

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
CENTRO DE EXCELÊNCIA EM BIOINSUMOS COORDENAÇÃO DE
CAPACITAÇÃO EM BIOINSUMOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS IF GOIANO
CAMPUS URUTAÍ**

DANILO VASCONCELOS DOS SANTOS

**Simulação Computacional Do Controle Biológico De *Meloidogyne javanica* Com
*Purpureocillium lilacinum***

URUTAÍ, GO

2025

DANILO VASCONCEILOS DOS SANTOS

**Simulação Computacional Do Controle Biológico De *Meloidogyne javanica* Com
*Purpureocillium lilacinum***

Monografia apresentada à Banca Examinadora
do Curso de Especialização em Bioinsumos
Instituto Federal Goiano como exigência
parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Bernardes
Neto
Coorientadora: Prof.^a Dra. Bruna Rodrigues

URUTAÍ, GO

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

V334	VASCONCEILOS DOS SANTOS, DANILO Simulação Computacional Do Controle Biológico De Meloidogyne Javanica Com Purpureocillium Lilacinum / DANILO VASCONCEILOS DOS SANTOS. Urutaí 2025. 32f. il. Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Bernardes Neto. Coorientadora: Prof^ª. Dra. Bruna Rodrigues. Tcc (Especialista) - Instituto Federal Goiano, curso de 0130426 - Especialização em Bioinsumos - Urutaí (Campus Urutaí). I. Título.
------	--

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – CEBIO/IF Goiano

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos **vinete** dias do mês de **setembro** de **dois mil e vinte e cinco**, às **18 horas**, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: **Prof. Dr. José Feliciano Bernardes Neto** (orientador), **Dra. Bruna Rodrigues (Coorientadora)**, **Dr. Profº Mairon Marques dos Santos** e o **Me. Raphael Luca Souza da Silva**, para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **‘Simulação Computacional do Controle Biológico de *Meloidogyne javanica* com *Purpureocillium lilacinum*’** de **Danilo Vasconcelos dos Santos**, estudante da *lato sensu* em Bioinsumos do **Centro de Excelência em Bioinsumos (CEBIO) do IF Goiano – Campus Urutaí**, sob as **Matrículas nº 2024101304260003**, respectivamente. A palavra foi concedida ao(estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Urutaí, 20 de setembro de 2025.

(Assinado eletronicamente)

Dr. José Feliciano Bernardes Neto

Orientador

(Assinado eletronicamente)

Dra. Bruna Rodrigues

Coorientadora

(Assinado eletronicamente)

Dr. Mairon Marques dos Santos

Membro da Banca Examinadora

(Assinado eletronicamente)

Me. Raphael Luca Souza da Silva

Membro da Banca Examinadora

Observação:

Para o caso de REAPRESENTAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REAPRESENTAÇÃO** do TCC. Desta forma, o estudante deve realizar correções e adequações no trabalho e apresentá-lo novamente em até XX dias, contados a partir de hoje (XX/XX/XXX). Nesta nova oportunidade, após avaliação da banca examinadora, o estudante poderá ser APROVADO ou REPROVADO, não havendo possibilidade de outra reapresentação. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Responsável de TCC.”

Para o caso de REPROVAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REPROVAÇÃO** do(a) estudante. Desta forma, o estudante deverá realizar o desenvolvimento e defesa de novo TCC no próximo semestre. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Responsável de TCC.”

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jose Feliciano Bernardes Neto**, **ASSISTENTE DE ALUNO**, em 20/09/2025 19:34:44.
- **Raphael Luca Souza da Silva**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/09/2025 19:37:41.
- **Mairon Marques dos Santos**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/09/2025 19:41:49.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 745645

Código de Autenticação: 55430ebb54





TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

☒ Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Danilo Vasconcelos dos Santos

Matrícula:

2024101304260003

Título do trabalho:

Simulação Computacional Do Controle Biológico De Meloidogyne Javanica Com Purpureocillium Lilacinum

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Urutaí-Go

Local

01 / 10 / 2025

Data

Danilo Vasconcelos dos Santos

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Dedico este trabalho a todos que acreditaram que ele sairia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que rege nossas vidas. Sem Ele, nada seria possível. Aos meus pais, que mesmo com os dedos calejados de tanto trabalhar, se recusam a me deixar fora do alcance do conhecimento e da possibilidade de uma vida plena através da educação. Minha eterna gratidão por todo o sacrifício e dedicação. Ao meu grande amor, Keyla Jamille, por estar ao meu lado em todos esses momentos acadêmicos, oferecendo apoio e compreensão quando mais precisei. E a Natty Abacate, que igual ao mestre dos magos, aparece e logo some, mas sempre compartilhamos momentos especiais. E ao Westher, outro que faz o mesmo - some por meses, mas no fim nada muda em nossa amizade. Ao José Neto, por ter me acolhido nessa missão. Sem você, já teria desistido. Obrigado por acreditar em mim. A Bruna, por contribuir ainda mais com essa pesquisa, agregando valor e conhecimento ao trabalho. E por fim, ao grandíssimo amigo Zé Armado. O tempo passa, as coisas mudam, mas ele sempre está presente. Seja resolvendo os problemas do LaTeX, corrigindo minha gramática ou fazendo minhas figuras e esquemas. Meu muitíssimo obrigado, meu amigo, meu irmão. A todos vocês, minha sincera gratidão por tornarem esta jornada possível.



