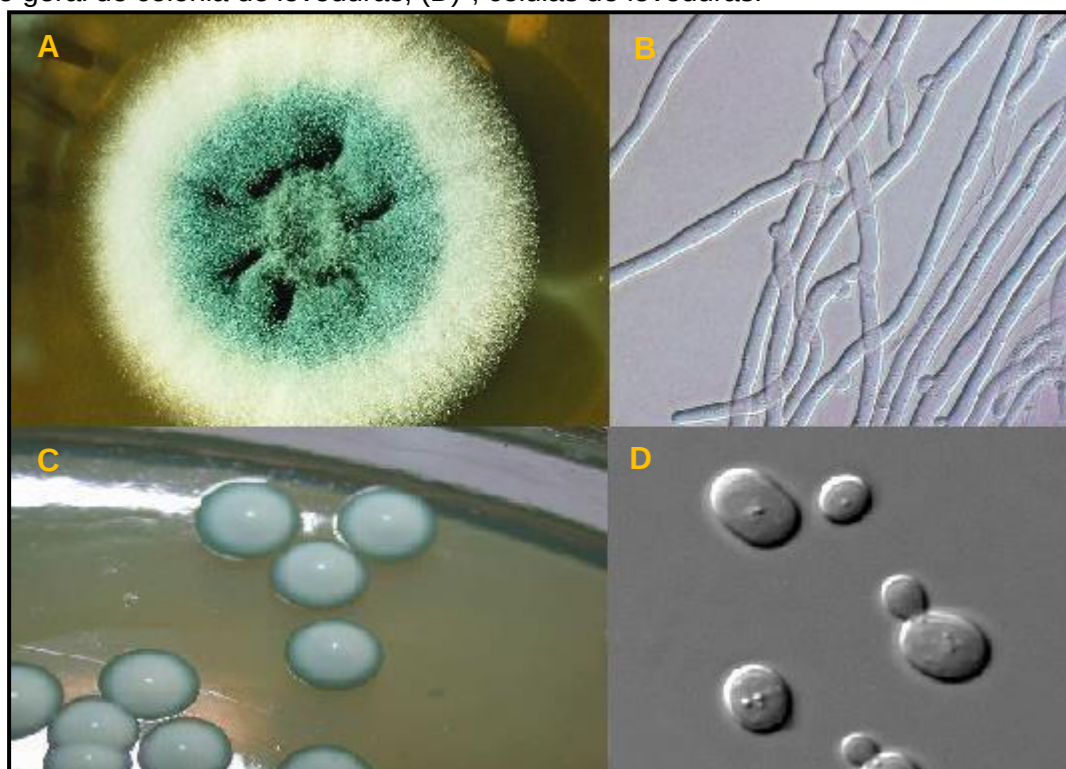
Dentre os microrganismos utilizados como agentes de controle biológico, destacam-se os fungos pois apresentam diversas aplicações, podendo atuar como inseticidas, acaricidas, nematocidas, fungicidas e herbicidas (SCHRANK & VAINSTEIN, 2010). Esse amplo potencial dos fungos como agentes de controle biológico deve-se às características inerentes a esse grupo de organismos, tais como: ampla distribuição e persistência no ambiente; apresentam um alto nível de especificidade de hospedeiros; têm dispersão eficiente; além da facilidade de serem cultivados e mantidos em laboratórios (SAVITA & SHARMA, 2019).

Os fungos pertencem ao Reino Fungi (WHITTAKER, 1969), e são caracterizados como seres eucarióticos e heterotróficos, com parede celular constituída por quitina e glucanos, e apresentam como reserva de energia o glicogênio. Podem ser unicelulares, denominados de leveduras, ou multicelulares, estes conhecidos como fungos filamentosos uma vez que são formados por filamentos, cuja unidade é chamada de hifas e o conjunto de hifas denomina-se de micélio (ALEXOPOULOS et al., 1996) (Figura 1).

A classificação mais atual dos fungos foi proposta por Wijayawardene et al. (2020) que considera 19 filos, sendo eles, Aphelidiomycota, Ascomycota, Basidiobolomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota, Calcarisporiellomycota, Caulochytriomycota, Chytridiomycota, Entomophthoromycota, Entorrhizomycota,

Glomeromycota, Kickxellomycota, Monoblepharomycota, Mortierellomycota, Mucoromycota, Neocallimastigomycota, Olpidiomyota, Rozellomycota e Zoopagomycota. Um outro grupo de fungos que tem grande importância, mas não representa uma categoria taxonômica, sendo considerado uma classificação artificial, é o dos fungos assexuais, também conhecidos como mitospóricos, anamorfos ou conidiais. Estes são caracterizados por apresentar reprodução assexuada com produção de esporos exógenos e são associados aos filos Ascomycota, em sua maioria, e Basidiomycota.

Figura 1 - Características macro e micromorfológicas de fungos filamentosos e leveduras. (A)¹, visão geral de uma colônia de fungo filamentoso; (B)², hifas formando o micélio; (C)³, visão geral de colônia de leveduras; (D)⁴, células de leveduras.



Dentre os filos de fungos, Ascomycota e Entomophthoromycota apresentam a maior diversidade de espécies com potencial para o controle biológico de pragas agrícolas (BARON et al., 2019). Algumas outras espécies de fungos pertencentes aos filos Basidiomycota, Blastocladiomycota, Chytridiomycota, Glomeromycota, Kickxellomycota, Mucoromycota e Rozellomycota também têm sido relatadas na literatura científica como bons agentes controladores de populações de pragas (BARON et al., 2019; BJØRNSON & OI, 2014; MORA et al., 2017; THAMBUGALA et al. 2020).

1 Disponível em: <https://create.vista.com/pt/photos/micolog%C3%ADa/>.

2 Disponível em: <https://ibapcursos.com.br/caracteristicas-dos-fungos-filamentosos-o-que-sao-quais-os-tipos-classificacao-estruturas-e-morfologia/>.

3 Disponível em: <https://docplayer.com.br/58063058-Levedura-selecionada-de-sua-propria-unidade-industrial.html>.

2.2.1 Controle biológico de artrópodes por fungos

O filo Arthropoda compreende um grupo de organismos que apresenta grande importância para a agricultura, seja positiva ou negativamente. Algumas espécies de insetos, que representa a principal classe do filo, são polinizadores naturais e, portanto, favorecem o aumento na produção de frutos e a manutenção de ecossistemas naturais (SCHRANK & VAINSTEIN, 2010). Por outro lado, algumas poucas espécies de artrópodes, insetos e ácaros, são conhecidas como pragas agrícolas, pois são responsáveis por causar globalmente grandes perdas anuais de colheitas, especialmente em países em desenvolvimento. As estimativas para as perdas da produtividade agrícola sugerem um aumento de 10 a 25% por grau de aquecimento global médio da superfície terrestre (GUANGCUN, 2022).

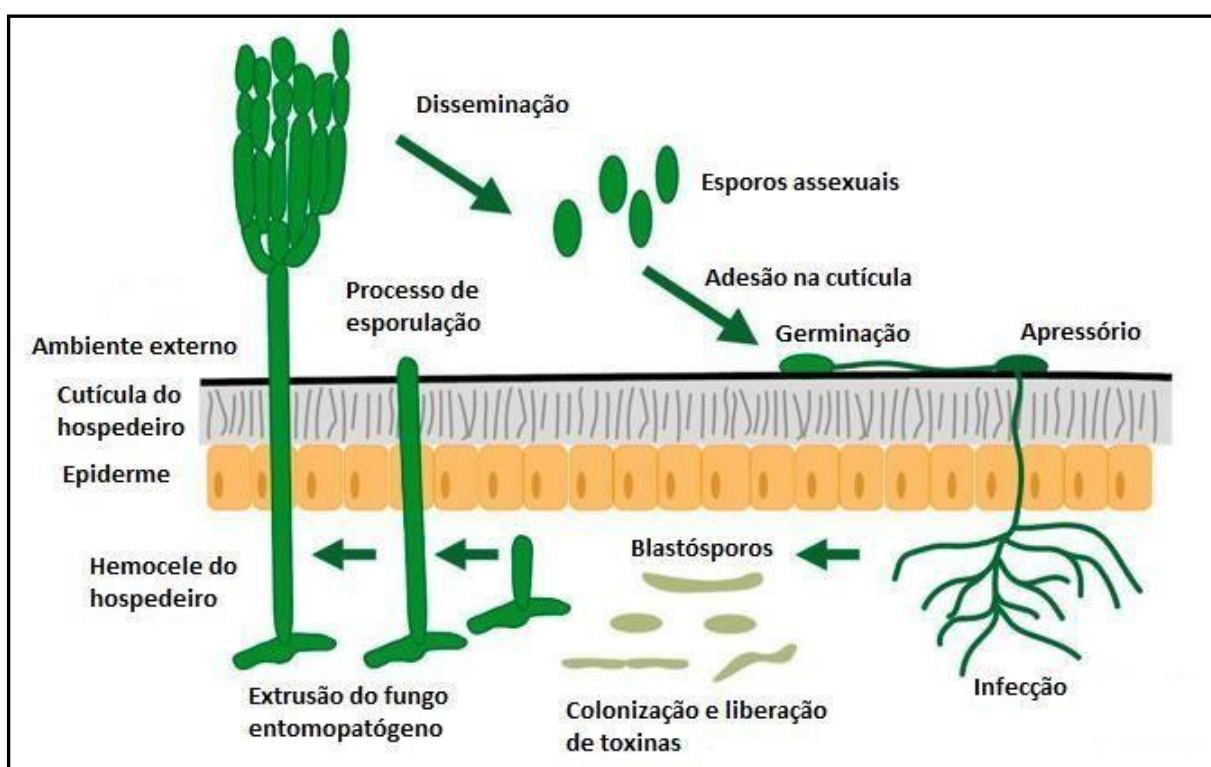
Nesse cenário, os fungos entomopatogênicos são utilizados para o controle biológico de populações de artrópodes pragas. O grupo dos fungos entomopatogênicos é formado por diversas espécies que são capazes de infectar e causar doenças em insetos e outros artrópodes em diferentes estágios de desenvolvimento e com os mais variados hábitos de vida (VALADARES-INGLIS et al., 2020). A grande maioria das espécies de fungos entomopatogênicos pertencem à ordem Hypocreales (filo Ascomycota) e ao filo Entomophthoromycota (BARON et al., 2019; MORA et al., 2017), algumas poucas espécies pertencem aos filos Basidiomycota, Blastocladiomycota, Chytridiomycota e Kickxellomycotina (MORA et al., 2017). Fungos do filo Entomophthoromycota são mais específicos para os seus hospedeiros, desta forma apresentam baixo risco de infectar insetos benéficos como os polinizadores, enquanto fungos ascomicetos são menos seletivos e infectam uma ampla gama de insetos hospedeiros (BARON et al., 2019).

