

2026

# Biocontrole de fitopatógenos: uma perspectiva integrada de produção científica e estudos experimentais

Martins, Livian Soares

Universidade Estadual do Norte do Paraná

---

MARTINS, Livian Soares. Biocontrole de fitopatógenos: uma perspectiva integrada de produção científica e estudos experimentais. Orientadora: Mayra Costa da Cruz Gallo de Carvalho. 2026. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Campus Luiz Meneghel, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2026.

<https://repositorio.uenp.edu.br/handle/123456789/855>

*Baixado de Repositório Institucional UENP*



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ**  
**CAMPUS LUIZ MENEGHEL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**(PPAGRO)**

LIVIAN SOARES MARTINS

**BIOCONTROLE DE FITOPATÓGENOS: UMA PERSPECTIVA INTEGRADA DE  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA E ESTUDOS EXPERIMENTAIS**

BANDEIRANTES, PR, BRASIL  
2026

LIVIAN SOARES MARTINS

**BIOCONTROLE DE FITOPATÓGENOS: UMA PERSPECTIVA INTEGRADA DE  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA E ESTUDOS EXPERIMENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPAGRO) da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel.

Orientador(a): Prof. Dr. Mayra Costa da Cruz Gallo de Carvalho

Coorientador(a): Prof. Dr. Luis Eduardo Azevedo Marques Lescano

BANDEIRANTES, PR, BRASIL  
2026

Ficha catalográfica elaborada na Biblioteca do Campus "Luiz Meneghel", vinculada ao Sistema de Bibliotecas Universitárias da Universidade Estadual do Norte do Paraná (SBU-UENP)

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

M3865b Martins, Livian Soares.  
Biocontrole de fitopatógenos: uma perspectiva integrada de produção científica e estudos experimentais / Livian Soares Martins. – 2026.  
101 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Mayra Costa da Cruz Gallo de Carvalho.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Agronomia, 2026.  
Inclui bibliografia.

1. Controle biológico - Dissertação. 2. Talaromyces - Dissertação. 3. Sclerotinia sclerotiorum - Dissertação. 4. Macrophomina phaseolina - Dissertação. 5. Micoparasitismo – Dissertação. 6. Metabólitos secundários - Dissertação. 7. Cientometria - Dissertação. I. Carvalho, Mayra Costa da Cruz Gallo de. II. Universidade Estadual do Norte do Paraná. Campus Luiz Meneghel. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDD: 632 (22.ed)

Bibliotecário Elísio Custódio Brentan Junior (CRB-9/1955)

LIVIAN SOARES MARTINS

**BIOCONTROLE DE FITOPATÓGENOS: UMA PERSPECTIVA INTEGRADA DE  
PRODUÇÃO CIENTÍFICA E ESTUDOS EXPERIMENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPAGRO) da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel.

Aprovada em: 27/02/2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Mayra Costa da Cruz Gallo de Carvalho

Universidade Estadual do Norte do Paraná

Luis Eduardo Azevedo Marques Lescano

Universidade Estadual do Norte do Paraná

Rafaella Cardoso Sichieri

Universidade Estadual de Londrina

Guilherme Fonseca Reis

Faculdade São Isidro de Pesquisa e Ensino



Prof. Dr. Mayra Costa da Cruz Gallo de Carvalho

Orientador

Universidade Estadual do Norte do Paraná,

*Campus* Luiz Mengehel

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, que me sustentou nos momentos de desafio; aos meus pais, Carla Fernanda Soares e Marcelo Martins, pelo amor e apoio incondicional; e ao meu marido, Fernando Henrique Queiroz da Silva, grande incentivador do meu ingresso no mestrado, oferecendo confiança, carinho e apoio desde o início.

À minha orientadora, Prof. Dr. Mayra Costa da Cruz Gallo de Carvalho, expresse minha profunda gratidão pelo acolhimento e pela confiança depositada em meu trabalho em um momento decisivo da minha trajetória acadêmica. Sua orientação, marcada por dedicação, sabedoria e generosidade, foi fundamental para a condução e conclusão desta pesquisa.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Luis Eduardo Azevedo Lescano Marques, agradeço por seu apoio constante, orientação técnica e incentivo acadêmico, sempre disponível para contribuir com meu desenvolvimento científico.

Aos colegas do Laboratório de Genética e Biologia Molecular, meu sincero agradecimento pela amizade, companheirismo e momentos de aprendizado compartilhados, que tornaram cada dia de pesquisa mais leve.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a realização deste mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPAGRO) da Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP) pelo suporte institucional, infraestrutura e oportunidades acadêmicas ao longo desta trajetória.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa, deixo minha profunda gratidão.

“Os desafios se tornam oportunidades quando a  
determinação encontra o incentivo certo.”

MARTINS, L. S. **BIOCONTROLE DE FITOPATÓGENOS: UMA PERSPECTIVA INTEGRADA DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA E ESTUDOS EXPERIMENTAIS**. 2026. Dissertação de Mestrado em Agronomia (PPAGRO) - Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2026.

## RESUMO

O controle biológico tem sido amplamente estudado como estratégia sustentável para o manejo de doenças de plantas causadas por fungos fitopatogênicos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de *Talaromyces stollii* como agente de biocontrole dos fungos fitopatogênicos de solo *Sclerotinia sclerotiorum* e *Macrophomina phaseolina* e analisar a evolução da produção científica sobre a biologia molecular do controle biológico de doenças de plantas por meio de estudo cienciométrico. Para os ensaios laboratoriais, *T. stollii* cepa BCA1.1 foi cultivada em cultura dupla de BDA com *S. sclerotiorum* e *M. phaseolina*. Foi avaliada a ação de compostos voláteis e de metabólitos presentes no sobrenadante obtido do cultivo do fungo antagonista sobre o crescimento dos fitopatógenos. Para a análise cienciométrica das publicações sobre mecanismos moleculares de antagonismo entre agentes de biocontrole e fitopatógenos, foram coletados dados das bases *Web of Science e Scopus* entre 1990 e 2024, analisados os indicadores de crescimento da produção científica, principais áreas temáticas, autores, instituições, redes de colaboração e tendências de pesquisa. Os resultados experimentais mostraram que *T. stollii* inibiu ambos os fitopatógenos apenas em confronto direto na cultura dupla. A análise macroscópica da placa revelou que a invasão de *S. sclerotiorum* ocorreu inicialmente por baixo e depois por cima do micélio, enquanto em *M. phaseolina* o antagonista se estabeleceu sobre o micélio, por esporulação. Observações por microscopia óptica de luz, utilizando o método da fita adesiva, permitiram visualizar o enrolamento hifal típico de micoparasitismo e a esporulação do antagonista sobre o micélio. Compostos voláteis e metabólitos não voláteis de *T. stollii* não inibiram o crescimento fúngico. Os resultados sugerem que a inibição depende do contato direto, indicando que *T. stollii* pode ter potencial no manejo integrado e na redução de defensivos químicos. A análise cienciométrica mostrou que os estudos sobre mecanismos moleculares de biocontrole começaram em 1990 e cresceram expressivamente a partir de 2007, com taxa média anual de 9,99%. Houve mudança do estudo de agentes clássicos, como *Trichoderma* e *Bacillus subtilis*, para abordagens modernas envolvendo genômica, transcriptômica, metabolômica, produção de enzimas, metabólitos secundários e interações ecológicas complexas. O biocontrole evoluiu de práticas tradicionais para ciência orientada por “omics”, com destaque para prospecção genômica e formulação racional de agentes biológicos. China, Brasil e Índia se destacam, com redes internacionais de cooperação e maior inserção do sul global. As perspectivas futuras incluem agentes multifuncionais, engenharia genética, otimização de metabólitos antifúngicos e integração com manejo sustentável. A integração entre resultados laboratoriais e análise cienciométrica reforça o potencial de *T. stollii* e indica que avanços em biotecnologia e biologia molecular podem ampliar sua aplicação prática no controle de doenças agrícolas.

**Palavras-chave:** micoparasitismo; controle biológico; ciencimetria; fungos antagonistas; sustentabilidade agrícola.

MARTINS, L. S. **BIOCONTROL OF PHYTOPATHOGENS: AN INTEGRATED PERSPECTIVE OF SCIENTIFIC PRODUCTION AND EXPERIMENTAL STUDIES.** 2026. Master's Dissertation in Agronomy (PPAGRO) - State University of Northern Paraná, Luiz Meneghel *Campus*, Bandeirantes, 2026.

## ABSTRACT

The biological control has been widely studied as a sustainable strategy for the management of plant diseases caused by phytopathogenic fungi. This work aimed to evaluate the potential of *Talaromyces stollii* as a biocontrol agent of the soil phytopathogenic fungi *Sclerotinia sclerotiorum* and *Macrophomina phaseolina* and to analyze the evolution of scientific production on the molecular biology of biological control of plant diseases through a scientometric study. For the laboratory assays, *T. stollii* strain BCA1.1 was cultivated in dual culture on PDA with *S. sclerotiorum* and *M. phaseolina*. The action of volatile compounds and metabolites present in the supernatant obtained from the antagonist fungus culture on the growth of the phytopathogens was evaluated. For the scientometric analysis of publications on molecular mechanisms of antagonism between biocontrol agents and phytopathogens, data were collected from the Web of Science and Scopus databases between 1990 and 2024, analyzing indicators of scientific production growth, main thematic areas, authors, institutions, collaboration networks, and research trends. The experimental results showed that *T. stollii* inhibited both phytopathogens only in direct confrontation in dual culture. Macroscopic analysis of the plate revealed that the invasion of *S. sclerotiorum* initially occurred beneath and then above the mycelium, while in *M. phaseolina* the antagonist established itself over the mycelium through sporulation. Observations by optical light microscopy, using the adhesive tape method, allowed visualization of the typical hyphal coiling of mycoparasitism and the sporulation of the antagonist over the mycelium. Volatile compounds and non-volatile metabolites of *T. stollii* did not inhibit fungal growth. The results suggest that inhibition depends on direct contact, indicating that *T. stollii* may have potential in integrated management and in reducing chemical pesticides. The scientometric analysis showed that studies on molecular mechanisms of biocontrol began in 1990 and grew significantly from 2007 onwards, with an average annual rate of 9.99%. There was a shift from the study of classical agents, such as *Trichoderma* and *Bacillus subtilis*, to modern approaches involving genomics, transcriptomics, metabolomics, enzyme production, secondary metabolites, and complex ecological interactions. Biological control has evolved from traditional practices to a science guided by “omics,” highlighting genomic prospecting and rational formulation of biological agents. China, Brazil, and India stand out, with international collaboration networks and greater participation of the global south. Future perspectives include multifunctional agents, genetic engineering, optimization of antifungal metabolites, and integration with sustainable management. The integration between laboratory results and scientometric analysis reinforces the potential of *T. stollii* and indicates that advances in biotechnology and molecular biology may expand its practical application in the control of agricultural diseases.

**Keywords:** mycoparasitism; biological control; scientometrics; antagonistic fungi; sustainable agriculture.

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>   | <b>12</b> |
| 1.1.     | Controle Biológico.....  | 12        |
| 1.2.     | Mecanismos de Controle Biológico.....  | 17        |
| 1.3.     | Fungos como agentes de biocontrole.....  | 19        |
| 1.4.     | <i>Macrophomina phaseolina</i> .....   | 23        |
| 1.5.     | <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> .....  | 26        |
| 1.6.     | <i>Talaromyces</i> .....   | 28        |
| 1.7.     | <i>Talaromyces stollii</i> .....   | 30        |
| 1.7.     | Cienciometria.....   | 32        |
|          | REFERÊNCIAS.....   | 35        |
| <b>2</b> | <b>ARTIGO 1: GLOBAL TRENDS IN MOLECULAR MECHANISMS OF BIOLOGICAL CONTROL AGAINST PHYTOPATHOGENS: A SCIENTOMETRIC ANALYSIS 45</b>   |           |
| 2.1      | INTRODUCTION .....   | 47        |
| 2.2      | MATERIALS AND METHODS.....   | 48        |
| 2.3      | RESULTS .....  | 49        |
| 2.4      | DISCUSSION.....  | 61        |
| 2.5      | CONCLUSION.....  | 65        |
|          | REFERENCES .....   | 67        |
| <b>3</b> | <b>ARTIGO 2 - <i>TALAROMYCES STOLLII</i> COMO AGENTE DE BIOCONTROLE DE <i>MACROPHOMINA PHASEOLINA</i> E <i>SCLEROTINIA SCLEROTIORUM</i> EM CONDIÇÕES <i>IN VITRO</i> .....</b> | <b>72</b> |
| 3.1.     | INTRODUÇÃO .....   | 75        |
| 3.2.     | MATERIAL E MÉTODOS .....   | 77        |
| 3.3.     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 82        |
| 3.4      | CONCLUSÃO .....  | 97        |
|          | <b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>   | <b>98</b> |
|          | REFERÊNCIAS.....   | 99        |

## LISTA DE FIGURAS

### REVISÃO

**Figura 1.** Características morfológicas de *M. phaseolina*. a) Colônia na placa de cultura mostrando micélio vegetativo. b) Hifa castanha com conídio em formato de canoa. c) Globo negro correspondente a microscleródio maduro.....23

**Figura 2.** Caracterização morfológica de *S. Sclerotiorum*. a) Vista frontal da placa de cultura. b) Vista lateral da placa de cultura. c) Visão microscópica de hifas em germinação. d) Aglomerados de ascósporos ao microscópio.....27

**Figura 3.** *T. stollii* cepa B.C.A 1.1. a) Colônia na placa de cultura mostrando micélio vegetativo. b) Hifas, conidióforos biverticilados e conídios elipsoides visíveis na extremidade.....30

### ARTIGO 1

**Figure 1.** PRISMA 2020 flow diagram showing the criteria used for the identification, screening, and selection of databases for the bibliometric analysis of the molecular biology of antagonistic interactions between phytopathogens and their biocontrol agents .....50

**Figure 2.** Annual scientific production. Evolution in the annual number of articles published in the field of molecular biology of antagonistic relationships between phytopathogens and their biocontrol agents .....51

**Figure 3.** Global scientific production and worldwide collaboration. (a) Distribution of scientific production as a color gradient corresponding to the number of publications per country from 1990 to 2024. (b) Country of affiliation of the corresponding author in publications on the topic .....52

**Figure 4.** Core journals on the molecular biology of biological control of phytopathogens during 1990-2024.....54

**Figure 5.** Top ten authors in the field. Relationship between the ten main authors and their ten primary institutional affiliations .....56

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 6.</b> Co-authorship. Network of collaboration among authors, where node size indicates connection strength and distance reflects the level of collaboration ..... | 57 |
| <b>Figure 7.</b> Keywords. (a) Forty most frequent keywords in the dataset. (b) Keyword co-occurrence network. (c) Temporal visualization of the co-occurrence network ..... | 58 |

## ARTIGO 2

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Esquema representativo do ensaio de cultura dupla entre <i>T. stollii</i> e os fitopatógenos <i>M. phaseolina</i> e <i>S. sclerotiorum</i> .....   | 78 |
| <b>Figura 2.</b> Esquema representativo do procedimento utilizado para a análise de micoparasitismo.....  | 79 |
| <b>Figura 3.</b> Esquema metodológico da avaliação do potencial de <i>T. stollii</i> em produzir compostos voláteis fungicidas contra <i>S. sclerotiorum</i> e <i>M. phaseolina</i> .....   | 80 |
| <b>Figura 4.</b> Fluxograma metodológico do ensaio de avaliação da produção de metabólitos fungicidas por <i>Talaromyces stollii</i> contra <i>M. phaseolina</i> e <i>S. sclerotiorum</i> .....   | 81 |
| <b>Figura 5.</b> Inibição do Crescimento Micelial (ICM, %) dos fitopatógenos <i>S. sclerotiorum</i> e <i>M. phaseolina</i> , por <i>T. stollii</i> na primeira e segunda avaliação após a inoculação (DAI).....   | 83 |
| <b>Figura 6.</b> Diâmetro do micélio do fungo fitopatogênico <i>M. phaseolina</i> cultivado em cultura dupla com o fungo antagonista <i>T. stollii</i> durante 20 dias.....   | 84 |
| <b>Figura 7.</b> Imagens da cultura dupla de <i>Macrophomina phaseolina</i> com <i>Talaromyces stollii</i> no obtidas no 5° dia (A), 8° dias (B), 10° dia (C), 12° dia (D), 16°dia (E) e 20° dia (F) após a inoculação de ambos os fungos na placa de Petri. A imagem (G) e (H) são imagens do crescimento de <i>M. phaseolina</i> e <i>T. stollii</i> , respectivamente, na condição controle..... | 85 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 8.</b> Interação entre <i>M. phaseolina</i> e <i>T. stollii</i> . (a) Hifas dispostas lado a lado. (b) Micoparasitismo de <i>T. stollii</i> sobre <i>M. phaseolina</i> , com hifas coradas em azul.....  | 86 |
| <b>Figura 9.</b> Diâmetro do micélio do fungo fitopatogênico <i>S. sclerotiorum</i> crescido em cultura dupla com o fungo antagonista <i>T. stollii</i> durante 20 dias.....   | 88 |
| <b>Figura 10.</b> Imagens da cultura dupla de <i>S. sclerotiorum</i> com <i>T. stollii</i> no obtidas no 7° dia (A), 10° dias (B), 13° dia (C), 16° dia (D), 18° dia (E) e 20° dia (F) após a inoculação de ambos os fungos na placa de Petri. As imagens (G) e (H) são imagens do crescimento de <i>S. sclerotiorum</i> e <i>T. stollii</i> , respectivamente, na condição de controle .....  | 89 |
| <b>Figura 11.</b> Imagens da cultura dupla de <i>S. sclerotiorum</i> com <i>T. stollii</i> obtidas no 20° dia após a inoculação de ambos os fungos em placa de Petri.....  | 90 |
| <b>Figura 12.</b> Micoparasitismo das hifas de <i>S. sclerotiorum</i> por <i>T. stollii</i> . A) As setas mostram as hifas do <i>T. stollii</i> formando uma espiral em volta das hifas do fungo fitopatogênico coradas em azul; B) A seta indica a hifa do <i>T. stollii</i> aderida à hifa da <i>S. sclerotiorum</i> .....   | 92 |
| <b>Figura 13.</b> Imagens das placas de controle (A, B e C) e cultura dupla (D e E) do experimento. Análise de possível produção de compostos voláteis com ação fungicida por <i>Talaromyces stollii</i> . A: controle do <i>T. stollii</i> , B: controle da <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , C: placa controle da <i>Macrophomina phaseolina</i> ; D: cultura dupla de <i>T. stollii</i> (lado esquerdo) com <i>S. sclerotiorum</i> (lado direito); e E: cultura dupla de <i>T. stollii</i> (lado esquerdo) com <i>M. phaseolina</i> (lado direito).....                                 | 95 |
| <b>Figura 14.</b> Placas de confronto direto mostrando que não houve inibição dos fitopatógenos por metabólitos presentes no sobrenadante livre de células. Legenda dos tratamentos: <b>TXM</b> – <i>T. stollii</i> puro em confronto com <i>M. phaseolina</i> ; <b>T+M X M</b> - <i>T. stollii</i> em co-cultivo com <i>M. phaseolina</i> em confronto com <i>M. phaseolina</i> ; <b>TXS</b> – <i>T. stollii</i> puro em confronto com <i>S. sclerotiorum</i> ; <b>T+S X S</b> – <i>T. stollii</i> em co-cultivo com <i>S. sclerotiorum</i> em confronto com <i>S. sclerotiorum</i> ..... | 96 |

## **LISTA DE TABELAS**

### **REVISÃO DE LITERATURA**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Agentes biológicos e bioquímicos utilizados em controle biológico e promoção do crescimento vegetal ..... | 16 |
|--|----|

### **ARTIGO 1**

|   |    |
|---|----|
| <b>Table 1.</b> Top 10 articles with the highest number of citations..... | 60 |
|---|----|

## 1 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1 Controle Biológico

O controle biológico é uma estratégia de manejo de pragas e doenças baseada no uso de organismos vivos para reduzir populações de agentes nocivos, sendo uma prática observada empiricamente desde a Antiguidade. Registros históricos indicam que interações naturais entre predadores e pragas já eram reconhecidas há milhares de anos, como no Egito Antigo, onde animais eram utilizados para proteger estoques agrícolas (Shao *et al.*, 2026).

Entre os séculos XVII e XVIII, durante a Revolução Agrícola europeia, essas observações passaram a ser sistematizadas, permitindo o registro e a compreensão das interações ecológicas benéficas entre organismos. Esse período marcou o início da transição do conhecimento empírico para abordagens mais científicas no manejo de pragas agrícolas (Fontes; Valadares-Inglis, 2020).

No século XIX, o controle biológico passou a ser aplicado de forma deliberada, com destaque para a introdução de predadores naturais como estratégia de manejo. Um exemplo clássico foi a introdução de joaninhas na Austrália para o controle de pulgões, demonstrando a viabilidade do uso intencional de inimigos naturais na proteção de culturas agrícolas (Cojanu *et al.*, 2026).

Entre as décadas de 1920 e 1930, o controle biológico consolidou-se como uma área científica, evoluindo nas décadas seguintes com o desenvolvimento de técnicas de criação em massa, seleção de organismos e estratégias de aplicação visando maior eficiência no controle de pragas agrícolas (Fontes; Valadares-Inglis, 2020)

No Brasil, a comercialização de produtos biológicos teve início em 1991, com o registro do primeiro inseticida à base de *Bacillus thuringiensis*, o Bac-Control® WP, da empresa Vectorcontrol (Vectorcontrol, 1991). Em 1997, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) publicou a primeira regulamentação específica para

produtos microbiológicos, que na época foram classificados como agrotóxicos (EMBRAPA, 2004).

Atualmente, o país é referência mundial na produção e utilização de bioinsumos, contando com mais de 600 produtos registrados no Ministério da Agricultura e Pecuária (BRASIL, 2026) abrangendo bioinseticidas, biofungicidas, bionematicidas e bioinoculantes, amplamente utilizados em culturas como soja, milho, cana-de-açúcar, café e hortaliças (Vermelho *et al.*, 2025).

O mercado global de bioinsumos agrícolas apresenta crescimento acelerado, com taxa anual média em torno de 13%, impulsionado pela demanda crescente por práticas agrícolas mais sustentáveis e pela redução do uso de defensivos químicos convencionais (FAO, 2022; OECD, 2023). Esse avanço é observado em diferentes regiões do mundo, com destaque para América Latina, Europa, América do Norte e Ásia-Pacífico.

No Brasil, o setor de bioinsumos registrou crescimento significativo na safra 2024/2025, com avanço de 13% e alcançando 156 milhões de hectares tratados. A adoção desses insumos aumentou de 23% para 26% da área plantada nacional, consolidando o país como referência global no uso de bioinsumos e evidenciando seu elevado potencial econômico e ambiental. O avanço médio anual do setor manteve-se elevado, em torno de 22%, demonstrando a expansão contínua do mercado brasileiro (Forbes Brasil, 2025).

Na Europa, projeta-se expansão do mercado de bioinsumos de aproximadamente US\$ 1,71 bilhão em 2025 para US\$ 2,53 bilhões em 2030, refletindo políticas rigorosas de sustentabilidade e incentivo à agricultura de base biológica. Nos Estados Unidos, a expectativa é que o setor atinja cerca de US\$ 1,46 bilhão até 2032, acompanhando a transição gradual para sistemas agrícolas mais sustentáveis (OECD, 2023).

Na região da Ásia-Pacífico, especialmente em países como Índia, China e Japão, observa-se aumento expressivo na adoção de inoculantes microbianos e outros bioinsumos, principalmente em culturas como arroz, trigo e hortaliças. Esse crescimento acompanha as tendências globais de intensificação sustentável da produção agrícola (Farmonaut, 2025; Mordor Intelligence, 2025).

Em dezembro de 2024, foi sancionada a Lei nº 15.070, que estabeleceu o marco regulatório dos bioinsumos no Brasil, transferindo ao Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) a responsabilidade pelo registro, produção e fiscalização desses produtos. Contudo, a plena efetividade da referida lei depende da publicação de seu respectivo decreto regulamentador. A legislação também regulamentou a produção “on farm” e fortaleceu o Programa Nacional de Bioinsumos, criando um ambiente institucional mais favorável ao desenvolvimento e à ampliação do uso de agentes biológicos no manejo agrícola (BRASIL, 2024).

Esse avanço regulatório tende a contribuir para a consolidação do controle biológico como estratégia viável e segura na agricultura brasileira, ao favorecer a pesquisa, o desenvolvimento e a adoção de microrganismos antagonistas, especialmente fungos, no controle de fitopatógenos (BRASIL, 2024).

Dados institucionais do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), apresentados pela Embrapa, indicam que aproximadamente 40 milhões de hectares no Brasil são cultivados com bactérias promotoras de crescimento de plantas, enquanto cerca de 10 milhões de hectares utilizam outros bioinsumos agrícolas (EMBRAPA, 2023). Esses números refletem a ampla adoção de produtos biológicos no manejo das lavouras brasileiras, com impactos positivos tanto na produtividade quanto na redução da dependência de insumos químicos.

A legislação brasileira classifica os produtos biológicos agrícolas de acordo com sua função e tipo de organismo, abrangendo categorias como bioinseticidas, biofungicidas, bionematicidas, biofertilizantes e bioestimulantes. A Lei nº 15.070/2024, que estabelece o marco regulatório dos bioinsumos no Brasil, define bioinsumos como produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana destinados a influenciar o crescimento, o desenvolvimento ou a resposta biológica de plantas, animais, microrganismos e solo, regulamentando sua produção, registro, comercialização e uso (Brasil, 2024).

Essas definições são detalhadas em instrumentos normativos complementares, como as Instruções Normativas nº 13/2021 e nº 70/2022 do Ministério da Agricultura e Pecuária. Isso permite o registro de produtos formulados tanto com espécie única quanto com a combinação de

microrganismos de diferentes grupos (consórcio), desde que comprovada a compatibilidade e a eficácia conjunta (BRASIL, MAPA, 2021; 2022).

De forma geral, os organismos utilizados no controle biológico, como fungos, bactérias e nematoides, por diferentes mecanismos para reduzir a ação de patógenos, seja pela competição por recursos, pela produção de substâncias antimicrobianas ou pelo estímulo às defesas naturais das plantas (Silva; Mello, 2007).

Entre os agentes biológicos, destacam-se os fungos antagonistas, como *Trichoderma* spp., *Beauveria* spp. e *Metarhizium* spp., que competem por nutrientes e espaço e produzem enzimas líticas e metabólitos antifúngicos. Também são importantes as bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR), como *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp. e *Paenibacillus* spp., que favorecem a germinação de sementes, aumentam a disponibilidade de nutrientes e induzem respostas de defesa sistêmica (ISR), protegendo as plantas contra fitopatógenos. Alguns bioinsumos ainda incluem vírus e nematoides entomopatogênicos, voltados ao controle de pragas agrícolas (Nassary, 2025).

Nesse contexto, o uso combinado de agentes biológicos tem se intensificado como estratégia para aumentar a eficácia no controle de fitopatógenos. Por exemplo, *Bacillus subtilis* atua principalmente por meio da produção de antibióticos e lipopeptídeos, enquanto espécies do gênero *Trichoderma* spp. apresentam múltiplos mecanismos de antagonismo, incluindo micoparasitismo, competição por espaço e nutrientes, produção de metabólitos antifúngicos (gliotoxina, gliovirina e trichodermina) além da indução de resistência nas plantas (Harman *et al.*, 2004; Vinale *et al.*, 2008).

A adoção dessas práticas contribui para a redução da incidência de pragas e doenças, promove a saúde do solo, aumenta a produtividade e torna os sistemas de cultivo mais eficientes e menos dependentes de produtos químicos (Silva *et al.*, 2025).

Além disso, o controle biológico apresenta vantagens relevantes em relação aos defensivos sintéticos, uma vez que produtos à base de microrganismos são altamente específicos ao alvo, preservam organismos benéficos, reduzem o risco de seleção de populações resistentes,

apresentam menor impacto ambiental e se degradam naturalmente no ambiente, minimizando danos aos ecossistemas agrícolas (Bettiol; Morandi, 2009).

**Tabela 1.** Agentes biológicos e bioquímicos utilizados em controle biológico e promoção do crescimento vegetal.

| <b>Tipo</b>                 | <b>Organismo / Substância</b>  | <b>Alvo / Função</b>                                  |
|-----------------------------|--------------------------------|---|
| <b>Fungos antagonistas</b>  | <i>Trichoderma</i> spp.        | Fungos fitopatógenos – Controle                       |
|                             | <i>Beauveria</i> spp.          | Insetos-praga – Controle                              |
|                             | <i>Metarhizium</i> spp.        | Insetos-praga – Controle                              |
| <b>Bactérias PGPR</b>       | <i>Bacillus</i> spp.           | Fitopatógenos – Crescimento vegetal                   |
|                             | <i>Pseudomonas</i> spp.        | Fitopatógenos – ISR                                   |
|                             | <i>Paenibacillus</i> spp.      | Solo / Fitopatógenos – Crescimento / Resistência      |
|                             | <i>Bradyrhizobium</i> spp.     | Soja – Fixação de N                                   |
|                             | <i>Azospirillum</i> spp.       | Gramíneas, soja, milho – Fitohormônios / Fixação de N |
| <b>Biofertilizantes</b>     | <i>Rhizobium</i> spp.          | Leguminosas – Fixação de N                            |
|                             | Micorrizas                     | Raízes – Nutrientes / Resistência                     |
| <b>Produtos bioquímicos</b> | Metabólitos secundários        | Patógenos – Inibição                                  |
|                             | Fitohormônios                  | Plantas – Crescimento / Estresse                      |
|                             | Elicitores e extratos vegetais | Plantas – Defesa / Antifúngico / Repelente            |
|                             |                                |   |

**Fonte:** Elevagro, 2022; Croplife BrasiL, 2022; Agrivalle, 2022; FRAC.

O controle biológico é mais eficiente quando integrado a outras práticas sustentáveis de manejo, como rotação de culturas, uso de variedades resistentes e monitoramento constante das lavouras, formando um manejo integrado que combina diversas estratégias para aumentar a proteção das

plantas (Garcia *et al.*, 2015). Por outro lado, o controle biológico pode ser empregado de forma integrada ao manejo químico (ONS *et al.*, 2020).

Apesar do crescimento do uso de bioinsumos, é improvável que eles substituam totalmente os produtos químicos no curto prazo. O papel dos agentes biológicos tende a ser complementar, promovendo a redução do uso de defensivos químicos, estimulando a produtividade de forma sustentável e contribuindo para a saúde do solo e das culturas (Embrapa, 2023). Dessa forma, os bioinsumos funcionam como uma ferramenta estratégica dentro do manejo integrado de pragas e doenças, combinando eficiência, sustentabilidade e segurança alimentar. Nesses casos, é fundamental que se desenvolva uma estratégia pautada na compatibilidade dos produtos e melhor eficiência de uso (Meyer *et al.*, 2024).