"Nunca ande por trilhas, pois assim só irá até
onde outros já foram." Alexander Graham Bell

BIOGRAFIA DO ALUNO

Filho de Maria do Nascimento Vasconcelos e Damião Alves dos Santos, nasceu em Goiânia no ano de 1998. Coursou o ensino médio no Centro de Ensino Caminho do Futuro, em Imperatriz – Maranhão. Posteriormente, graduou-se em Licenciatura em Matemática pelo IF Goiano – Campus Urutaí. Atualmente, encontra-se no mestrado em Modelagem Matemática e Computacional na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

RESUMO

DOS SANTOS, DANILO VASCONCELOS. Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí–GO, setembro de 2025. **Simulação Computacional Do Controle Biológico De *Meloidogyne javanica* com *Purpureocillium lilacinum***. Orientador: José Feliciano Bernardes Neto.

O presente estudo desenvolveu um modelo matemático para simular o controle biológico de *Meloidogyne javanica*, importante nematoide-das-galhas, utilizando o fungo nematófago *Purpureocillium lilacinum*. A modelagem foi baseada na adaptação do sistema predador-presa de Lotka-Volterra, expandido para representar as interações tri-tróficas entre planta hospedeira, nematoide e fungo. O sistema de equações diferenciais ordinárias foi parametrizado a partir de dados da literatura e resolvido numericamente em Python, por meio do método de Runge-Kutta de quarta ordem. As simulações demonstraram que a aplicação do fungo promove redução significativa da população de juvenis e adultos de *M. javanica*, favorecendo a recuperação da biomassa da planta e a estabilização do sistema produtivo. A análise de sensibilidade evidenciou que a taxa de infecção do fungo é determinante para o sucesso do biocontrole. Conclui-se que a simulação computacional é uma ferramenta promissora para avaliar estratégias de manejo sustentável de nematoides, indicando perspectivas de aplicação prática e a necessidade de validações experimentais futuras.

Palavras-chave: controle biológico; modelagem matemática; *Purpureocillium lilacinum*; *Meloidogyne javanica*; simulação computacional.

ABSTRACT

DOS SANTOS, DANILO VASCONCEILOS. Goiano Federal Institute – Urutaí Campus – GO, September 2025. **Computational Simulation of the Biological Control of *Meloidogyne javanica* with *Purpureocillium lilacinum***. Advisor: José Feliciano Bernardes Neto.

This study developed a mathematical model to simulate the biological control of *Meloidogyne javanica*, a major root-knot nematode, using the nematophagous fungus *Purpureocillium lilacinum*. The modeling was based on an adaptation of the Lotka-Volterra predator-prey system, extended to represent the tri-trophic interactions among host plant, nematode, and fungus. The system of ordinary differential equations was parameterized with data from the literature and numerically solved in Python using the Runge-Kutta fourth-order method. Simulations demonstrated that the introduction of the fungus significantly reduced populations of juveniles and adults of *M. javanica*, favoring plant biomass recovery and stabilizing the production system. Sensitivity analysis indicated that the fungal infection rate is a key factor for biocontrol success. These findings suggest that computational simulation is a promising tool for assessing sustainable nematode management strategies, highlighting its practical potential and the need for future experimental validation.

Keywords: Biological control; Mathematical modeling; *Purpureocillium lilacinum*; *Meloidogyne* spp.; Computational simulation.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
2. OBJETIVOS GERAIS	12
REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO I.....	13
1. Introdução	14
2. Referencial Teórico	16
3. Materiais e Métodos	18
4. Resultados e discussões.....	20
4.1. Resultados das simulações	20
4.2. Comparação entre cenários	26
4.3. Implicações práticas	27
4.4. Originalidade do estudo	27
4.5. Potencial de replicação do modelo	27
4.6. Limitações e perspectivas.....	27
5. Conclusões	28
6. Referências	29
CONCLUSÃO GERAL	32

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os nematoides de galhas das raízes, em especial *Meloidogyne javanica* (Machado *et al.*, 2014), constituem uma ameaça significativa à agricultura, afetando culturas de grande importância econômica como tomate, cenoura, batata e soja. Ao induzirem a formação de galhas nas raízes, comprometem a absorção de água e nutrientes, o que resulta em queda no desenvolvimento vegetal e na produtividade. As perdas globais associadas a esses patógenos são estimadas entre 80 e 110 bilhões de dólares anuais (Nicol *et al.*, 2011).

O controle químico tradicional, embora eficaz, acarreta riscos ambientais e à saúde humana, incluindo a contaminação do solo, de águas subterrâneas e a exposição de organismos não-alvo, como insetos benéficos e microrganismos do solo. Esses fatores reforçam a necessidade de alternativas sustentáveis, como o uso de bioinsumos (Desaeger *et al.*, 2020).

Nesse cenário, destaca-se o fungo nematófago *Purpureocillium lilacinum*, amplamente estudado e já presente em formulações comerciais registradas no Brasil como agente de biocontrole. Esse microrganismo atua parasitando ovos e juvenis de segundo estágio (J2) de *M. javanica*, promovendo reduções de até 62% na eclosão de ovos, 61% na viabilidade de juvenis, além da diminuição de 45–52% no número de galhas e 60–70% nas massas de ovos em condições de campo (El-Nagdi *et al.*, 2020; El-Ashry *et al.*, 2021; Santos & Martinelli., 2022). Tais resultados reforçam seu potencial como alternativa sustentável em programas de manejo integrado de pragas.

Com base no triângulo da doença, que considera a interação entre hospedeiro, patógeno e ambiente, este trabalho propõe a modelagem de dinâmicas tri-tróficas para simular tais interações e identificar estratégias ótimas de aplicação (Francl, 2001). Para tanto, foi adaptado o modelo predador-presa de Lotka-Volterra em equações diferenciais ordinárias (Boyce & DiPrima, 2020), implementado em Python para simulações numéricas em cenários com e sem aplicação do fungo, incluindo análise de sensibilidade.