Ao contrário de outros microrganismos que requerem ser ingeridos para infecção, os fungos entomopatogênicos infectam por contato. O processo de infecção inicia-se com a adesão das estruturas fúngicas à superfície do hospedeiro suscetível, seguida de germinação, penetração e colonização interna (VALADARES-INGLIS et al., 2020). Os esporos originados principalmente da reprodução assexuada, são as principais estruturas fúngicas envolvidas no processo de invasão dos hospedeiros pelos fungos entomopatogênicos (MORA et al., 2017).

Uma vez em contato com a superfície do hospedeiro suscetível, o esporo germina, o tubo germinativo desenvolve até a formação do apressório, quando, então, inicia a penetração e secreção de enzimas hidrolíticas que rompem a cutícula e

permitem a colonização dos tecidos internos do hospedeiro pelo alongamento das hifas (BARON et al., 2019; MORA et al., 2017). Quando o fungo alcança a hemolinfa, se diferencia em blastósporos, estruturas unicelulares arredondadas capazes de invadir as células imunes do hospedeiro, que facilitam a disseminação do fungo por todo o corpo do hospedeiro (sistema nervoso, túbulos digestivos e tecido adiposo), podendo colonizar os órgãos (RUSTIGUEL et al., 2018). Após a morte do hospedeiro, o fungo rompe novamente a cutícula e inicia o processo de esporulação na sua superfície (Figura 2). Dessa forma, os esporos se tornam uma fonte de inóculo na área, e são capazes de contaminar outros insetos.

Figura 2 - Colonização de um inseto hospedeiro por ascomiceto com ciclo de vida assexuado: adesão e germinação; penetração; colonização; reprodução; e disseminação.

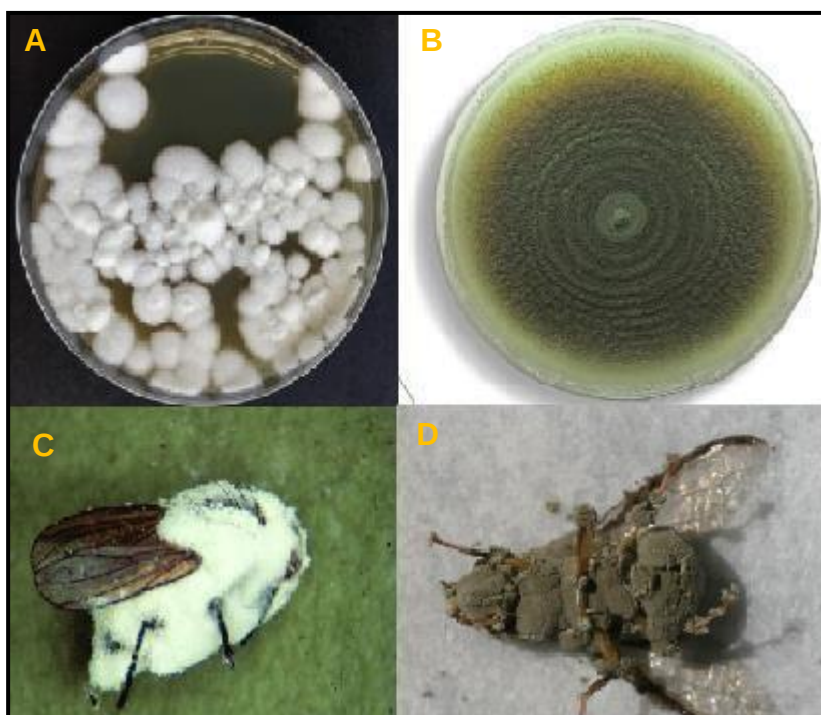


Fonte: Adaptado de Silva (2012).

Durante a infecção do hospedeiro, os fungos produzem vários compostos como enzimas (e.g. proteases, quitinases e lipases) e toxinas, que desempenham papéis fundamentais no processo de infecção, seja por favorecer a adesão do esporo na superfície do hospedeiro, por auxiliar no processo de degradação da cutícula, ou por interferir nos sistemas fisiológico e neurológico do hospedeiro, reduzindo sua resposta imune (ALVES, 1998; RUSTIGUEL et al., 2018).

Os fungos entomopatogênicos mais frequentemente e amplamente empregados como agentes de biocontrole contra artrópodes pragas são *Beauveria bassiana* e *Metharrizium anisopliae* (BARON et al., 2019; MORA et al., 2017). Tal fato se deve provavelmente à ampla distribuição geográfica, à capacidade de infectar uma ampla variedade de hospedeiros artrópodes e à condição de serem parasitas facultativos, uma vez que não necessitam obrigatoriamente de um hospedeiro para completar o seu ciclo de vida, podendo permanecer no solo onde ocorrem naturalmente (BARON et al., 2019; SCHRANK & VAINSTEIN, 2010) (Figura 3).

Figura 3 - Fungos entomopatogênicos *Beauveria bassiana* (A)¹ e *Metarhizium anisopliae* (B)² crescendo sobre meio de cultivo. Insetos praga colonizadas por *B. bassiana* (C)¹ e *M. anisopliae* (D)³.



A espécie *B. bassiana* foi descrita pela primeira vez em 1835 por Agostino Bassi, como patógeno do bicho-da-seda (*Bombyx mori* L.) (FONTES et al., 2020). Esta espécie está atualmente sob extenso estudo, uma vez que ela é considerada um parasita facultativo de mais de 700 espécies de insetos e outros artrópodes (SOUSA et al., 2018). Como um dos primeiros fungos entomopatogênicos estudados, a vasta experiência com *B. bassiana* permitiu aos pesquisadores compreender melhor o controle biológico com outras espécies fúngicas, contribuindo para importantes avanços nesse setor (ALVES, 1998; SOUSA et al., 2018).

1 Disponível em: <https://blog.verde.ag/nutricao-de-plantas/conheca-o-microrganismo-beauveria-bassiana-e-seus-beneficios-para-a-agricultura/>.

2 Disponível em: <https://www.themyceliumporium.com/product-page/met-52-metarhizium-anisopliae>.

3 Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/4255001/bactrocera-carambolae-infectada-por-metarhizium-anisopliae>.

O controle biológico de diversos artrópodes pragas por *B. bassiana* tem sido relatado na literatura. Neves e Hirose (2005), avaliaram a virulência de 61 isolados de *B. bassiana*, obtidos de diferentes regiões geográficas, para o controle da broca-do-café, *Hypothenemus hampei*, o qual é uma das mais importantes pragas do cafeeiro. Como resultado os autores selecionaram 11 isolados de *B. bassiana* que causaram mortalidade acima de 60%. Investigando o controle biológico do bicudo-da-cana (*Sphenophorus levis*) por *B. bassiana*, Simi (2014) observou que 13 isolados diferiram significativamente da testemunha com percentuais variando entre 64 a 80% de mortalidade confirmada. Em uma avaliação da eficácia de diversas cepas de *B. bassiana* no controle de *Cosmopolites sordidus* (moleque-da-bananeira) em condições de laboratório, Moran et al. (2021) observaram mortalidade de 80% em adultos de gorgulho preto após oito e 10 dias da inoculação.