## **1.2 Mecanismos de Controle Biológico**

Os mecanismos de controle biológico são representados por um conjunto de estratégias que, juntas, são responsáveis por reduzir a população do patógeno/parasita diminuindo seus efeitos sobre o alvo. Os principais mecanismos de controle biológico incluem: antibiose, competição, predação, hipovirulência e indução de defesa do hospedeiro, com uma forma específica de interferir no crescimento ou na sobrevivência do patógeno/parasita (Bettiol, 1991).

Nos últimos anos, novas abordagens têm sido incorporadas, como o uso de RNA de interferência (RNAi), que atua diretamente sobre genes essenciais de microrganismos patogênicos, oferecendo uma estratégia de controle altamente específica e sustentável (Zotti *et al.*, 2018; Christiaens *et al.*, 2022).

A antibiose ocorre quando o organismo antagonista produz substâncias químicas que inibem o crescimento, a germinação ou a reprodução do patógeno, funcionando como uma defesa química natural altamente eficaz. Esse mecanismo tem sido observado em determinadas cepas de *Pseudomonas fluorescens*, que produzem compostos capazes de inibir o crescimento de diversos patógenos de solo, como *Fusarium* e *Rhizoctonia*. Vale ressaltar que nem todas as cepas possuem o mesmo perfil de produção de metabólitos secundários, sendo o efeito antagonista dependente da cepa, do ambiente e do hospedeiro (Nguyen *et al.*, 2025; Riera *et al.*, 2023).

A competição acontece quando dois ou mais microrganismos disputam os mesmos recursos, como nutrientes, espaço ou oxigênio, limitando a disponibilidade desses elementos para o patógeno e favorecendo o desenvolvimento do antagonista. Cepas de *Bacillus subtilis* exemplificam esse mecanismo, competindo com *Pseudomonas syringae* e protegendo o tomate ao reduzir a disponibilidade de nutrientes para o patógeno, que é responsável pela mancha bacteriana do tomate (Nguyen *et al.*, 2025).

A predação ocorre quando um organismo se alimenta do patógeno ou de outros recursos, contribuindo para a diminuição da população do agente causador da doença. Protozoários e nematoides predadores consomem esporos e hifas de fungos fitopatogênicos no solo, diminuindo sua densidade e limitando infecções radiculares, enquanto algumas espécies de *Paenibacillus polymyxa* e de *Trichoderma* apresentam comportamento predatório sobre outros microrganismos, envolvendo contato direto e lise celular (Contreras-Soto *et al.*, 2025).

A hipovirulência se refere à introdução de linhagens menos agressivas do patógeno, que podem transmitir essa característica às linhagens mais virulentas, reduzindo sua capacidade de causar infecções. Essa estratégia tem sido utilizada comercialmente no controle do cancro do castanheiro (*Cryphonectria parasitica*), especialmente na Europa, onde cepas infectadas por vírus hipovirulentos são aplicadas para reduzir a virulência do patógeno (Suzuki *et al.*, 2021).

A indução de resistência ocorre quando organismos não patogênicos ou linhagens atenuadas estimulam os mecanismos naturais de defesa da planta, fortalecendo sua resistência a futuras infecções (Yang *et al.*, 2020). Além disso, promotores de crescimento de plantas (PGPR), como *Bacillus* spp., *Pseudomonas* e *Paenibacillus*, podem induzir resistência sistêmica e favorecer o crescimento, combinando controle biológico e promoção de desenvolvimento vegetal em um único agente (Hasan *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022).

O parasitismo é um mecanismo onde um organismo antagonista utiliza o patógeno como fonte de nutrientes, enfraquecendo seu crescimento, reprodução e sobrevivência e no ambiente. Esse mecanismo ocorre principalmente entre fungos, quando espécies antagonistas atacam hifas, esporos e estruturas de resistência do patógeno, processo denominado de micoparasitismo, contribuindo para a redução da incidência de doenças em diversas culturas (Broetto, 2013).

Um mesmo agente de controle biológico pode agir de várias formas ao mesmo tempo, como inibir patógenos, competir por recursos, estimular a defesa e crescimento da planta. Esse efeito já foi evidenciado em espécies como *Bacillus amyloliquefaciens*, que podem atuar como promotoras de crescimento, fortalecendo a planta e aumentando sua resistência a doenças (Lian *et al.*, 2023). Além disso, muitos produtos comerciais combinam diferentes microrganismos ou cepas para aumentar a eficácia, como exemplo tem-se produtos à base de *Bacillus subtilis* (como o *Companion*®, comercializado pela Hekagro Biotechnology) e *Trichoderma harzianum* (como o *Trichodermil*® comercializado pela Koppert) que unem controle de patógenos e estímulo ao crescimento das plantas (Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025).

### 1.3 Fungos como agentes de biocontrole

Os fungos são organismos presentes em praticamente todos os ambientes e desempenham funções essenciais para o equilíbrio dos ecossistemas, como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. Além de seu papel natural, alguns fungos têm grande importância na agricultura, podendo atuar como promotores do crescimento das plantas ou agentes de biocontrole, o que os torna aliados estratégicos na proteção e no desenvolvimento das culturas (Wang *et al.*, 2025).

No contexto do controle biológico, os fungos se destacam como agentes versáteis e eficazes, capazes de atuar contra uma ampla gama de patógenos. Espécies do gênero *Talaromyces*, como *T. stollii*, têm mostrado potencial no manejo de fitopatógenos de solo, como *Macrophomina phaseolina* e *Sclerotinia sclerotiorum*, contribuindo para reduzir danos em culturas economicamente relevantes, como soja, feijão e milho (Pereira *et al.*, 2026).

A eficácia desses fungos está associada à variedade de mecanismos de ação que possuem, espécies de *Talaromyces* podem competir com patógenos por espaço e nutrientes, realizar micoparasitismo aderindo às hifas do fitopatógeno e produzindo enzimas hidrolíticas, como quitinases e glucanases, além de liberar metabólitos secundários com efeito inibidor que estimulam respostas de defesa nas plantas hospedeiras, promovendo resistência sistêmica (Tang *et al.*, 2025; Karlsson, 2017).

Espécies de *Trichoderma* exemplificam esses mecanismos de forma consolidada, combinando produção de antibióticos, micoparasitismo e indução de resistência nas plantas, reforçando a eficácia do controle biológico em contextos agrícolas (Harman, 2006). Outros fungos, como *Gliocladium* e *Clonostachys*, também apresentam mecanismos semelhantes, incluindo competição e produção de enzimas, podendo atuar em conjunto com *Trichoderma* e fortalecendo a proteção das plantas (Leclère *et al.*, 2020).

Além desses, fungos entomopatogênicos como *Beauveria bassiana* (Zimmermann, 2007) e *Metarhizium anisopliae* (Lovett *et al.*, 2020) se destacam entre os principais agentes de biocontrole, atuando na proteção das plantas indiretamente ao controlar insetos-praga. Estes fungos infectam diretamente os insetos, reduzindo suas populações, e estudos mostram que também podem colonizar tecidos vegetais, promovendo resistência e estímulo ao crescimento das plantas (Vega *et al.*, 2009).

No entanto, a eficiência desses fungos depende de fatores ambientais, como temperatura, umidade, composição do solo e a presença de outros microrganismos. Para que o controle biológico seja realmente eficaz, é necessário não apenas escolher o agente correto, mas também planejar sua aplicação de forma adequada e adaptar a estratégia às condições locais (Silva; Mello, 2007).

Mesmo que os fungos ofereçam grandes benefícios, seu uso como agentes de biocontrole ainda enfrenta desafios práticos, já que sua eficácia pode variar dependendo da região e da cultura. Além disso a produção de formulações comerciais estáveis é um desafio técnico que exige cuidado no preparo e no armazenamento (Mascarin *et al.*, 2019). A superação dessas limitações depende do aprimoramento dos processos produtivos e das tecnologias envolvidas, pois a forma como os microrganismos são cultivados, formulados e aplicados influencia diretamente o desempenho no campo (GFI Brasil, 2022).

Técnicas como a fermentação líquida permitem maior padronização e controle de variáveis como temperatura, oxigenação e pH, favorecendo produtos estáveis e eficientes (GFI Brasil, 2022). A fermentação em estado sólido (FES), por sua vez, utiliza substratos sólidos como farelos

ou resíduos agrícolas para o crescimento de fungos ou bactérias, gerando bioinsumos e agentes de biocontrole de forma eficiente e sustentável (Rocha *et al.*, 2024).

Entretanto, a aplicação em campo ainda requer ajustes, já que fatores como o tamanho das partículas e a viscosidade das formulações podem provocar entupimentos em bicos de pulverização e reduzir a eficiência do tratamento (Beltrán-Martí *et al.*, 2024).

Além disso, condições ambientais adversas, como radiação solar intensa e altas temperaturas, podem afetar a sobrevivência de estruturas fúngicas utilizadas no controle biológico, como conídios, blastósporos e fragmentos de hifas (Sutanto *et al.*, 2002). Por isso, o planejamento da aplicação do produto em horários adequados é importante para preservar a viabilidade dos microrganismos (Brito, 2014).

Por exemplo, conídios de *Beauveria bassiana* expostos diretamente à radiação solar intensa apresentam redução significativa na viabilidade e germinação, evidenciando a importância de aplicações em horários e condições que minimizem a exposição a UV e altas temperaturas, aumentando a persistência do fungo no ambiente (Kaiser *et al.*, 2019).

Assim, o avanço no uso de fungos como agentes de biocontrole depende da integração entre processos industriais bem estruturados, formulações compatíveis com as tecnologias agrícolas e estratégias de manejo que garantam a eficácia em condições de campo (Köhl *et al.*, 2019).

Muitos biofungicidas apresentam como principal mecanismo de ação o micoparasitismo. Neste mecanismo de controle biológico um fungo parasita o outro e estabelece uma interação antagonista que resulta na morte do hospedeiro e no uso de seus nutrientes pelo parasita. Fungos micoparasitas desenvolvem estratégias sofisticadas para identificar e colonizar seus alvos, se adaptando às condições ambientais para otimizar o sucesso do ataque (Mukherjee *et al.*, 2022).

O reconhecimento do hospedeiro é essencial no micoparasitismo e ocorre por sinais químicos do fungo-alvo, que orientam o parasita até ele. Após o contato, o micoparasita secreta enzimas hidrolíticas, como quitinases e glucanases, que degradam a parede celular e permitem a penetração e a obtenção de nutrientes necessários ao seu desenvolvimento (Karlsson, 2017).

Durante o processo de colonização, os fungos micoparasitas produzem metabólitos secundários que enfraquecem a defesa do hospedeiro e inibem sua capacidade de regeneração. Essa combinação entre ação enzimática e produção de compostos bioativos garante que o parasita consiga monopolizar os recursos do hospedeiro e assegura a vantagem competitiva em relação a outros microrganismos presentes no ambiente (Tang *et al.*, 2025).

A eficiência do micoparasitismo depende de vários fatores, como a compatibilidade entre parasita e hospedeiro, a disponibilidade de nutrientes e as condições ambientais. Estudos indicam que a decisão do fungo parasita de atacar ou não um hospedeiro é regulado por sinais químicos complexos, que podem indicar a presença de competidores ou condições desfavoráveis para a colonização (Stange *et al.*, 2024).

Esse mecanismo apresenta vantagens importantes para a agricultura sustentável, pois reduz a necessidade de defensivos químicos, diminui impactos ambientais e contribui para o equilíbrio ecológico do solo. A aplicação de fungos micoparasitas em culturas tem demonstrado resultados promissores no manejo de doenças fúngicas, aumenta a resistência das plantas e promove maior produtividade (Van Den Boogert, 1996).

Espécies de *Trichoderma* são amplamente utilizadas como agentes de biocontrole, sendo capazes de parasitar e suprimir diversos fitopatógenos, além de fortalecer respostas de defesa nas plantas em culturas como tomate, feijão e cereais (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2023). Estudos também demonstraram que alguns isolados de *Trichoderma harzianum* produzem enzimas hidrolíticas que degradam a parede celular de fungos patogênicos, resultando em redução significativa de infecção em ensaios *in vitro* (Qualhato *et al.*, 2013).

Além disso, gêneros como *Clonostachys*, incluindo *Clonostachys rosea*, mostraram capacidade de micoparasitar espécies de *Trichoderma* e outros fungos, o que tem implicações para o desenvolvimento de inoculantes mistos e estratégias de biocontrole eficientes em culturas como cacau (*Theobroma cacao*) (Krauss *et al.*, 2013).

O uso de estratégias integradas que combinam micoparasitismo com outros métodos biológicos, como a utilização de microrganismos promotores de crescimento vegetal, têm mostrado potencial para aumentar a eficiência do controle biológico. Assim reforçar o papel do

micoparasitismo como ferramenta adaptável e sustentável para a proteção de plantas contra patógenos, mostra sua relevância em contextos agrícolas e ecológicos (Tang *et al.*, 2025).

A complexidade no uso de fungos como agentes de controle biológico demonstra a importância de se compreender as interações naturais entre plantas e fungos. A coevolução entre as espécies determina como elas se adaptam, se defendem e se atacam mutuamente, influenciando diretamente a eficácia do manejo biológico (Barbieri; Carvalho, 2001).

#### 1.4 *Macrophomina phaseolina*

*Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid é um fungo fitopatogênico da família *Botryosphaeriaceae*, dentro da ordem *Botryosphaeriales*, e é amplamente reconhecido como agente causador da doença chamada podridão-do-carvão em diversas culturas agrícolas (Kaur *et al.*, 2012).

Seu micélio é composto por hifas septadas, inicialmente hialinas com paredes finas, que escurecem com a idade. Além do micélio vegetativo, o fungo forma microscleródios, massas compactas de hifas endurecidas, esféricas, ovais ou oblongas, que funcionam como estruturas de resistência e sobrevivência prolongada no solo. Embora raramente observados em condições naturais, também podem ser produzidos piquínios, corpos frutíferos assexuais maiores, escuros e globosos, com ostíolo, que contêm conídios, estruturas reprodutivas formadas sobre conidióforos ramificados e importantes para a disseminação do fungo (Marquez *et al.*, 2021) (Figura 1).



**Figura 1** – Características morfológicas de *M. phaseolina*. a) Colônia na placa de cultura mostrando micélio vegetativo. b) Hifa castanha com conídio em formato de canoa. c) Globo negro correspondente a microscleródio maduro. Fonte: Autoria própria.

Essa espécie possui ampla distribuição geográfica, ocorrendo principalmente em regiões tropicais e subtropicais, onde as condições de alta temperatura e baixa umidade favorecem seu desenvolvimento. Sua alta capacidade de sobrevivência é atribuída, entre outras características, à formação de microscleródios, que são estruturas escuras e densas que permitem a persistência no solo por longos períodos, mesmo na ausência de plantas hospedeiras (Marquez *et al.*, 2021).

Os sintomas da podridão do carvão aparecem principalmente nos tecidos epidérmicos das raízes durante a fase de maturação, sendo intensificado em plantas mais velhas, já que a gravidade da infecção está relacionada à idade e ao enfraquecimento dos tecidos, o que favorece o avanço do patógeno (Almeida *et al.*, 2003).

Após a emergência das plântulas, ocorre o aparecimento de manchas castanhas e escuras nos cotilédones e hipocótilos das folhas unifoliadas, com lesões marrom-avermelhadas e circulares que evoluem para tons mais escuros, e pode expandir-se até o caule (Gupta *et al.*, 2012).

O ciclo de vida desse patógeno se inicia geralmente no solo, onde os microscleródios permanecem viáveis durante meses ou até anos, até que raízes ou partes subterrâneas de plantas suscetíveis entrem em contato com esses micélios e ocorra a infecção. O fungo então invade os tecidos vegetais principalmente através de ferimentos naturais ou crescimentos de raiz em desenvolvimento (Khan, 2007).

Durante sua colonização, o patógeno secreta enzimas extracelulares, como celulasas e pectinases, que degradam a parede celular da planta, facilita a penetração e disseminação pelo tecido hospedeiro. Este processo leva à desintegração dos tecidos e ao aparecimento dos sintomas típicos da doença, como manchas escuras na base do caule, murcha e morte das plantas em casos severos (Khan, 2007).

A *M. phaseolina* possui grande importância econômica, pois afeta a produtividade e a qualidade das culturas agrícolas, e entre os hospedeiros mais suscetíveis estão soja, feijão, girassol, algodão, milho e diversas leguminosas, variando a intensidade da doença conforme a espécie,

variedade e condições ambientais (Sodji *et al.*, 2025). Rajput *et al.* (2025) relatam que, sob condições epidemiológicas favoráveis, como altas temperaturas e seca, a podridão de carvão em soja pode causar perdas significativas de rendimento, com cultivares suscetíveis apresentando reduções de até cerca de 33 % na produção mesmo sob irrigação e, em epidemias específicas, podem atingir perdas locais de até 80 %.

Na cultura do girassol, a podridão-do-carvão pode reduzir consideravelmente a produção de sementes e afetar a germinação. Já na cultura do feijão-caupi, o fungo compromete o vigor das plantas jovens, o estabelecimento das lavouras, perdas quantitativas, e impactos indiretos, aumentando os custos com sementes e insumos, e dificultando o manejo integrado de pragas e doenças (Gulya *et al.*, 2002).

Várias estratégias de manejo têm sido estudadas para reduzir seus impactos, como a utilização de variedades resistentes, que tem se mostrado como a abordagem mais eficiente e sustentável, reduzindo a necessidade do uso de fungicidas e protegendo o solo de altos níveis de inoculo do patógeno (Sodji *et al.*, 2025).

Práticas culturais, como rotação de culturas com espécies não hospedeiras, plantio em solo bem drenado e manejo adequado de restos culturais, também contribuem para reduzir a incidência da doença (Marquez *et al.*, 2021). Junto a isso, o uso criterioso de fungicidas pode complementar essas estratégias, embora a eficácia química seja limitada devido à habilidade do fungo de permanecer em estruturas resistentes no solo (Rehman, Ghazanfar, Raza., 2021).

A *M. phaseolina* apresenta variabilidade na sensibilidade a fungicidas, com alguns ingredientes ativos conseguindo inibir totalmente o crescimento micelial em ensaios *in vitro*, enquanto outros têm efeito reduzido, indicando tolerância de certos isolados (Chouhan *et al.*, 2025). Além disso, o fungo sobrevive por longos períodos no solo como microscleródios, o que limita a eficácia do controle químico em campo. Essas características tornam o manejo exclusivamente químico insuficiente, reforçando a necessidade de estratégias integradas, combinando controle químico, variedades resistentes e práticas culturais (Marquez *et al.*, 2021).

A detecção precoce do fitopatógeno é essencial, pois métodos tradicionais baseados em sintomas e isolamento em meio de cultura são lentos e pouco precisos. Técnicas moleculares,

como a PCR, permitem a identificação rápida e confiável do fungo, auxiliando o manejo integrado e a adoção de medidas preventivas. A combinação entre diagnóstico precoce, resistência genética e práticas culturais adequadas é fundamental para reduzir os impactos da podridão-do-carvão (Kaur *et al.*, 2012).

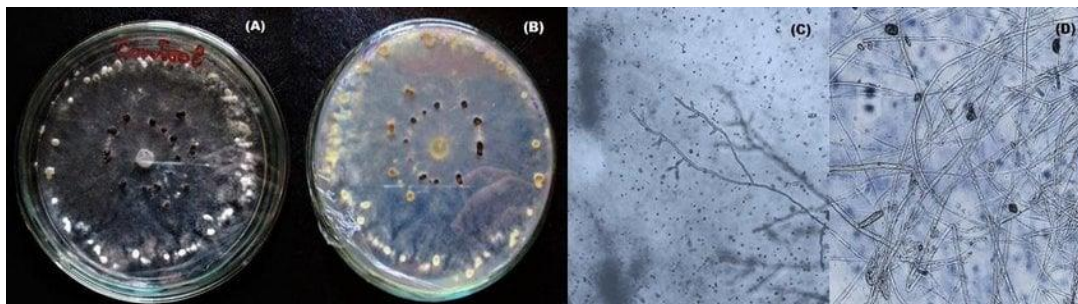
Entender a biologia, ciclo de vida e impacto econômico do fitopatógeno, aliado à aplicação de técnicas modernas de diagnóstico e manejo integrado, é essencial para a mitigação de perdas e para a manutenção da produtividade das culturas afetadas (Marquez *et al.*, 2021; Kaur *et al.*, 2012; Sodji *et al.*, 2025).

### **1.5 *Sclerotinia sclerotiorum***

*Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary é um fungo fitopatogênico pertencente à classe Ascomycota, ordem Helotiales e família Sclerotiniaceae, possui ampla distribuição em regiões temperadas e subtropicais, onde condições de alta umidade favorecem seu desenvolvimento, e por sua capacidade de infectar mais de 400 espécies vegetais, incluindo culturas de grande importância econômica como soja, feijão, girassol, tomate, alface e feijão verde (Purdy, 1979; Ficker, 2019).

Este patógeno apresenta mecanismos de adaptação que permitem sua sobrevivência no solo por longos períodos, principalmente por meio da formação de escleródios, estruturas resistentes que garantem sua persistência mesmo na ausência de hospedeiros, o que contribui para a dificuldade de manejo e a ampla incidência de mofo-branco em diversas lavouras (Hossain *et al.*, 2023).

Os escleródios são estruturas de resistência formadas pelo entrelaçamento das hifas, que inicialmente apresentam coloração branca e tornam-se escuras com o acúmulo de melanina, pigmento associado à proteção contra condições ambientais desfavoráveis, variando em forma e tamanho conforme o hospedeiro (Bolton *et al.*, 2006) (Figura 2).



**Figura 2** – Caracterização morfológica de *S. Sclerotium*. a) Vista frontal da placa de cultura. b) Vista lateral da placa de cultura. c) Visão microscópica de hifas em germinação. d) Aglomerados de ascósporos ao microscópio.

Fonte: Mahmood; Hamid, 2021)

A infecção das plantas ocorre por contato direto ou pela dispersão de esporos, favorecendo a disseminação do patógeno no ambiente agrícola (Purdy, 1979). A virulência do fungo está relacionada à produção de ácido oxálico, que facilita a colonização e causa sintomas como murcha, necrose e morte das plantas, comprometendo a produção (Zhu *et al.*, 2024). Além disso, a ampla gama de hospedeiros e a sobrevivência no solo dificultam a detecção precoce, tornando o monitoramento contínuo essencial para reduzir perdas agrícolas (Ficker, 2019).

Com isso, várias estratégias de manejo têm sido estudadas e aplicadas com o objetivo de reduzir os efeitos do patógeno, sendo que práticas culturais como rotação de culturas com espécies não hospedeiras, remoção de restos culturais infectados e controle de plantas daninhas demonstram reduzir a densidade de inóculo no solo e limitar a propagação da doença (Purdy, 1979).

O uso de agentes de controle biológico, incluindo *Trichoderma* spp. e *Paraphaeosphaeria minitans*, tem se mostrado eficiente contra *S. sclerotiorum* devido à competição por nutrientes, produção de enzimas que degradam a parede celular do patógeno e indução de resistência nas plantas hospedeiras, destacando-se como uma alternativa sustentável ao manejo químico (Topolovec-Pintarić *et al.*, 2025).

O controle químico, apesar de eficaz, apresenta limitações devido à seleção de fungos resistentes e aos impactos ambientais, reforçando a importância de estratégias integradas que combinem diferentes abordagens (Han *et al.*, 2023). *S. sclerotiorum* é um fungo patogênico devastador, capaz de afetar mais de 400 hospedeiros vegetais, incluindo soja, canola e girassol, podendo causar perdas de até 94% da produção em casos extremos, sua virulência se deve à

produção de ácidos orgânicos, enzimas hidrolíticas e moléculas efetoras que atacam o hospedeiro, tornando a resistência completa difícil de alcançar (Talmo; Ranjan, 2025).

Além disso, avanços em métodos moleculares de diagnóstico, como PCR e qPCR, têm permitido a detecção precoce de *S. sclerotiorum* em amostras de solo e tecidos vegetais, favorecendo a implementação de medidas preventivas antes da disseminação da doença, o que evidencia a relevância de integrar práticas culturais, controle biológico e monitoramento preciso para reduzir os impactos econômicos e produtivos causados pelo fungo (Reich; Chatterton 2023).

### **1.6 *Talaromyces***

As espécies do gênero *Talaromyces* são amplamente distribuídas em solos agrícolas e materiais vegetais em decomposição, desempenhando papel importante na reciclagem da matéria orgânica e na manutenção da fertilidade do solo, além de apresentar capacidade de crescimento em temperaturas elevadas, desde que haja umidade suficiente, permitindo colonização de ecossistemas tropicais e subtropicais (Chalfoun *et al.*, 2005).

O gênero foi descrito por Benjamin em 1955 como a forma sexual de *Penicillium*, produzindo ascomas de paredes macias cobertos por hifas entrelaçadas. Estudos filogenéticos mostraram que *Talaromyces* e o subgênero *Biverticillium* de *Penicillium* formam um clado monofilético distinto, e com a adoção do conceito de “um fungo, um nome”, que estabelece que cada fungo deve ter apenas um nome científico válido independentemente da fase sexual ou assexual, o subgênero *Biverticillium* foi reclassificado para o gênero *Talaromyces* (Yilmaz *et al.*, 2014).

Morfologicamente, os fungos do gênero são filamentosos, com colônias formadas por hifas finas e entrelaçadas, conídios predominantemente elipsoidais e conidióforos simetricamente biverticilados, características que permitem identificação laboratorial e classificação taxonômica (Lima, 2005). A organização das hifas e a formação de conidióforos complexos são essenciais para a reprodução e dispersão, garantindo a manutenção das populações em ambientes naturais (Yilmaz *et al.*, 2014).

O gênero possui elevada capacidade metabólica, com mais de 500 metabólitos secundários descritos, incluindo alcaloides, terpenos, poliquetídeos, meroterpenoides, isocumarinas, xantonas,

antroquinonas e azafilonas, muitos com atividades antimicrobianas e antioxidantes (Lei *et al.*, 2022). Essa diversidade justifica o crescente interesse em aplicações biotecnológicas, como biofungicidas, biofertilizantes e produtos naturais, além de usos em medicina, indústria alimentícia e tratamento de resíduos orgânicos (Lei *et al.*, 2022; Ramos, 2018). A habilidade de decompor celulose e liberar nutrientes reforça o potencial do gênero em aplicações sustentáveis, como produção de enzimas e biofertilizantes (Ramos, 2018).

No contexto agrícola, espécies de *Talaromyces* destacam-se pelo antagonismo a fitopatógenos, produzindo metabólitos antifúngicos, enzimas hidrolíticas e praticando micoparasitismo, além de atuar como endófitos, promovendo crescimento vegetal, aproveitamento de nutrientes e aumento da tolerância a estresses bióticos e abióticos (Yang *et al.*, 2024; Condé *et al.*, 2025).

Diversas espécies têm demonstrado potencial em manejo integrado de doenças e promoção do crescimento vegetal, sendo alternativas sustentáveis à dependência de insumos químicos (Lei *et al.*, 2022; Condé *et al.*, 2025). Espécies como *Talaromyces flavus* atuam contra patógenos como *Verticillium dahliae*, *Fusarium oxysporum* e *Sclerotinia sclerotiorum*, principalmente através da produção de compostos voláteis, enzimas degradadoras da parede celular e competição por espaço e nutrientes, enquanto *T. purpureogenus* e *T. funiculosus* estão associadas à promoção do crescimento vegetal e indução de resistência natural às doenças (Lei *et al.*, 2022; Condé *et al.*, 2025).

Embora raras, algumas espécies podem causar infecções humanas, sendo *Talaromyces marneffe* a única reconhecida como patogênica, endêmica do Sudeste Asiático, capaz de provocar infecções pulmonares e disseminadas em indivíduos imunocomprometidos (Brown *et al.*, 2025). De modo geral, entretanto, a maioria das espécies apresenta perfil seguro, reforçando o potencial do gênero para aplicações agrícolas e biotecnológicas (Lei *et al.*, 2022).

O gênero *Talaromyces* apresenta espécies com potencial biotecnológico relevante, capazes de promover crescimento vegetal e antagonizar fitopatógenos, servindo de base para a análise de espécies específicas, como *Talaromyces stollii* (Lei *et al.*, 2022; Vignassa *et al.*, 2024).

### 1.7 *Talaromyces stollii*

*T. stollii* é um fungo filamentososo do filo Ascomycota, encontrado principalmente em solos agrícolas, rizosfera de plantas e resíduos vegetais em decomposição, indicando que faz parte da microbiota natural do solo e participa de interações ecológicas com outros microrganismos saprófitos, demonstrando adaptação a microclimas variados e capacidade de sobrevivência em diferentes condições ambientais (EPPO, 2026).

A espécie cresce em meios como PDA, MEA e CYA, formando colônias que variam do branco ao verde, com micélio septado e denso, produzindo conídios assexuais esféricos de 2–3  $\mu\text{m}$  sobre conidióforos biverticilados e filides cilíndricas de 6–7  $\mu\text{m}$  com superfície irregular visível em microscopia eletrônica, enquanto estruturas sexuais (ascocarpos) não foram descritas, indicando predominância da reprodução assexuada (Yilmaz *et al.*, 2012). (Figura 3).



**Figura 3** – *T. stollii* cepa B.C.A 1.1. a) Colônia na placa de cultura mostrando micélio vegetativo. b) Hifas, conidióforos biverticilados e conídios elipsoides visíveis na extremidade. Fonte: Autoria própria.

A produção de conídios permite dispersão eficiente no solo e colonização da rizosfera, sendo a esporulação eficiente em diferentes meios relevante para o desenvolvimento de formulações biológicas e aplicações em biocontrole (Yilmaz *et al.*, 2012).

Em contraste, *T. stollii* não é relatado como patogênico em humanos, indicando baixo risco para uso em controle biológico (Liao *et al.*, 2025). Para garantir segurança, recomenda-se utilizar

cepas bem caracterizadas e aplicar boas práticas de biossegurança, como confinamento no solo ou na rizosfera, evitando exposição direta a trabalhadores ou ao ambiente (Brown *et al.*, 2025).

Ensaio *in vitro* demonstraram que *T. stollii* antagoniza patógenos do solo, como *Fusarium proliferatum*, reduzindo o crescimento micelial em aproximadamente 22 %, sugerindo que a espécie atua por meio de metabólitos bioativos e competição direta por espaço e nutrientes, evidenciando seu valor em práticas agrícolas sustentáveis (Vignassa *et al.*, 2024).

Além disso, a inoculação de sementes ou solo com *T. stollii* pode reduzir doenças causadas por *Fusarium pseudograminearum* e aumentar a produtividade em condições experimentais, reforçando seu potencial para manejo biológico de culturas (Yang *et al.*, 2024).

A relevância prática desses microrganismos é evidenciada por inovações tecnológicas, como a Carta Patente nº BR 10 2020 015323-4, concedida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) à Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP). Essa patente descreve o uso de *T. stollii* como agente de controle biológico da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), capaz de reduzir a severidade da doença em ensaios laboratoriais e a campo. O registro evidencia o potencial de *T. stollii* no manejo sustentável de doenças agrícolas e destaca este gênero como uma alternativa biotecnológica promissora para o manejo integrado da ferrugem da soja (INPI, 2022).