Dessa forma, este estudo busca avaliar, por meio da simulação computacional, o potencial do *P. lilacinum* como bioinsumo no controle de *M. javanica*, contribuindo para a consolidação de práticas agrícolas mais seguras, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

2. OBJETIVOS GERAIS

Modelar as dinâmicas populacionais tri-tróficas envolvendo *Meloidogyne javanica*, *Purpureocillium lilacinum* e a planta hospedeira, por meio de simulações computacionais, a fim de avaliar cenários de controle biológico e propor estratégias sustentáveis de manejo agrícola.

REFERÊNCIAS

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C.; MEADE, D. B. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. 12. ed. Hoboken: Wiley, 2022.

DESAEGER, J.; WRAM, C.; ZASADA, I. New reduced-risk agricultural nematicides – rationale and review. *Journal of Nematology*, v. 52, e2020-31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-091>

EL-ASHRY, R. M.; OSMAN, G. Y.; ELSAYED, H. E.; ABDEL-MONAIM, M. F.; HASSAN, M. H. Integrated management of *Meloidogyne incognita* on tomato using combinations of abamectin, *Purpureocillium lilacinum*, rhizobacteria, and botanicals compared with nematicide. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 31, n. 93, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00438-x>.

FRANCL, L. J. The disease triangle: a plant pathological paradigm revisited. *The Plant Health Instructor*, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHI-T-2001-0517-01>.

GIANNAKOU, I. O.; KONSTANTINIDOU, E. D.; PAPADAKIS, J. S. Efficacy of *Purpureocillium lilacinum* in combination with chitosan for the control of *Meloidogyne javanica*. *Biocontrol Science and Technology*, v. 30, n. 10, p. 1067–1082, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1756227>.

MACHADO, A. C. Z. Current nematode threats to Brazilian agriculture. *Current Agricultural Science and Technology*, v. 20, n. 1, p. 26–35, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18539/cast.v20i1.3737>.

NICOL, J. M.; TURNER, S. J.; COYNE, D. L.; DE NIJS, L.; HOCKLAND, S.; MAAFI, Z. T. Current nematode threats to world agriculture. In: JONES, J.; GHEYSEN, G.; FENOLL, C. (ed.). *Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions*. Dordrecht: Springer, 2011. p. 21–43. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-0434-3_2.

SANTOS, R. S.; MARTINELLI, P. R. P. Controle biológico de *Meloidogyne* spp. com fungos nematófagos em cultivo de cenoura. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 12, e157111234301, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34301>.

CAPÍTULO I

Simulação Computacional Do Controle Biológico De *Meloidogyne javanica* com *Purpureocillium lilacinum*

(Normas de acordo com a Revista Ceres– Qualis B1)

Resumo

Este estudo apresenta uma modelagem matemática aplicada ao controle biológico de *Meloidogyne javanica* utilizando o fungo nematófago *Purpureocillium lilacinum*. A partir da adaptação do modelo predador-presa de Lotka-Volterra, foi desenvolvido um sistema de equações diferenciais ordinárias para representar a dinâmica populacional entre a cultura agrícola, o nematoide e o fungo antagonista. O modelo foi implementado em Python (bibliotecas SciPy e NumPy) e submetido a simulações numéricas em diferentes cenários, com e sem aplicação do biocontrole. Os resultados indicaram que a introdução do fungo reduziu significativamente a população de nematoides, estabilizando a biomassa da planta em níveis mais elevados e promovendo um sistema agrícola mais equilibrado e produtivo. A análise de sensibilidade revelou que a taxa de infecção do fungo é determinante para o sucesso do biocontrole.

Palavras-chave: Controle biológico; Modelagem matemática; *Purpureocillium*; *Meloidogyne*; Simulação computacional.

1. Introdução

Os nematoides de galhas das raízes, particularmente *Meloidogyne javanica* (Machado *et al.*, 2014), representam um problema significativo para a agricultura, afetando culturas de importância econômica como tomate, batata e outras solanáceas. Esse parasita penetra nas raízes das plantas, induzindo a formação de galhas que comprometem a absorção de água e nutrientes, resultando em redução do crescimento e da produtividade.

Economicamente, os prejuízos causados por espécies de *Meloidogyne* spp. são estimados em bilhões de dólares anualmente, com perdas globais que variam entre 80 e 110 bilhões de dólares em cultivos agrícolas. Esses impactos abrangem não apenas a queda na qualidade e quantidade da produção, mas também afetam exportações e provocam oscilações de preços (NICOL *et al.*, 2011). Em regiões altamente dependentes dessas culturas, os danos intensificam a insegurança alimentar, demandando estratégias de manejo mais eficazes.

Tabela 1- Nematicidas Históricos Banidos ou Restritos

Princípio Ativo	Classe Química	Principais Motivos da Restrição/Banimento
Brometo de Metila	Fumigante	Destruição da camada de ozônio; alta toxicidade humana.
Dibromocloropropano (DBCP)	Fumigante	Causa de esterilidade humana (distúrbios reprodutivos).
1,3-Dicloropropeno (1,3-D)	Fumigante	Potencial carcinógeno; risco de contaminação da água.
Aldicarb	Carbamato	Altíssima toxicidade aguda; contaminação de águas subterrâneas.
Carbofuran	Carbamato	Extrema toxicidade para aves e outros animais selvagens.
Fenamifos	Organofosforado	Alta toxicidade e risco de contaminação de águas subterrâneas.