O fungo *B. bassiana* formulado como microinseticida, vem sendo empregado em cultivos agrícolas em todo mundo. Na Europa mais de dois milhões de hectares já recebem aplicações a base de propágulos de *B. bassiana*. No Brasil, a aplicação de *B. bassiana* ocorre em cerca de 100 mil hectares (ZIMMERMANN, 2007; PARRA, 2014).

A espécie *Metarhizium anisopliae* está também entre os fungos mais estudados nos programas de controle biológico de pragas agrícolas e promoção do crescimento das plantas, já tendo superado a marca de mais de 2 milhões de hectares em área aplicada. Este fungo é amplamente conhecido por parasitar uma variedade de espécies de insetos e pela capacidade de produção em massa *in vitro* além da possibilidade de utilizar diferentes técnicas de aplicação (ALVES, 1998). Tem sido bastante utilizado para o controle de diferentes pragas no Brasil, como a broca-da-bananeira, pragas de grãos armazenados, carrapatos, cupim de montículo em pastagens, larvas de escarabeídeos que atacam a cana de açúcar e a cigarrinha da cana-de-açúcar (GARCIA et al., 2005).

Dentre as vantagens do uso de fungos entomopatógenos para o controle biológico, destacam-se a facilidade de dispersão e a manutenção do inóculo em campo (ALVES, 1998). O mecanismo de infecção desses fungos é muito complexo, no entanto, altamente especializado, e o conhecimento da relação artrópode-fungo é essencial. O uso de fungos entomopatogênicos na agricultura aumentou nos últimos anos devido ao grande potencial que têm no manejo de pragas, representando uma

alternativa eficiente ao uso de produtos químicos pesticidas, que são considerados altamente prejudiciais à saúde do homem e dos ecossistemas (MORA et al., 2017).

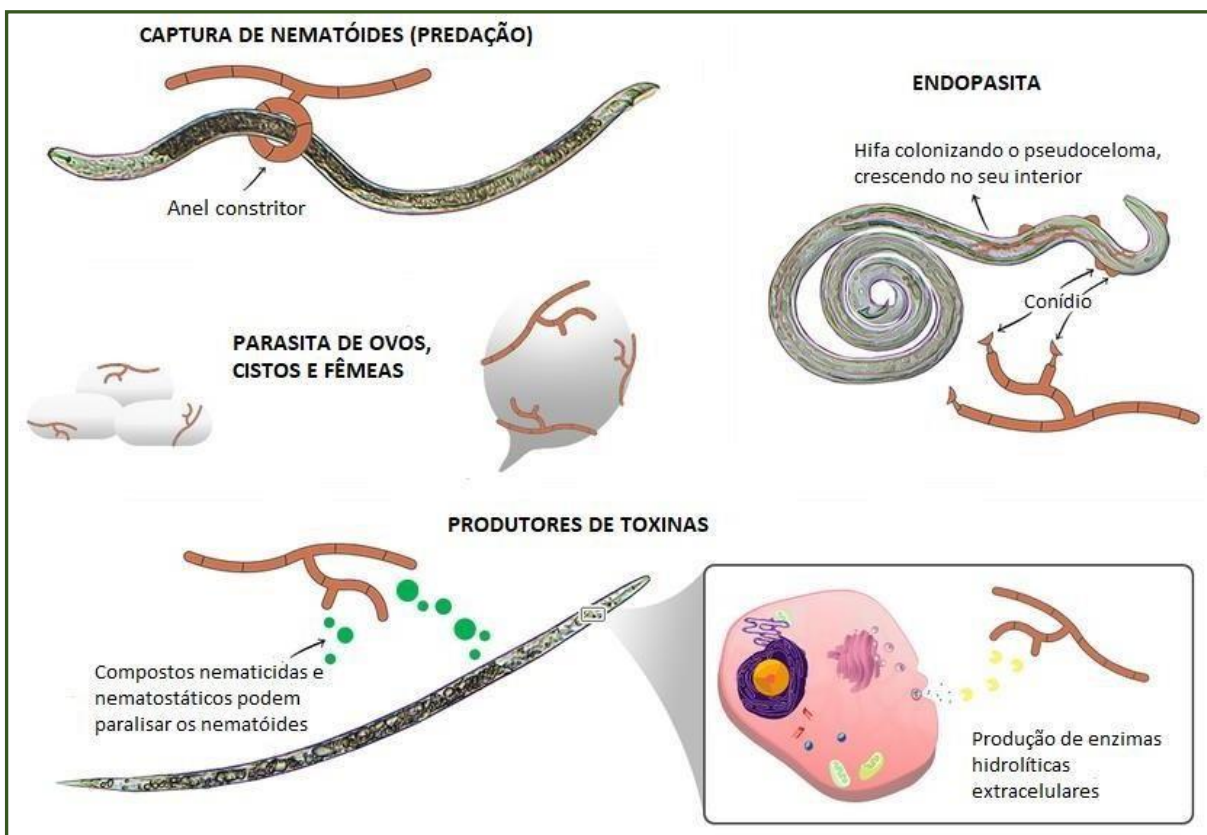
2.2.2 Controle biológico de nematoides por fungos

Os nematoides são provavelmente os metazoários mais diversos e numerosos no solo e nos sedimentos aquáticos, embora sejam pouco estudados (MAGGENTI, 1981; HUGOT et al., 2001). Cerca de 4.100 espécies são parasitas de plantas, capazes de parasitar as raízes na maioria dos casos, causando prejuízos ao desenvolvimento e produtividade de todas as culturas e, então, proporcionando perdas econômicas drásticas com as estimativas global anual chegando ao montante de 173 bilhões de dólares (PIRES et al., 2022). Por serem vermes microscópicos são difíceis de serem identificados e, portanto, uma vez presentes no solo, os nematoides são difíceis de ser erradicados (FERRAZ & BROWN, 2016).

O manejo de nematoides parasitas de plantas depende em grande parte do uso de nematicidas químicos, a maioria dos quais são fumigantes de solo. Nas últimas décadas, os agricultores estão usando nematicidas químicos intensivamente, com o intuito de reduzir as perdas na produtividade agrícola devido aos fitonematoides (YADAV et al., 2023). O controle biológico de nematoides parasitas de plantas oferece uma alternativa promissora aos nematicidas, e isso têm atraído atenção ao longo dos anos. Estratégias baseadas no uso de microrganismos para o controle de fitonematoides têm sido relatadas como uma abordagem segura e sustentável, visto que é livre de resíduos no ambiente e não causa prejuízo à saúde humana e animal (PIRES et al. 2022; YADAV et al., 2023).

Os fungos nematófagos são inimigos naturais dos nematoides, que possuem a capacidade de utilizar as larvas em diferentes estágios de desenvolvimento como forma de nutrição a fim de assegurar a sua alimentação ou sobrevivência (PIRES et al., 2022). Estes organismos estão presentes nos solos e em ambiente aquático e são classificados nos filos Ascomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota e Zoopagomycota, apresentando, portanto, fungos com esporos flagelados e aplanósporos (SOARES et al., 2018; WIJAYAWARDENE et al., 2020). De acordo ao seu modo de ataque aos nematoides, quatro grupos distintos de fungos nematófagos podem ser considerados: (1) fungos que capturam nematoides, também chamados de predadores; (2) fungos endoparasitas; (3) fungos parasitas de ovos e fêmeas; e (4) fungos produtores de toxinas (Figura 4 e Figura 5) (YADAV et al., 2023).

Figura 4 - Representação ilustrativa dos tipos e modos de ação dos fungos nematófagos.



Fonte: Adaptado de Moore et al. (2020).

Os fungos pertencentes ao grupo dos predadores formam ao longo de suas hifas estruturas especializadas que secretam substâncias colantes capazes de prender os nematoides quando estes entram em contato com elas (Figura 5A). Dentre as estruturas especializadas têm-se anéis constritores e não constritores, redes tridimensionais pegajosas, e nódulos adesivos, as quais apresentam-se como armadilhas que atuam na captura dos nematoides (Figura 6) (PIRES et al., 2022).

Uma vez o nematoide preso nas armadilhas fúngicas se inicia o processo de penetração do seu corpo pelas hifas através da liberação de enzimas hidrolíticas capazes de solubilizar macromoléculas da cutícula e, em seguida, degradar completamente o nematoide (LOPES et al., 2007). Pertence a este grupo o gênero *Arthrobotrys*, com as espécies *A. oligospora*, *A. conoides* e *A. musiformis*, produtoras de redes adesivas tridimensionais; e a espécie *A. dactyloides* que forma anéis constritores e captura a presa de forma mecânica. O gênero *Monacrosporium* apresenta botões e colunas adesivas (NORDBRING-HERTZ et al., 2006).

Figura 5 - Fungos nematófagos predadores, *Arthrobotrys* sp. (A)¹; endoparasitas, *Hirsutella rhossiliensis* (B)²; parasitas de ovos, *Pochonia chlamydosporia* (C)², e de fêmea, *Verticillium* sp. (D)², de nematoide.