Análises genômicas recentes identificaram diversos biosynthetic gene clusters associados à produção de compostos bioativos, fornecendo suporte molecular para o antagonismo observado *in vitro* e indicando que o conhecimento genético da espécie pode ser explorado para otimizar sua eficácia e estabilidade no solo, permitindo o desenvolvimento de estratégias de manejo integrado mais eficientes (Quan *et al.*, 2024).

Apesar do potencial biotecnológico e das evidências laboratoriais de antagonismo, ainda existem lacunas importantes relacionadas a ensaios de campo, formulações comerciais, impacto sobre produtividade e interações ecológicas com a microbiota do solo, sendo necessários estudos adicionais para validar plenamente a aplicação de *T. stollii* em sistemas agrícolas sustentáveis (Vignassa *et al.*, 2024; INPI, 2022).

## 1.7 Cienciometria

A cienciometria utiliza dados quantitativos para entender como a ciência é produzida e difundida. Por meio de métricas como publicações, citações e cooperação entre autores, ela permite identificar padrões e tendências na atividade científica (Mingers; Leydesdorff, 2015).

Essas informações ajudam a reconhecer áreas em crescimento e temas emergentes, além de evidenciar o impacto de trabalhos e revistas dentro da comunidade científica. Assim, a cienciometria contribui para organizar e interpretar o desenvolvimento da ciência (Leydesdorff; Milojević apud Mingers; Leydesdorff, 2015).

O termo *cienciometria* surgiu na década de 1960 e, inicialmente, era utilizado como sinônimo de *bibliometria*, focada apenas na medição de publicações. Com o tempo, o conceito foi ampliado para incluir fatores sociais, econômicos e políticos, como financiamento de pesquisas e políticas científicas, tornando-se uma ferramenta mais completa para analisar a atividade científica (Gilbert, 1978).

O avanço de grandes bases de dados, como Web of Science, Scopus e Google Scholar, tornou a cienciometria mais precisa e abrangente. Essas plataformas permitem analisar milhões de artigos e citações, acompanhar tendências globais e comparar pesquisadores, instituições e países com maior confiabilidade (Mingers; Leydesdorff, 2015).

Um dos objetivos da cienciometria é medir a produtividade e o impacto de pesquisadores, instituições e países. Para isso, utiliza indicadores como número de publicações, total de citações, fator de impacto e índice h, sendo este último um parâmetro que combina quantidade de publicações e número de citações recebidas, refletindo simultaneamente a produtividade e o impacto científico de um pesquisador ou grupo (Mingers; Leydesdorff, 2015).

Essas métricas permitem avaliar a relevância das pesquisas, identificar tendências emergentes e orientar políticas públicas de ciência e tecnologia. Com isso, governos, universidades e agências de fomento conseguem decidir onde investir e como fortalecer determinadas áreas estratégicas (Nath; Jana, 2021).

A cienciometria também analisa redes de colaboração por meio de coautoria e coocorrência de palavras-chave, permitindo identificar como pesquisadores interagem, quais temas estão conectados e como ideias circulam entre áreas do conhecimento. Essas métricas também ajudam a avaliar revistas científicas e sua influência em cada campo (Kim; Zhu, 2018).

Apesar das vantagens, existem limitações importantes. As bases de dados tendem a privilegiar artigos em inglês e de países desenvolvidos, o que gera vieses e invisibiliza pesquisas de regiões periféricas. Além disso, métricas podem ser interpretadas de forma equivocada, como supor que maior produtividade sempre indica melhor qualidade (Kenna, Mryglod; Berche, 2017; Mingers; Leydesdorff, 2015).

É importante usar a cienciometria com responsabilidade, combinando métricas quantitativas e análises qualitativas para avaliar melhor a relevância e o impacto social das pesquisas. Nos últimos anos, surgiram as altmetrics, que ampliam essa avaliação ao considerar menções em redes sociais, downloads e presença digital, permitindo compreender de forma rápida a repercussão imediata de um trabalho (Mingers; Leydesdorff, 2015; Nath; Jana, 2021).

Ferramentas de visualização científica, como VOSviewer e CiteSpace, são usadas para mapear redes de colaboração e a evolução de temas, permitindo identificar grupos de pesquisadores, conexões entre áreas e tendências de desenvolvimento científico ao longo do tempo. Essas visualizações oferecem insights importantes sobre como o conhecimento se organiza e se transforma (Kim; Zhu, 2018).

Além disso, técnicas de inteligência artificial e mineração de texto têm ampliado a capacidade de análise ao automatizar o processamento de grandes volumes de dados, identificar padrões complexos e detectar áreas emergentes antes mesmo de serem amplamente reconhecidas. Essas tecnologias aumentam a precisão, a transparência e a reprodutibilidade das avaliações cienciométricas (Saeidnia *et al.*, 2024).

Mesmo com todas essas ferramentas, é fundamental interpretar os resultados com cautela. Os números, sozinhos, não capturam toda a complexidade da atividade científica, e as métricas devem servir como apoio, não como único critério de avaliação de pesquisadores ou instituições. A leitura

crítica dos indicadores evita distorções e uso inadequado das informações (Kenna; Mryglod; Berche, 2017; Mingers; Leydesdorff, 2015).

A cienciometria, quando aplicada de forma consciente e ética, torna-se essencial para compreender o funcionamento da ciência, identificar tendências, medir impactos e orientar decisões estratégicas. O futuro aponta para uma integração maior entre métodos quantitativos e qualitativos, com ampliação do uso de tecnologias e inteligência artificial para aprimorar políticas e o planejamento científico (Saeidnia *et al.*, 2024).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. M. R. et al. Genotypic diversity among Brazilian isolates of *Macrophomina phaseolina* revealed by RAPD. **Fitopatologia Brasileira**, v. 28, p. 279-285, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-41582003000300009>
- AGRIVALLE. *O que são bioinsumos e para que servem: controle biológico*. Disponível em: <https://agrivalle.com.br/blog/2022/08/19/bioinsumos-controle-biologico/>. Acesso em: 20 out. 2025.
- BARBIERI, R. L.; CARVALHO, F. I. F. Coevolução de plantas e fungos patogênicos. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 7, n. 2, p. 79–83, 2001. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/CAST/article/view/376>. Acesso em: 2 out. 2025.
- BAIS, H. P.; FALL, R.; VIVANCO, J. M. Biocontrol of *Bacillus subtilis* against infection of *Arabidopsis* roots by *Pseudomonas syringae* is facilitated by biofilm formation and surfactin production. **Plant Physiology**, v. 134, n. 1, p. 307–319, jan. 2004. DOI: [10.1104/pp.103.028712](https://doi.org/10.1104/pp.103.028712)
- BELTRÁN-MARTÍ, R. et al. Do hydraulic pumps and filters of sprayers influence the viability of *Beauveria bassiana* based mycoinsecticide Botanigard®? **Crop Protection**, v. 180, p. 106639, 2024. DOI: [10.1016/j.cropro.2024.106639](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106639).
- BETTIOL, W. **Controle biológico de doenças de plantas**. Jaguariúna. Embrapa- CNPDA. p. 406, 1991. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/10080>. Acesso em: 2 out. 2025.
- BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas. **Seropédica: Embrapa Meio Ambiente**, 2009. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/297525012\\_Biocontrole\\_de\\_Doencas\\_de\\_Plantas\\_Uso\\_e\\_Perspectivas](https://www.researchgate.net/publication/297525012_Biocontrole_de_Doencas_de_Plantas_Uso_e_Perspectivas). Acesso em: 02 out. 2025.
- BOLTON, M. D.; THOMMA, B. P. H. J; NELSON, B. D. Sclerotinia sclerotiorum (Lib.) de Bary: biology and molecular traits of a cosmopolitan pathogen. **Molecular plant pathology**, v. 7, n. 1, p. 1-16, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2005.00316.x>
- BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**. *Instrução Normativa nº 13, de 23 de agosto de 2021*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 ago. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-13-de-23-de-agosto-de-2021-340160720>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**. *Instrução Normativa nº 70, de 20 de dezembro de 2022*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 dez. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/> (pesquisar “Instrução Normativa nº 70 de 20/12/2022”). Acesso em: 15 mar. 2026.
- BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**. Líder global na utilização de bioinsumos, Brasil apresenta panorama regulatório de registros biológicos. Brasília:

MAPA, 22 out. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/lider-global-na-utilizacao-de-bioinsumos-brasil-apresenta-panorama-regulatorio-de-registros-biologicos-na-abim/>. Acesso em: 15 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024**. Dispõe sobre bioinsumos para uso agrícola, pecuário, aquícola e florestal. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 dez. 2024. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2024/Lei/L15070.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L15070.htm). Acesso em: 15 mar. 2026.

BRITO, E. S. G. **Influência da radiação solar sobre a viabilidade de isolados de fungos entomopatogênicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro). <https://uenf.br/posgraduacao/producao-vegetal/wp-content/uploads/sites/10/2014/09/Eliane-Brito.pdf>

BROETTO, L. **Antagonismo a *Macrophomina phaseolina* e promoção do crescimento em feijoeiro mediados por *Trichoderma spp.*** 2013. p. 1-61. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1228>

BROWN, L. et al. Recent advances in the diagnosis of talaromycosis. **Clinical Infectious Diseases**, v. 81, n. 6, p. e533-e543, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1093/cid/ciaf253>

CHALFOUN, S. M. et al. **Predominância do gênero *Penicillium* em solos de cultivo de café pelo sistema orgânico**. In: ENCONTRO NACIONAL DO CAFÉ, 2005, Brasília, DF. *Anais...* Brasília, DF: Embrapa Café, 2005. Disponível em: <https://sbicafe.ufv.br/items/f69fdfcb-cd6f-4fcb-8c8d-ae0ff7c29ab4>. Acesso em: 15 out. 2025.

CHRISTIAENS, O. et al. Implementation of RNAi-based arthropod pest control: environmental risks, potential for resistance and regulatory considerations. **Journal of Pest Science**, v. 95, n. 1, p. 1-15, 2022. DOI: [10.1007/s10340-021-01439-3](https://doi.org/10.1007/s10340-021-01439-3)

CHOUHAN, A. et al. Evaluating the Efficacy of Fungicides against *Macrophomina phaseolina*, Causing Charcoal Rot of Soybean under in-vitro Conditions. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 28, n. 10, p. 1962-1972, 2025. DOI: [10.9734/jabb/2025/v28i103207](https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i103207)

COJANU, D. N. et al. Biological control agents in sustainable agriculture: From European regulation to farmers' adoption. **Romanian Journal of Plant Protection**, 2026. DOI: [10.54574/RJPP.18.01](https://doi.org/10.54574/RJPP.18.01)

CONDÉ, T. O. et al. Inside out: New root endophytic *Penicillium* and *Talaromyces* species isolated from *Cattleya orchids* (Orchidaceae) in Brazil. **Fungal Systematics and Evolution**, v. 15, n. 1, p. 179-200, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3114/fuse.2025.15.08>

CONTRERAS-SOTO, M. B. et al. Biocontrol Strategies Against Plant-Parasitic Nematodes Using *Trichoderma spp.*: Mechanisms, Applications, and Management Perspectives. **Journal of Fungi**, v. 11, n. 7, p. 517, 2025. DOI: [10.3390/jof11070517](https://doi.org/10.3390/jof11070517)

CROPLIFE BRASIL. **Bioinsumos: soluções sustentáveis para o agronegócio**. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/bioinsumos/>. Acesso em: 20 out. 2025.

ELEVAGRO. **Trichoderma no controle biológico**. Disponível em: <https://elevagro.com/trichoderma-no-controle-biologico/>. Acesso em: 20 out. 2025.

EMBRAPA. **Recursos Genéticos e Biotecnologia. Regulamentação de produtos biológicos para o controle de pragas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/185447/1/doc119.pdf>

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Bioinsumos: Tendência de crescimento no Brasil**. Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/85620702/bioinsumos-tendencia-de-crescimento-no-brasil>

FAO. **The State of Food and Agriculture 2022**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2022. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6fa56152-c232-4bc6-8eee-7d413261ad64/content>

FARIA, M. R.; MAGALHÃES, B. P. O uso de fungos entomopatogênicos no Brasil. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 22, p. 18–25, set/out. 2001. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/284267729\\_O\\_uso\\_de\\_fungos\\_entomopatogenicos\\_no\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/284267729_O_uso_de_fungos_entomopatogenicos_no_Brasil)

FICKER, A. L. **Sclerotinia sclerotiorum impacts on host crops**. Iowa State University Digital Repository, 2019. Disponível em: <https://dr.lib.iastate.edu/server/api/core/bitstreams/640fe546-ccb5-4b44-8e5e-a788680997bb/content>. Acesso em: 25 ago. 2025.

FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. **Controle biológico de pragas da agricultura**. 2020. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1121825>

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Agricultural Biologicals Market Size & Share Analysis**. Disponível em: [https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/agricultural-biologicals-market-100411?utm\\_source=](https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/agricultural-biologicals-market-100411?utm_source=). Acesso em: 20 out. 2025.

FARMONAUT. **Agricultural Biologicals & Microbials Market Trends 2025**. Disponível em: <https://farmonaut.com/blogs/agricultural-biologicals-microbials-market-trends-2025>. Acesso em: 20 out. 2025.

FARMONAUT. **Bio Farming & Bio Products In Agriculture: 2025 Trends**. Disponível em: <https://farmonaut.com/blogs/bio-farming-bio-products-in-agriculture-2025-trends>. Acesso em: 20 out. 2025.

FARMONAUT. **Agriculture Southeast Asia: 2025 Trends & Challenges**. Disponível em: <https://farmonaut.com/asia/agriculture-southeast-asia-2025-trends-challenges>. Acesso em: 20 out. 2025.

FRAC. **FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE**. Code List 2022. [s.l.]: FRAC, 2022. Disponível em: [https://mssoy.org/sites/default/files/documents/frac-code-list-2022\\_1.pdf](https://mssoy.org/sites/default/files/documents/frac-code-list-2022_1.pdf)

GAI, Y.; WANG, H. Plant Disease: A Growing Threat to Global Food Security. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1615, 2024. DOI: [10.3390/agronomia14081615](https://doi.org/10.3390/agronomia14081615)

GARCIA, T. V.; KNAACK, N.; FIUZA, L. M. Bactérias endofíticas como agentes de controle biológico. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 82, p. 1-9, 2015. DOI: [10.1590/1808-1657001262013](https://doi.org/10.1590/1808-1657001262013)

GILBERT, G. N. Measuring the growth of science. **Scientometrics**, 1(1), 9–34. 1978. DOI: [10.1007/BF02016837](https://doi.org/10.1007/BF02016837)

GFI BRASIL. **Fermentação e processos fermentativos**. Série Tecnológica das Proteínas Alternativas. São Paulo: GFI Brasil, 2022. Disponível em: <https://gfi.org.br/wp-content/uploads/2022/11/Serie-Tecnologica-Fermentacao-e-processos-fermentativos-GFI-Brasil.pdf>. Acesso em: 27 out. 2025.

GOVERNO DO BRASIL. **Ministro Favaro debate soluções sustentáveis para a cadeia dos bioinsumos**. Publicado em 16 out. 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/em-sao-paulo-ministro-favaro-debate-solucoes-sustentaveis-para-a-cadeia-dos-bioinsumos?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/em-sao-paulo-ministro-favaro-debate-solucoes-sustentaveis-para-a-cadeia-dos-bioinsumos?utm_source=chatgpt.com)

GULYA, T. J. et al. First report of charcoal rot (*Macrophomina phaseolina*) on sunflower in North and South Dakota. **Plant disease**, v. 86, n. 8, p. 923-923, 2002. DOI: [10.1094/PDIS.2002.86.8.923A](https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.8.923A)

GUPTA, G. K.; SHARMA, S. K.; RAMTEKE, R. Biology, epidemiology and management of the pathogenic fungus *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid with special reference to charcoal rot of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Journal of Phytopathology**, v. 160, n. 4, p. 167-180, 2012. DOI: [10.1111/j.1439-0434.2012.01884.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2012.01884.x)

GUZMÁN-GUZMÁN, P. et al. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases — a review. **Plants**, v. 12, n. 3, 432, 2023. DOI: [10.3390/plants12030432](https://doi.org/10.3390/plants12030432)

HAN, V. C. et al. Biological control of *Sclerotinia sclerotiorum*: Modes of action of biocontrol agents, soil organic amendments, and soil microbiome manipulation. **Biological Control**, v. 186, p. 105346, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105346>

HARMAN, G. E. et al. *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature reviews microbiology**, v. 2, n. 1, p. 43-56, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>. Acesso em: 30 jan. 2026.

HARMAN, G. E. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. **Phytopathology**, v. 96, n. 2, p. 190-194, 2006. DOI: [10.1094/PHYTO-96-0190](https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0190)

HASAN, A. et al. Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: A review. **Bacteria**, v. 3, n. 2, p. 59-75, 2024. DOI: [10.3390/bacteria3020005](https://doi.org/10.3390/bacteria3020005)

HOSSAIN, M. M. et al. *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary: Insights into the pathogenomic features of a global pathogen. **Cells**, v. 12, n. 7, p. 1063, 2023. DOI: [10.3390/cells12071063](https://doi.org/10.3390/cells12071063).

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (INPI). **Controle biológico da ferrugem asiática da soja por fungo antagonista**. *Carta Patente nº BR 102020015323-4*, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br>

KAISER, D. et al. Efficiency of natural substances to protect *Beauveria bassiana conidia* from UV radiation. **Pest management science**, v. 75, n. 2, p. 556-563, 2019. DOI: [10.1002/ps.5209](https://doi.org/10.1002/ps.5209).

KARLSSON, M. Necrotrophic mycoparasites and their genomes. **Fungal Genetics and Biology**, 2017. DOI: [10.1128/microbiolspec.funk-0016-2016](https://doi.org/10.1128/microbiolspec.funk-0016-2016)

KAUR, S. et al. Emerging phytopathogen *Macrophomina phaseolina*: biology, economic importance and current diagnostic trends. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 38, n. 2, p. 136-151, 2012. DOI: [10.3109/1040841X.2011.640977](https://doi.org/10.3109/1040841X.2011.640977).

KENNA, R.; MRYGLOD, O.; BERCHE, B. A scientists' view of scientometrics: Not everything that counts can be counted. **arXiv**. 2017. DOI: [10.48550/arXiv.1703.10407](https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.10407)

KHAN, S. *Macrophomina phaseolina* as causal agent for charcoal rot of sunflower. **Mycopath**, v. 5, n. 2, p. 111–118, 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228357467\\_Macrophomina\\_phaseolina\\_as\\_causal\\_agent\\_for\\_charcoal\\_rot\\_of\\_sunflower](https://www.researchgate.net/publication/228357467_Macrophomina_phaseolina_as_causal_agent_for_charcoal_rot_of_sunflower). Acesso em: 25 ago. 2025.

KRAUSS, U. et al. Mycoparasitism by *Clonostachys byssicola* and *Clonostachys rosea* on *Trichoderma* spp. from cocoa (*Theobroma cacao*) and implication for the design of mixed biocontrol agents. **Biological Control**, v. 67, p. 317–327, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.09.011>

KIM, M. C.; ZHU, Y. Scientometrics of Scientometrics: Mapping Historical Footprint and Emerging Technologies in Scientometrics. In: JIBU, M.; OSABE, Y. (eds.). *Scientometrics*. London: **IntechOpen**. 2018. DOI: [10.5772/intechopen.77951](https://doi.org/10.5772/intechopen.77951)

KÖHL, J.; KOLNAAR, R.; RAVENSBERG, W. J. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 845, 2019. DOI: [10.3389/fpls.2019.00845](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845)

LEI, L. R. et al. Research advances in the structures and biological activities of secondary metabolites from *Talaromyces*. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 984801, 2022. DOI: [10.3389/fmicb.2022.984801](https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.984801).

LECLÈRE, V. et al. Mycosubtilin overproduction by *Bacillus subtilis* BBG100 enhances the organism's antagonistic and biocontrol activities. *Applied and environmental microbiology*, v. 71, n. 8, p. 4577-4584, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.71.8.4577-4584.2005>

- LIAN, H. et al. The effect of *Trichoderma harzianum* agents on physiological-biochemical characteristics of cucumber and the control effect against Fusarium wilt. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 17606, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44296-z>
- LIAO, L. et al. Exploring the diversity and pathogenicity of *Talaromyces* species isolated from clinical in Southern China. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, p. 1610481, 2025. DOI: [doi.org/10.3389/fmicb.2025.1610481](https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1610481)
- LIMA, S. M. **Estudo da capacidade biodegradadora de culturas mistas de fungos em blendas poliméricas biodegradáveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2005. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6755>
- LI, X. et al. Application progress of plant-mediated RNAi in pest control. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 10, p. 963026, 2022. DOI: [10.3389/fbioe.2022.963026](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.963026).
- MAHMOOD, A.; HAMID, I. Combined efficacy of biocontrol agents against *Root Knot Nematodes* and *Sclerotinia sclerotiorum* of vegetables. MSc. (Hons.) Thesis, University of Sargodha, 2021. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/356616618>
- MARQUEZ, N. et al. *Macrophomina phaseolina*: General characteristics of pathogenicity and methods of control. **Frontiers in plant science**, v. 12, p. 634397, 2021. DOI: [10.3389/fpls.2021.634397](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634397).
- MASCARIN, G. M. et al. *Produção industrial de Trichoderma*: a composição nutricional do meio de cultura líquido e os fatores físicos do ambiente de produção influenciam a formação, rendimento e qualidade. 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1119282/1/Mascarinproducaoindustrial2019.pdf>. Acesso em: 27 out. 2025.
- MCGUIRE, A. V.; NORTHFIELD, T. D. Tropical Occurrence and Agricultural Importance of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 6, 2020. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00006. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.00006/full>.
- MEYER, M. C. et al. Avaliação da associação de fungicidas químicos e biológicos no controle de doenças foliares da soja, safra 2023/2024: resultados sumarizados da rede de experimentos cooperativos. **Londrina: Embrapa Soja**, 2024. (Circular Técnica, 208). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1166563/1/Circ-Tec-208.pdf>. Acesso em: 27 out. 2025.
- MINGERS, J.; LEYDESDORFF, L. A review of theory and practice in scientometrics. **European Journal of Operational Research**, 246(1), 1–19. 2015. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.04.002](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.002)
- MORDOR INTELLIGENCE. **Agricultural Biologicals Market Size & Share Analysis**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/agricultural-biologicals-market>. Acesso em: 20 out. 2025.

MUKHERJEE, P. K. et al. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. **Fungal Biology Reviews**, v. 39, n. 1, p. 15–33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>

NATH, A.; JANA, S. A Scientometric Review of Global Altmetrics Research. **Science & Technology Libraries**, 40(3), 325–340. 2021. DOI: [10.1080/0194262X.2021.1918607](https://doi.org/10.1080/0194262X.2021.1918607)

NASSARY, E. K. Fungal biocontrol agents in the management of soil-borne pathogens, insect pests, and nematodes: Mechanisms and implications for sustainable agriculture. **The Microbe**, v. 7, p. 100391, 2025. DOI: [10.1016/j.microb.2025.100391](https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100391)

NGUYEN, H. T. et al. Microbial biocontrol in agriculture: from mechanistic understanding to field application. **Discover Plants**, v. 2, p. 334, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00421-y>

OECD - FA. **ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO)**. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032*. Paris: OECD Publishing; Roma: FAO, 2023. Disponível em:

<https://www.oecd.org/agriculture/oecd-fao-agricultural-outlook/>.

Acesso em: 30 jan. 2026.

ONS, L. et al. Combining biocontrol agents with chemical fungicides for integrated plant fungal disease control. **Microorganisms**, v. 8, n. 12, p. 1930, 2020. DOI: [10.3390/microorganisms8121930](https://doi.org/10.3390/microorganisms8121930)

PEREIRA, C. L. S. et al. Chemical diversity of three endophytic *Talaromyces* strains and their potential for biocontrol against the cocoa pathogenic fungus. **Chemistry & Biodiversity**, v. 23, n. 1, e03152, 2026. DOI: [10.1002/cbdv.202503152](https://doi.org/10.1002/cbdv.202503152)

FORBES BRASIL. **Uso de bioinsumos na agricultura brasileira cresceu 13% na safra 2024/2025, alcançando 156 milhões de hectares tratados**. Forbes Agro, 2025. Disponível em: [https://forbes.com.br/forbes-agro/2025/05/uso-de-bioinsumos-na-agricultura-brasileira-cresce-13-na-safra-2024-25/?utm\\_source](https://forbes.com.br/forbes-agro/2025/05/uso-de-bioinsumos-na-agricultura-brasileira-cresce-13-na-safra-2024-25/?utm_source). Acesso em: 15 mar. 2026.

POTRICH, M. et al. Avaliação de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. e *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorok. para controle de *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Biodiversidade Agropecuária**, v. 1, n. 0, p. 34, 2026. DOI: <https://doi.org/10.14295/BA.v1.0.34>

PURDY, L. H. *Sclerotinia sclerotiorum*: history, diseases and control. **Phytopathology**, v. 69, n. 8, p. 875–880, 1979. DOI: [10.1094/Phyto-69-875](https://doi.org/10.1094/Phyto-69-875)

QUALHATO, T. F. et al. Mycoparasitism studies of *Trichoderma* species against three phytopathogenic fungi: evaluation of antagonism and hydrolytic enzyme production. **Biotechnology Letters**, v. 35, n. 9, p. 1461–1468, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10529-013-1225-3>

QUAN, N. D. et al. Genome characteristics of the endophytic fungus *Talaromyces* sp. DC2 isolated from *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. **Journal of Fungi**, v. 10, n. 5, p. 352, 2024. DOI: [10.3390/jof10050352](https://doi.org/10.3390/jof10050352)

RAJPUT, L. S. et al. Evaluation of combination fungicides for charcoal rot and collar rot management in soybean. **Agronomy**, v. 15, n. 3, p. 528, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15030528>

RAMOS, S. M. S. **Diversidade de espécies de *Penicillium* e *Talaromyces* em solos usados para o cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e detecção da produção de micotoxinas**. 2018. 119 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Biociências. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34045>

REHMAN, H.; GHAZANFAR, M. U.; RAZA, W. Comparative efficacy of fungicides against charcoal rot of sunflower with the evaluation of different respective plant traits under greenhouse conditions. **Sarhad Journal of Agriculture**, 37(3), 807–817. 2021. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2021/37.3.807.817>.

REICH, J.; CHATTERTON, S. Predicting field diseases caused by *Sclerotinia sclerotiorum*: a scoping review. **Plant Pathology**, v. 72, n. 1, p. 136–146, 2023. DOI: [10.1111/ppa.13643](https://doi.org/10.1111/ppa.13643).

ROCHA, T. M. et al. Agricultural bioinputs obtained by solid-state fermentation: from production in biorefineries to sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 16, n. 3, p. 1076, 26 jan. 2024. DOI: [10.3390/su16031076](https://doi.org/10.3390/su16031076)

SAEIDNIA, H. R. et al. *Unleashing the Power of AI: A Systematic Review of Cutting-Edge Techniques in AI-Enhanced Scientometrics, Webometrics, and Bibliometrics*. **arXiv**. 2024. DOI: [10.48550/arXiv.2403.18838](https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.18838)

SHAO, X. L. et al. Biological Control of Insect Pests in Agroecosystems: Current Challenges, Innovative Strategies, and Future Directions. **Agriculture**, v. 16, n. 5, p. 597, 2026. DOI: [10.3390/agriculture16050597](https://doi.org/10.3390/agriculture16050597).

SILVA, J. B. T.; MELLO, S. C. M. **Utilização de *Trichoderma* no controle de fungos fitopatogênicos**. Jaguariúna: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/189682/4/doc241.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SODJI, F.; TENGEY, T. K.; KWOSEH, C. K. Identification of new sources of resistance to charcoal rot caused by *Macrophomina phaseolina* in cowpea. **BMC Plant Biology**, v. 25, p. 659, 2025. DOI: [10.1186/s12870-025-06628-1](https://doi.org/10.1186/s12870-025-06628-1).

STANGE, P. et al. The decision for or against mycoparasitic attack by fungi. **Fungal Biology and Biotechnology**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40694-024-00183-4>

SUTANTO, K. D. et al. Persistency of indigenous and exotic entomopathogenic fungi isolates under ultraviolet B (UV-B) irradiation to enhance field application efficacy and obtain sustainable control of the red palm weevil. **Insects**, v. 13, n. 1, p. 103, 2022. DOI: [10.3390/insects13010103](https://doi.org/10.3390/insects13010103)

SUZUKI, N. et al. In-tree behavior of diverse viruses harbored in the chestnut blight fungus, *Cryphonectria parasitica*. **Journal of Virology**, v. 95, n. 17, p. e01962-20, 2021. DOI: [10.1128/JVI.01962-20](https://doi.org/10.1128/JVI.01962-20).

TANG, Y. et al. The biocontrol effects and mechanisms of mycoparasitic fungi. **Frontiers in Microbiology**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1598458>

TALMO, N.; RANJAN, A. Comparative insights into soybean and other oilseed crops' defense mechanisms against *Sclerotinia sclerotiorum*. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 1616824, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1616824>

TOPOLOVEC-PINTARIĆ, S. et al. Biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* on oilseed Brassicas. **Plants**, v. 16, n. 2, p. 35, 2025. DOI: [10.3390/microbiolres16020035](https://doi.org/10.3390/microbiolres16020035)

VAN DEN BOOGERT, P. H. J. F. Mycoparasitism and biocontrol. In: Plant relationships. **Springer**. p. 425-439. 1996. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2901-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2901-7_44)

VECTORCONTROL. Bac-Control® WP. **Produto biológico à base de *Bacillus thuringiensis* var. kurstaki**. Registro inicial: 1991. Disponível em: <https://vectorcontrol.agr.br/produto/bac-control-wp/>. Acesso em: 15 mar. 2026.

VEGA, F. E. et al. Fungal entomopathogens: new insights on their ecology. **Fungal Ecology**, v. 2, n. 4, p. 149–159, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2009.05.001>

VERMELHO, A. B. et al. Microbial bioinputs in Brazilian agriculture. **Revista de Agricultura Integrativa**, v. 25, n. 2, p. 402-423, fev. 2026. Disponível em:

VIGNASSA, M. et al. Modulation of growth and mycotoxigenic potential of *Fusarium* species by *Talaromyces stollii*. **Toxins**, v. 16, n. 8, p. 344, 2024. DOI: [10.3390/toxins16080344](https://doi.org/10.3390/toxins16080344).

VINALE, F. et al. Trichoderma–plant–pathogen interactions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 1, p. 1-10, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.002>

VILLAVICENCIO-VÁSQUEZ, M. et al. Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1578915, 2025. DOI: [10.3389/fagro.2025.1578915](https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915).