Historicamente, o controle desses nematoides tem se baseado no uso de nematicidas químicos, que embora eficientes, acarretam riscos ambientais e à saúde humana. Esses compostos podem contaminar solos, águas subterrâneas e ecossistemas aquáticos, além de prejudicar organismos não-alvo, como insetos benéficos e microrganismos do solo (DESAEGER; WRAM; ZASADA, 2020). Além disso, a exposição prolongada a esses produtos está associada a distúrbios respiratórios, reprodutivos e neurológicos, o que levou à proibição ou restrição de diversos princípios ativos em diferentes países (Tabela 01).

Nesse cenário, os bioinsumos emergem como alternativas sustentáveis, promovendo o controle biológico por meio de agentes naturais que reduzem impactos negativos. Entre eles, destaca-se o fungo nematófago *Purpureocillium lilacinum*, um parasita de ovos e juvenis de segundo estágio (J2) de *M. javanica*, capaz de reduzir em aproximadamente 62% a eclosão de ovos e em 61% a viabilidade de J2 (EL-NAGDI; YOUSSEF; DAWOOD, 2020). Ensaios de campo também relatam reduções de 45 a 52% no índice de galhas e de 60 a 70% no número de massas de ovos (EL-ASHRY *et al.*, 2021; SANTOS & MARTINELLI, 2022).

O triângulo da doença, conceito fundamental em fitopatologia, explica a ocorrência de infecções como resultado da interação entre hospedeiro suscetível, patógeno e condições ambientais favoráveis (FRANCL, 2001). No caso de *M. javanica*, o nematoide estabelece sítios de alimentação nas raízes que alteram o metabolismo da planta, enquanto variáveis como temperatura, umidade e tipo de solo influenciam a mobilidade e a sobrevivência dos juvenis. Esse modelo evidencia a necessidade de intervenções que interrompam o ciclo patogênico, como a utilização de fungos antagonistas.

O impacto desses nematoides nas culturas é profundo, com reduções na biomassa radicular e foliar, ocorrência de clorose e murcha, além de perdas de produtividade que variam significativamente com a suscetibilidade da cultivar (DINARDO-MIRANDA, 2019).

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe modelar as dinâmicas populacionais tri-tróficas envolvendo o nematoide, o fungo e a planta hospedeira, simulando cenários de biocontrole e identificando estratégias de aplicação mais eficientes. Apesar do avanço no uso de *P. lilacinum* em estudos de biocontrole, ainda são escassas as abordagens que empregam modelagem matemática e simulação computacional para prever sua eficácia no manejo de *M. javanica*, o que confere originalidade e relevância a este estudo.

2. Referencial Teórico

A fundamentação teórica deste estudo explora os princípios científicos subjacentes às interações ecológicas e matemáticas no sistema tri-trófico composto pelo nematoide, pelo fungo antagonista e pela planta hospedeira. Essa análise baseia-se em conceitos de biologia parasitária, micologia aplicada e ecologia quantitativa, que fornecem suporte à modelagem das dinâmicas populacionais.

M. javanica pertence ao grupo dos nematoides de galhas das raízes, caracterizados por um ciclo de vida que envolve fases de ovos, juvenis e adultos, sendo os juvenis de segundo estágio (J2) os principais vetores de infecção (MACHARIA; DUONG; MOLELEKI, 2023). Esses parasitas apresentam ampla gama de hospedeiros e adaptam-se a condições tropicais e subtropicais por meio de mecanismos genéticos que conferem variabilidade intraespecífica. A patogênese inicia-se com a penetração dos J2 nas raízes, onde induzem a formação de células gigantes multinucleadas, alterando o fluxo vascular e o metabolismo da planta (SONG *et al.*, 2022). Efeitos secretados pelo nematoide, como *MjShKT* e *Mj2G02*, modulam as respostas imunes da hospedeira, facilitando o estabelecimento de sítios de alimentação (KUMAR *et al.*, 2023). Análises *in silico* revelam um secretoma diversificado, composto por proteínas secretadas tanto por vias clássicas quanto não clássicas, que contribuem para a virulência e adaptação do parasita (MACHARIA; DUONG; MOLELEKI, 2023). Essa complexidade genética e bioquímica reforça a necessidade de estratégias de controle que explorem vulnerabilidades específicas do ciclo vital do nematoide.

P. lilacinum é um fungo filamentoso com hábitos saprofíticos e parasitários, capaz de adotar estratégias nematofágicas por meio da produção de estruturas especializadas, como apressórios e hifas penetrantes (MORENO-GAVIRA *et al.*, 2020). Seu mecanismo de infecção envolve a adesão a ovos e juvenis de nematoides, seguida da secreção de enzimas, como serina proteases alcalinas e quitinases, que degradam a quitina da cutícula e facilitam a penetração (KHAN; TANAKA, 2023). Além disso, o fungo produz metabólitos secundários, como leucinotoxinas e ácidos de cadeia curta, que inibem o desenvolvimento do parasita (CONTRERAS-SOTO *et al.*, 2025). Mudanças transcricionais durante a infecção indicam a ativação de genes relacionados à patogenicidade, promovendo a destruição interna do hospedeiro nematoidal (KHAN; TANAKA, 2023). Essa versatilidade ecológica possibilita que *P. lilacinum* colonize rizosferas de forma persistente, integrando-se a agroecossistemas e contribuindo para a supressão de populações patogênicas.