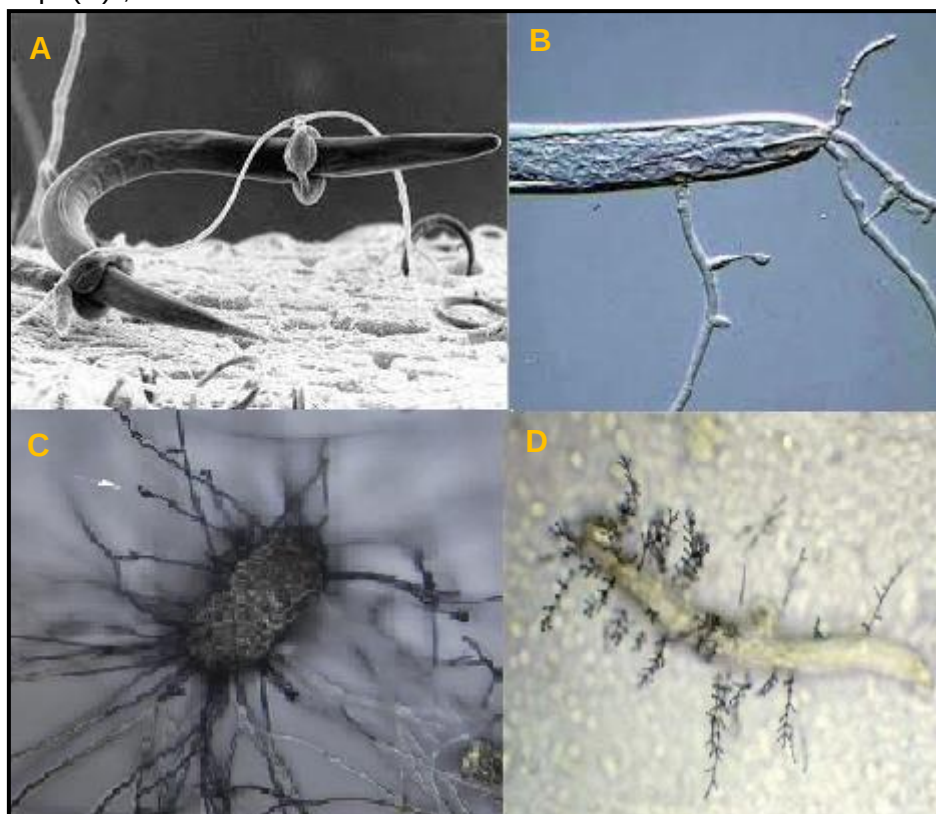
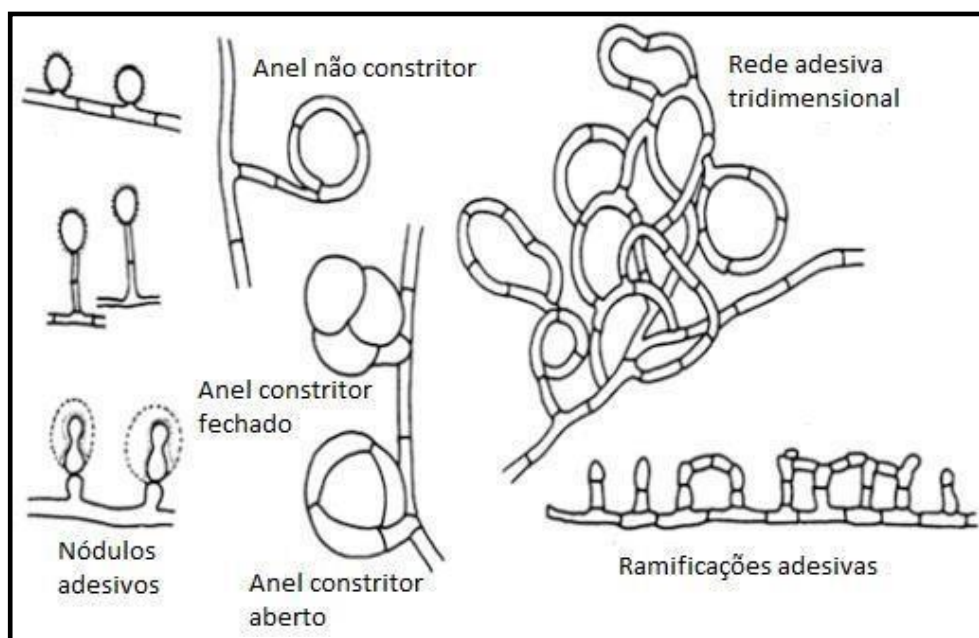


Figura 6 - Armadilhas de captura de fungos predadores.



Fonte: Adaptado de Carneiro et al. (2020).

Os fungos endoparasitos, não produzem extenso micélio nos solos, mas apresentam-se como esporos (conídios e zoósporos) no ambiente e infectam nematoides aderindo-se à sua superfície ou pela ingestão direta. Nessa situação, uma vez no interior do nematoide os esporos germinam rapidamente e as hifas se desenvolvem por toda a cavidade corporal, colonizando o pseudoceloma e causando a ruptura de órgãos e tecidos, cujo conteúdo será completamente consumido pelo fungo (LIU et al., 2009; PIRES et al., 2022). Após a degradação do nematoide, o fungo endoparasita cresce em direção ao solo e produz novos esporos para o próximo ciclo de infecção (LIU et al., 2009) (Figura 5B). A grande maioria dos fungos endoparasitas são parasitas obrigatórios e todos os estágios vegetativos de seu ciclo de vida ocorrem dentro dos nematoides infectados (YADAV et al., 2023).

Alguns endoparasitas nematófagos produzem esporos adesivos, como as espécies *Hirsutella rhossiliensis* e *H. minnesotensis*, que se fixam aos nematoides e após a germinação a hifa do fungo penetra a cutícula e coloniza o interior do hospedeiro (LIU et al., 2009). Outros fungos endoparasitas, como a espécie *Caternaria anguilulae*, já produzem zoósporos móveis que se encistam na superfície do nematóide e subsequentemente penetram e infectam nematoides de vida livre. Algumas espécies de endoparasitas tem conídios (esporos assexuais) morfolologicamente adaptados que, quando ingerido pelo nematoide, ficam alojados em sua cavidade bucal ou esôfago. Estas espécies pertencem quase exclusivamente ao gênero *Harposporium* (FERRAZ & SANTOS, 1995).

Os fungos parasitas de ovos e de fêmeas também chamados oportunistas apresentam grande potencial para o controle biológico de nematoides, e as espécies de fungos *Purpureocillium lilacinum* (previamente conhecido como *Paecilomyces lilacinus*) e *Metacordyceps chlamydosporia* se destacam nesse grupo (BARON et al., 2019) (Figura 5C e 5D). Como a maioria são saprofíticos, eles habitam o solo independente da presença de ovos de nematoides para a sua sobrevivência (FERRAZ & SANTOS, 1995). Devido a essa característica, se estabelecem mais facilmente no solo, quando comparados com os fungos predadores. Tais fungos oportunistas parasitam rapidamente ovos e fêmeas de nematoides, destruindo de uma só vez grande quantidade de indivíduos, especialmente no caso dos nematoides de galhas (*Meloidogyne* spp.) e dos cistos (*Heterodera* spp., *Globodera* spp) (STIRLING, 1991).

Os fungos produtores de toxinas liberam compostos tóxicos que podem imobilizar os nematoides, antes da penetração das hifas através de sua cutícula

(YADAV et al., 2023). Este grupo compreende gêneros do filo Basidiomycota como *Pleurotus* e *Coprinus*, mas também ascomicetos que possuem mais de uma forma de atuação, podendo pertencer a um dos três grupos de fungos nematófagos mencionados acima (DEGENKOLB & VILCINSKAS, 2016). São conhecidos aproximadamente 80 gêneros de fungos que produzem compostos com atividade nematicida e, entre eles, destacam-se *Verticillium*, *Purpureocillium*, *Trichoderma*, *Arthrobotrys*, *Monacrosporium*, *Aspergillus* e *Penicillium*. As toxinas são compostos oriundos de metabólitos secundários que agem sobre os ovos e formas ativas dos nematoides (CARNEIRO et al., 2020).

Dentre os fungos nematófagos, os fungos oportunistas estão entre os mais promissores para a aplicação do controle biológico, devido à baixa especificidade do hospedeiro, e presença na maioria dos solos, estando mais associados a solos subtropicais e tropicais. Estes fungos são capazes de reduzir a eclosão e a mobilidade juvenil devido à produção de toxinas, além de induzirem a resistência às plantas, por meio da produção de antibióticos, toxinas e enzimas (STIRLING, 1991). Ademais, são produtores de estruturas de resistência, chamadas de clamidósporos, as quais possibilitam a sua permanência no solo sem a presença de nematoides (CIANCIO et al., 2016).