WANG, Q. et al. Fungi in horticultural crops: promotion, pathogenicity and monitoring. **Agronomy**, 2025. DOI: [10.3390/agronomia15071699](https://doi.org/10.3390/agronomia15071699)

YANG, H. et al. Antagonistic effects of *Talaromyces muroii* TM28 against *Fusarium pseudograminearum* and its potential as a biocontrol agent. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1292885, 2024. DOI: [10.3389/fmicb.2023.1292885](https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1292885).

YANG, X. et al. Comparative transcriptome analysis of *Sclerotinia sclerotiorum* revealed its response mechanisms to the biological control agent, *Bacillus amyloliquefaciens*. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020. DOI: [10.1038/S41598-020-69434-9](https://doi.org/10.1038/S41598-020-69434-9)

YILMAZ, N. et al. *Delimitation and characterisation of Talaromyces purpurogenus and related species*. **Persoonia**, v. 29, p. 39–54, 2012. DOI: [10.3767/003158512X659500](https://doi.org/10.3767/003158512X659500)

YILMAZ, N. et al. Polyphasic taxonomy of the genus *Talaromyces*. **Studies in Mycology**, v. 78, p. 175-341, 2014. DOI: [10.1016/j.simyco.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.simyco.2014.08.001)

ZIMMERMANN, G. Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 17, p. 553–596, 2007. DOI: [10.1080/09583150701309006](https://doi.org/10.1080/09583150701309006).

ZHANG, W. et al. The co-inoculation of *Pseudomonas chlororaphis* H1 and *Bacillus altitudinis* Y1 promoted soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] growth and increased the relative abundance of beneficial microorganisms in rhizosphere and root. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 1079348, 2023. DOI: [10.3389/fmicb.2022.1079348](https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1079348).

ZHU, Y. et al. Recent advances in virulence of a broad host range plant pathogen *Sclerotinia sclerotiorum*: a mini-review. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1424130, 2024. DOI: [10.3389/fmicb.2024.1424130](https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1424130).

ZOTTI, M. J. et al. RNA interference technology in crop protection against arthropod pests, pathogens and nematodes. **Pest Management Science**, v. 74, n. 6, p. 1239–1250, 2018. DOI: [10.1002/ps.4813](https://doi.org/10.1002/ps.4813).

**ARTIGO 1: GLOBAL TRENDS IN MOLECULAR MECHANISMS OF BIOLOGICAL CONTROL AGAINST PHYTOPATHOGENS: A SCIENTOMETRIC ANALYSIS**

Artigo submetido à Revista Information Research Communications

<https://www.inforescom.org/>

## 2 GLOBAL TRENDS IN MOLECULAR MECHANISMS OF BIOLOGICAL CONTROL AGAINST PHYTOPATHOGENS: A SCIENTOMETRIC ANALYSIS

### ABSTRACT

Research on the molecular mechanisms underlying biological control has expanded substantially over the past three decades. This scientometric study analyzes global trends from 1990 to 2024 based on 598 research articles indexed in Web of Science and Scopus. Bibliometric indicators and network analyses were used to evaluate publication growth, collaboration structures, and thematic evolution. Scientific output intensified markedly after 2014, accompanying the incorporation of omics approaches and genome-based analyses. China, India, the United States, and Brazil emerged as leading contributors. Thematic mapping indicates a shift from enzyme-centered and antifungal activity studies toward integrative frameworks involving secondary metabolite biosynthesis, transcriptomic regulation, microbiome interactions, and plant defense responses. Overall, the field has progressed from descriptive characterization to mechanistically informed and translational research strategies. By identifying structural patterns and conceptual transitions, this study provides a strategic overview to support the development of predictive and multifunctional biological control agents (BCAs) aligned with sustainable agriculture.

**Keywords:** Molecular Interactions, Genomics, Metabolomics, Sustainable Agriculture.

## 2.1 INTRODUCTION

Climate change and the need to sustain global food production have reinforced biological control as a central strategy in the transition toward sustainable agriculture. Although the Green Revolution increased productivity, intensive chemical use has led to pathogen resistance, environmental impacts, and escalating costs, exposing structural limitations in conventional plant protection and motivating a shift toward biologically based solutions - a paradigm shift frequently named as a “Green Revolution 2.0” (Ceresini *et al.*, 2024)

Plant diseases causes yield losses of up to 40% worldwide, highlighting the urgency of effective and scalable alternatives (Wang *et al.*, 2024). This relevance is reflected in market trends, as biological control products has increased worldwide more than 15%. In Brazil, the global leader in the sector, the MAPA (Ministry of Agriculture, Livestock, and Supply) had registered in 2024 a total of 524 new biological products (Andreato *et al.*, 2025). Commercial solutions are predominantly based on *Bacillus* spp. and *Trichoderma* spp., whose multifunctional activity illustrates the convergence of ecological and molecular principles in crop protection (Yao *et al.*, 2023).

Parallel to commercial expansion, the scientific landscape has undergone a marked epistemic shift. Descriptive and *in vitro* investigations have progressively evolved into molecularly informed research employing genomics, transcriptomics, metabolomics, and genetic enhancement to elucidate regulatory pathways, secondary metabolite biosynthesis, and strain–pathogen interactions (Mukherjee *et al.*, 2022; Martínez *et al.*, 2023). This transition reflects a movement from empirical screening toward mechanism-driven development of biological control agents (BCAs).

However, the accelerated expansion and thematic diversification of this literature obscure dominant research trajectories, collaboration patterns, and emerging gaps. To address this limitation, this study performs a comprehensive scientometric analysis of global research on molecular BCA–phytopathogen interactions, mapping the intellectual evolution, principal actors, and strategic directions of the field.

## 2.2 MATERIALS AND METHODS

### Data Sources, Search Strategy, and Study Selection

Records for this study were retrieved from the Web of Science (WoS) Core Collection and Scopus, covering publications indexed between 1990 and December 2024. The year 1990 corresponds to the earliest publication identified in the databases, while records indexed in 2025 were excluded due to incomplete coverage at the time of data collection. Only original research articles published in English were included, and other document types, such as reviews, editorials, or letters, were excluded.

The search was conducted using strings developed based on the central objective of this study: to analyze publications on the molecular mechanisms of antagonism between biological control agents (BCAs) and phytopathogens. The search string was as follows: (phytopathogen OR "plant pathogen") AND (antagonism OR antagonist\*) AND (gene\* OR "gene expression" OR "RNA seq" OR "transcriptome" OR "molecular mechanism\*" OR "molecular biology" OR cDNA) AND ("biological control" OR inhibition OR "biological management" OR biocontrol) NOT (screening OR pipeline) NOT ("genetic diversity")\*. Syntax was adapted for each database while maintaining conceptual equivalence.

After retrieval, non-English articles and non-original research documents were excluded. The WoS and Scopus datasets were then merged in R (v4.4.2; R Core Team, 2024), and duplicate records were removed. Manual screening of titles and abstracts was subsequently performed to ensure alignment with the research scope, excluding studies outside the defined focus, such as those addressing bioprospection, taxonomic identification of BCAs, mineral-solubilizing bacteria, or biocontrol assays without investigation of molecular antagonistic mechanisms.

### Scientometric and Network Analysis

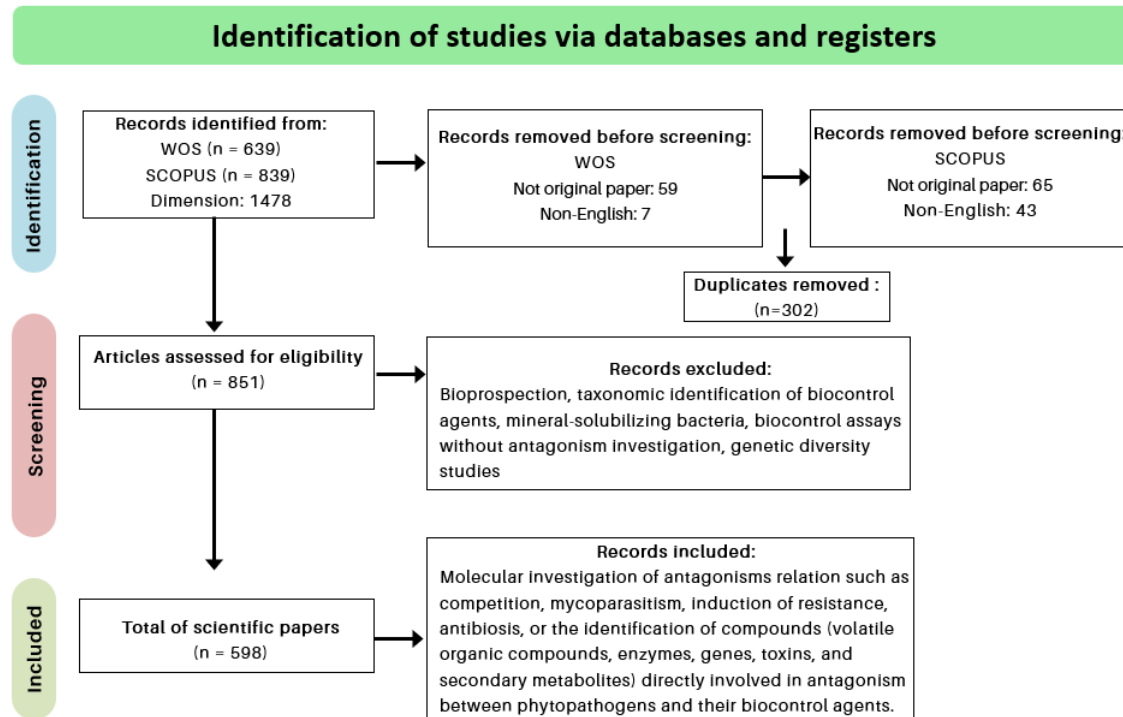
The resulting dataset was analyzed using Bibliometrix (R) via the Biblioshiny interface and VOSviewer. Descriptive indicators included annual scientific production, source distribution, and citation counts. Author productivity and journal dispersion were evaluated using Lotka's and Bradford's laws, respectively. Collaboration patterns were assessed through institutional and international co-authorship networks using full counting. The conceptual structure was explored through keyword co-occurrence networks, with a minimum occurrence threshold of five terms, generated in VOSviewer using full counting.

Citation analysis identified the most influential publications, providing insight into the main advances in molecular mechanisms of antagonism between BCAs and phytopathogens.

## 2.3 RESULTS

### Overview Research

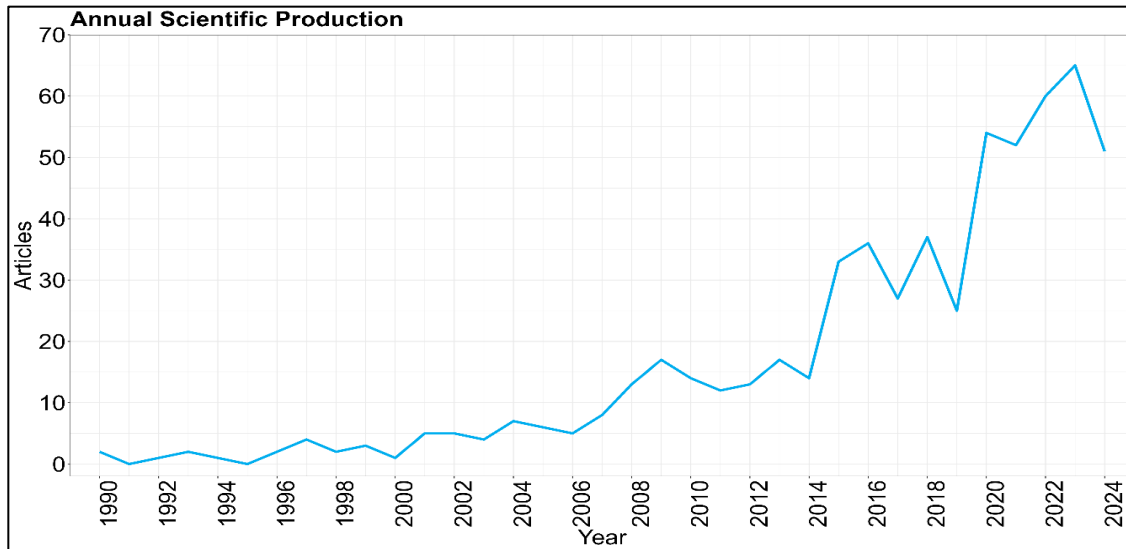
Considering the period between 1990 and 2024, 1,478 documents concerning the molecular biology of the antagonistic interaction between plant pathogens and their biological control agents were identified in the WOS and Scopus databases. Most of these documents came from the Scopus databases (839), with the observed redundancy between the databases being 20.4%. From the 839 and 639 documents obtained from Scopus and WOS, 87.1% and 89.7%, respectively, represented original articles written in English, resulting in the automated selection of 851 papers (Figure 1). Further, the manual inspection of the 851 documents resulted in the identification of out-of-theme studies that were excluded from the dataset, resulting in a final dataset of 598 selected documents published across 250 different sources. The average annual growth rate of publications is 9.99%, indicating a consistent expansion of the field over time. The average document age is 8.14 years, with each publication receiving an average of 33.36 citations. A total of 3,097 authors contributed to this body of work, with only 6 publishing single-authored articles. The average number of co-authors per article is 6.66, highlighting a high level of collaboration among researchers. Additionally, 20.23% of the articles resulted from international collaborations. The dataset includes 1,528 author keywords, reflecting the thematic diversity of the studies.



**Figure 1:** PRISMA Methodology of articles 1990 to 2024.

## Global research

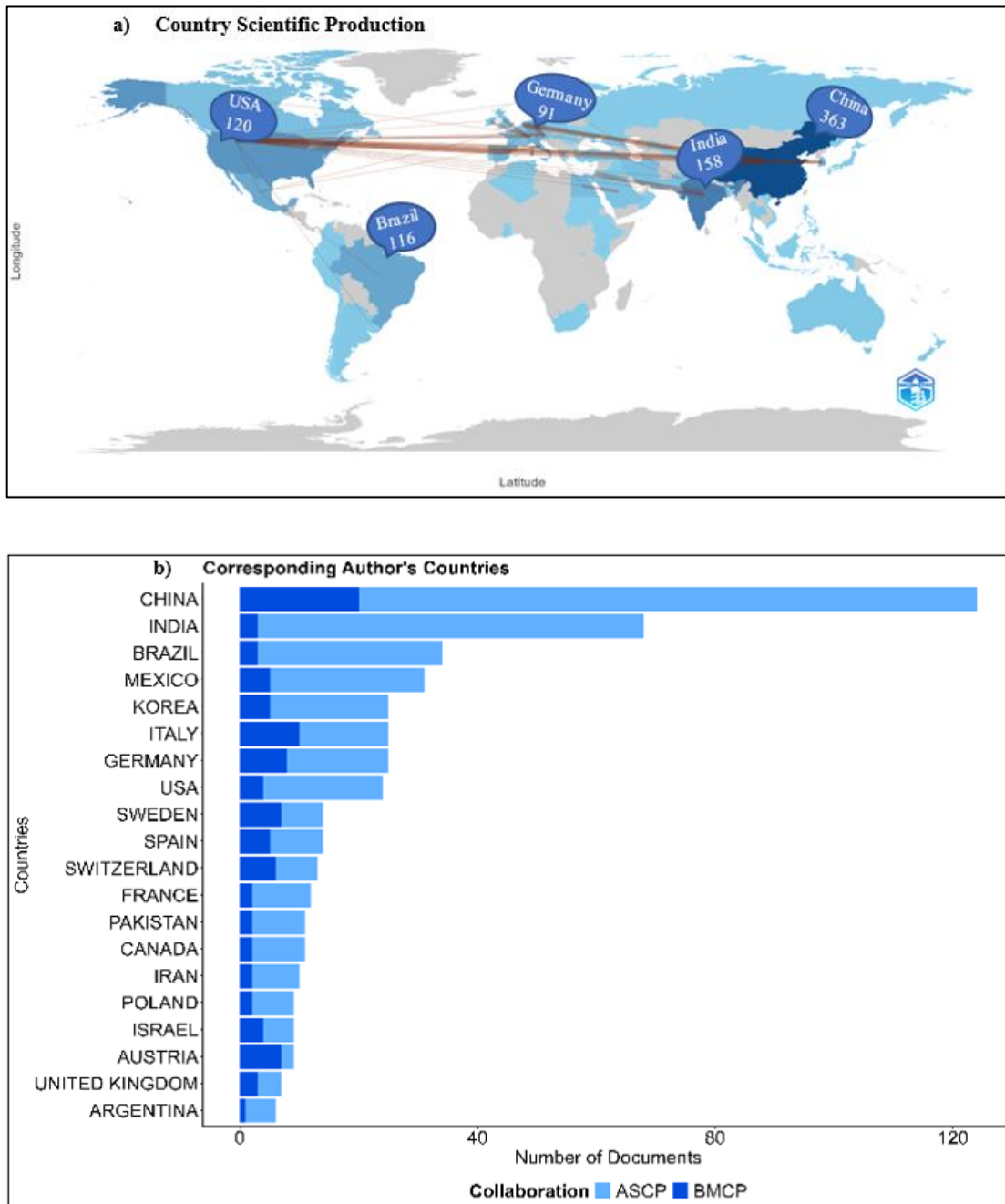
In recent years, the molecular biology of antagonistic interactions in the biological control of phytopathogens has increasingly attracted the attention of the scientific community, driven by the search for more sustainable methods for managing plant diseases. An analysis of original publications available in the WOS and Scopus databases between 1990 and 2024 reveals a clear growth trajectory (Figure 2). Until the early 2000s, the number of articles was relatively low, increasing gradually until 2014. From 2014 onwards, a significant surge can be observed, culminating in a peak of more than 60 publications in 2023. Despite a slight decline after this point, annual output has remained consistently higher than in previous decades. It is noteworthy that in the last decade (2014–2024), the number of publications (454) was about 3.1 times higher than in the entire previous period from 1990 to 2013 (144), highlighting the strengthening and consolidation of this research field.



**Figure 2:** Annual production of articles from 1990 to 2024.

The heat map of global scientific production (Figure 3a) shows that the five leading countries in terms of scientific output and international collaboration are China, India, the United States, Brazil, and Germany. China, with 363 publications, maintains international collaborations with 18 countries, while India, with 158 articles, participates in partnerships with 7 countries. The United States, with 120 publications, stands out as the country with the largest number of collaborations, connecting to 20 countries. Brazil, ranking fourth in scientific output (116 articles), collaborates with 7 countries, and Germany, with 91 publications, maintains collaborations with 17 countries, acting as an important global connector.

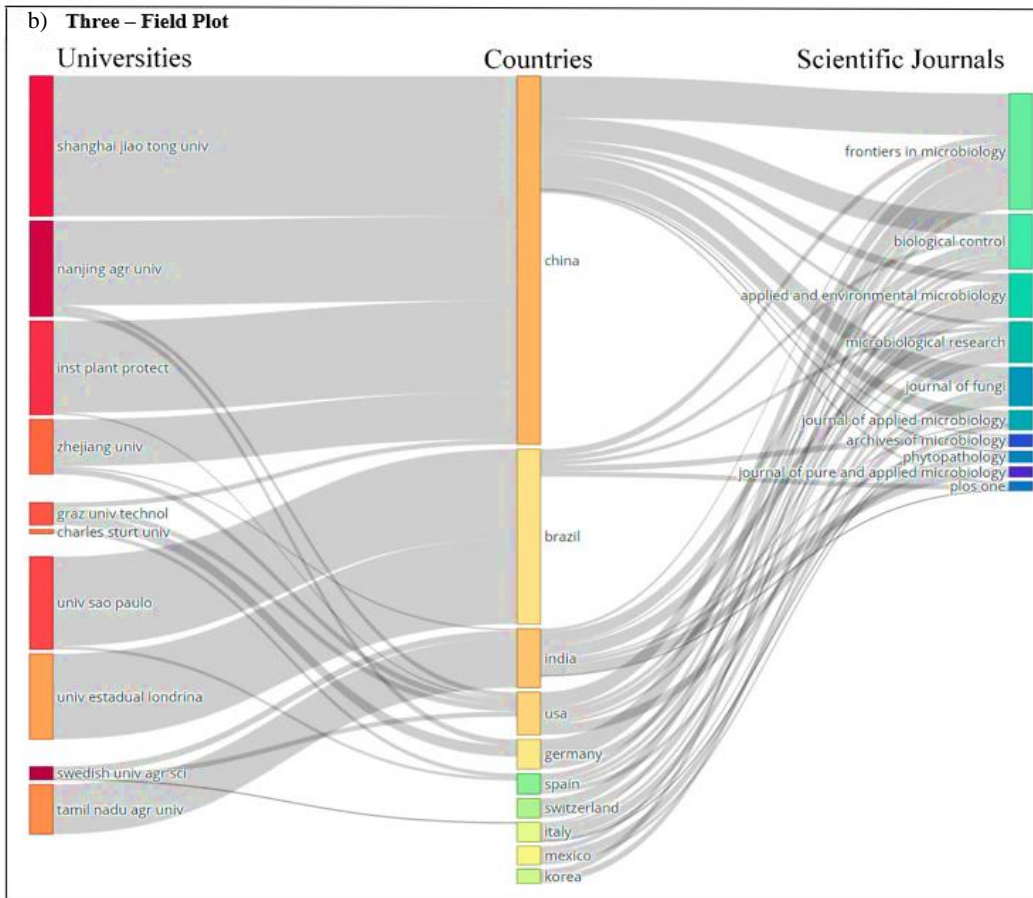
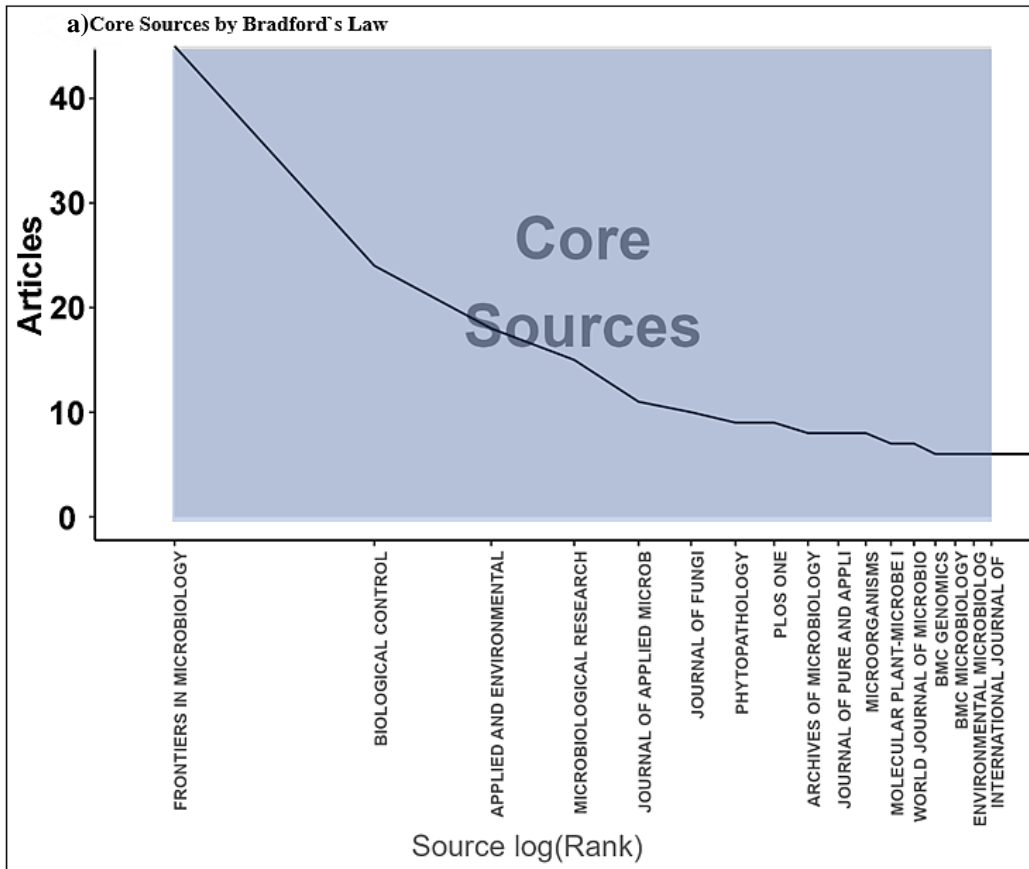
Other countries with intermediate scientific output, such as Italy, Spain, South Korea, and Switzerland, have an average of 50–78 publications, with international collaborations ranging from 3 to 15 countries. Most other countries, with fewer than 40 publications, maintain more limited collaborations, generally with 1 to 4 international partners. These data indicate that, although scientific productivity is important, the scope of international partnerships is concentrated mainly among the leading countries, reflecting an uneven global network of scientific collaboration.



**Figure 3: Global scientific production and worldwide collaboration.** Global scientific production and worldwide collaboration. (a) Distribution of scientific production as a color gradient corresponding to the number of publications per country from 1990 to 2024. (b) Country of affiliation of the corresponding author in publications on the topic.

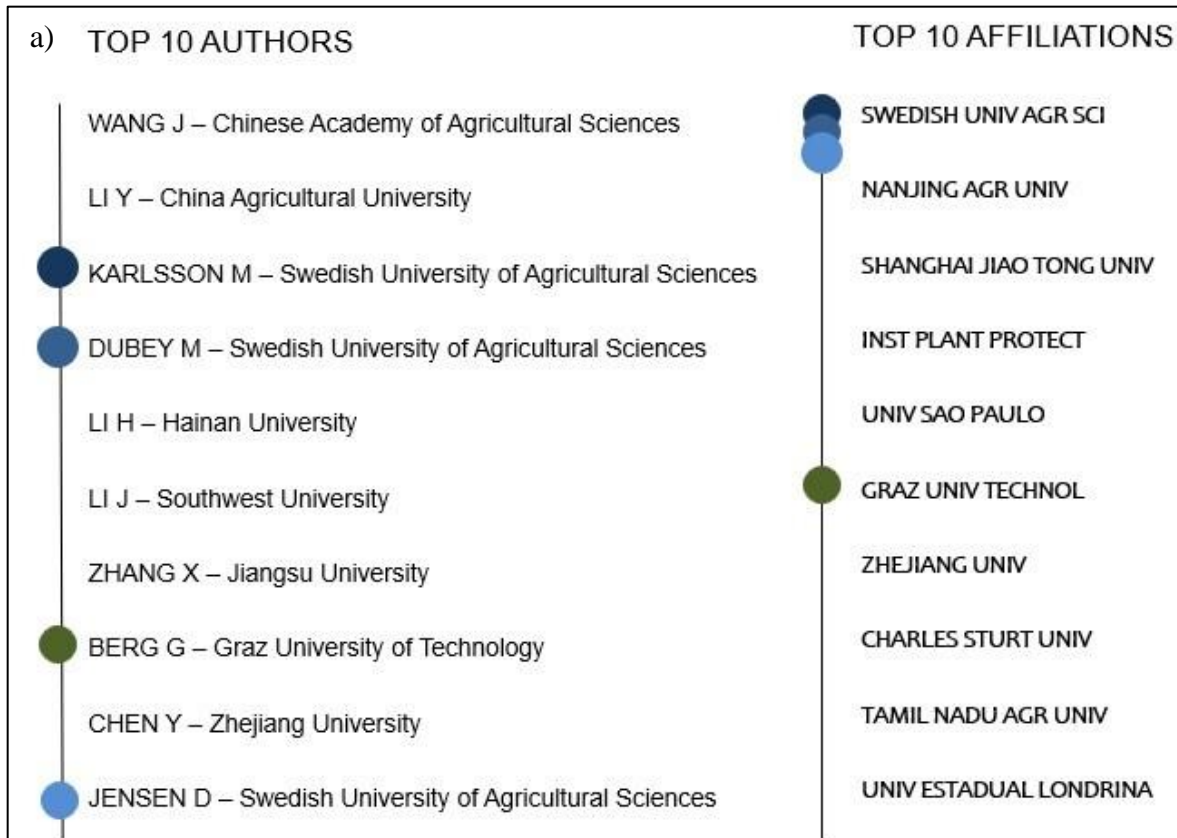
**Journals, countries, Institutes and authors connections**

Figure 4a illustrates the core journals in the field, which are composed of 17 sources that, according to Bradford's law, produce the relevant knowledge in the area of study. First in the ranking was *Frontiers in Microbiology* with 45 articles (published by Frontiers, Switzerland) followed by: *Biological Control* (24 articles, Elsevier, with main editorial office in the Netherlands), *Applied and Environmental Microbiology* (18 articles, American Society for Microbiology, United States of America), *Microbiological Research* (15 articles, Elsevier, Germany), *Journal of Applied Microbiology* (11 articles, Wiley, United Kingdom), *Journal of Fungi* (10 articles, MDPI, Switzerland), *Phytopathology* (9 articles, American Phytopathological Society, United States of America), *PLOS ONE* (9 articles, Public Library of Science, United States of America), *Archives of Microbiology* (8 articles, Springer, Germany), and *Journal of Pure and Applied Microbiology* (8 articles, De Gruyter, Germany).



**Figure 4: Core journals on the molecular biology of biological control of phytopathogens during 1990-2024.** a) Distribution of the core journals according to Bradford's Law. The shading indicates the main sources that concentrate the highest number of articles. b) Three-field plot connecting authors' affiliations (left), countries (center), and journals (right). Frequency: 10 occurrences.

The three-field plot analysis in Figure 4b shows an almost exact correspondence with Bradford's analysis, as the same 10 most relevant journals in Bradford's analysis are among the 10 most frequent in the three-plot analysis. The journals *Frontiers in Microbiology*, *Biological Control*, *Applied and Environmental Microbiology*, and *Microbiological Research* are, in that order, among the four most important in both analyses. It is interesting to note that the three-plot analysis relates the most relevant journals to the countries that lead the ranking of global production in the field. However, in this analysis, the ranking maintains China and Germany in first and fifth place but changes the position of Brazil, India, and the USA, which now occupy the second, third, and fourth positions, respectively, in terms of production in the most important journals in the field. The three-plot analysis also identified the 10 research institutes and universities responsible for the scientific production associated with the core journals. In China, the main institutes are Shanghai Jiao Tong University, the Institute of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, and Zhejiang University; in Brazil, the University of São Paulo (USP) and the State University of Londrina (UEL); in India, the Tamil Nadu Agricultural University; in the USA, although no single institution is prominent among the top affiliations, collaborative contributions are present; and in Germany, contributions appear through co-authorship or publication channels rather than direct institutional dominance. In summary, all 10 most relevant author affiliations are public universities.