O controle biológico fundamenta-se na manipulação de interações antagonistas para regular populações de patógenos, explorando mecanismos como hiperparasitismo e indução de resistência sistêmica nas plantas (CONTRERAS-SOTO *et al.*, 2025). No caso dos nematoides de galhas, fungos como *P. lilacinum* atuam em múltiplos níveis tróficos, influenciando não apenas o parasita, mas também a microbiota do solo e a fisiologia da planta hospedeira (MORENO-GAVIRA *et al.*, 2020). A associação com outros microrganismos, como bactérias promotoras de crescimento vegetal, amplia os efeitos positivos e promove um equilíbrio ecológico que reduz rebotes populacionais (CONTRERAS-SOTO *et al.*, 2025). Essa abordagem está alinhada ao conceito de manejo integrado de pragas, no qual fatores ambientais e genéticos da planta modulam a eficácia do antagonista.

Os modelos predador-presa, originados das equações de Lotka-Volterra, descrevem dinâmicas populacionais por meio de sistemas de equações diferenciais que capturam interações de crescimento e predação. A formulação básica é dada por:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta xy, \quad \frac{dy}{dt} = \delta xy - \gamma y$$

em que x representa a população da presa (nematoide), y a do predador (fungo), e os coeficientes refletem taxas intrínsecas e de interação (BOYCE; DIPRIMA, 2020).

Adaptações desses modelos incorporam pulsos de introdução de agentes de biocontrole, permitindo análises de estabilidade e oscilações populacionais (BOYCE; DIPRIMA, 2020; CONTRERAS-SOTO *et al.*, 2025). Modelos tri-tróficos estendem esse arcabouço ao incluir o recurso basal (planta), incorporando feedbacks como o consumo radicular pelo nematoide e a regulação pelo fungo (CIANCIO *et al.*, 2022). Estudos de simulação envolvendo *M. incognita* e fungos biocontroladores demonstram padrões cíclicos e pontos de equilíbrio dependentes de parâmetros como taxas de parasitismo (CIANCIO *et al.*, 2022). Essas simulações, resolvidas numericamente, auxiliam na otimização de rotações de culturas e na definição de estratégias de aplicação de antagonistas, considerando variações sazonais e densidades populacionais iniciais (CIANCIO *et al.*, 2022). A colaboração interdisciplinar fortalece esses modelos, ao integrar dados empíricos que tornam as previsões mais robustas e aplicáveis em cenários agrícolas.

Apesar dos avanços na literatura, ainda são escassas as abordagens que empregam simulação matemática para avaliar o papel de *P. lilacinum* no manejo de *M. javanica*, o que evidencia a originalidade e relevância deste estudo.

3. Materiais e Métodos

A pesquisa teve início por meio de uma revisão bibliográfica realizada nas bases de dados Periódicos CAPES e Google Scholar. Foram utilizados descritores específicos, tais como: “*Meloidogyne incognita*” AND (“biological control” OR “microbial control”); “*Meloidogyne javanica*” AND (*Bacillus subtilis*); “*Meloidogyne enterolobii*” AND (*Pochonia chlamydosporia*); “*Meloidogyne spp*” AND (“biological control”) AND (*Purpureocillium lilacinum*), além dos termos “*Purpureocillium lilacinum*” e “controle biológico de nematoides”.

Os artigos selecionados forneceram dados sobre taxas de reprodução, mortalidade e eficácia do fungo, que foram compilados em planilhas no Excel para a parametrização do modelo.

O modelo proposto consiste em um sistema tri-trófico contínuo, inspirado nos princípios predador-presa de Lotka-Volterra e adaptado para incluir interações nematoide–fungo–planta. As variáveis são:

- **J(t)**: densidade de juvenis J2;
- **N(t)**: densidade de nematoides adultos;
- **F(t)**: densidade do fungo;
- **H(t)**: biomassa da planta hospedeira.

O sistema de equações diferenciais ordinárias que descreve a dinâmica é dado por:

$$\begin{cases} \frac{dJ}{dt} = bN \left(\frac{H}{K_H} \right) - (g + u_J + aF) J, \\ \frac{dN}{dt} = gJ - u_N N, \\ \frac{dF}{dt} = eaJF - u_F F, \\ \frac{dH}{dt} = r_H H \left(1 - \frac{H}{K_H} \right) - cNH. \end{cases}$$

Onde:

- **b** representa a taxa de reprodução de J2 por adulto, dependente do suporte hospedeiro
- $\left(\frac{H}{K_H} \right)$ é a capacidade de suporte da planta;
- **g** indica a taxa de maturação de J2 em adultos;
- **u_J , u_n e u_f** correspondem às taxas de mortalidade natural de J2, adultos e fungo, respectivamente;

- a é a taxa de ataque do fungo sobre J2;
- e é a eficiência de conversão do parasitismo em crescimento fúngico;
- r_H representa a taxa de crescimento logístico da planta;
- c corresponde à taxa de consumo da planta pelos nematoides adultos.

O modelo incorpora elementos do Lotka-Volterra clássico e do crescimento logístico (GNR – *Generalized Nonlinear Response*), ampliados por feedbacks tri-tróficos.