2.2.3 Controle biológico de fungos patógenos de plantas por fungos

Os patógenos são causadores de diversas doenças de plantas e por isso são uma preocupação à agricultura pois são responsáveis por grandes perdas na produtividade das culturas e qualidade das plantas. O termo patógeno é aplicado na agricultura para designar qualquer microrganismo capaz de causar danos nas plantas, incluindo os fungos, bactérias, vírus e nematoides. Dentre estes microrganismos os fungos se destacam, visto que são causadores de, aproximadamente, 65% das doenças em plantas (ALMEIDA et al., 2019).

Os agentes fúngicos de biocontrole, são geralmente isolados da filosfera e rizosfera e desempenham um papel importante no controle de fitopatógenos, uma vez que previne a infecção da planta hospedeira ou o estabelecimento do patógeno. Desta forma, podem exibir efeitos diretos sobre o patógeno ou apresentar mecanismos indiretos de ação envolvidos no controle da doença. Tais mecanismos incluem antibiose (onde um metabólito inibitório ou antibiótico é produzido pelo agente de biocontrole), micoparasitismo (onde o agente de biocontrole necessita de alguns ou

de todos os seus nutrientes do hospedeiro fúngico), resistência (indução da resposta de defesa da planta contra patógenos) e aumento do crescimento da planta (promove o crescimento enquanto os efeitos da doença estão sendo reduzidos além da produção de fitohormônios, como ácido indolacético e ácido giberélico) (THAMBUGALA et al., 2020).

Fungos do gênero *Trichoderma* encontram-se entre os agentes de controle de patógenos de plantas mais estudados e empregados na produção agrícola mundial e no Brasil (BETTIOL et al. 2019), visto que apresentam grande potencial para melhorar a sanidade e o desenvolvimento de plantas, além de não serem patogênicos ao homem e ao meio ambiente (MUKHERJEE et al., 2022). São habitantes comuns do solo e amplamente distribuídos, apresentam uma elevada taxa de crescimento e o seu maior papel na natureza é como decompositor primário. Esses fungos são capazes de inibir o crescimento de fungos fitopatogênicos induzindo a resistência da planta ou agindo diretamente contra o patógeno como antagonista, micoparasita ou competidor (BARON et al., 2019) (Figura 7).

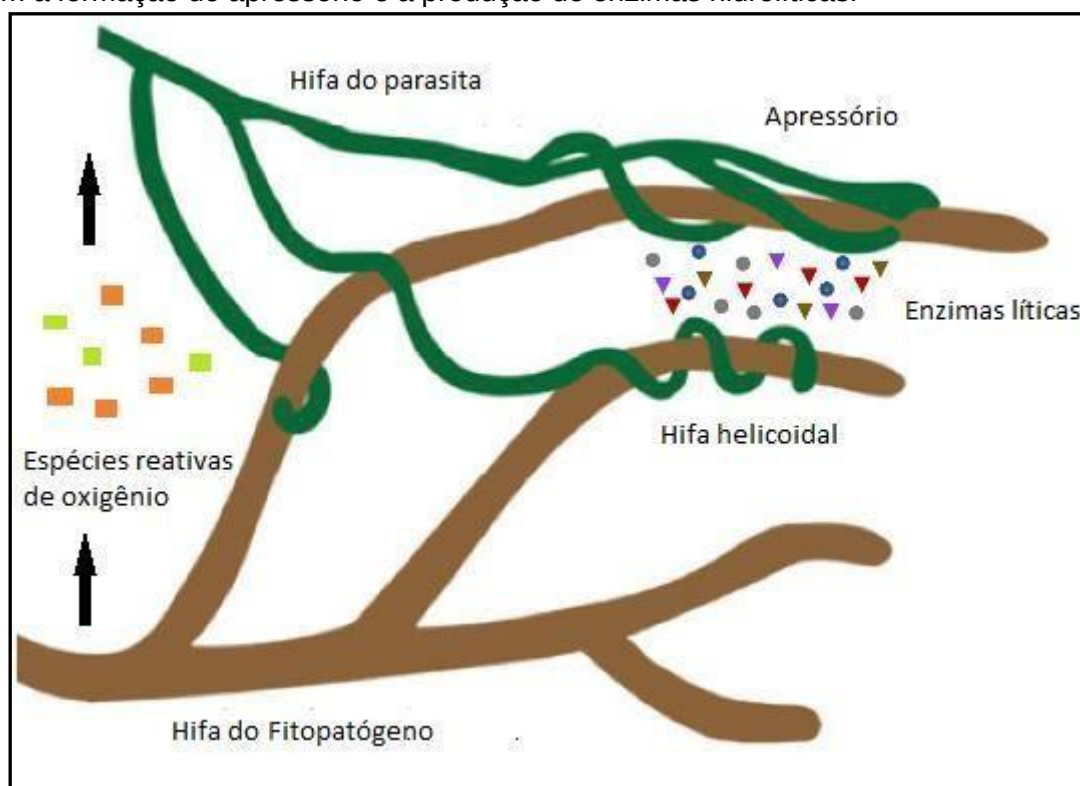
Como micoparasita, as espécies de *Trichoderma* produzem hifas helicoidais ao redor das hifas do fungo patogênico, formando apressórios, onde enzimas líticas degradantes são produzidas e liberadas, permitindo a sua penetração nas hifas do patógeno para obtenção de nutrientes (BARON et al., 2019). O fungo fitopatógeno, que está sendo parasitado, também produz metabólitos e espécies reativas de oxigênio (ROS) como mecanismo de defesa em resposta ao ataque e, por sua vez, o micoparasita, *Trichoderma*, ativa genes envolvidos na desintoxicação em resposta ao estresse (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023) (Figura 8). Enzimas como quitinase, β -glucanases e proteases são relatadas como as principais enzimas envolvidas no micoparasitismo (MUKHERJEE et al., 2022).

Como antagonista as espécies de *Trichoderma* produzem vários compostos com atividade antimicrobiana, e são também grandes competidores por espaço e nutrientes (BARON et al., 2019). Segundo Mukherjee et al. (2022), o micoparasitismo, é um dos mecanismos mais importantes de redução do inóculo do patógeno, sendo um processo fisiológico complexo que deve ser visto na perspectiva ampla da competição microbiana e envolve a produção de enzimas e metabólitos secundários. Espécies de *Trichoderma* têm sido tradicionalmente consideradas comomicoparasitas necrotróficas, uma vez que matam as células dos fungos hospedeiros através do contato físico e da liberação de substâncias tóxicas,

Figura 7 - Visão geral da colônia de *Trichoderma* sp. (A)¹; micrografia eletrônica do parasitismo de *Trichoderma* sobre o fungo hospedeiro *Aspergillus* (B)²; e parasitismo de escleródios de *Sclerotinia sclerotiorum* por *Trichoderma*, em campo (C e D)³.



Figura 8 - Crescimento do micoparasita *Trichoderma* ao redor da hifa do fungo patogênico, com a formação do apressório e a produção de enzimas hidrolíticas.



Fonte: Adaptado de <https://plantbio.com.mx/trichoderma-harzianum-magni-root/>.

1 Disponível em: <https://ciorganicos.com.br/biblioteca/fungo-trichoderma-e-aliado-no-controle-biologico-de-doencas-em-culturas-agricolas/>.

2 Disponível em: <https://comosembrar.website/control-biologico/fungicida-biologico-trichoderma-la-mejor-proteccion-para-tu-cultivo/>.

3 Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/209702/1/cap-13-livro-trichoderma-online-06.01.20-1.pdf>

sendo considerado um parasitismo destrutivo (MUKHERJEE et al., 2022). Em alguns casos, *Trichoderma* obtém nutrientes, mas sem causar a morte do patógeno, sendo classificado como micoparasitismo biotrófico (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023).

As espécies *T. harzianum*, *T. asperellum* e *T. atroviride*., amplamente utilizadas como agentes de controle biológico, utilizam o micoparasitismo e a competição como mecanismos primários de ação contra fitopatógenos (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023). A espécie *T. harzianum* apresenta atividade parasitária e estudos demonstraram a inibição do crescimento de fungos patogênicos e produtores de micotoxinas tais como *Fusarium oxysporum*, *Alternaria alternata*, *Aspergillus. flavus*, e *A. carbonarius* (BRAUN et al., 2018); e também dos patógenos *F. graminearum* (HEWEDY et al., 2020) e *Sclerotinia sclerotiorum* (MENENDEZ & GODEAS, 1998).

Trichoderma asperellum tem sido relatado como um forte antagonista contra vários tipos de fitopatógenos tais como *Fusarium camptocerus*, *F. oxysporum*, *F. solani*, *A. alternata*, *Colletotrichum gleosporoides*, *Ganoderma applanatum*, *Botrytis cinerea* e *Cytospora chrysosperma*, devido a sua atividade de micoparasitismo e competição por espaço e nutrientes (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023). Guo et al. (2018) demonstraram que *T. asperellum* foi capaz de inibir o crescimento de *Rhizoctonia solani* e *A. alternata* mesmo em condições de estresse salino. *Trichoderma atroviride* compete e é capaz de parasitar *F. avenaceum* e *F. culmorum*, importantes patógenos do milho, além do patógeno da videira *Neofusicoccum parvum* (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023).