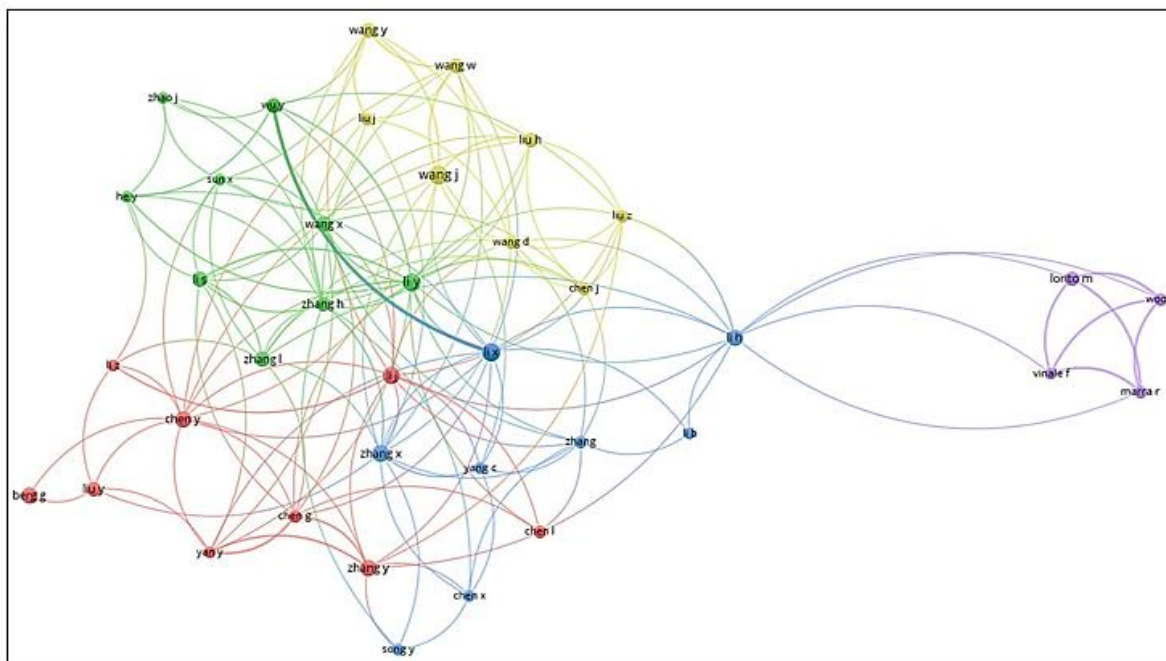


**Figure 5: top 10 authors in the field.** Relationship between the top ten authors and their top ten institutional affiliations.

In Figure 5a, the colors of the dots represent the connection between the top 10 authors and their affiliations, highlighting how scientific production is organized across institutions. Note, for example, that the Swedish University of Agricultural Sciences brings together three of the most productive authors (Karlsson M., Dubey M., and Jensen D.), while Asian universities, such as the Chinese Academy of Agricultural Sciences, China Agricultural University, Hainan University, Southwest University, and Jiangsu University. In the Western context, the University of Graz in Austria, Charles Sturt University in Australia, and the Brazilian universities University of São Paulo (USP) and State University of Londrina (UEL) stand out. It is important to note that these same universities appear as the 10 most relevant in the three-plot analysis shown in Figure 4b.

The collaboration network between authors on the molecular biology of antagonistic relationships between phytopathogens and biocontrol agents is presented in Figure 6. Each author is symbolized by a node (circle). The size of a node corresponds to the total link strength related to that author, and the distance between two nodes indicates

the level of collaboration. The colors are used to represent co-authorship clusters. The co-authorship network consists of five clusters with 38 authors. The analysis of author co-occurrence highlights the formation of well-defined collaborative clusters, with a predominance of groups of Chinese origin. These clusters exhibit strong internal cooperation, reflecting the intense national scientific production in the field. The existence of a European cluster is also observed, which, although highly cohesive, maintains limited connections with the other groups. In this context, author Li H. plays a structural link, connecting the Eastern and Western clusters.

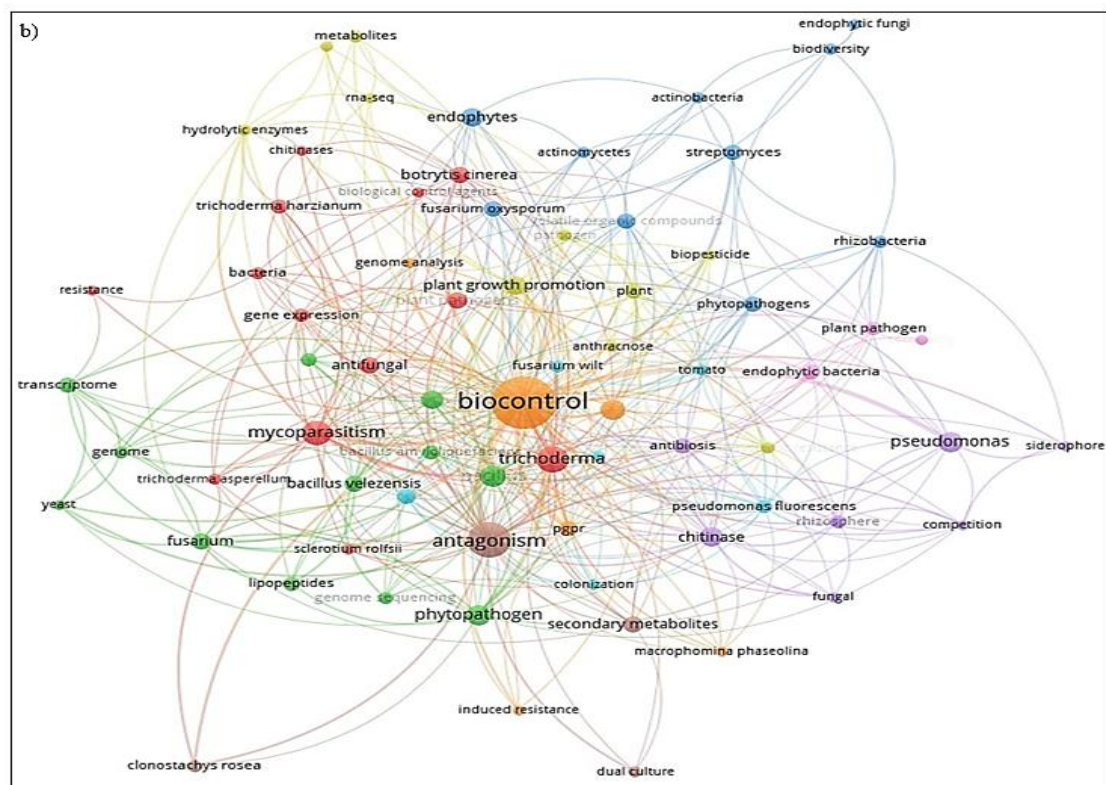
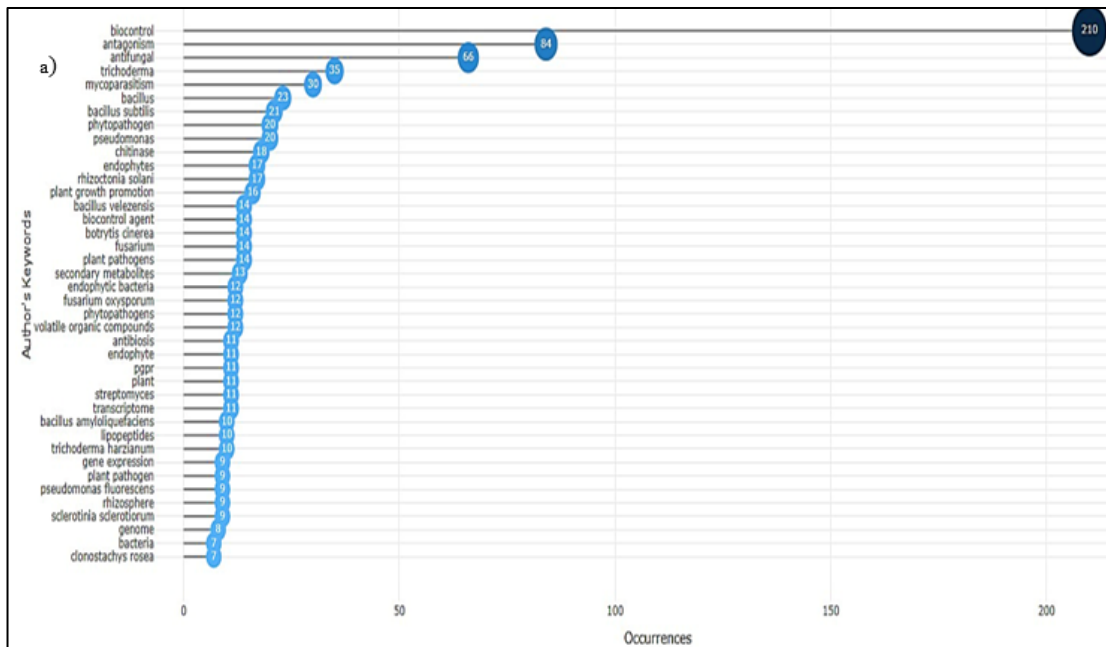


**Figure 6: Co-authorship.** The figure illustrates the network of collaboration among authors in the studied field. Each author is represented by a node (circle), with the node size indicating the overall strength of their connections to other authors, and the distance between nodes reflecting the level of collaboration. The analysis was conducted using the following parameters: co-authorship, full counting, authors, exclusion of documents with a large number of authors (option selected), and a maximum of 25 authors per document.

### Keywords and thematic evolution in the field

The analysis of keywords mainly related to the topic and their evolution over time is shown in Figure 7. Figure 7a illustrates the 40 most frequent keywords, highlighting among them biocontrol or its synonym biological control (210), antagonism (84), antifungal (66), *Trichoderma* (35), and mycoparasitism (30). Words such as "transcriptome" (11), "gene expression" (9), and "genome" (8) appear with low frequencies. The co-occurrence network shows that the most frequent terms are connected

to specific subtopics, such as mycoparasitism, secondary metabolites, hydrolytic enzymes, and plant defense (Figure 7b). The temporal analysis of co-occurrences reveals that older studies emphasized classical agents, such as *Trichoderma*, *Bacillus subtilis*, and *Pseudomonas fluorescens*, while more recent work incorporates omics approaches (transcriptomics, gene expression, and microbiome) (Figure 7c).



**Figure 7: Keywords.** a) 40 most frequent keywords in the dataset. b) Keyword co-occurrence network.

Each node represents a keyword, and the thickness between nodes represents the strength of the relationship between the keywords, determined by how often they appeared together in publications.

### **Top 10 - cited studies**

The analysis of the ten most cited articles in the field of molecular mechanisms underlying the interaction between phytopathogens and their biological control agents (BCAs) reveals a transition from simple antagonist screenings to a mechanistic understanding guided by molecular biology (Table 1). Several interconnected themes emerge from these influential studies. The most cited articles **were** Innerebner et al., 2011 (411 citations); Chen et al., 2013 (379 citations); and Vinale et al., 2008 (353 citations).

Table 1. Top 10 articles with the highest number of citation

| Title   | Total Citations | Ano  | Authors   | Journal                                     | DOI                              | Mainly results   |
|---|-----------------|------|---|---|----------------------------------|--|
| Protection of Arabidopsis thaliana against Leaf-Pathogenic Pseudomonas syringae by Sphingomonas Strains in a Controlled Model System  | 411             | 2011 | Innerebner, G., Knief, C., Vorholt, J. A.   | Applied and Environmental Microbiology      | 10.1128/AEM.00133-11             | Pre-inoculation with a mixture of Sphingomonas strains reduced the pathogen population and the severity of disease symptoms in Arabidopsis plants. Competition for nutrients, as evidenced by carbon source utilization profiles, is suggested as a possible mechanism of biocontrol.  |
| Biocontrol of tomato wilt disease by <i>Bacillus subtilis</i> isolates from natural environments depends on conserved genes mediating biofilm formation                             | 379             | 2013 | Chen, Y., Yan, F., Chai, Y., Liu, H., Kolter, R., Losick, R., Guo, J.-h.  | Environmental Microbiology                  | 10.1111/j.1462-2920.2012.02860.x | Mutations in genes essential for biofilm formation in <i>B. subtilis</i> reduced biocontrol efficacy, while a surfactin-deficient mutant showed reduced biocontrol efficacy and biofilm formation. The ability to form biofilms promoted greater cell colonization in the tomato rhizosphere.  |
| A novel role for Trichoderma secondary metabolites in the interactions with plants  | 353             | 2008 | Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E.L., Marra, R., Barbetti, M.J., Li, H., Woo, S.L., Lorito, M.  | Physiological and Molecular Plant Pathology | 10.1016/j.pmpp.2008.05.005       | Secondary metabolites of Trichoderma spp. can directly promote plant growth and induce plant systemic defense responses. The expression of defense genes was induced in canola and tomato plants treated with the purified metabolites.  |
| <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> GA1 as a source of potent antibiotics and other secondary metabolites for biocontrol of plant pathogens   | 282             | 2009 | Arguelles-Arias, A., Ongena, M., Halimi, B., Lara, Y., Brans, A., Joris, B., Fickers, P.  | Microbial Cell Factories                    | 10.1186/1475-2859-8-63           | Reclassification of the <i>B. subtilis</i> strain as <i>B. amyloliquefaciens</i> GA1. Partial genome sequencing revealed gene clusters for the synthesis of multiple biocontrol compounds: lipopeptides, polyketides, and the siderophore bacillibactin.   |
| Bacillomycin D Produced by <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Is Involved in the Antagonistic Interaction with the Plant-Pathogenic Fungus <i>Fusarium graminearum</i>               | 206             | 2008 | Gu, Q., Yang, Y., Yuan, Q., Shi, G., Wu, L., Lou, Z., Huo, R., Wu, H., Borriss, R., Gao, X.   | Applied and Environmental Microbiology      | 10.1128/AEM.01075-17             | Bacillomycin D (a lipopeptide produced by <i>B. amyloliquefaciens</i> FZB42) is the main antifungal agent against <i>F. graminearum</i> . It acts by promoting the disruption of the fungal plasma membrane and cell wall, inducing the accumulation of reactive oxygen species and cell death. Morphological and ultrastructural damage were observed in the hyphae and conidia of <i>F. graminearum</i> treated with bacillomycin D. |
| Characterization of ech-42, a <i>Trichoderma harzianum</i> endochitinase gene expressed during mycoparasitism   | 189             | 1994 | Carsolio, C., Gutiérrez, A., Jiménez, B., Van Montagu, M., Herrera-Estrella, A.   | Proc. Natl. Acad. Sci. USA                  | 10.1073/pnas.91.20903            | Expression of the ech-42 gene (42kDa chitinase) is strongly induced during direct mycoparasitic interaction with pathogenic fungi ( <i>R. solani</i> ) and by chitin.  |
| Antifungal Activity of Bacillus Species Against Fusarium and Analysis of the Potential Mechanisms Used in Biocontrol  | 184             | 2018 | Khan, N., Martínez-Hidalgo, P., Ice, T. A., Maymon, M., Humm, E. A., Nejat, N., Sanders, E. R., Kaplan, D., Hirsch, A. M.   | Frontiers in Microbiology                   | 10.3389/fmicb.2018.02363         | <i>B. subtilis</i> 30VD-1 showed the most effective antagonism against Fusarium. Inhibition of fungal growth appears to be linked to the production of cellulase, xylanase, pectinase, chitinase, volatiles, and other antifungal compounds. Microscopic analyses revealed abnormal distortions and swellings in the hyphae of <i>F. oxysporum</i> when in contact with 30VD-1.  |
| Characterization of the antifungal and plant growth-promoting effects of diffusible and volatile organic compounds produced by <i>Pseudomonas fluorescens</i> strains               | 176             | 2015 | Hernández-León, R., Rojas-Solís, D., Contreras-Pérez, M., Orozco-Mosqueda, M. del C., Macías-Rodríguez, L.I., Reyes-de la Cruz, H., Valencia-Cantero, E., Santoyo, G. | Biological Control                          | 10.1016/j.biocontrol.2014.11.011 | Strains of <i>P. fluorescens</i> exhibit multiple biocontrol and plant growth promotion mechanisms. Antagonistic and PGP activity is mediated by both diffusible organic compounds and volatile organic compounds. Strains produce multiple biocontrol determinants, including phenazines, hydrogen cyanide (HCN), ACC deaminase, siderophores, and proteases.   |
| Degradation of pathogen quorum-sensing molecules by soil bacteria: a preventive and curative biological control mechanism   | 175             | 2003 | Molina, L., Constantinescu, F., Zl, L., Reimann, C., Duffly, B., Defago, G.   | FEMS Microbiology Ecology                   | 10.1016/S0168-6496(03)00125-9    | Transformed strain P3/pME6863 has its biocontrol activity based on the degradation of AHLs (quorum sensing signaling molecules. N-acyl-homoserine lactones, AHLs).   |
| <i>Bacillus velezensis</i> RC 218 as a biocontrol agent to reduce Fusarium head blight and deoxynivalenol accumulation: Genome sequencing and secondary metabolite cluster profiles | 173             | 2016 | Palazzini, J. M., Dunlap, C. A., Bowman, M. J., Chulze, S. N.   | Microbiological Research                    | 10.1016/j.micres.2016.06.002     | Reclassification of <i>B. subtilis</i> RC 218 strain to <i>B. velezensis</i> through phylogenomic analysis. The RC 218 genome contains genes for the synthesis of surfactin, iturin, fengycin, bacillaene, diflicidin, macrolactin, bacillibactin, amylocyclin and ericin.   |

The 10 most cited articles on the molecular mechanisms underlying interactions between phytopathogens and biological control agents (BCAs) share clear patterns that make them references in the field. Collectively, these studies highlight the key mechanisms that underpin biocontrol, including the production of antifungal secondary metabolites, hydrolytic enzymes, volatile and diffusible compounds, the induction of systemic resistance in plants, and effective host colonization. Genomics, bioinformatics, and genome mining have been widely used to accurately classify BCAs and identify genetic clusters responsible for the biosynthesis of bioactive compounds such as surfactins, iturins, fengycins, and bacillaene. Innovative strategies, such as quorum quenching, also emerge as important mechanisms to disarm bacterial pathogens. These studies provide a solid foundation for researchers seeking to understand and enhance BCA efficacy, establishing themselves as key references for the development of more efficient and scientifically grounded biocontrol strategies.

## 2.4 DISCUSSION

Biological control is a form of management in which the damage caused by a pest is reduced or eliminated by a biological agent, thus attempting to reduce the average density of a “pest” population through the introduction of disease-causing agents, parasites, or predators (Krebs, 1972). Biological pest management has been employed by humanity since the 3rd century (Gonçalves, 1996); however, the scientific application of biological control emerged only at the end of the 19th century and was systematically applied in the second half of the 20th century (Huffaker, 1976).

Although the literature indicates records of scientific production since the 19th century, recent analyses show that Brazilian scientific production grew at an annual exponential rate of 6.61% between 1990 and 2017, with a significant acceleration observed from 2010 (Nascimento; Freitas; Silva, 2021). This growth is explained by the climate emergency and the need to develop more sustainable agricultural management strategies, as well as by the biotechnological advances achieved, especially in the last two decades (Chandler; Bailey; Tatchell, 2011; Spadaro; Droby, 2016).

In this sense, the scientometric analysis conducted in the present study aims to contribute to technological development in the field, focusing on studies on the molecular

mechanisms of the antagonistic interaction between the phytopathogen and its biological control agent. These studies mainly involve the use of genomic, transcriptomic, and metabolomic tools, which began to be recorded only from 1990 in the databases, corroborating the observation of a recent increase in scientific production between 2019 and 2024, with peaks in 2021 and 2023. Similarly, the annual growth rate of production on the topic of biological control (9.99%) is much lower than that observed in other scientometric studies, which reported a maximum rate of 33.7% (Yuan; Li; Wang, 2025). By limiting the study to the Web of Science and Scopus databases, part of the regional or technical literature may have been overlooked, a common limitation in bibliometric analyses. Thus, this study excludes part of the regional scientific production, especially that published in local languages or technical journals. Nevertheless, the results reveal a clear movement of consolidation in the investigation of molecular mechanisms involved in antagonistic relationships as a priority strategy. This is also corroborated by the analysis of the most cited articles and the evolution of keywords over time.

China leads global scientific output in this field, not only through the high number of publications but also by fostering international collaborations and advancing science and technology. Chinese researchers and universities play a prominent role among the most influential contributors. Although China was once the world's largest polluter, its government now implements programs aimed at steering development toward more sustainable paths, which is reflected in its scientific production (Petushkova, 2022). Furthermore, the country stands out as a major agricultural producer worldwide, leading in rice, potato, and tomato production, while also ranking among the top producers of corn and wheat. Significant investments in technological advancements and innovation have enabled it to secure a leading position globally in sustainable agriculture patents (OMPI, 2025).

India, the United States, and Brazil are leading countries in global scientific production on the topic, with Brazil closely following the USA. This proximity underscores Brazil's prominent role in the adoption and development of bioinputs. The domestic market for these products is experiencing significant growth, with the adoption rate of biological products in Brazil exceeding 35%, compared to the global average of 18% (Bettioli; Medeiros, 2023; Lopes; Silva; Rocha, 2021). According to Global Crop Protection (2025), Brazil went from only one registered biological product in 2005 to 647 registrations in 2024. Furthermore, these countries have high agricultural diversity and vulnerability to plant diseases, factors that drive the development of biological solutions for crop management (Berg, Donnelly, &

Sivasithamparam, 2009). Brazil stands out, for example, for the increasing use of biocontrol in crops such as soybean, corn, and vegetables, driven in part by public policies that promote the use of bioinputs (Lopes *et al.*, 2021).

When evaluating collaboration networks among authors, it is observed that the network configuration suggests a field characterized by high intra-country collaboration but low levels of internationalization, indicating opportunities for expansion in global research networks. European countries, especially Austria, are more active in international cooperation, but there is still much to advance in the rest of the world. An example of the importance of strengthening these collaborations is the most cited study in the area, by Palazzini *et al.* (2016), conducted by researchers from the Department of Microbiology and Immunology at the Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, and multiple departments of the National Center for Agricultural Utilization Research, Agricultural Research Service, USDA, USA. The *Bacillus subtilis* RC 218 strain was isolated in Argentina, and the field tests also took place in Córdoba Province, while genome sequencing, phylogenomic analysis, and identification of secondary metabolites, such as ericin, were performed in the USA. This division of tasks enabled globally recognized advances, thanks to the identification of locally important strains and the combination of efforts from institutes with different expertise.

The analyses of the most important keywords and their relationships over time reveal central aspects of the research fields, showing how they are structured and indicating future trends. The field is strongly structured around the terms “biocontrol,” “antagonism,” and “Trichoderma,” confirming the centrality of these concepts in studies on the interaction between biological control agents and plant pathogens. The relevance of *Trichoderma* reinforces its established role as a model organism in biocontrol, recognized for suppressing pathogens through mycoparasitism, production of antifungal metabolites, nutrient competition, and induction of resistance in host plants (Mukherjee; Horwitz; Kenerley, 2022; Martínez; López; González, 2023).

Co-occurrence analysis indicates that the literature is organized around two main axes: (i) (i) the molecular and biochemical mechanisms of antagonism (mycoparasitism, enzymes, and antimicrobial metabolites) and (ii) effects on the host plant, including growth promotion and resistance induction. Temporal analysis shows a shift in research focus: older studies (1990–2019) emphasized classical agents such as *Trichoderma*, *Bacillus subtilis*, and

*Pseudomonas fluorescens*, while recent works (2020–2024) highlight more specialized terms such as antagonistic activity, endophytes, *Bacillus amyloliquefaciens*, lipopeptides, mycoparasitism, and chitinase, indicating increasing specialization with emphasis on molecular mechanisms and practical applications for crop protection. Recent studies also incorporate “omics” approaches (transcriptomics, gene expression, and microbiome), reflecting the field’s expansion toward a deeper understanding of molecular mechanisms, secondary metabolites, and complex interactions among antagonists, pathogens, and plants. This evolution aligns with Sawangproh; Tan; Li (2025), who highlighted the transition from general antagonism studies to research targeting specific bacterial species and functional mechanisms, emphasizing sustainable strategies in biological control.

Among the various approaches to understanding the evolution of a scientific field, analyzing the most cited documents is one of the most effective. In the context of biological control of phytopathogens with antagonistic fungi, this strategy allows identifying studies that most influenced the development of the area, both theoretically and methodologically. The most cited articles demonstrate that biocontrol has evolved into a molecular science, where the focus goes beyond identifying antagonists and addressing their “molecular kits” and ecological characteristics. Genomics has become a central tool, not only for taxonomic precision but also to predict and rationally select strains with high biocontrol potential. Genome prospecting represents a scalable and efficient strategy for the identification of promising biological control agents. By analyzing microbial genomes, researchers can prioritize isolates harboring gene clusters responsible for antimicrobial compounds, lytic enzymes, siderophores, and ISR elicitors, thereby predicting their biocontrol potential before extensive experimental testing (Palazzini et al., 2016; Arguelles-Arias et al., 2009). This approach not only accelerates the discovery and development of effective BCAs but also provides mechanistic insights into the molecular strategies underlying plant protection. These results highlight that effective biocontrol rarely depends on a single mechanism but rather on the combination of multiple strategies: direct antagonism (enzymes, secondary metabolites), interference in pathogen signaling (quorum quenching), modulation of host plant defenses (ISR), and competitive colonization (biofilm formation and niche exclusion) (Innerebner et al., 2011; Chen et al., 2012; Vinale et al., 2008; Molina et al., 2003). This multifaceted action increases resilience and reliability under variable field conditions.

The findings further emphasize that microbial lifestyle traits, especially the ability to colonize roots or leaves, are as critical as the presence of biosynthetic gene clusters. The synergy between metabolite production and colonization, as observed for surfactin and biofilm formation, exemplifies the ecological integration of molecular mechanisms (Chen et al., 2012; Palazzini et al., 2016). Finally, the literature points out that genetic engineering and the development of formulations of antagonists and endophytic bacteria emerge as a logical extension of accumulated molecular knowledge. By targeting key pathways, such as biofilm matrix production, it is possible to design biological control agents with enhanced colonization and protective capacity, while selecting more efficient strains allows for higher-impact formulations. Combined with high-performance genome prospecting, these approaches provide a rational and efficient path to developing the next generation of multifunctional biological agents for sustainable agriculture

## 2.5 CONCLUSION

Through a scientometric approach, this study presented the evolution of scientific production on molecular mechanisms in antagonistic interactions between phytopathogens and biological control agents, starting in 1990 and showing significant growth from 2007 onward, with an average annual growth rate of 9.99%. The thematic focus evolved from classical agents, such as *Trichoderma* spp. and *Bacillus* spp., to molecular approaches, "omics", metabolomics, and combined antagonistic strategies. Authors and institutions from China lead in publications and collaborations, while research from Brazil and India is gaining prominence, reflecting the strengthening of international networks and the growing role of the Global South. The most influential publications highlight the transition from traditional biological control to a science based on genomics and the rational formulation of bioagents, integrating multiple mechanisms of action. Advances in "omics" technologies, genetic engineering, the exploration of secondary metabolites, and the combination of 65 multifunctional strains are identified as promising strategies for the future of the field. The study contributes to guiding research and policy support for the development of more efficient biological agents, despite the limitation of excluding regional literature.

## **ABBREVIATIONS**

BCA, Biological Control Agent; FAO, Food and Agriculture Organization; ISR, Induced Systemic Resistance; MCP, Multi-Country Publication; NRPS, Non-Ribosomal Peptide Synthetase; PGP, Plant Growth Promoter; PKS, Polyketide Synthase; PRISMA, Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; R, R programming language; SCP, Single-Country Publication; VOSviewer, Visualization of Similarities viewer; WOS, Web of Science.

## **CONFLICT OF INTEREST**

The author declares that there is not conflict of interest.