Tabela 2-Parâmetros

Parâmetro	Significado Biológico	Unidade	Valor / Faixa Usada	Fonte (Referência científica)
b	Taxa de produção de J2 por adulto (oviposição efetiva por dia)	J2/dia	$\sim 0.3\text{--}0.8$	Gupta, R., Sharma, G. C., & Priyanka, S. (2018) [1] e Kaur, T., et al. (2016) [2]
g	Taxa de transição J2 $\rightarrow$ Adulto	1/dia	$\sim 0.07\text{--}0.12$ (1/8 a 1/14 dias)	Ploeg, A. T., & Maris, P. C. (1999) [3]
uJ	Mortalidade natural de J2	1/dia	0.01–0.05	Lu, C. J., et al. (2022) [4]
uN	Mortalidade natural de Adulto	1/dia	~ 0.04 (vida média ~ 25 dias)	Ciancio, A., et al. (2022) [5]
uF	Mortalidade natural do fungo	1/dia	0.03–0.06	Parajuli, G., Kemerait, R., & Timper, P. (2014) [6] e Rumbos, C. I., & Kiewnick, S. (2006) [7]
a	Taxa de ataque do fungo sobre J2	1/(dia·unid)	Escolhido para reproduzir redução de 50–60%	Dahlin, P., et al. (2019) [8], López-Lima, D., et al. (2023) [9], Isaac, G. S., et al. (2024) [10] e Nagachandrabose, S., et al. (2018) [11]
e	Eficiência de conversão (J2 “comidos” $\rightarrow$ crescimento fúngico)	adimensional	0.8–1.0 (alta eficiência)	Literatura geral sobre modelos predador-presa microbiológicos e ecologia trófica
r_H	Taxa de crescimento da planta	1/dia	0.02–0.06	de Oliveira, M. M. T., et al. (2024) [12] e Salinier, J., et al. (2019) [13]
c	Consumo de biomassa da planta pelo nematoide	1/(dia·unid)	0.001–0.01	

Os parâmetros empregados no modelo, extraídos da literatura e de estudos empíricos, estão detalhados na Tabela 2. O sistema de equações foi resolvido numericamente com o método de Runge-Kutta de quarta ordem, implementado em Python (biblioteca SciPy), partindo das condições iniciais de $J_0=10$ e $H_0=100$, sem a presença do fungo, que foi introduzido no sistema em $t=24$ dias. O intervalo de simulação foi estabelecido em 200 dias, pois essa duração abrange o ciclo de campo da maioria das culturas hospedeiras (conforme Tabela 3), permitindo analisar a interação completa entre nematoide, planta e fungo em condições agrícolas realistas.

Tabela 3-Tempo de crescimento das solanaceas

Cultura	Nome Científico	Tempo Médio no Campo (do transplântio/plântio à colheita)
Tomate (Indústria)	<i>Solanum lycopersicum</i>	90 - 130 dias
Tomate (Mesa)	<i>Solanum lycopersicum</i>	150 - 200+ dias
Batata	<i>Solanum tuberosum</i>	70 - 130 dias
Pimentão / Pimenta	<i>Capsicum annuum</i>	150 - 180 dias
Berinjela	<i>Solanum melongena</i>	180 - 220 dias
Fumo / Tabaco	<i>Nicotiana tabacum</i>	90 - 120 dias

4. Resultados e discussões

4.1. Resultados das simulações

As simulações realizadas permitiram avaliar a dinâmica tri-trófica entre *M. javanica*, *P. lilacinum* e a planta hospedeira, considerando cenários com e sem a aplicação do biocontrole.