As espécies de *Trichoderma* são um dos principais agentes de controle biológico utilizado no Brasil devido, principalmente, à sua ampla adaptação às condições ambientais do país e pela grande variabilidade e especificidade de controle a determinados patossistemas. Segundo Meyer et al. (2019) os biofungicidas à base de *Trichoderma* são utilizados no Brasil para as culturas da soja, algodão, milho, feijão, morango, citros, cana-de-açúcar, café, tabaco, hortaliças, ornamentais, frutíferas e espécies florestais.

2.2.4 Controle biológico de plantas daninhas por fungos

As plantas daninhas, também chamadas de plantas invasoras, representam um grande prejuízo para as atividades agrícolas, visto que perdas diretas podem ser verificadas tanto pela redução da produtividade, em virtude da competição por nutrientes e espaço ou da alelopatia, como pela elevação dos custos de produção e

beneficiamento. Espécies de plantas invasoras podem atuar como hospedeiras alternativas para pragas e doenças funcionando como reservatórios. Na pecuária, a presença dessas espécies causa prejuízos às pastagens, além da possibilidade de provocar a morte de animais pelo envenenamento (NACHTIGAL et al., 2020).

Dentre os fatores bióticos responsáveis pelas perdas agrícolas, as ocasionadas por plantas invasoras representam um percentual de aproximadamente 32% (NARWAL, 1996). Existem cerca de 30.000 espécies de plantas daninhas distribuídas em todo o globo, das quais 1.800 delas causam prejuízos na produção agrícola a cada ano (TREMACOLDI & SOUZA FILHO, 2006). Para controlar plantas daninhas e aumentar a produtividade das lavouras, a aplicação de defensivos agrícolas é uma das técnicas de manejo mais utilizadas pelos agricultores, motivo pelo qual o consumo desses produtos químicos vem aumentando no Brasil.

Nas últimas décadas, a descoberta de moléculas químicas naturais que controlem as plantas daninhas, mas sem causar prejuízos para os cultivos agrícolas, tem atraído a atenção de pesquisadores que buscam utilizá-las diretamente na forma de bio defensivos ou que possam compor a formulação de novos produtos. Inicialmente, moléculas químicas produzidas por plantas foram o principal foco de pesquisas, as quais levaram à descoberta de importantes substâncias químicas com potente atividade herbicida. Outra fonte importante, devido a sua especificidade química, têm sido as toxinas produzidas por fungos fitopatógenos, os quais podem fornecer surpreendentes moléculas químicas com propriedades bioerbicidas (TREMACOLDI & SOUZA FILHO, 2006).

Toxinas com potencial bioerbicida são capazes de penetrar a planta hospedeira, desintegrar sua estrutura celular e induzir a produção de lesões necróticas ou halo clorótico, com a vantagem de não serem tóxicas aos mamíferos e serem facilmente degradadas no ambiente. A determinação do modo de ação das toxinas é um desafio, devido à multiplicidade de sítios moleculares de ação em potencial. Um dos métodos utilizados consiste em selecionar um composto químico e testá-lo sobre todos os sítios-alvos conhecidos para herbicidas (MORI et al., 1995). Por este método já foram identificados cerca de trinta sítios-alvos para toxinas (DUKE et al., 1997). A especificidade da toxina para a planta daninha hospedeira é variável, indo de uma única espécie a um conjunto de espécies, sendo que quanto menor a especificidade pela planta hospedeira mais promissora é a toxina para uso como bioerbicida (CHARUDATTAN, 1991).

A primeira evidência do uso de fungos para controle de plantas daninhas foi em 1971 com o basidiomiceto *Puccinia chondrillina* para controlar *Chondrilla juncea*, importante invasora de cultivos de trigo e de pastagens na Austrália (BARTON, 2004). E desde então diversas pesquisas foram realizadas sobre esse tema, cujas referências dos trabalhos publicados podem ser acessadas em Nachtigale et al. (2020). Espécies patogênicas produtoras de toxinas ocorrem em todos os principais grupos taxonômicos de fungos e as mais estudadas são as dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Claviceps*, *Alternaria*, *Stachybotrys*, *Myrothecium*, *Phoma* e *Diplodia* (TREMACOLDI & SOUZA FILHO, 2006).

Considerando o gênero *Fusarium*, frequentemente estudado quanto à produção de substâncias tóxicas e os seus efeitos nas células vegetais e animais; o mais importante grupo de toxinas é o tricotecenos, uma vez que é responsável pela patogenicidade das espécies do gênero (DESJARDINS & HOHN, 1997). Dentre as toxinas pertencentes a este grupo, Zonno & Vurro (1999) verificaram que a deoxinivalenol, toxina T2, fumonisina e nivalenol tiveram efeito no controle da planta daninha *Striga hermonthica*, sendo que as duas primeiras toxinas, deoxinivalenol e toxina T2, inibiram completamente a germinação das sementes da planta (ZONNO & VURRO, 1999).

Toxinas de outros fungos fitopatogênicos também apresentam efeito bioerbicida, como a prehelmintosporal isolada de *Helminthosporium* sp., um patógeno de *Sorghum alperse*. Quando testada contra as plantas daninhas *S. bicolor* e *S. alperse* foi verificado grande atividade mesmo em baixas concentrações, quando aplicada às folhas. Por esta razão, a toxina prehelmintosporal é tida como uma das mais promissoras para uso agrícola, devido à sua baixa toxicidade (PENA-RODRIGUEZ et al., 1988). Viridiol é uma toxina de amplo espectro produzida pelo fungo *Gliocladium virens*. É efetiva apenas contra plantas daninhas dicotiledôneas (STIPANOVIC & HOWELL, 1984).

Toxinas isoladas do fungo *Phoma sorghina*, um patógeno de *Phytolacca americana*, apresentou amplo espectro de ação contra monocotiledôneas e dicotiledôneas (VENKATASUBBAIAH et al., 1992). *Aschochyta hialospora*, um patógeno causador de mancha foliar, produz toxinas (ascoquitina, pirenolídeo A e hialopirona) que exibem atividade fitotóxica a nove espécies de plantas daninhas, entre elas *Chenopodium album*, *Sida spinosa*, *Ipomea* sp. e *Sorghum halepense* (VENKATASUBBAIAH et al., 1992).

O uso de fungos fitopatogênicos como bioherbicidas podem ser eficazes no controle de plantas daninhas. No entanto, mais estudos precisam ser feitos para viabilizar a aplicabilidade dessas toxinas produzidas por fungos fitopatógenos e permitir que os alimentos sejam cultivados em sistemas com maior sustentabilidade e segurança alimentar. De fato, os estudos sobre esse tema são relativamente recentes, mas há um potencial para o desenvolvimento de herbicidas comerciais que sejam efetivos contra plantas daninhas e não prejudiciais às culturas agrícolas e ao meio ambiente.

3 METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo adotou-se a pesquisa exploratória e descritiva. A pesquisa exploratória visou construir a bagagem de um referencial teórico concreto para elucidar os temas e subtemas envolvidos na questão central do trabalho. Já a pesquisa descritiva foi utilizada para obter uma análise do objeto de estudo, observando dados qualitativos e quantitativos. Para tanto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica por meio de material já elaborado, de diferentes metodologias e bancos de dados. Segundo Estrela (2018, p. 32):

A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém, pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta.

Quanto à sua natureza deste trabalho, é classificada como uma pesquisa básica, destinada a apresentar *status* da discussão teórica em torno do tema do estudo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As consequências da toxicidade dos pesticidas sintéticos e a velocidade com que as pragas estão adquirindo resistência a eles levaram a uma forte demanda por métodos alternativos que solucione problemas causados por pragas na

agricultura. Assim, o controle biológico tem recebido muita atenção da comunidade científica e pode atender às necessidades tanto dos pequenos agricultores quanto da produção agrícola em grande escala.

Entre os agentes de controle biológico, determinados grupos de fungos, como os fungos entomopatogênico, nematófagos, micoparasitas e os fitopatogênicos (herbicidas), desempenham um papel importante no controle biológico de pragas agrícolas de tal forma que já há no mercado produtos com formulação à base de fungos. Desta forma, podemos afirmar que os grupos de fungos acima mencionados são eficazes no ataque aos organismos-alvo.

Nesse sentido, há uma perspectiva para o futuro crescimento da comercialização e uso desses agentes de controle biológico, uma vez que a diversidade desse grupo de organismos ainda não é totalmente conhecida e estudada. Os fungos têm grande potencial para se tornar um dos agentes de controle biológico mais utilizados na produção agrícola no Brasil, e no mundo, com o intuito de reduzir os impactos no meio ambiente e na saúde animal e humana. Dessa forma, será possível, garantir uma produção de alimentos de maneira sustentável e saudável além de proporcionar a conservação da biodiversidade e dos habitats.