## REFERENCES

- Arguelles-Arias, A., García-Altare, M., García-Borrón, J. C., López-Mondéjar, R., Martínez-Bravo, M., & Martínez-del Campo, F. (2009). Genome mining of *Bacillus* species for nonribosomal peptide synthetase and polyketide synthase gene clusters. *Microbial Biotechnology*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-8-63>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Aristovnik, A., Ravšelj, D., & Umek, L. (2020). A bibliometric analysis of COVID-19 across science and social science research landscape. *Sustainability*, 12(21), Article 9132. <https://doi.org/10.3390/su12219132>
- Atlagić, K., Cvetić Antić, T., Lukičić, J., Kruščić, K., Živić, M., Unković, N., Pajić, T., Stevanović, K., & Todorović, N. V. (2025). Biocontrol potential of native *Trichoderma* strains toward soil-borne phytopathogenic and saprotrophic fungi. *Journal of Fungi*, 11(7), Article 535. <https://doi.org/10.3390/jof11070535>
- Berg, G., Donnelly, D., & Sivasithamparam, K. (2009). Impact of plant-associated microorganisms on plant health and development. In R. G. Burns & R. P. Dick (Eds.), *Microbial Diversity and Bioprospecting* (pp. 209–219). ASM Press. [10.1007/s00253-009-2092-7](https://doi.org/10.1007/s00253-009-2092-7)
- Bettiol, W., & Medeiros, F. H. V. de. (2023). How Brazil became the largest producer and consumer of biocontrol products. *Revista Cultivar*. <https://revistacultivar.com/articles/how-Brazil-became-the-largest-producer-and-consumer-of-biocontrol-products>
- Bradford, S. C. (1934). Sources of information on specific subjects. *Journal of Information Science*, 137, 85–86. <https://doi.org/10.1177/016555158501000406>
- Britannica. (2025). *The Green Revolution: AP® Environmental Science Review*. Albert. <https://www.albert.io/blog/the-green-revolution-ap-environmental-science-review/>
- Brito, E. S. G. (2014). *Influência da radiação solar sobre a viabilidade de isolados de fungos entomopatogênicos* [Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro]. <https://uenf.br/posgraduacao/producao-vegetal/wp-content/uploads/sites/10/2014/09/Eliane-Brito.pdf>
- Carsolio, C., Gutiérrez, A., Jiménez, B., Montagu, M., & Herrera-Estrella, A. (1994). Characterization of ech-42, a *Trichoderma harzianum* endochitinase gene expressed during mycoparasitism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(23), 10903–10907. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.23.1090>
- Ceresini, P. C., Silva, T. C., Vicentini, S. N. C., Leite Júnior, R. P., Moreira, S. I., Castro-Ríos, K., Garcés-Fiallos, F. R., Krug, L. D., Moura, S. S., Silva, A. G., Custódio, A. A. P., De Mío, L. L. M., Gasparoto, M. C. G., Portalanza, D., & Jesus Júnior, W. C. (2024). Strategies for managing fungicide resistance in the Brazilian tropical agroecosystem:

Safeguarding food safety, health, and the environmental quality. *Tropical Plant Pathology*, 49, 36–70. <https://doi.org/10.1007/s40858-023-00632-2>

**Chandler, D., Bailey, A. S., Tatchell, G. M., Davidson, G., Greaves, J., & Grant, W. P. (2011).** The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1573), 1987–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0390>

**Chen, Y., Cao, S., Chai, Y., Clardy, J., Kolter, R., Guo, J. H., & Losick, R. (2012).** A *Bacillus subtilis* sensor kinase involved in triggering biofilm formation on the roots of tomato plants. *Molecular Microbiology*, 85(3), 418–430. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2012.08109.x>

**Croplife Brasil. (2025).** *Bioinsumos do Brasil: Dados de mercado do setor*. Brasília: Croplife Brasil. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/publicacao/bioinsumos-do-brasil-dados-de-mercado-do-setor/>

**Croplife Brasil. (2024).** *Mercado de bioinsumos cresceu 15% na safra 2023-2024*. Brasília: Croplife Brasil. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/mercado-de-bioinsumos-cresceu-15-na-safra-2023-2024>

**Ellegaard, O., & Wallin, J. A. (2015).** The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact? *Scientometrics*, 105(3), 1809–1831. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1645-z>

**Embrapa. (2025).** *Diversification of microorganisms for disease control and increased resilience in soybean and common bean in the South-Central region*. <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/222156/micro-diversificacao-de-microrganismos-para-o-controle-de-doencas-e-aumento-da-resiliencia-em-soja-e-feijoeiro-no-centro-sul>

**FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021).** *Climate change fans spread of pests and threatens plants and crops, new FAO study*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/Climate-change-fans-spread-of-pests-and-threatens-plants-and-crops-new-FAO-study/zh>

**Gai, Y., & Wang, H. (2024).** Plant disease: A growing threat to global food security. *Agronomy*, 14(8), Article 1615. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081615>

**Global Crop Protection. (2025).** *The biological pesticides market in Brazil: Main highlights and expectations for the future*. <https://globalcropprotection.com/noticias/analises-gcp/o-mercado-de-defensivos-biologicos-no-brasil-principais-destaques-e-expectativas-para-o-futuro/>

**Godoy, C. V., Seixas, C. D. S., Soares, R. M., Marcelino-Guimarães, F. C., Meyer, M. C., & Costamilan, L. M. (2016).** Asian soybean rust in Brazil: Past, present, and future. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(5), 407–421. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000500001>

**Gonçalves, L. (1996).** Historical facts of biological control. *Floresta e Ambiente*, 3, 96–101. <https://www.floram.org/article/588e224be710ab87018b470f/pdf/floram-3-unico-96.pdf>

**Gu, Y., Wang, Z., Zhang, Y., & Yuan, J. (2017).** Bacillomycin D induces plasma membrane disruption and reactive oxygen species accumulation leading to *Fusarium graminearum* cell death. *Frontiers in Microbiology*, 8, Article 1297. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01297>

**Harman, G. E. (2006).** Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. *Phytopathology*, 96(2), 190–194. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0190>

**Hegde, G. M., & Monisha, L. (2024).** *Challenges and potentials of microbial consortia for plant disease management and sustainable productivity*. Asia Pacific Biofertilizer and Biopesticide Information Platform. <https://apbb.fftc.org.tw/article/611>

**Hernández-Rosas, F., Figueroa-Rodríguez, K. A., García-Pacheco, L. A., Velasco-Velasco, J., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2020).** Microorganisms and biological pest control: An analysis based on a bibliometric review. *Agronomy*, 10(11), Article 1808. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111808>

**Howell, C. R. (2003).** Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: The history and evolution of current concepts. *Plant Disease*, 87(1), 4–10. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.1.4>

**Huffaker, C. B., & Messenger, P. S. (Eds.). (1976).** *Theory and practice of biological control*. Academic Press.

**Innerebner, G., Knief, C., & Vorholt, J. A. (2011).** Protection of *Arabidopsis thaliana* against leaf-pathogenic *Pseudomonas syringae* by *Sphingomonas* strains in a controlled model system. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(10), 3202–3210. <https://doi.org/10.1128/AEM.00133-11>

**Khan, N., Martínez-Hidalgo, P., Ice, T. A., Maymon, M., Humm, E. A., Nejat, N., Sanders, E. R., Kaplan, D., & Hirsch, A. M. (2018).** Antifungal activity of *Bacillus* species against *Fusarium* and analysis of the potential mechanisms used in biocontrol. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 2363. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02363>

**Krebs, C. J. (1972).** *Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance*. Harper & Row.

**Lopes, R. B., Melo, I. S., & Carvalho, D. D. C. (2021).** *Biological control in Brazil: Advances, challenges, and perspectives*. Embrapa Meio Ambiente. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1133096/controlo-biologico-no-brasil-avancos-desafios-e-perspectivas>

**Lotka, A. J. (1926).** The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 16(12), 317–323. [suspicious link removed]

**Martínez, Y., Ribera, J., Schwarze, F. W. M. R., & De France, K. (2023).** Biotechnological development of *Trichoderma*-based formulations for biological control.

*Applied Microbiology and Biotechnology*, 107, 5595–5612. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12687-x>

**Massi, F., Torriani, S. F. F., Borghi, L., & Toffolatti, S. L. (2021).** Fungicide resistance evolution and detection in plant pathogens: *Plasmopara viticola* as a case study. *Microorganisms*, 9(1), Article 119. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010119>

**Molina, L., de Fago, G., & Duffy, B. (2006).** Autoinduction in *Erwinia amylovora*. *Acta Horticulturae*, 704, 443–448. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.704.66>

**Montesinos, E. (2003).** Development, registration and commercialization of microbial pesticides for plant protection. *International Microbiology*, 6(4), 245–252. <https://doi.org/10.1007/s10123-003-0144-x>

**Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Herrera-Estrella, A., Scholl, M., & Kenerley, C. M. (2022).** *Trichoderma* research in the genome era. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 115–138. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102353>

**Nascimento, D. S. A., Souza, R. F., Silva Junior, J. J., & Silva, L. R. (2021).** Exponential projections of Brazilian science: Models and quantitative analyses of national scientific production published in the last 30 years. *Informação & Informação*, 26(1), 53–73. <https://doi.org/10.5433/1981-8920.2021v26n1p53>

**Palazzini, J. M., Dunlap, C. A., Bowman, M. L. J., & Chulze, S. N. (2016).** *Bacillus velezensis* RC 218 as a biocontrol agent to reduce Fusarium head blight and deoxynivalenol accumulation: Genome sequencing and secondary metabolite cluster profiles. *Libro de Abstracts*. Embrapa. <https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/11590734>

**Petushkova, V. V. (2022).** China's experience and prospects for sustainable development: Balancing economy, society, and environment. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 92(2), 209–218. <https://doi.org/10.1134/S1019331622020095>

**R Core Team. (2024).** *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

**Sawangproh, W., Paejaroen, P., Afifah, L., & Phaenark, C. (2025).** Microbial pesticides: A bibliometric analysis of global research trends (1973–2024). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 35(2), Article 2. <https://doi.org/10.1186/s41938-025-00840-9>

**Singh, V. K., Singh, P., Karmakar, M., Leta, J., & Mayr, P. (2021).** The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. *Scientometrics*, 126(6), 5113–5142. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03948-5>

**Spadaro, D., & Droby, S. (2016).** Development of biocontrol products for postharvest diseases of fruit. *Trends in Food Science & Technology*, 47, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.003>

**Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010).** Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

**Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2008).** *Trichoderma*–plant–pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.002>

**Woo, S. L., Ruocco, M., Vinale, F., Nigro, M., Marra, R., Lombardi, N., Pascale, A., Lanzuise, S., Manganiello, G., & Lorito, M. (2014).** *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. *The Open Mycology Journal*, 8, 71–126. <https://doi.org/10.2174/1874437001408010071>

**World Intellectual Property Organization. (2025).** *Agrifood patent landscape in Brazil*. Geneva. <https://www.wipo.int/web/patent-analytics/w/agrifood-patent-landscape-in-brazil>

**Worldometers. (2025).** *World population projections*. <https://www.worldometers.info/world-population/world-population-projections/>

**Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023).** *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*, 14, Article 1160551. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>

**Yuan, Z., Shen, Q., Yu, K., Liu, Y., Zheng, H., Yao, Y., & Jia, B. (2025).** Half century scientometric analysis: Unveiling the excellence of fungi as biocontrol agents and biofertilisers. *Journal of Fungi*, 11(2), Article 117. <https://doi.org/10.3390/jof11020117>

**Zupic, I., & Čater, T. (2015).** Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>

**3 ARTIGO 2 - *TALAROMYCES STOLLII* COMO AGENTE DE BIOCONTROLE DE *MACROPHOMINA PHASEOLINA* E *SCLEROTINIA SCLEROTIORUM* EM CONDIÇÕES *IN VITRO***

Artigo a ser submetido à Revista Científica

<https://cientifica.dracena.unesp.br/index.php/cientifica/about>

## RESUMO

A crescente demanda por alternativas sustentáveis no manejo de doenças agrícolas tem impulsionado a busca por agentes biológicos eficazes e ambientalmente seguros. Este estudo avaliou o potencial do fungo *Talaromyces stollii* cepa BCA1.1 como agente de biocontrole de patógenos de solo. Ensaios de cultura dupla foram conduzidos com *Sclerotinia sclerotiorum* e *Macrophomina phaseolina* para avaliar antagonismo direto, enquanto mecanismos indiretos foram testados utilizando sobrenadante filtrado e compostos voláteis produzidos por *T. stollii*. O cultivo em meio sólido, o acompanhamento do desenvolvimento micelial e análises microscópicas permitiram determinar o percentual de inibição e os padrões de micoparasitismo. Os resultados mostraram que *T. stollii* inibiu o crescimento dos patógenos apenas mediante contato direto, caracterizando micoparasitismo e competição por espaço, sem efeito significativo dos sobrenadantes ou compostos voláteis. O micoparasitismo apresentou padrões distintos: contra *S. sclerotiorum*, as hifas de *T. stollii* se projetaram de diferentes lados e se entrelaçaram, formando uma espiral ao redor do micélio do patógeno; contra *M. phaseolina*, houve enrolamento direto das hifas do fungo ao redor das hifas do patógeno. As taxas médias de inibição na primeira avaliação foram 55,71% para *M. phaseolina* e 66,57% para *S. sclerotiorum*, aumentando na segunda avaliação para 75,24% e 73,76%, respectivamente. Estes resultados indicam que a aplicação de *T. stollii* deve garantir contato direto com o patógeno, destacando seu potencial como biofungicida, com versatilidade ecológica e estabilidade em solo, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e redução do uso de defensivos químicos.

**Palavras-chave:** antagonismo fúngico; micoparasitismo; metabolismo secundário; patógenos de solo; sustentabilidade

## ABSTRACT

The increasing demand for sustainable alternatives in crop disease management has driven the search for effective and environmentally safe biological agents. This study evaluated the potential of the fungus *Talaromyces stollii* strain BCA1.1 as a biocontrol agent against soilborne pathogens. Dual culture assays were conducted with *Sclerotinia sclerotiorum* and *Macrophomina phaseolina* to assess direct antagonism, while indirect mechanisms were tested using cell-free culture filtrates and volatile compounds produced by *T. stollii*. Growth monitoring on solid medium and microscopic analyses allowed determination of inhibition rates and mycoparasitism patterns. Results showed that *T. stollii* inhibited pathogen growth only through direct contact, exhibiting mycoparasitism and space competition, with no significant effect from filtrates or volatile compounds. Mycoparasitism patterns differed between pathogens: against *S. sclerotiorum*, *T. stollii* hyphae projected from multiple directions and intertwined, forming a spiral around the pathogen's mycelium; against *M. phaseolina*, the hyphae directly coiled around the pathogen's hyphae. Average inhibition rates in the first assessment were 55.71% for *M. phaseolina* and 66.57% for *S. sclerotiorum*, increasing in the second assessment to 75.24% and 73.76%, respectively. These findings indicate that effective application of *T. stollii* requires direct contact with the pathogen, highlighting its potential as a biofungicide with ecological versatility and soil stability, contributing to sustainable agricultural practices and reduced chemical fungicide use.

**Keywords:** fungal antagonism; mycoparasitism; secondary metabolism; soilborne pathogens; sustainability

### 3.1 INTRODUÇÃO

O uso de bioinsumos na agricultura tem se destacado como uma alternativa sustentável e promissora para o manejo de doenças de plantas, pois oferece múltiplos mecanismos de ação, como micoparasitismo, produção de metabólitos antimicrobianos e indução de resistência nas plantas, além de reduzir a dependência de fungicidas químicos e os impactos ambientais associados ao manejo exclusivamente químico (Silva *et al.*, 2025).

Além disso, a adoção do controle biológico reduz os custos de produção uma vez que os gastos com os insumos químicos são reduzidos (Cruz *et al.*, 2025). Os microrganismos usados nos bioinsumos podem atuar por diferentes mecanismos, os quais incluem competição por nutrientes e espaço, produção de substâncias antimicrobianas, micoparasitismo, promoção de crescimento em plantas, indução de resistência e manutenção da biodiversidade e saúde do solo e do equilíbrio ecológico dos sistemas agrícolas (Vidal-Martínez *et al.*, 2021).

As doenças fúngicas representam um dos maiores desafios na produção agrícola, afetando o crescimento das plantas, a formação de grãos e a produtividade das lavouras. Relatórios técnicos da Embrapa indicam que doenças de plantas são responsáveis por uma parte considerável das perdas agrícolas, com estimativas de que cerca de 15% das perdas totais na produção mundial estejam associadas a doenças fitopatogênicas, incluindo as fúngicas, o que evidencia seu impacto econômico e produtivo (Embrapa, 2025).

O controle tradicional por fungicidas químicos sintéticos, embora relativamente eficiente, apresenta limitações crescentes devido à seleção de patógenos resistentes, à toxicidade ambiental e aos riscos à saúde humana, o que reforça a necessidade de buscar alternativas mais seguras e sustentáveis para proteger as culturas (Hoffmann *et al.*, 2024). Nesse sentido, a adoção do controle biológico representa uma alternativa sustentável para a proteção de plantas, integrando-se como um pilar fundamental do Manejo Integrado de Pragas (MIP).

Essa estratégia utiliza microrganismos que combatem naturalmente os causadores de doenças, minimizando o uso de produtos químicos e os danos ao meio ambiente (Gajera *et al.*, 2012). Os fungos têm se destacado como aliados naturais no controle biológico de doenças agrícolas, especialmente devido à sua capacidade de combater patógenos por meio de diversos

mecanismos, como produção de substâncias antimicrobianas, competição por nutrientes e micoparasitismo (Köhl *et al.*, 2019; Michereff, 2001).

O gênero *Talaromyces* tem recebido crescente atenção devido ao seu potencial em aplicações biotecnológicas, especialmente na produção de metabólitos secundários com atividade antimicrobiana e no controle biológico de fitopatógenos (Zhai *et al.*, 2016). Espécies desse gênero apresentam elevada diversidade metabólica e capacidade de interação com outros microrganismos, o que favorece sua aplicação no manejo sustentável de doenças agrícolas (Nicoletti; Salvatore; Andolfi, 2018).

Pesquisas conduzidas pela Universidade Estadual do Norte do Paraná (UENP, 2020) demonstraram o potencial de *Talaromyces funiculosus* (atualmente *Talaromyces stollii*) no controle da ferrugem asiática da soja, com atuação associada ao micoparasitismo e à produção de metabólitos bioativos. Como resultado dessas investigações, foi concedida a Carta Patente nº BR 102020015323-4, reconhecendo o uso desse microrganismo como agente de controle biológico da doença (INPI, 2020).

Entre os microrganismos biocontroladores, *T. stollii* tem se mostrado promissor por sua capacidade de atuar contra diferentes fungos e bactérias fitopatogênicos, ampliando as possibilidades de manejo biológico (Vignassa *et al.*, 2024). Apesar disso, o modo de ação desse fungo ainda não está completamente esclarecido, especialmente em relação a patógenos como *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum*. Com isso, o presente estudo teve como objetivo investigar se o *T. stollii* isolado na UENP cepa BCA 1.1 é capaz de reduzir o crescimento desses fitopatógenos em condições *in vitro*, além de avaliar se o micoparasitismo é o mecanismo fúngico envolvido nesse processo, contribuindo para um melhor entendimento de seu potencial como agente de controle biológico.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### Material biológico

Os materiais biológicos utilizados foram um isolado de cada espécie. A cepa BCA1.1 de *Talaromyces stollii* (depósito CBMAI 2830 foi obtida da Coleção Brasileira de Microrganismos de Ambiente e Indústria – CBMAI, CPQBA/Unicamp). Os isolados de *Macrophomina phaseolina* e *Sclerotinia Sclerotiorum* foram cedidos pelo Laboratório de Biotecnologia Microbiana (LABIM) da Universidade Estadual de Londrina (UEL). As amostras fúngicas utilizadas no presente estudo foram obtidas a partir de discos de micélio mantidos a -20 °C em microtubos contendo meio BD (batata e dextrose) com 30% de glicerol.

### Ensaio de Cultura Dupla

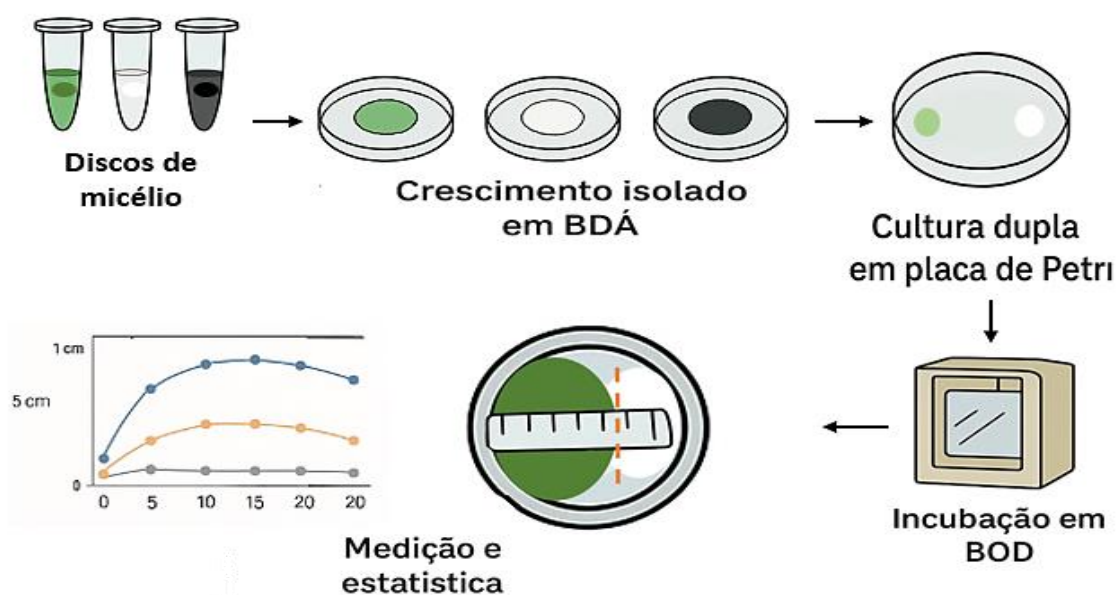
Os experimentos foram realizados no Laboratório de Genética e Biologia Molecular da Universidade Estadual do Norte do Paraná, campus Luiz Meneghel (UENP-CLM). Ensaio de cultura dupla da cepa de *T. stollii* BCA1.1 e dos fungos fitopatogênicos *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* foram realizados objetivando avaliar o efeito do *T. stollii* sobre o crescimento micelial dos fitopatógenos (Figura 1). Foram conduzidos três ensaios independentes em DIC (delineamento inteiramente casualizado) com intervalo de 10 dias entre eles e cinco repetições de cada tratamento.

As espécies fúngicas foram previamente cultivadas individualmente em placas de Petri contendo meio de cultura BDA (batata, dextrose e ágar), incubadas a 25 °C, sob fotoperíodo de 12 h luz/12 h escuro, por 10 dias. Após o desenvolvimento das colônias realizou-se o pareamento das culturas, retirando-se um disco de micélio da borda da colônia de *M. phaseolina* ou *S. sclerotiorum* e um disco de micélio de *T. stollii*, os quais foram inoculados em extremidades opostas de uma placa de Petri contendo BDA, equidistantes do centro e a 1 cm da borda.

As placas foram incubadas a 25 °C, sob fotoperíodo de 12 h luz/12 h escuro, por 20 dias. O tratamento controle consistiu em placas contendo apenas um disco de micélio do fitopatógeno ou de *T. stollii*, inoculado a 1 cm da borda da placa. Durante o período de incubação, o diâmetro das colônias foi mensurado a cada 24 h, medindo-se o crescimento micelial, do disco de inoculação até a borda da colônia.

O crescimento micelial foi avaliado em placas controle e em culturas pareadas em dois momentos do experimento: (i) no instante em que os micélios de *T. stollii* e de *M. phaseolina* ou *S. sclerotiorum* se encontraram na placa de Petri e (ii) ao final do experimento, 20 dias após a inoculação. Com base nos valores obtidos, determinou-se a porcentagem de inibição do crescimento micelial (%ICM), calculada pela fórmula  $\%ICM = [(DC - DCP) / DC] \times 100$ , em que DC corresponde ao diâmetro do micélio do fungo fitopatogênico na condição controle e DCP ao diâmetro do micélio na cultura pareada.

A variação do crescimento micelial de *T. stollii*, *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* ao longo do tempo foi representada em gráficos elaborados no software estatístico R (versão 2023.03.0), permitindo a visualização da dinâmica de crescimento e das diferenças entre os tratamentos.



**Figura 1.** Esquema representativo do ensaio de cultura dupla entre *T. stollii* e os fitopatógenos *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum*. Ilustração criada com BioRender.

### Avaliação da ocorrência de Micoparasitismo nas interações entre *T. stollii* e *M. phaseolina* ou *S. sclerotiorum*

A avaliação da ocorrência de micoparasitismo foi realizada a partir das placas de cultura dupla de *T. stollii* com cada fungo patogênico (*M. phaseolina* ou *S. sclerotiorum*) em

cada um dos três ensaios realizados, de forma independente das placas utilizadas no ensaio de cultura dupla descrito anteriormente. Em cada placa de Petri, 72 h após o encontro dos micélios fúngicos, um pedaço de fita adesiva transparente foi pressionado no local onde o micélio do *T. stollii* havia crescido e esporulado sobre o micélio do fitopatógeno.

A fita adesiva com a amostra de micélio, com aproximadamente **5 cm de comprimento** e 1 cm de largura, foi então colocada sobre uma lâmina de microscópio com uma gota de corante azul de algodão com lactofenol a 0,05% e observada em microscópio óptico em aumentos de 400× e 1.000×. As imagens foram registradas utilizando uma câmera digital com resolução de 12 MP, abertura f/1.6, tempo de exposição de 1/120 s e ISO 100. Posteriormente, as imagens foram tratadas e ajustadas para uma resolução de 300 dpi, garantindo qualidade adequada para documentação e análise (Figura 2).

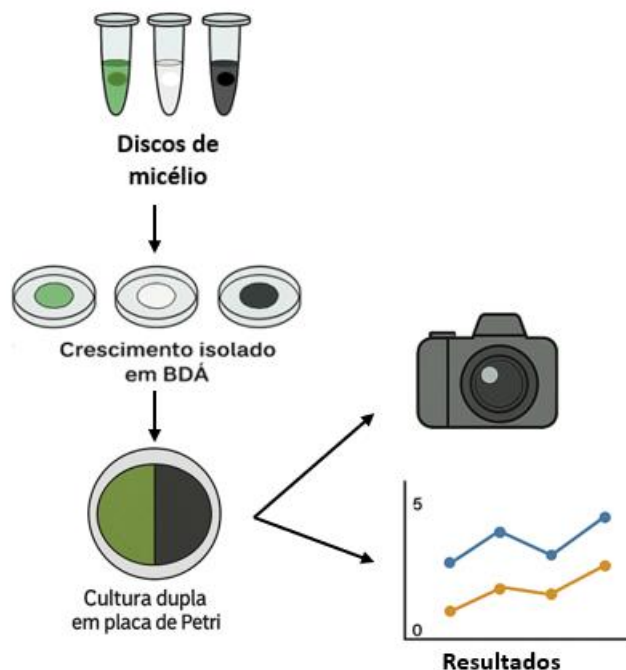


**Figura 2.** Esquema representativo do procedimento utilizado para a análise de micoparasitismo. Ilustração criada com BioRender.

### **Avaliação da Produção de Compostos Voláteis Fungicidas por *T. stollii***

O experimento foi conduzido para avaliar a capacidade de *T. stollii* em produzir compostos voláteis com potencial de inibir o crescimento micelial da *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* em placas de Petri com dois compartimentos (Figura 3). Discos de micélio com 5 mm de diâmetro do *T. stollii*, *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* foram obtidos da cultura de cada fungo após 144 h de crescimento em meio BDA à 25 °C e fotoperíodo de 12 h luz/12 h escuro. Em placas de Petri de 90 mm de diâmetro contendo meio BDA foi colocado em cada compartimento um disco de micélio junto à barreira que divide a placa (Figura 3). Foram realizados três tratamentos: 1) *T. stollii*/*M. phaseolina*; 2) *T. stollii*/*S. sclerotiorum* e 3) *T. stollii*/*T. stollii*. As placas foram embaladas individualmente com plástico filme de PVC e incubadas por 14 dias à 28 °C e fotoperíodo de 12 h luz/12 h escuro. O delineamento

experimental foi inteiramente casualizado (DIC) com três repetições (placas de Petri) por tratamento.



**Figura 3.** Esquema metodológico da avaliação do potencial de *T. stollii* em produzir compostos voláteis fungicidas contra *S. sclerotiorum* e *M. phaseolina*. Ilustração criada com BioRender

### **Avaliação do potencial de Produção de Metabólitos Fungicidas por *T. stollii* em meio líquido**

Os fungos *T. stollii*, *S. sclerotiorum* e *M. phaseolina* foram inicialmente cultivados individualmente em placas de Petri contendo meio BDA e incubados por 7 dias a  $25\pm 2$  °C, sendo em seguida retirados discos de micélio de 10 mm de diâmetro para preparo dos inóculos.

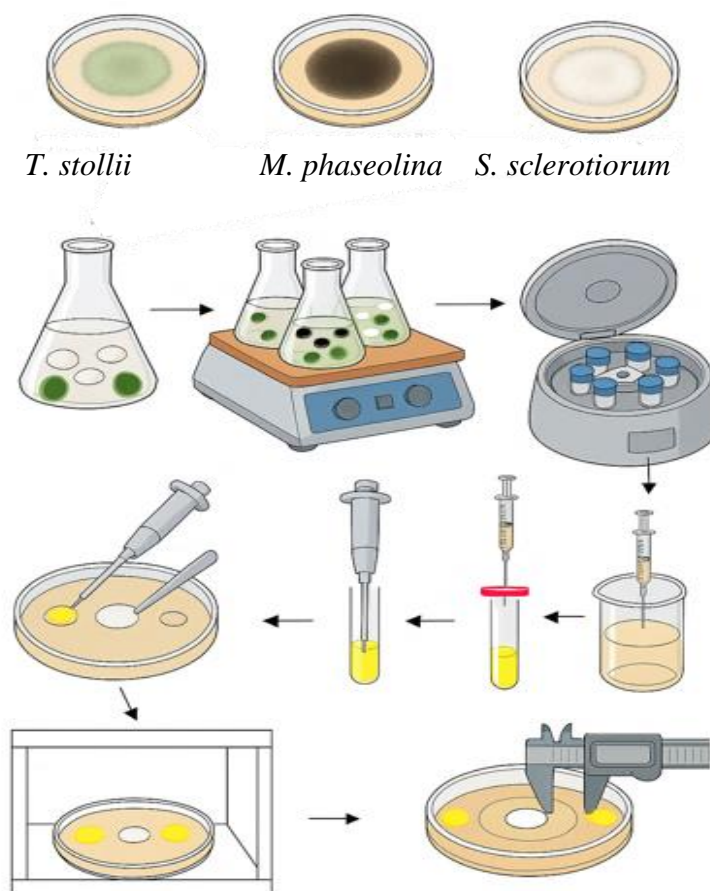
Foram utilizados frascos Erlenmeyer de 500 mL, contendo 250 mL de meio líquido BD (Batata-Dextrose) para os seguintes tratamentos: (i) controle com 2 discos de *T. stollii*; (ii) co-cultivo com 2 discos de *T. stollii* + 3 discos de *S. sclerotiorum*; (iii) co-cultivo com 2 discos de *T. stollii* + 3 discos de *M. phaseolina*, sendo cada tratamento realizado em três repetições, totalizando 9 frascos (Figura 4).

Os Erlenmeyers foram incubados em agitador orbital a 120 rpm e  $25\pm 2$ °C por 144 h.

Após esse período, 12 mL da cultura foram transferidos para tubos Falcon e centrifugados a 4.000 rpm por 15 minutos. O sobrenadante obtido foi transferido para béquer estéril e 5 mL e foi coletado com auxílio de seringa acoplada a filtro de membrana esterilizante de 0,22  $\mu\text{m}$ .

Para o ensaio de antibiose, placas de Petri contendo meio BDA foram preparadas com dois poços (6 mm de diâmetro), posicionados a 1 cm da borda da placa e equidistantes do centro. No centro de cada placa foi depositado um disco de micélio (10 mm) do fitopatógeno (*S. sclerotiorum* ou *M. phaseolina*). Em cada poço foram adicionados 100  $\mu\text{L}$  do sobrenadante estéril, totalizando 200  $\mu\text{L}$  por placa. Foram utilizadas 12 placas, sendo quatro com *S. sclerotiorum*, quatro com *M. phaseolina* e quatro controles, nos quais o sobrenadante obtido do cultivo de *T. stollii* puro ou em co-cultivo com um dos fitopatógenos foi testado.

As placas foram incubadas a  $25\pm 2^\circ\text{C}$  até o crescimento completo do controle. A atividade antifúngica foi avaliada pela formação de halos de inibição ao redor dos poços e/ou pela redução do crescimento radial do fitopatógeno em direção ao sobrenadante, sendo os resultados registrados por fotografias digitais e mensuração dos halos com paquímetro digital.



**Figura 4.** Fluxograma metodológico do ensaio de avaliação da produção de metabólitos fungicidas por *T. stollii* contra *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum*. Ilustração criada com BioRender.

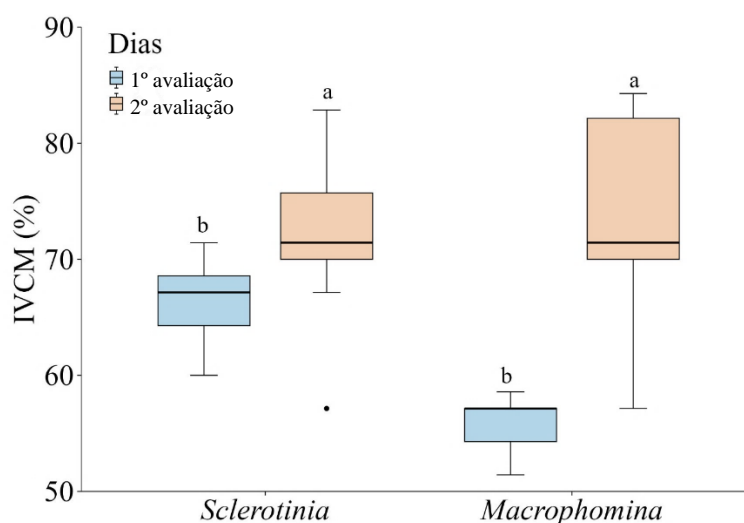
### Índice de Crescimento Micelial (ICM)

Com o objetivo de verificar se o Índice de Crescimento Micelial (ICM) se manteve ou aumentou após o encontro entre os fungos, foi realizada uma análise estatística comparando os valores obtidos em duas avaliações consecutivas. Para cada fungo fitopatogênico (*M. phaseolina* e *S. sclerotiorum*), a primeira avaliação considerou o crescimento micelial do patógeno no controle (sem a presença do antagonista) como referência, enquanto a segunda avaliação ocorreu ao final do período experimental, aos 20 dias, considerando o período posterior ao encontro dos micélios. As comparações foram realizadas separadamente para cada fungo, utilizando o teste não paramétrico de Mann–Whitney. As análises estatísticas foram conduzidas no programa R, adotando-se nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ).