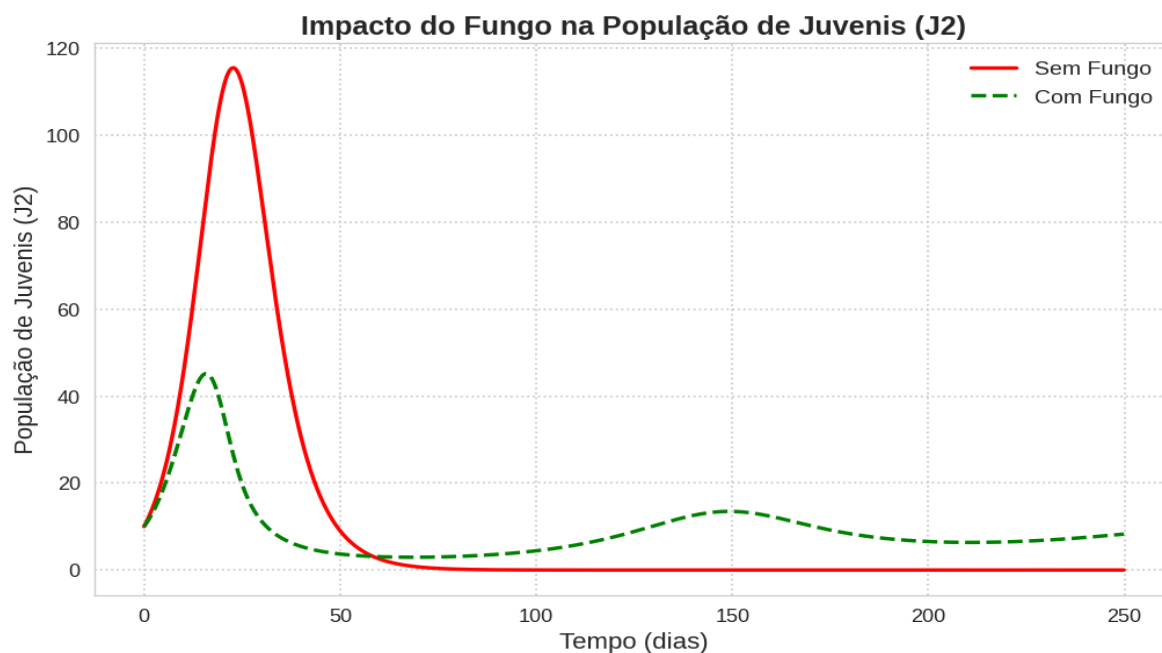


Figura 1- Dinâmica da População de Juvenis (J2) sob Controle Biológico

A Figura 1 ilustra a dinâmica temporal da população de nematoides em seu segundo estágio juvenil (J2), comparando um sistema sem controle biológico (ausência de fungo) com um sistema sob a ação do agente nematófago. No cenário sem controle, observa-se um crescimento exponencial inicial que culmina em um pico populacional agudo (~115 indivíduos), seguido por um colapso subsequente devido à exaustão do recurso alimentar (planta hospedeira). Em contrapartida, na presença do fungo, a dinâmica é drasticamente alterada. O pico populacional é significativamente atenuado (~45 indivíduos) e, subsequentemente, a população é regulada em um patamar baixo e oscilatório. Este resultado evidencia a eficácia do agente de controle biológico em suprimir a população da praga em um estágio crítico de seu ciclo de vida, prevenindo surtos populacionais.

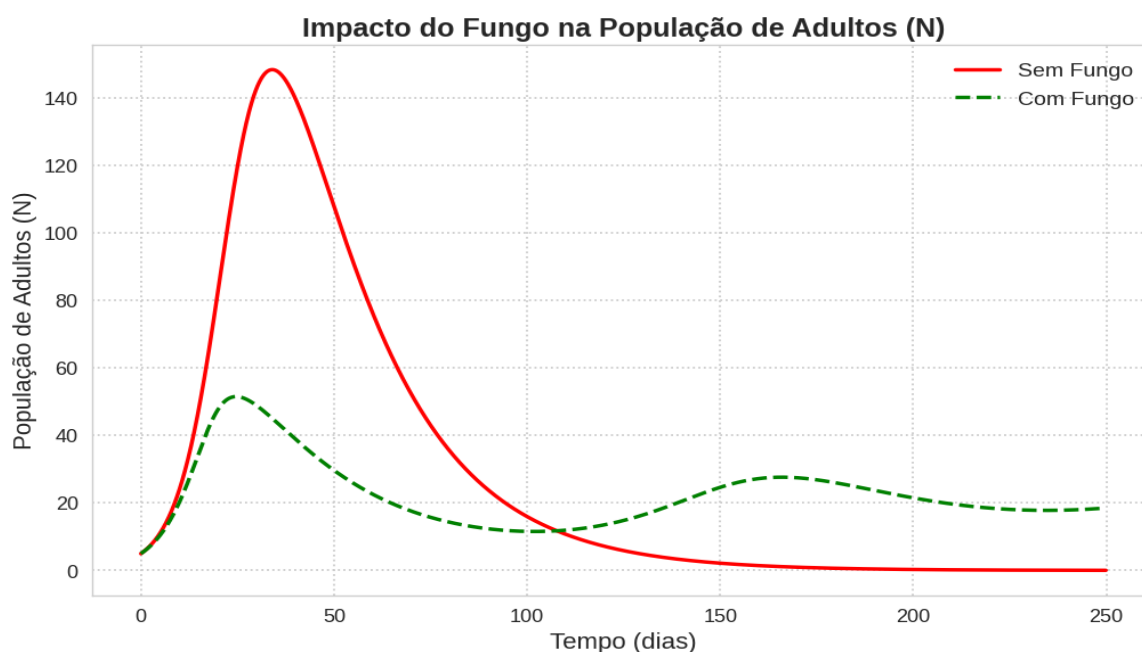


Figura 2-Dinâmica da População de Nematoides Adultos (N)

A Figura 2 apresenta a dinâmica correspondente para a população de nematoides adultos (N), que representam o estágio reprodutivo e de maior dano ao hospedeiro. O impacto propagado do controle sobre os juvenis é claramente visível. No sistema não controlado, o pico de J2 resulta em um pico subsequente e ainda mais pronunciado de adultos (~150 indivíduos). No sistema controlado, a supressão dos juvenis leva a uma redução drástica no recrutamento de adultos, cujo pico é atenuado em aproximadamente 65%. A regulação contínua mantém a população adulta em níveis baixos, limitando tanto o dano direto à planta quanto o potencial reprodutivo da praga.