REFERÊNCIAS

- ALEXOPOULOS, C.J.; MIMS, C.W.; BLACKWELL, M. 1996. **Introductory Mycology**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons.
- ALMEIDA, F.; RODRIGUES, M.L.; COELHO, C. 2019. **The Still Underestimated Problem of Fungal Diseases Worldwide**. *Front Microbiol.*, 10: 214.
- ALVES, S. B. **Fungos entomopatogênicos**. In: ALVES, S. B. (Ed.). *Controle microbiano de insetos*. Piracicaba: FEALQ, 1998.
- BARON, N.C.; RIGOBELLO, E.C.; ZIED, D.C. 2019. Filamentous Fungi in Biological Control: Current Status and Future Perspectives. **Chilean Journal of Agricultural Research**, 79(2):307–15.
- BARTON, J. 2004. How good are we at predicting the field host-range of fungal pathogens used for classical biological control of weeds?. **Biological Control**, 31(1): 99-122.
- BETTIOL, W.; SILVA, J.C.; CASTRO, M.L.M.P. **Uso atual e perspectivas do *Trichoderma* no Brasil**. In: MEYER, M.C.; MAZARO, S.M.; SILVA, J.C. (eds). *Trichoderma* uso na agricultura. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 538 p.
- BJØRNSON, S.; OI, D. **Microsporidia Biological Control Agents and Pathogens of Beneficial Insects**. In: WEISS, L.M.; BECNEL, J.J. (eds). *Microsporidia: Pathogens of Opportunity*, First Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- BRAUN, H.; WOITSCH, L.; HETZER, B.; GEISEN, R.; ZANGE, B.; SCHMIDT-HEYDT, M. 2018. ***Trichoderma harzianum*: Inhibition of Mycotoxin Producing Fungi and Toxin Biosynthesis**. *Int. J. Food Microbiol.*, 280:10-16.
- BUENO, V. H. P.; VAN LENTEREN, J. C. **Predadores no Controle Biológico de Pragas: Sucessos e Desafios**. *Defensivos Agrícolas Naturais*, p. 359, 2016.
- CARNEIRO, R.M.D.G.; MONTEIRO, T.S.A.; ECKSTEIN, B.; FREITAS, L.G. **Controle de nematoides fitoparasitas**. In: FONTES, E.M.G.; VALADARES-INGLIS, M.C. (orgs.). *Controle biológico de pragas da agricultura*. Brasília: Embrapa, 2020. Cap. 12, p. 371-411.
- CHARUDATTAN, R. **The mycoherbicide approach with plant pathogens**. In: **TEBEEEST, D.O. (Ed.). Microbial control of weeds**. New York: Chapman and Hall, 1991.
- CIANCIO, A.; COLAGIERO, M.; PENTIMONE, I.; ROSSO, L. C. Formulation of *Pochonia chlamydosporia* for plant and nematode management. In: ARORA, N. K.; MEHNAZ, S.; BALESTRINI, R. (eds.). **Bioformulations: for Sustainable Agriculture**. New Delhi: Springer, jun. 2016.

DEGENKOLB, T.; VILCINSKAS, A. 2016. **Metabolites from nematophagous fungi and nematicidal natural products from fungi as an alternative for biological control**. Part I: metabolites from nematophagous ascomycetes. Appl Microbiol Biotechnol 100:3799–3812.

DESJARDINS, A. E.; HOHN, T. M. 1997. **Mycotoxins in plant pathogenesis**. *Molecular PlantMicrobe Interactions*, 10(2):147-152.

DUKE, S. O.; DAYAN, F. E.; HERNÁNDEZ, A.; DUKE, M. V.; ABBAS, H. K. **Natural products as leads for new herbicide modes of action**. Proceedings, Brighton Crop Protection Conference Weeds, v. 2, p. 579-586, 1997.

ESTRELA, C. **Metodologia científica: ciência, ensino, pesquisa**. Artes Médicas, 2018.

FAO, Relatório da Organização das Nações Unidas **sobre “Como alimentar o mundo em 2050” (documento em inglês)**. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf>. Acesso em: 10/05/2023.

FERRAZ, L.C.C.B.; BROWN, D.J.F. **Nematologia de plantas: fundamentos e importância**. Manaus: NORMA EDITORA, 2016. 251 p.

FERRAZ, S.; SANTOS, M.A.1995. **Controle biológico de fitonematóides pelo uso de fungos**. Revisão Anual de Proteção de Plantas, 3: 283-314.

FONTES, E.M.G.; PIRES, C.S.; SUJII, E.R. Estratégias de uso e histórico. In: FONTES, E.M.G.; VALADARES-INGLIS, M.C. (orgs.). **Controle biológico de pragas da agricultura**. Brasília: Embrapa, 2020. Cap. 1. p. 21-44.

GARCIA, M.V.; MONTEIRO, A.C.; SZABÓ, M.P.J.; PRETTE, N.; BECHARA, G.H. 2005. **Mechanism of infection and colonization of *Rhizoglyphus sanguineus* eggs by *Metarhizium anisopliae* as revealed by scanning electron microscopy and histopathology**. Brazilian Journal of Microbiology, São Paulo, v.36, n.4, p.368-372.

GREATHEAD, D. J.; GREATHEAD, A. H. **Biological control of insect pests by insect parasitoids and predators: the BIOCAT**. Biocontrol, v. 13, n. 4, p. 61-68, 1992.

GUANGCUN, He. 2022. **Engineering chloroplasts for insect pest control**. Proc Natl Acad Sci U S A. 119(22).

GUO, R.; WANG, Z.; HUANG, Y.; FAN, H.; LIU, Z. 2018. **Biocontrol Potential of Saline- or Alkaline-Tolerant *Trichoderma asperellum* Mutants against Three Pathogenic Fungi under Saline or Alkaline Stress Conditions**. Braz. J. Microbiol., 49: 236–245.

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S.; PARRA-COTA, F.I.; OROZCO-MOSQUEDA, M.D.C.; FADIJI, A.E.; HYDER, S.; BABALOLA,

O.O.; SANTOYO, G. 2023. **Trichoderma Species: Our Best Fungal Allies in the Biocontrol of Plant Diseases—A Review**. *Plants*, 12(432).

HEIMPEL, G.E.; MILLS, N.J. **Biological Control: ecology and applications**. Cambridge: Cambridge University Press. 2017.

HEWEDY, O.A.; ABDEL LATEIF, K.S.; SELEIMAN, M.F.; SHAMI, A.; ALBARAKATY, F.M.; EL-MEIHY, R.M. 2020. **Phylogenetic Diversity of *Trichoderma* Strains and Their Antagonistic Potential against Soil-Borne Pathogens under Stress Conditions**. *Biology*, 9(189).

HUGOT, J. P.; BAUJARD, D.; MORAND, S. **Biodiversity in helminthes and nematodes as a field study: an overview**. *Nematology*, v. 3, p. 199-208, 2001.

INOBEME, A.; MATHEW, J.T.; OKONKWO, S.; AJAI, A.I.; JACOB, J.O.; OLORI, E. 2020. **Pesticide residues in food: distribution, route of exposure and toxicity: in review**. *MOJ Food Process Technols.*, 8(3):121–124.

LIU, X.; XIANG, M.; CHE, Y. 2009. **The living strategy of nematophagous fungi**. *Mycoscience*, 50:20-25.

LOPES, C.V.A.; ALBUQUERQUE, G.S.C. 2018. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde Debate**, 42(117).

LOPES, E.A.; FERRAZ, S.; FERREIRA, P.A.; FREITAS, L.G.; DHINGRA, O.D.; GARDIANO, C.G.; CARVALHO, S.L. 2007. **Potencial de Isolados de Fungos Nematófagos no Controle de *Meloidogyne javanica***. *Nematologia Brasileira*, 31 (2).

MAGGENTI, A. **General Nematology**. 1st ed. New York: Springer-Verlag; 1981. p. 372. DOI: 10.1007/978-1-4612-5938-1.

MEDEIROS, F. H. V.; SILVA, J. C. P.; PASCHOLATI, S. F. **Controle biológico de doenças em plantas**. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. Manual de fitopatologia: 5 ed., v.1. princípios e conceitos. Ouro Fino, MG: Agronômica Ceres, 2018.

MENENDEZ, A.B.; GODEAS, A. 1998. Biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* attacking soybean plants. Degradation of the cell walls of this pathogen by *Trichoderma harzianum* (BAFC 742). **Mycopathologia**, 142:153-160.

MOORE, D.; ROBSON, G.D.; TRINCI, A.P.J. 2020. **21st Century Guidebook to Fungi**. 2nd Edition.

MORA, M.A.E.; CASTILHO, A.M.C.; FRAGA, M.E. 2017. Classification and infection mechanism of entomopathogenic fungi Classificação e mecanismo de infecção dos fungos entomopatogênicos. **Arq. Inst. Biol.**, 84:1-10.