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de cultura dupla demonstraram que *T. stollii* cepa BCA 1.1 é capaz de inibir o crescimento micelial de *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum*. Os valores apresentados correspondem à média de três ensaios independentes, realizados com intervalos de 10 dias entre o início de cada ensaio, sendo cada um constituído de cinco repetições. Na 1ª avaliação, o valor de ICM foi de 55,71% para *M. phaseolina* (5º dia após a inoculação) e 66,57% para *S. sclerotiorum* (7º dia após a inoculação). Na 2ª avaliação, no 20º dia após a inoculação dos fungos, os valores de ICM aumentaram para 75,24% para *M. phaseolina* e 73,76% para *S. sclerotiorum* (Figura 5).

Os resultados de ICM e a observação das placas ao longo do experimento, demonstram que *T. stollii*, manteve seu crescimento micelial após o encontro dos micélios até o término do experimento, enquanto ambos fitopatógenos mostraram redução no diâmetro micelial, provocada pela ação antagonista de *T. stollii*. Para ambos os fungos fitopatógenos, os valores de ICM foram maiores na segunda avaliação (20 DAI) em comparação à primeira avaliação (5 DAI para *M. phaseolina* e 7 DAI para *S. sclerotiorum*), indicando que o crescimento micelial se manteve ou aumentou após o encontro com o antagonista. Esses resultados estão representados na Figura 5.



**Figura 5.** Inibição do Crescimento Micelial (ICM, %) dos fitopatógenos *S. sclerotiorum* e *M. phaseolina*, por *T. stollii* na primeira e segunda avaliação após a inoculação (DAI).

### ***Inibição do Crescimento Micelial de M. phaseolina***

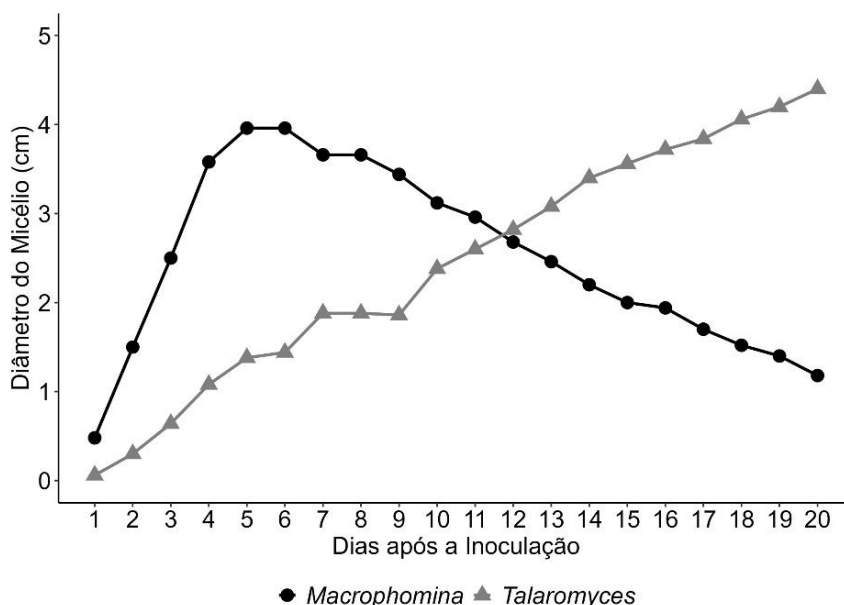
A inibição de fungos fitopatógenos por espécies do gênero *Talaromyces* já foi observada na literatura. Por exemplo, Yang et al. (2024) relataram que *T. muroii* TM28 inibiu 87,8% do crescimento micelial de *Fusarium pseudograminearum* após 72 horas, evidenciando o potencial do gênero como agente de biocontrole.

Até o momento, não há relatos específicos de *T. stollii* produzindo compostos voláteis com efeito antifúngico sobre *M. phaseolina* ou *S. sclerotiorum*. Espécies próximas, como *T. flavus*, foram descritas como capazes de liberar compostos voláteis com efeito antifúngico, embora essa atividade dependa da cepa, do meio de cultivo e das condições de incubação (Abdel-Rahim & Abo-Elyousr, 2018).

A ausência de efeito volátil observada neste estudo pode estar relacionada à cepa utilizada ou às condições experimentais adotadas, ressaltando a necessidade de investigações futuras sobre a capacidade de produção de VOCs no gênero *Talaromyces*. Esses resultados confirmam que espécies do gênero podem ser eficientes no controle de fungos que prejudicam culturas agrícolas, reforçando o potencial do *T. stollii* como agente de biocontrole.

A Figura 6 apresenta o aumento no tamanho dos micélios (distância do disco até a borda do micélio) da *M. phaseolina* e *T. stollii* em cultura dupla ao longo de 20 dias. Foi

observado que o micélio de *M. phaseolina* (tamanho= 4 cm) cresceu mais rapidamente que o *T. stollii* (tamanho= 1,5 cm) até o encontro de ambos no 5º dia após inoculação. Entre o 5º e 6º dia dos ensaios, não foi observado crescimento micelial de ambos os fungos, possivelmente devido ao período em que o antagonista (*T. stollii*) ainda se encontrava em fase de adaptação e estabelecimento na placa, retardando a expansão do micélio do fitopatógeno. Após este período, apenas o micélio do *T. stollii* reiniciou o crescimento micelial e apresentou esporulação sobre o micélio do fitopatógeno, continuando a crescer até o final do experimento.



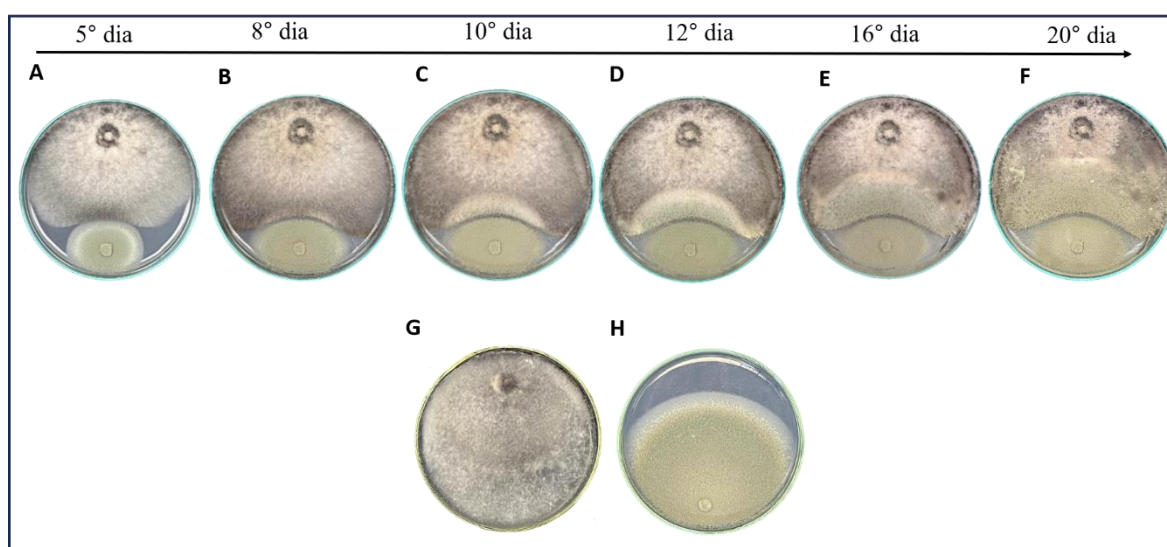
**Figura 6.** Diâmetro do micélio do fungo fitopatogênico *M. phaseolina* cultivado em cultura dupla com o fungo antagonista *T. stollii* durante o período de 20 dias.

A observação do crescimento micelial de *M. phaseolina* até o 5º dia do cocultivo confirma as características de *M. phaseolina* como fungo de crescimento rápido em condições *in vitro*, o que pode estar relacionado a sua alta capacidade de colonização em tecidos vegetais, além de causar doença em uma ampla gama de hospedeiros e ser um fitopatógeno de difícil controle no campo (Marquez *et al.* 2021).

Entretanto, a partir do 6º dia de crescimento, *M. phaseolina* passou a reduzir sua taxa de expansão, enquanto *T. stollii* manteve seu crescimento. Entre o 11º e 12º dias, as duas curvas de crescimento se cruzaram, e a partir deste momento o antagonista passou a ocupar maior espaço na placa. Ao 20º dia, o micélio de *T. stollii* atingiu aproximadamente 5 cm de

diâmetro, enquanto o patógeno se manteve restrito a cerca de 1,5 cm, evidenciando que a interação entre os dois microrganismos resultou em inibição significativa de *M. phaseolina*.

As imagens seriadas (Figura 7 A-F) obtidas nos 5°, 8°, 10°, 12°, 16° e 20° dias após a inoculação na cultura pareada corroboram os dados do gráfico. Nas imagens é observado que no 5° dia (Figura 7A) os micélios dos dois fungos se encontram e a partir desse dia o tamanho do micélio do fitopatógeno não aumenta, enquanto o antagonista cresce e esporula sobre a *M. phaseolina* (Figura 7 B-F).

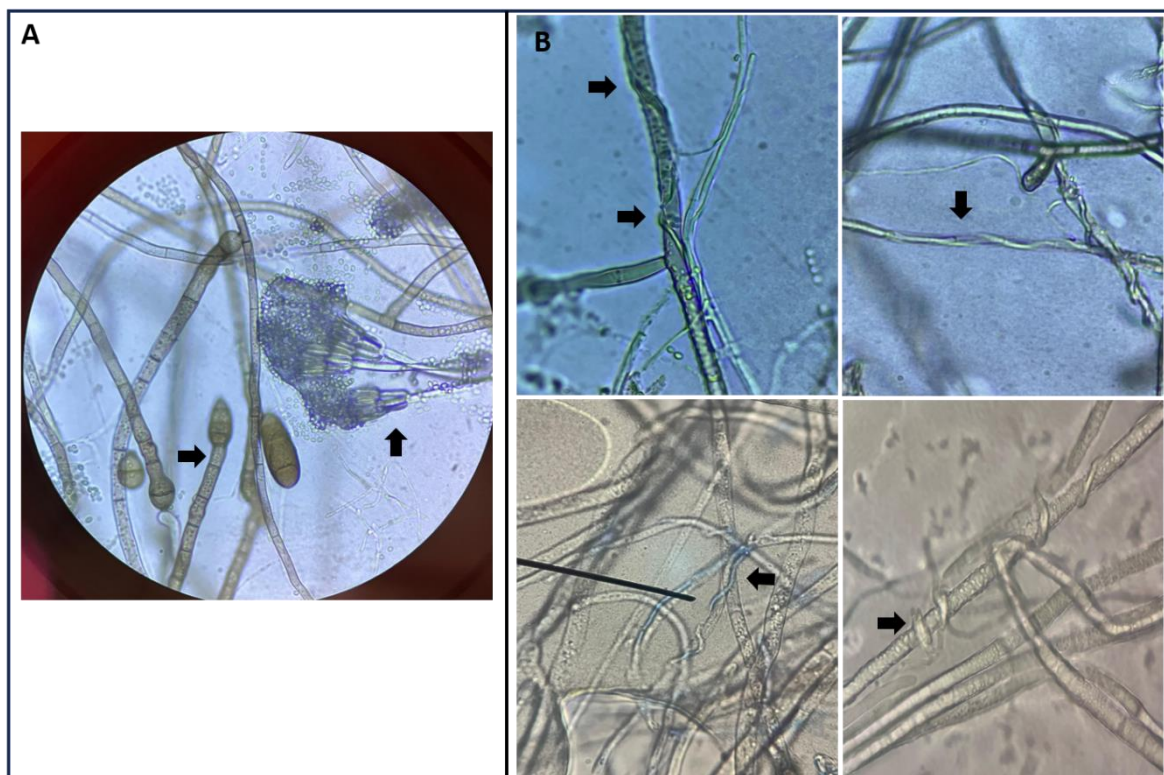


**Figura 7.** Imagens da cultura dupla de *Macrophomina phaseolina* com *Talaromyces stollii* no obtidas no 5° dia (A), 8° dias (B), 10° dia (C), 12° dia (D), 16° dia (E) e 20° dia (F) após a inoculação de ambos os fungos na placa de Petri. A imagem (G) e (H) são imagens do crescimento de *M. phaseolina* e *T. stollii*, respectivamente, na condição controle.

Portanto, nos primeiros dias o fitopatógeno dominava a placa, porém após o encontro com o antagonista, o micélio do fitopatógeno parou seu desenvolvimento. Nos controles (Figuras 7 G e H), em que cada microrganismo foi cultivado isoladamente, ambos apresentaram crescimento contínuo, confirmando que a inibição do crescimento do fitopatógeno foi devida à interação direta entre os dois fungos.

As fotomicrografias obtidas da região de sobreposição do micélio do *T. stollii* sobre *M. phaseolina* mostram um mecanismo de inibição do crescimento micelial do fitopatógeno por micoparasitismo (Figura 8). Os dois fungos apresentam características morfológicas distintas, que permitem diferenciá-los por microscopia de luz: as hifas de *M. phaseolina* apresentam maior diâmetro e são septadas enquanto as hifas de *T. stollii* são

finas, septadas e mais ramificadas. As hifas do *T. stollii* (indicadas pelas setas na Figura 8) em determinadas regiões estão aderidas paralelamente às hifas espessas da *M. phaseolina* e observa-se o enrolamento das hifas de *T. stollii* ao redor das hifas do fitopatógeno.



**Figura 8. Interação entre *Macrophomina phaseolina* e *Talaromyces stollii*.** a) Hifas de *M. phaseolina* (marrom) e de *T. stollii* (azul) dispostas lado a lado; aumento 400×. b) Micoparasitismo de *T. stollii* sobre *M. phaseolina*, com setas indicando as hifas de *T. stollii* parasitando as hifas do fungo fitopatogênico (azuis); aumento 1000×.

O crescimento sobre o micélio e o enrolamento nas hifas do fitopatógeno pelo *T. stollii* é descrito também em outros estudos que observaram a inibição do crescimento de fitopatógenos por micoparasitismo em cultura dupla com os antagonistas *Trichoderma harzianum* (Azevedo *et al.* 2020) e *Talaromyces pinophilus* (Abdel-Rahim; Abo-Elyousr, 2018). Segundo Benítez *et al* (2004) a adesão das hifas do fungo antagonista nas hifas do fitopatógeno representa a etapa inicial do micoparasitismo. Em seguida ocorre a produção e secreção de enzimas hidrolíticas (quitinases,  $\beta$  1-3 glucanases, lipases e proteases) pelo antagonista, as

quais são capazes de degradar a parede celular das hifas do fitopatógeno e liberar nutrientes que são absorvidos pelo fungo (Halo *et al* 2019).

Harman (2006) descreve que fungos antagonistas como *Trichoderma* combinam o micoparasitismo e produção de metabólitos secundários para inibir o crescimento de fitopatógenos. Diversos estudos têm demonstrado que espécies de *Talaromyces* sp. apresentam alta capacidade de inibir o crescimento de fungos fitopatogênicos por meio da produção de metabólitos bioativos (Vinale *et al.*, 2008; Halo *et al.*, 2019; Lei *et al.*, 2022). Entre esses compostos, destacam-se policetídeos, alcaloides e terpenos, que exibem reconhecida atividade antimicrobiana contra patógenos de importância agrícola (Lei *et al.* 2022).

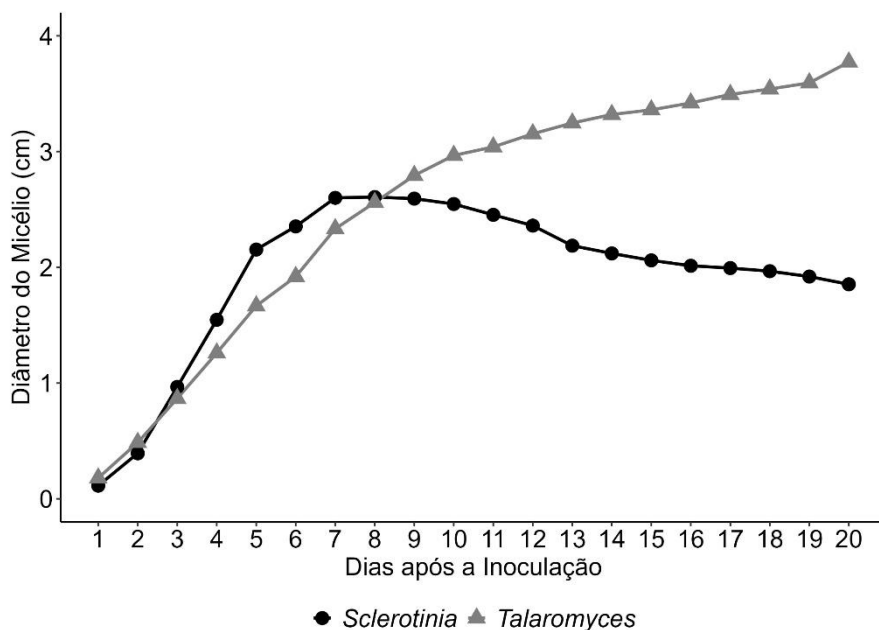
A supressão do crescimento de fitopatógenos por microrganismos antagonistas, como o gênero *Talaromyces*, pode ocorrer através de mecanismos múltiplos e complementares, incluindo tanto a produção de metabólitos secundários quanto o micoparasitismo, comportamento frequentemente observado em espécies com potencial para o biocontrole de doenças de plantas (Vinale *et al.*, 2008; Halo *et al.*, 2019).

Nesse contexto, Halo *et al.* (2019) evidenciaram que *Talaromyces variabilis* é capaz de reduzir significativamente o crescimento de *Pythium aphanidermatum*, ação atribuída à produção das enzimas  $\beta$ -glucanase e celulase, associada à secreção de sideróforos, os quais contribuem para limitar a disponibilidade de ferro e inibir o desenvolvimento do patógeno.

No presente estudo, a análise das imagens de microscopia, aliada à identificação morfológica das hifas confirma que o micoparasitismo é um mecanismo ativo de antagonismo exercido por *T. stollii*, o qual envolve as hifas do fitopatógeno e promove sua destruição física (Figuras 7 e 8b). Esses resultados reforçam o potencial do fungo como agente de biocontrole, oferecendo uma alternativa sustentável para o manejo da podridão cinzenta das raízes causada por *M. phaseolina*. Isso abre perspectivas para futuros estudos em condições de campo e em diferentes sistemas de cultivo, a fim de validar a eficácia observada em laboratório e contribuir para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no manejo de doenças fúngicas de importância agrícola.

### *Inibição do Crescimento Micelial de S. sclerotiorum*

A Figura 9 apresenta a variação no diâmetro do micélio de *S. sclerotiorum* em cultura dupla com *T. stollii* ao longo de 20 dias. O gráfico compara o crescimento dos dois fungos, permitindo avaliar como a interação entre eles influenciou o desenvolvimento do fitopatógeno.

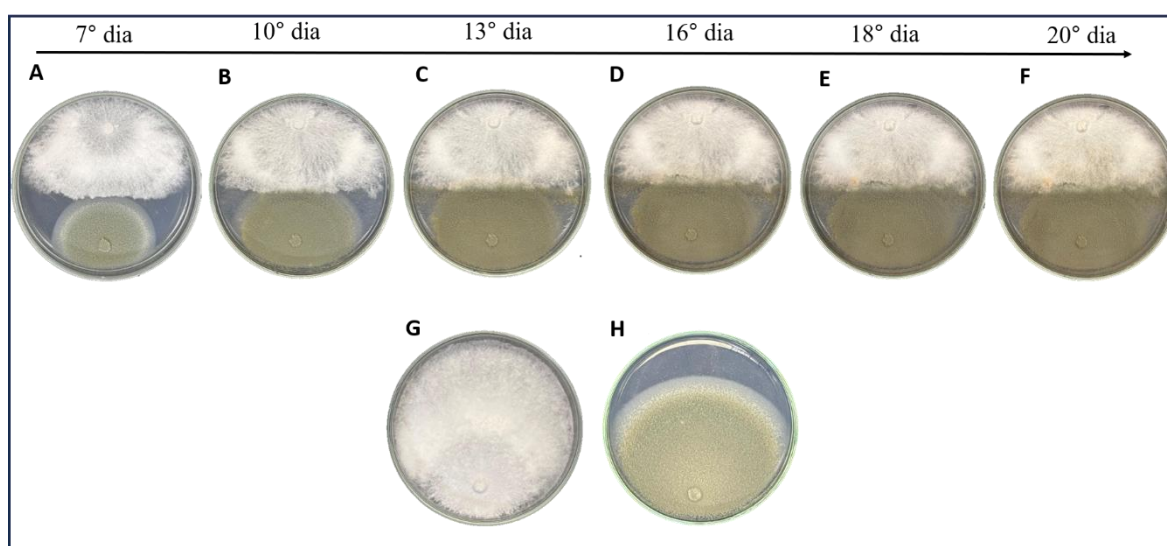


**Figura 9.** Diâmetro do micélio do fungo fitopatogênico *Sclerotinia sclerotiorum* crescido em cultura dupla com o fungo antagonista *Talaromyces stollii* durante o período de 20 dias.

Os micélios de *T. stollii* e *S. sclerotiorum* em cocultivo apresentaram tamanhos (medidos do disco até a borda do micélio) semelhantes (fitopatógeno= 2,5 cm e antagonista= 2,2 cm) até o 7º dia após a inoculação, quando o encontro dos micélios ocorreu (Figuras 9 e 10A). Porém, a área ocupada na placa pelo micélio do fitopatógeno foi maior do que a área ocupada pelo micélio do antagonista (Figura 10A) no momento do encontro dos fungos.

Após o encontro dos fungos, até o 9º dia não foi observado aumento no tamanho do micélio do fitopatógeno e a partir do 10º dia ocorreu a redução no tamanho do micélio da *S. sclerotiorum* até o 20º dia (tamanho= 1,8 cm, Figura 9). O encontro com o fitopatógeno não impediu o aumento no tamanho do micélio do *T. stollii* até o 20º dia após a inoculação (tamanho= 3,7 cm). Esse comportamento mostra que a presença do antagonista não apenas interrompe o aumento no crescimento do fitopatógeno, mas também reduz o tamanho do micélio, possivelmente devido a mecanismos de antagonismo (Halo *et al.*, 2019).

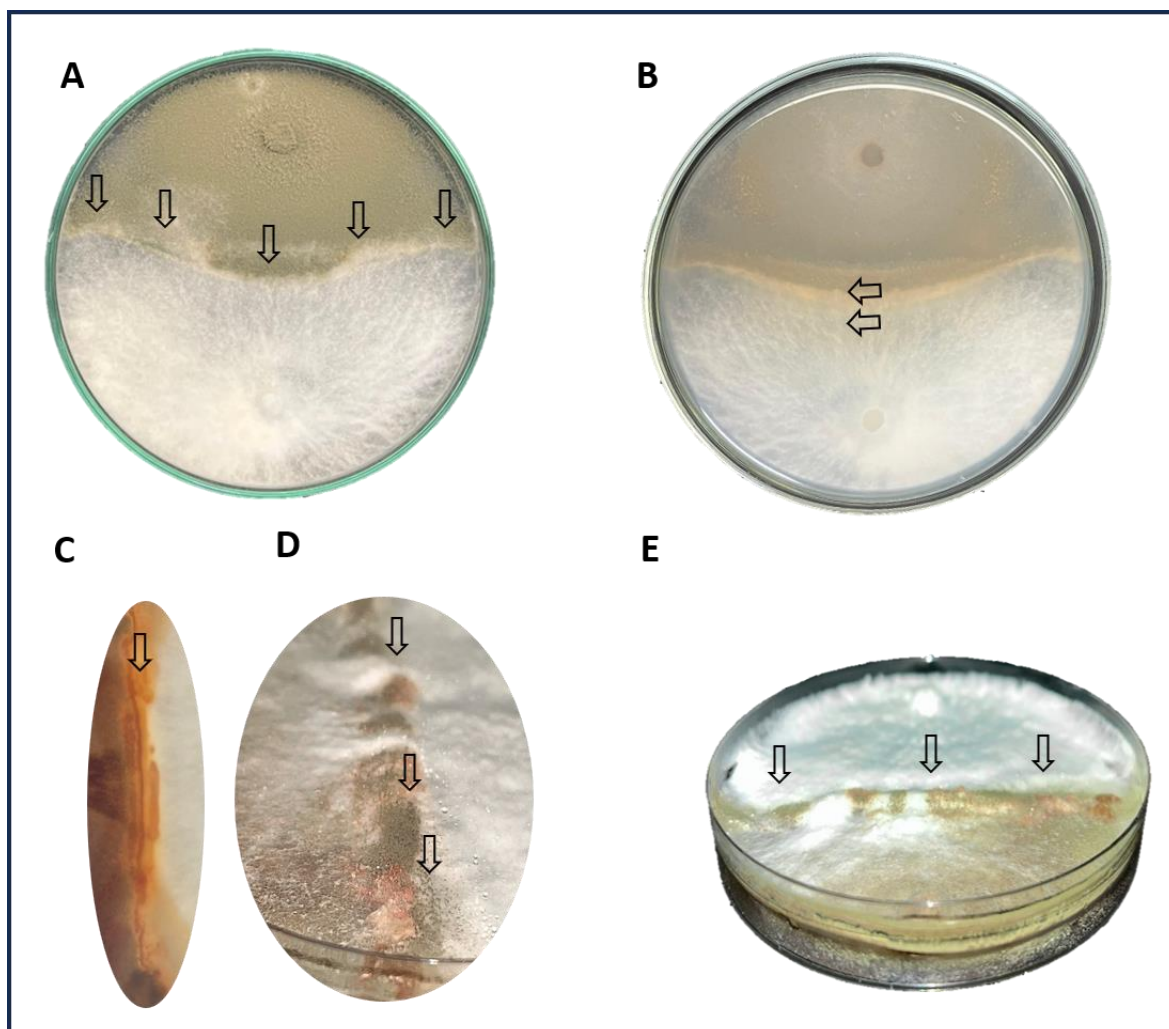
A Figura 10 mostra a sequência de imagens da cultura dupla de *S. sclerotiorum* com *T. stollii*, registradas no 7º, 10º, 13º, 16º, 18º e no 20º dia (Figura 10 A-F) após a inoculação. Até o 7º dia, os micélios crescem sem se sobreporem, sendo que *Sclerotinia sclerotiorum* cresce mais rápido e ocupa maior área da placa do que o antagonista. Esse comportamento é consistente com os resultados encontrados por Hiram *et al.* (2014), que avaliaram 17 microrganismos antagonistas em cultura dupla. No 7º dia os micélios se encontraram e, diferente de outros antagonistas, como *Trichoderma*, que liberam conídios cedo sobre o hospedeiro (Benítez *et al.*, 2004), *T. stollii* não esporula sobre o fitopatógeno nesse momento, sendo a esporulação sobre o micélio do fitopatógeno mais abundante a partir do 13º dia (Figura 10C).



**Figura 10.** Imagens da cultura dupla de *S. sclerotiorum* com *T. stollii* no obtidas no 7º dia (A), 10º dias (B), 13º dia (C), 16º dia (D), 18º dia (E) e 20º dia (F) após a inoculação de ambos os fungos na placa de Petri. As imagens (G) e (H) são imagens do crescimento de *S. sclerotiorum* e *T. stollii*, respectivamente, na condição de controle.

A esporulação tardia pode ser vista como uma estratégia: primeiro, garantir o contato e a degradação do hospedeiro; depois, se espalhar através dos conídios. Na figura 11 é possível observar que *T. stollii* cresce por baixo do micélio da *S. sclerotiorum* até o 20º dia, diferente do que foi observado na cultura dupla com *M. phaseolina*. Entre o 13º e 16º dias, houve avanço no crescimento do *T. stollii* por baixo do micélio do fitopatógeno, manifestando-se tanto na superfície quanto na base da placa, em faixas amareladas (Figura 11C) e em uma região mais elevada (Figura 11D), indicando o avanço de *T. stollii* no micélio do fitopatógeno. A partir do 18º até o 20º dia, observou-se que *T. stollii* apresentou pequeno aumento no

crescimento do micélio e manteve a esporulação sobre o fitopatógeno (Figuras 10E e 10F). Esse comportamento está de acordo com os relatos de Yilmaz *et al.* (2014), que descrevem uma diversidade de mecanismos micoparasíticos do gênero *Talaromyces*.



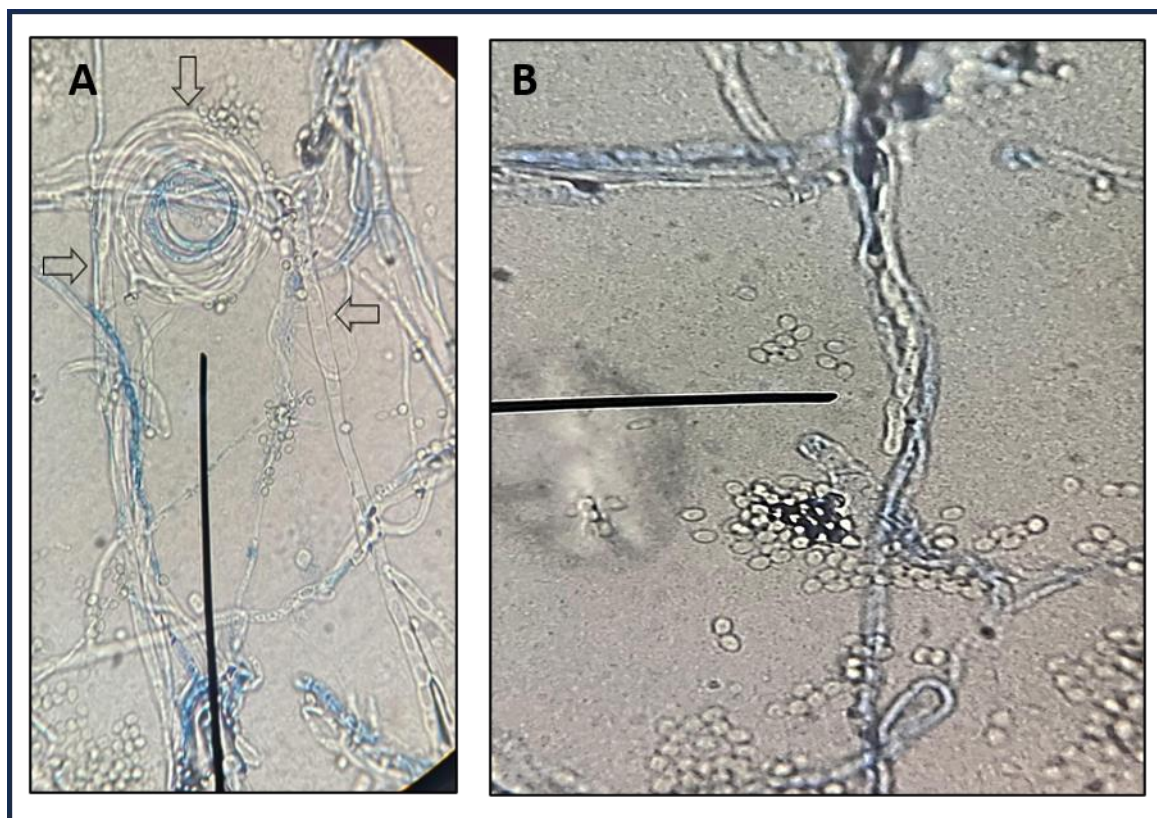
**Figura 11.** Imagens da cultura dupla de *S. sclerotiorum* com *T. stollii* obtidas no 20º dia após a inoculação de ambos os fungos em placa de Petri. **A:** vista superior da placa de Petri, mostrando a zona de interação entre os micélios; **B:** vista inferior da placa, onde as setas indicam o limite de crescimento dos micélios no momento do contato (seta superior) e o avanço de *S. sclerotiorum* até o 20º dia (seta inferior); **C:** imagem obtida da parte inferior da placa (invertida para melhor visualização), destacando as linhas de progressão do micélio de *T. stollii* sob o micélio de *S. sclerotiorum*; **D:** visão superior evidenciando a formação de uma elevação na região de encontro dos micélios, denominada faixa de progressão; **E:** imagem da faixa de progressão do micélio de *T. stollii* sob *S. sclerotiorum*, formando uma linha contínua.

Nos três bioensaios realizados foi observado um padrão de interação entre os dois fungos na placa de Petri, conforme descrito acima e observado nas imagens da figura 11.

Após o encontro dos fungos na placa de Petri, à medida que as hifas do *T. stollii* crescia por debaixo do fitopatógeno, foi observada uma elevação do micélio da *S. sclerotiorum* (Figuras 11D e 11E).

No presente estudo essa elevação no micélio foi denominada linha de progressão, a qual se forma provavelmente pelo encontro e interação das hifas de ambos os fungos. Na parte inferior da placa de Petri é possível observar uma linha marrom (Figura 11C), referida como a linha de progressão do micélio. Esta linha ocorre no mesmo local da faixa de progressão e, assim como a faixa de progressão, indica o local de encontro e interação dos micélios de ambos os fungos. Ao longo do experimento, foi observado que a linha e a faixa de progressão se deslocaram em direção ao micélio do fitopatógeno, o que, possivelmente, indica que as hifas do *T. stollii* estão mantendo seu crescimento em direção ao micélio da *S. sclerotiorum*.

No local de sobreposição dos micélios de ambos os fungos, foram observadas, a partir das fotomicrografias, hifas do fungo antagonista aderidas às hifas do fitopatógeno (Figura 12B) e a formação de hifas em espiral (Figura 12A). Estas imagens indicam um possível mecanismo de micoparasitismo das hifas da *S. sclerotiorum* pelo *T. stollii*, caracterizado pela formação de hifas em espiral que aderem firmemente às hifas do patógeno, diferente dos mecanismos de micoparasitismo descritos para outros fungos, como o *Trichoderma* sp. (Azevedo *et al.*, 2020) e outras espécies do gênero *Talaromyces* (Abdel-Rahim; Abo-Elyousr, 2018), que envolvem principalmente o enrolamento ou a penetração direta das hifas sem a formação dessas estruturas espirais.



**Figura 12. Micoparasitismo das hifas de *S. sclerotiorum* por *T. stollii*.** A) As setas mostram as hifas do *T. stollii* formando uma espiral em volta das hifas do fungo fitopatogênico coradas em azul; B) A seta indica a hifa do *T. stollii* aderida à hifa da *S. sclerotiorum*.

O fato de *S. sclerotiorum* apresentar redução no tamanho do micélio após o encontro com fungos do gênero *Trichoderma* sugere que não houve apenas competição passiva, mas uma ação direta de inibição. Esse mesmo padrão foi observado por Marquez *et al.* (2021), em que *Trichoderma harzianum* e *Trichoderma viride* liberaram compostos antifúngicos, resultando na degeneração parcial do micélio de patógenos de solo.

Esses resultados do presente estudo são relevantes, pois *S. sclerotiorum* é um fitopatógeno conhecido pela alta produção de escleródios, estruturas resistentes que permanecem viáveis no solo por anos, como já apontado por Adams & Ayers (1979), sendo seu controle por produtos químicos sintéticos muitas vezes insuficiente para eliminar o inóculo no campo.

Portanto, o desempenho de *T. stollii* encontrado aqui se soma às evidências da literatura de que esse gênero pode ser explorado como alternativa biológica promissora no

manejo integrado (Visagie *et al.*, 2014), reduzindo tanto o crescimento ativo quanto a sobrevivência do fitopatógeno no ambiente. Esses resultados estão de acordo com os achados de Abdel-Rahim & Abo-Elyousr (2018) e Marquez *et al.* (2021), que reforçam a ideia de que espécies de *Talaromyces* possuem mecanismos de antagonismo e se tornam ferramentas valiosas no biocontrole de fitopatógenos de solo de difícil manejo, como *S. sclerotiorum*.

### **Resposta antagonista diferencial de *T. stollii* em função do fitopatógeno**

Os ensaios conduzidos no presente estudo indicam que a eficiência do *T. stollii* no controle *in vitro* do crescimento micelial é diferente entre os dois fitopatógenos: com *M. phaseolina*, o micoparasitismo é mais eficiente no controle do micélio do fungo, enquanto com *S. sclerotiorum*, a redução no tamanho do micélio foi menor. Essa diferença na eficiência possivelmente está relacionada a aspectos moleculares específicos da interação antagonista × fitopatógeno, que poderiam ser elucidados por outros ensaios, como análises de expressão gênica, testes de atividade enzimática de degradação da parede celular, estudos metabolômicos e microscopia avançada para observar a dinâmica do contato entre os micélios (Marquez *et al.*, 2021).

O comportamento antagonista de *T. stollii* diferiu entre os fitopatógenos em função da dinâmica de crescimento inicial, da forma de ocupação do espaço e do tempo necessário para o estabelecimento do antagonismo (Panchalingam *et al.*, 2022). Em *M. phaseolina*, o crescimento inicial mais rápido do patógeno levou à estabilização precoce do antagonista, favorecendo uma ação antagonista mais imediata, caracterizada pela esporulação direta sobre o micélio e indicando micoparasitismo superficial eficiente (Marquez *et al.*, 2021).

Em contraste, durante a interação com *S. sclerotiorum*, o *T. stollii* apresentou atraso no estabelecimento e na manifestação do micoparasitismo direto, possivelmente devido ao tempo necessário para adaptação e ativação de suas respostas antagonistas (Albert *et al.*, 2022). O antagonista estabeleceu-se de forma gradual, com crescimento submicelial, avanço estruturado e esporulação tardia mais intensa, evidenciando uma estratégia progressiva de antagonismo.

Assim, as diferenças observadas nos valores de inibição do crescimento micelial refletem estratégias antagonistas distintas condicionadas pelo ritmo de crescimento e pela

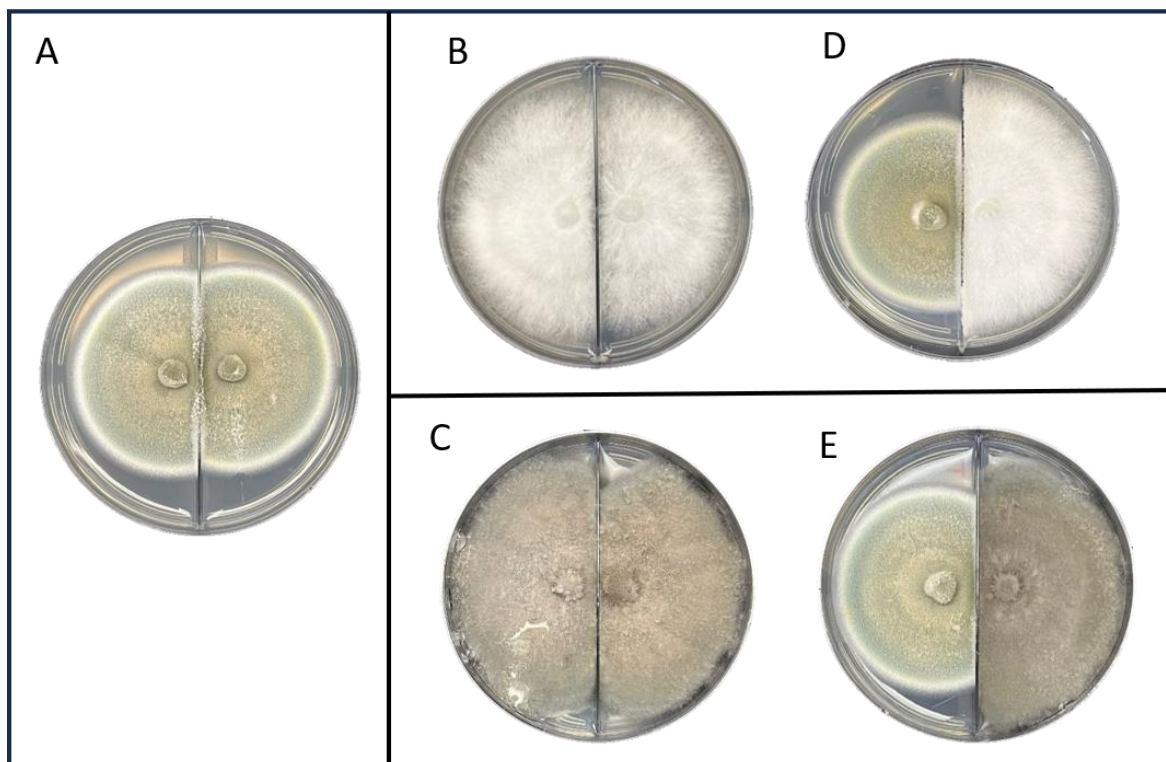
resposta micelial de cada fitopatógeno, e não uma menor eficiência de *T. stollii* frente a algum dos fitopatógenos (Smolinska; Kowalska, 2018).

### **Efeito de Compostos voláteis**

O experimento realizado para analisar a possível inibição do crescimento de *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* por compostos orgânicos voláteis produzidos por *T. stollii* durou duas semanas e o valor de ICM foi 0. Portanto, não ocorreu nenhuma diferença no crescimento dos fungos fitopatogênicos crescidos na placa com *T. stollii* (Figuras 13 D e E) em comparação com os controles (apenas o fitopatógeno na placa) (Figuras 13B e C). Estes resultados indicam que, nas condições experimentais analisadas, o *T. stollii* aparentemente não produziu compostos voláteis capazes de inibir os fungos testados, sugerindo que a interação entre esses fungos possivelmente não é mediada por esse tipo de substância. No entanto, não é possível descartar que compostos voláteis possam desempenhar algum papel em diferentes condições ou em outros estágios da interação.

A produção de compostos voláteis com ação antifúngica não é uma característica universal entre os microrganismos do solo (Giorgio *et al.*, 2015; Massawe *et al.*, 2018). Por exemplo, algumas cepas de *Bacillus* liberam VOCs capazes de inibir o crescimento de *S. sclerotiorum*, enquanto outras não apresentam esse efeito, evidenciando que a produção de VOCs varia conforme a espécie ou cepa (Massawe *et al.*, 2018). No caso do *Talaromyces stollii*, até o momento não há relatos de produção de VOCs antifúngicos.

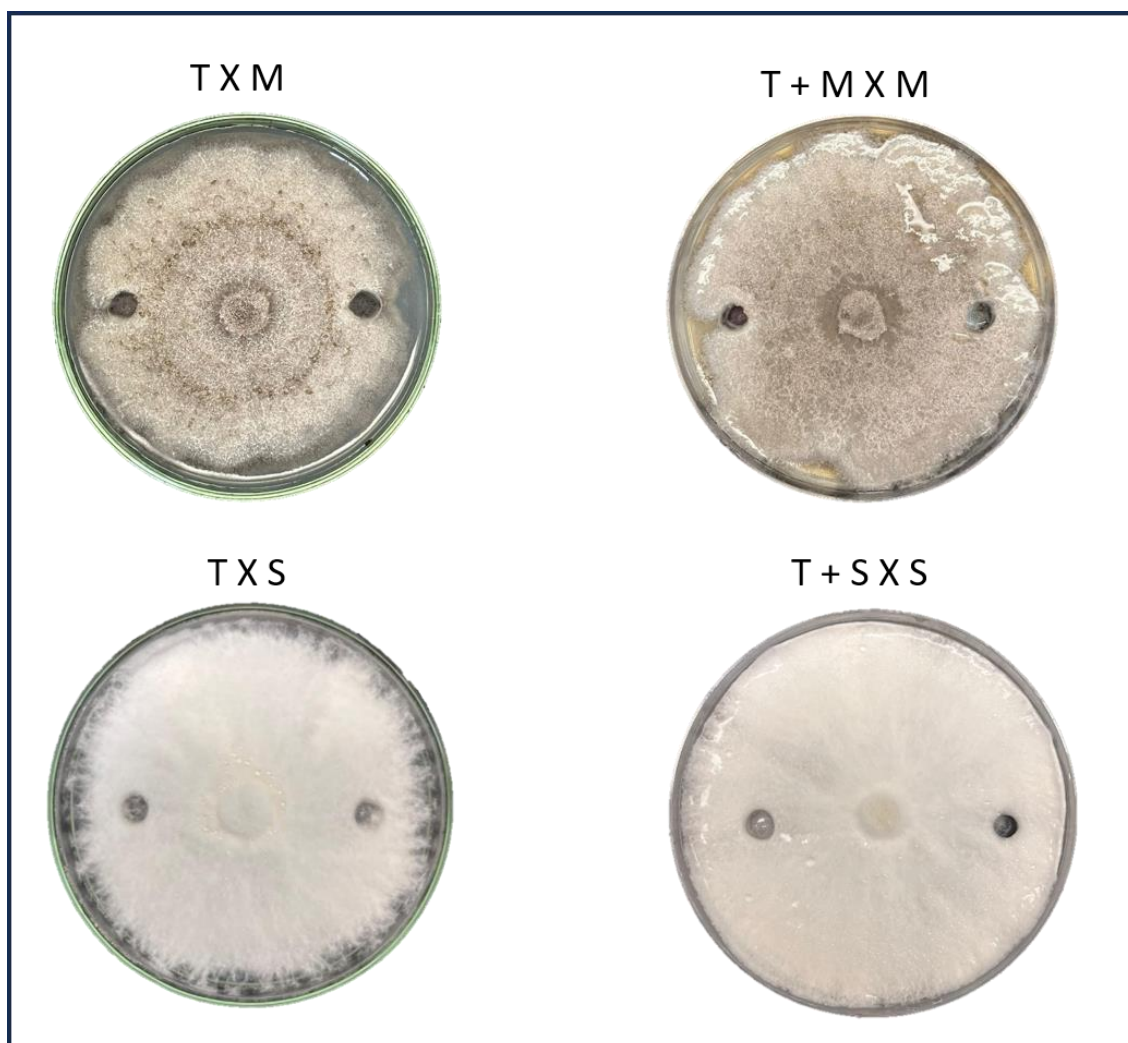
Entretanto, espécies do gênero, como *T. pinophilus* e *T. flavus*, foram descritas como capazes de liberar compostos voláteis com efeito antifúngico, embora isso dependa da cepa, do meio e das condições de incubação (Abdel-Rahim & Abo-Elyousr, 2018). A ausência de efeito volátil observada neste estudo pode estar relacionada à cepa utilizada ou às condições experimentais adotadas. De forma consistente, Giorgio *et al.* (2015) mostraram que certos tipos de bactérias do solo produzem VOCs que afetam fungos patogênicos, mas que essa ação depende da cepa, do meio de cultivo, da densidade celular e do tempo de incubação, não ocorrendo em todas as situações avaliadas.



**Figura 13. Imagens das placas de controle (A, B e C) e cultura dupla (D e E) do experimento.** Análise de possível produção de compostos voláteis com ação fungicida por *Talaromyces stollii*. A: controle do *T. stollii*, B: controle da *Sclerotinia sclerotiorum*, C: placa controle da *Macrophomina phaseolina*; D: cultura dupla de *T. stollii* (lado esquerdo) com *S. sclerotiorum* (lado direito); e E: cultura dupla de *T. stollii* (lado esquerdo) com *M. phaseolina* (lado direito).

### *Efeitos do sobrenadante livre de células*

A literatura descreve que diferentes espécies do gênero *Talaromyces* são capazes de produzir metabólitos secundários bioativos com atividade antifúngica (Lei *et al.* 2022). Além disso, os ensaios conduzidos com a cepa BCA1.1 que resultaram na patente nº BR 102020015323-4, indicam haver produção de metabólitos que inibem o desenvolvimento da ferrugem em folhas destacadas de soja. No entanto, no presente estudo, não foi observada a inibição do crescimento da *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* pelos metabólitos presentes no sobrenadante livre de células obtido do cultivo do fungo por 144 horas em duas condições: sozinho e co-cultivo com *M. phaseolina* ou *S. sclerotiorum*. Os fitopatógenos crescidos nas placas de Petri com o sobrenadante mostraram crescimento semelhante ao observado para *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* nas placas controle, sem a formação de halos de inibição ao redor dos poços.



**Figura 14. Placas de confronto direto mostrando que não houve inibição dos fitopatógenos por metabólitos presentes no sobrenadante livre de células.** Legenda dos tratamentos: **TXM** – *T. stollii* puro em confronto com *M. phaseolina*; **T+MXM** – *T. stollii* em co-cultivo com *M. phaseolina* em confronto com *M. phaseolina*; **TXS** – *T. stollii* puro em confronto com *S. sclerotiorum*; **T+SXS** – *T. stollii* em co-cultivo com *S. sclerotiorum* em confronto com *S. sclerotiorum*. T= *T. Stollii*.

Estudos prévios indicam que espécies do gênero *Talaromyces sp.* podem exibir atividade antifúngica contra fungos fitopatogênicos em condições específicas (Thomas *et al.*, 2025). Por exemplo, *Talaromyces assiutensis* demonstrou atividade antifúngica contra diversos fitopatógenos, incluindo *S. sclerotiorum*, em ensaios de difusão em ágar com extratos brutos (Sui *et al.*, 2025). No entanto, a eficácia de *Talaromyces sp.* como agente de controle biológico pode depender de fatores como a cepa específica, o método de aplicação e as condições ambientais.

A ausência de atividade antifúngica observada neste estudo sugere que os metabólitos produzidos por *T. stollii*, nas condições testadas, podem não apresentar ação antifúngica ou não ter sido secretados em concentrações suficientes para inibir o crescimento dos fitopatógenos (Adelusi *et al.*, 2022).

Fatores como a composição do meio de cultivo, o tempo de incubação e a estabilidade dos compostos antifúngicos podem influenciar diretamente a secreção e a atividade dos metabólitos pelos microrganismos (Adelusi *et al.*, 2022). A interação direta entre o antagonista e o fitopatógeno pode ser necessária para estimular a síntese de metabólitos com ação antifúngica, sendo que a produção desses compostos só é induzida quando o fungo antagonista interage com uma cepa sensível (Chalearmsrimuang, 2021; Nonaka *et al.*, 2015).

No presente estudo, os metabólitos obtidos do co-cultivo não apresentaram efeito inibitório sobre o crescimento dos fitopatógenos. Para investigações futuras, recomenda-se explorar diferentes condições de cultivo, incluindo a utilização de meios que favoreçam a produção de metabólitos secundários, como enzimas hidrolíticas (quitinases, glucanases, proteases), antibióticos, compostos fenólicos ou voláteis, extensão do período de incubação além de 144 h, e aumento da concentração do inóculo ou do sobrenadante.

A avaliação da atividade de cepas específicas de *Talaromyces* sp. em diferentes estágios de desenvolvimento, variações de temperatura e pH, bem como métodos alternativos de extração dos metabólitos, pode fornecer informações adicionais sobre o potencial antifúngico da cepa. Observações preliminares de halos de inibição indicam que, sob certas condições, *T. stollii* pode produzir compostos antifúngicos, reforçando a importância de otimizar as condições de cultivo para avaliar corretamente seu potencial como agente de controle biológico (Csüllög *et al.*, 2022).

### 3.4 CONCLUSÃO

A cepa BCA1.1 de *T. stollii* quando em confronto direto com *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum* é capaz de promover a redução de até 70% do crescimento micelial dos fitopatógenos. O modo de ação de *T. stollii* sobre *M. phaseolina* foi evidenciado pelo contato direto e colonização do micélio, caracterizando um efeito de micoparasitismo clássico. Em contraste, o modo de ação sobre *S. sclerotiorum* revelou a formação de estruturas espirais ao longo das hifas do patógeno, em substituição ao enrolamento hifal convencional. A ausência

de efeito inibitório nos ensaios com compostos voláteis e sobrenadante livre de células reforça que, nas condições experimentais avaliadas, a atividade antagonista de *T. stollii* ocorre por mecanismos dependentes de contato físico, com respostas diferenciadas entre os fitopatógenos avaliados. Sendo assim, os resultados obtidos revelam potencial de uso de *T. stollii* no controle biológico de ambos os fitopatógenos, com perspectivas para sua exploração na formulação de bioprodutos.

### CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo integrou uma análise cienciométrica sobre os mecanismos moleculares do controle biológico de doenças de plantas com um estudo experimental *in vitro*. A análise cienciométrica evidenciou crescimento expressivo da produção científica sobre a biologia molecular da interação fitopatógeno x antagonista a partir de 2007, com pico recente de publicações e destaque da China como principal país produtor. Além disso ficou evidente a alteração de campo de pesquisa na área, cada vez mais refletindo uso de abordagens ômicas e engenharia genética no desenvolvimento de bioinsumos. O estudo experimental por sua vez demonstrou que a cepa BCA1.1 de *T. stollii* apresentou forte atividade antagonista contra *M. phaseolina* e *S. sclerotiorum*, mas apenas em condições de contato físico direto, promovendo redução do crescimento micelial em mais de 70% para ambos os fitopatógenos. O controle no crescimento dos fitopatógenos foi alcançado por meio de ação de micoparasitismo e competição por espaço, enquanto compostos voláteis e metabólitos não voláteis não apresentaram efeito inibitório. Esses resultados indicam que a aplicação de *T. stollii* em programas de manejo integrado depende de estratégias que favoreçam a interação direta com o patógeno, reforçando seu potencial como agente de biocontrole em sistemas agrícolas sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

- Abdel-Rahim IR, Abo-Elyousr KAM (2018) Talaromyces pinophilus strain AUN-1 as a novel mycoparasite of Botrytis cinerea, the pathogen of onion scape and umbel blights. *Microbiological Research* **212-213:1-9**. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.04.004>
- Adams PB, Ayers WA (1979) Ecology of Sclerotinia species. *Phytopathology* **69:896-899**. <https://doi.org/10.1094/Phyto-69-896>
- Adelusi OA, Gbashi S, Adbiyi JA, Makhuele R, Adebo OA, Aasa AO, Targuma S, Kah G, Njobeh PB (2022) Variability in metabolites produced by Talaromyces pinophilus SPJ22 cultured on different substrates. *Fungal Biology and Biotechnology* **9:15**. <https://doi.org/10.1186/s40694-022-00145-8>
- Azevedo DMQ, Rocha F, Costa CA, Fernandes MFG (2020) Efeito antagonista de isolados de Trichoderma e seus metabólitos contra Fusarium solani e F. oxysporum em grão-de-bico. *Brazilian Journal of Development* **6(6):36344-36361**. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-251>
- Benítez T, Rincón AM, Limón MC, Codón AC (2004) Biocontrol mechanisms of Trichoderma strains. *International Microbiology* **7:249-260**
- Chalearmsrimung T, Ismail SI, Mazlan N, Suasaard S, Dethoup T (2021) Marine-derived fungi: a promising source of halo-tolerant biological control agents against plant pathogenic fungi. *Microorganisms* **9(6):1324**
- Csüllög K, Biró G, Gonsalves J, Sanga SM (2022) Examination of the efficacy of different fungicides against Macrophomina phaseolina and Sclerotinia sclerotiorum in laboratory conditions. *Acta Agraria Debreceniensis* **1(1):21-24**. <https://doi.org/10.34101/ACTAAGRAR/1/10692>
- Embrapa (2025) Doenças em lavouras devem se intensificar com as mudanças climáticas, alerta Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/99781504/doencas-em-lavouras-devem-se-intensificar-com-as-mudancas-climaticas-alerta-embrapa>
- Gajera HP, Bambharolia RP, Patel SV, Khatrani TJ, Goalkiya BA (2012) Antagonism of Trichoderma spp. against Macrophomina phaseolina: evaluation of coiling and cell wall degrading enzymatic activities. *Journal of Plant Pathology & Microbiology* **3(5):149**. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000149>
- Giorgio A, De Stradis A, Lo Cantore P, Iacobellis NS (2015) Biocide effects of volatile organic compounds produced by rhizobacteria on phytopathogenic fungi. *Frontiers in Microbiology* **6:1056**
- Halo BA, Al-Yahyai RA, Maharachchikumbura SSN, Al-Sadi AM (2019) Talaromyces variabilis interferes with Pythium aphanidermatum growth and suppresses Pythium-induced damping-off of cucumbers and tomatoes. *Scientific Reports* **9:11255**. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47736-x>

Harman GE (2006) Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. *Phytopathology* **96(2):190-194**. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0190>

Hirad AH, Elsheshtawi M, Bahkali AH, Elgorban AM, Sayed SRM (2014) Efficacy of several potential biocontrol agents against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Journal of Pure and Applied Microbiology* **8(2):267-271**

Hoffmann JVB, Santos RC, Silva RR, Almeida LM, Carvalho AF (2024) Controle do fungo causador da antracnose na cultura da soja utilizando isolados de *Trichoderma* spp. nativos do estado do Mato Grosso do Sul. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* **7(2):e70035**

Instituto Nacional da Propriedade Industrial (2022) *Controle biológico da ferrugem asiática da soja por fungo antagonista*. Carta patente BR102020015323-4

Köhl J, Kolnaar R, Ravensberg WJ (2019) Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. *Frontiers in Plant Science* **10:845**. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>

Lei LR, Gong LQ, Jin MY, Wang R, Liu R, Gao J, Liu MD, Huang L, Wang GZ, Wang D, Deng Y (2022) Research advances in the structures and biological activities of secondary metabolites from *Talaromyces* species. *Frontiers in Microbiology* **13:984801**. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.984801>

Marquez N, Giacherro ML, Declerck S, Ducasse DA (2021) *Macrophomina phaseolina*: general characteristics of pathogenicity and methods of control. *Frontiers in Plant Science* **12:634397**. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634397>

Massawe VC, Hanif A, Farzand A, Mburu DK, Ochola SO, Wu L, Tahir HAS, Gu Q, Wu H, Gao X (2018) Volatile organic compounds produced by *Bacillus* spp. inhibit the growth of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Canadian Journal of Microbiology* **64(5):345-352**

Michereff SJ (2001) *Fundamentos de fitopatologia*. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife

Nicoletti R, Salvatore MM, Andolfi A (2018) Secondary metabolites of mangrove-associated strains of *Talaromyces*. *Marine Drugs* **16(1):12**. DOI: <https://doi.org/10.3390/md16010012>

Nonaka K, Iwatsuki M, Horiuchi S, Shiomi K, Ōmura S, Masuma R (2015) Induced production of BE-31405 by co-culturing of *Talaromyces siamensis* FKA-61 with fungal strains. *Journal of Antibiotics* **68:431-434**

Silva JM, Dalbon VA, Alves AC, Moreira LH, Pereira GS (2025) Bioinputs in sustainable agriculture: benefits, challenges, and pathways for resilient farming systems. *Asian Journal of Research in Crop Science* **10(2):85-97**

Sui L, Lu Y, Cheng K, Tian Y, Liu Z, Xie Z, Zhang Z, Li Q (2025) A strain of *Talaromyces assiutensis* provides multiple benefits to plants under biotic stress. *Biological Control* **158:104996**

Thomas GA, Vuts J, Withall DM, Caulfield JC, Sidda J, Grant MR, Thornton CR, Birkett MA (2025) Inducible volatile chemical signalling drives antifungal activity of *Trichoderma hamatum* GD12 during confrontation with the pathogen *Sclerotinia sclerotiorum*. *bioRxiv*

Universidade Estadual Do Norte Do Paraná (2020). Documento técnico sobre *Talaromyces funiculosus* e uso biológico no controle de fitopatógenos. 2020. Disponível em: <https://repositorio.uenp.edu.br>

Vidal-Martínez NA, Argumedo-Delira R, Sánchez-Pale JR, Chiquito-Contreras RG, González-Mendoza D, Sánchez-Viveros G (2021) Microorganismos antagonistas: una alternativa para el control biológico de enfermedades fúngicas presentes en el cultivo de café. *Información Técnica Económica Agraria* **117(3)**

Vignassa M, Soria C, Durand N, Poss C, Meile JC, Chillet M, Schorr-Galindo S (2024) Modulation of growth and mycotoxigenic potential of *Fusarium* species by *Talaromyces stollii*. *Frontiers in Microbiology* **15:11360085**

Vinale F, Sivasithamparam K, Ghisalberti EL, Marra R, Woo SL, Lorito M (2008) *Trichoderma*–plant–pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry* **40(1):1-10**

Visagie CM, Houbraken J, Frisvad JC, Hong SB, Klaassen CHW, Perrone G, Seifert KA, Varga J, Yaguchi T, Samson RA (2014) Identification and nomenclature of the genus *Penicillium*. *Studies in Mycology* **78:1-40**

Yang H, Cui S, Wei Y, Li H, Hu J, Yang K, Wu Y, Zhao Z, Li J, Wang Y, Yang H (2024) Antagonistic effects of *Talaromyces muroii* TM28 against *Fusarium pseudograminearum* and its potential as a biocontrol agent. *Frontiers in Microbiology* **15:1292885**

Yilmaz N, Visagie CM, Houbraken J, Frisvad JC, Samson RA (2014) Polyphasic taxonomy of the genus *Talaromyces*. *Studies in Mycology* **78:175-341**

Zhai MM, Li J, Jiang CX, Shi YP, Di DL, Crews P, Wu QX (2016) The bioactive secondary metabolites from *Talaromyces* species. *Natural Products and Bioprospecting* **6(1):1–24**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13659-015-0081-3>