MORAN, A.R.; GALARZA, G.V.; PARRALES, Y.R.; ALVARADO, D.D.; GARCÍA, L.S.; FLORES, H.E.; ARAGONE, D.S. 2021. Controle biológico do gorgulho da bananeira

Cosmopolites sordidus Germar com a utilização de diversas cepas de *Beauveria bassiana* em condições de laboratório. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, 4(4):5527-5542.

MORI, I. R.; FONNE-PFISTER, R.; MATSUNAGA, S. **A novel class of herbicide: specific inhibitors of imidazoleglycerol phosphate dehydratase**. *Plant Physiology*, v. 107, p. 719-723, 1995.

MUKHERJEE, P. K., MENDOZA-MENDOZA, A., ZEILINGER, S., HORWITZ, B. A. 2022. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. **Fungal Biology Reviews**, 39:15-33.

NAÇÕES UNIDAS. 2022. **ONU News Perspectiva Global Reportagens Humanas**. População mundial atinge 8 bilhões de pessoas. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805342>> Acesso em: 13 de maio de 2023.

NARWAL, S. S. Potential and prospects of allelopathy mediated weed control for sustainable agriculture. In: NARWAL, S. S.; TAURO, P. (Ed.). **Allelopathy in pests management for sustainable agriculture**. Jodhpur: **Scientific Publishers**, 1996. p. 23-66.

NACHTIGAL, G.F.; GUATIMOSIM, E.; VITORINO, M.D.; MELLO, S.C.M.; MACEDO, D.M.; BARRETO, R.W. Controle de plantas invasoras. In: FONTES, E.M.G.; VALADARES-INGLIS, M.C. (orgs.). **Controle biológico de pragas da agricultura**. Brasília: Embrapa, 2020. Cap.11, p. 327-370.

NEVES, P.M.O.J.; HIROSE, E. 2005) Seleção de isolados de *Beauveria bassiana* para o controle biológico da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae). **Neotropical Entomology**, 34(1):77-82.

NORDBRING-HERTZ, B., JANSSON, H.B.; TUNLID, A. Nematophagous fungi. In: **Encyclopedia of Life Sciences**. John Wiley & Sons, Ltd., Chich, 2006.

PARRA, J. R. P. Biological Control in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 5, p. 420-429, 2014.

PARRA, J.R.P.; BOTELHO, P.S.M.; CORREA-FERREIRA, B.S.; BENTO, J.M.S. **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores**. Editora Manole, São Paulo. 609p, 2002.

PENA-RODRIGUEZ, L. M.; ARMINGEON, N. A.; CHILTON, W. S. 1988. Toxins from weed pathogens. I. Phytotoxins from a *Bipolaris* pathogen of Johnsongrass. **Journal of National Production**, 51:821-828.

PIRES, D.; VICENTE, C.S.L.; MENÉNDEZ, E.; FARIA, J.M.S.; RUSINQUE, L.; CAMACHO, M.J.; INÁCIO, M.L. 2022. The Fight against Plant-Parasitic Nematodes: Current Status of Bacterial and Fungal Biocontrol Agents. **Pathogens**, 11(117).

RIDGWAY, R.L., HOFFMANN, M.P., INSCOE, M.N. AND GLENISTER, C.S. **Mass-Reared Natural Enemies: Application, Regulation, and Needs**. Thomas Say

Publications in Entomology, Entomological Society of America, Lanham, Maryland, 1998. 332 p.

RUSTIGUEL, C. B., FERNÁNDEZ-BRAVO, M., GUIMARÃES, L. H. S., QUESADA-MORAGA, E. 2018. Different strategies to kill the host presented by *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*. **Canadian journal of microbiology**, 64(3):191-200.

SAVARY, S.; WILLOCQUET, L.; PETHYBRIDGE, S. J.; ESKER, P.; MCROBERTS, N.; NELSON, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. **Nature Ecology & Evolution**.

SAVITA; SHARMA, A. 2019. **Fungi as Biological Control Agents**. In: GIRI, B.; PRASAD, R.; WU, Q.S.; VARMA, A. (eds) *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*. Soil Biology, vol 55. Springer.

SCHRANK, A.; VAINSTEIN, M.H. 2010. *Metarhizium anisopliae* enzymes and toxins. **Toxicon.**, 56:1267–1274

SIMONATO, J.; GRIGOLLI, J.F.J.; OLIVEIRA, H.N. **Controle Biológico de Insetos-Praga na soja**. In: LOURENÇÃO, A.L.F.; GRIGOLLI, J.F.J.; MELOTTO, A.M.; PITOL, C.; GITTI, D. de C.; ROSCOE, R. (Ed.). **Tecnologia e Produção: Soja**. Maracaju, MS: Fundação MS, 2014.

SILVA, R.A. **Estudo de *Metarhizium anisopliae* (Metsch) Sorok: Toxicidade a compostos extraídos de *Tibraca limbativentris* Stal (Heteroptera: Pentatomidae), efeitos de agroquímicos utilizados na cultura do arroz e aumento da patogenicidade a *T. limbativentris* com doses subletais de inseticidas químicos**. Tese apresentada ao Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás, para a obtenção do título de Doutor em Química, 2012.

SIMI, L.D. 2014. **Controle de *Sphenophorus levis* e *Conotrachelus humeropictus* pelo uso combinado de nematoides e fungos entomopatogênicos**. 107 f. Tese (Doutorado)
Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

SOARES, F.E.F; SUFIATE, B.L.; QUEIROZ, J.H. 2018. **Nematophagous fungi: Far beyond the endoparasite, predator and ovicidal groups**. **Agriculture and Natural Resources**, 52.

SOUSA, A.C.B.; DE PAIVA GUIMARÃES, A.G.L.; BEZERRA, N.S.; ALMEIDA, A.F. 2018. Avaliação de substratos brutos alternativos para produção do fungo entomopatogênico *Beauveria bassiana* (Bals) Vuillemin (Deuteromycotina: hyphomycetes). **Revista Saúde & Ciência Online**, 7(2):379-396.

STIPANOVIC, R. D.; HOWELL, C. R. 1984. Phytotoxicity to crop plants and herbicidal effects on weeds of viridiol produced by *Gliocladium virens*. **Phytopathology**, 74:1346.

STIRLING, G. R. **Biological control of plant parasitic nematodes: Progress, problems and prospects**. Wallingford: CAB International, 1991.

STRANGE, R.N.; SCOTT, P.R. 2005. Plant disease: a threat to global food security. **Annu Rev Phytopathol**, 43:83-116.

THAMBUGALA, K.M.; DARANAGAMA, D.A.; PHILLIPS, A.J. L.; KANNANGARA, S.D.; PROMPUTTHA, I. 2020. Fungi vs. Fungi in Biocontrol: An Overview of Fungal Antagonists Applied Against Fungal Plant Pathogens. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, 10.

TOGNI, P. H. B. et al. Interações entre escalas espaciais no controle biológico conservativo: da paisagem ao cultivo. **Controle alternativo de pragas e doenças: opção ou necessidade?** p. 66. EPAMIG, Belo Horizonte, 2021.

TREMACOLDI, C.R.; SOUZA FILHO, A.P.S. **Toxinas produzidas por fungos fitopatógenos: possibilidades de uso no controle de plantas daninhas**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2006, 22p.

VALADARES-INGLIS, M.C.; LOPES, R.B.; FARIA, M.R. **Controle de artrópodes-praga com fungos entomopatogênicos**. In: FONTES, E.M.G.; VALADARES-INGLIS, M.C. (orgs.). **Controle biológico de pragas da agricultura**. Brasília: Embrapa, 2020. Cap. 7. p. 211-237.

VAN DRIESCHE, R.G.; BELLOWES JUNIOR, T. S. **Biological control**. New York: Chapman & Hall, 1996.

VENKATASUBBAIAH, P.; VAN DYKE, C. G.; CHILTON, W. S. 1992. **Phytotoxic metabolites of *Phoma sorghina*, a new foliar pathogen of pokeweed**. *Mycologia*, 84: 715-723.

WHITTAKER, R.H. **New Concepts of Kingdoms of Organisms**. Science, New York, v. 163, p. 150-161, 1969.

WIJAYAWARDENE, N.N.; HYDE, K.D.; AL-ANI, L.K.; TEDERSOO, L. ET AL. 2020. **Outline of Fungi and fungus-like taxa**. *Mycosphere* 11(1): 1060–1456.

YADAV, B.; SINGH, U.B.; MALVIYA, D. 2023. **Nematophagous Fungi: Biology, Ecology and Potential Application**. In: SINGH, U.B., KUMAR, R., SINGH, H.B. (eds) **Detection, Diagnosis and Management of Soil-borne Phytopathogens**. Springer, Singapore.

ZIMMERMANN, G. 2007. **Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii***. *Biocontrol Science and Technology*, 17: 553-596.

ZONNO, M. C.; VURRO, M. 1999. **Effect of fungal toxins on germination of *Striga hermonthica* seeds**. *Weed Research*, 39:15-20.