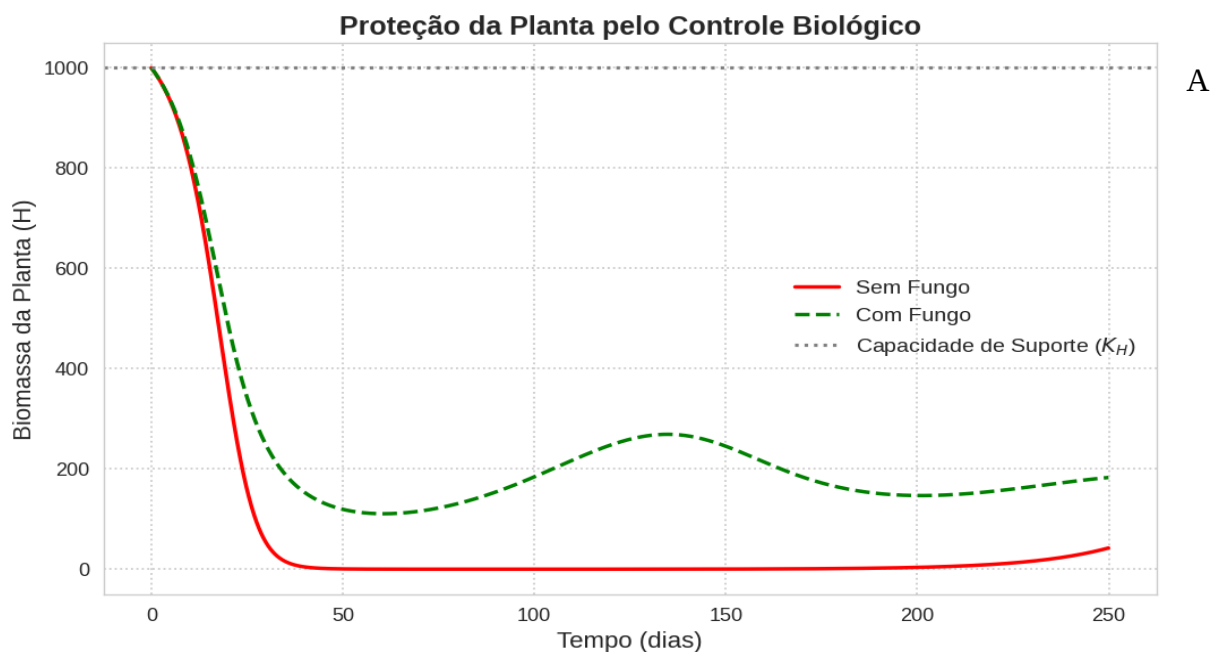


Figura 3-Efeito do Controle Biológico na Biomassa da Planta Hospedeira (H)

Os efeitos da regulação populacional do nematoide sobre a planta hospedeira são quantificados na Figura 3, que plota a evolução da biomassa vegetal (H) ao longo do tempo. Na ausência do fungo, a infestação descontrolada de nematoides resulta em um declínio acentuado da biomassa, levando à exaustão quase completa dos recursos do hospedeiro em aproximadamente 50 dias, caracterizando um colapso da cultura. Em contraste, o sistema sob controle biológico, embora sofra um impacto inicial, demonstra resiliência. A biomassa da planta se estabiliza em um patamar sustentável, confirmando que a regulação da praga se traduz diretamente na preservação da integridade e viabilidade do hospedeiro.

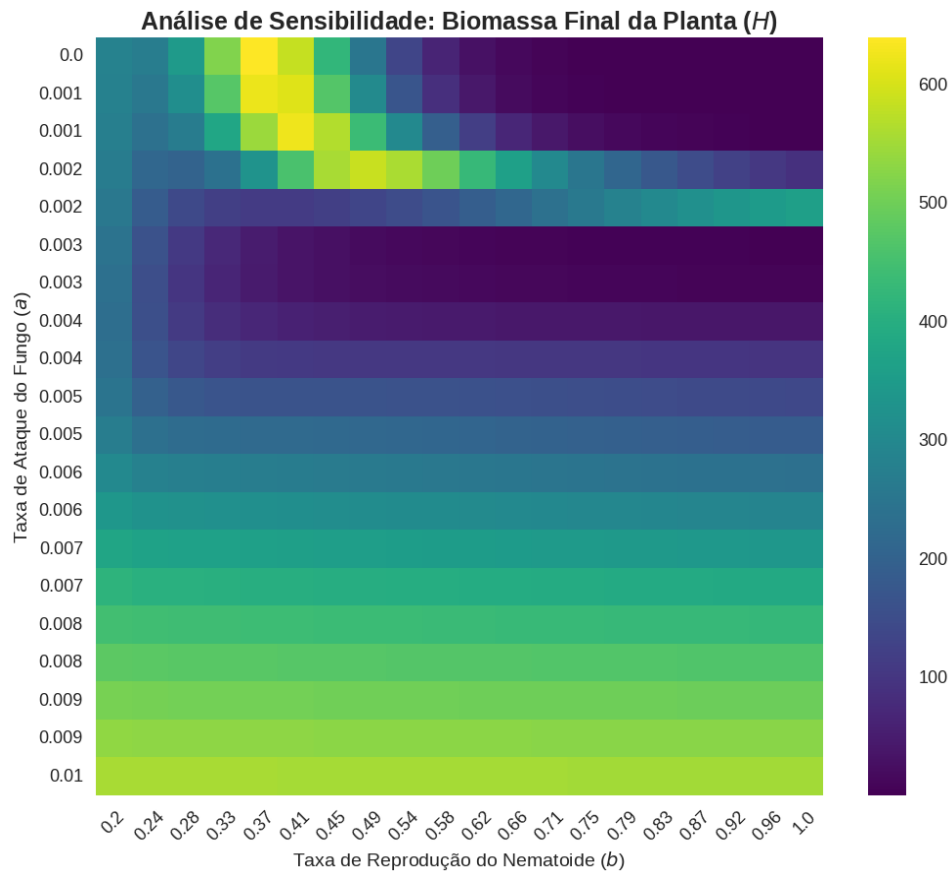


Figura 4-Análise de Sensibilidade Paramétrica

Figura 4 exhibe os resultados da análise de sensibilidade paramétrica, mapeando o impacto da variação simultânea da taxa de reprodução do nematoide (b) e da taxa de ataque do fungo (a) sobre a biomassa final da planta. A superfície de resposta revela regiões distintas no espaço de parâmetros. A região superior do mapa (valores elevados de a) é dominada por alta biomassa final (indicada em amarelo), sugerindo que um agente de controle altamente eficiente ($a > 0.005$) é capaz de garantir a proteção da cultura independentemente da virulência da praga (variação em b). Em contrapartida, a região inferior (valores baixos de a) mostra uma forte dependência da virulência da praga, com o colapso da biomassa (indicada em roxo) ocorrendo para valores elevados de b . A análise identifica, portanto, limiares críticos de eficácia para o agente de controle, fornecendo insights quantitativos sobre as condições necessárias para o sucesso do manejo biológico.

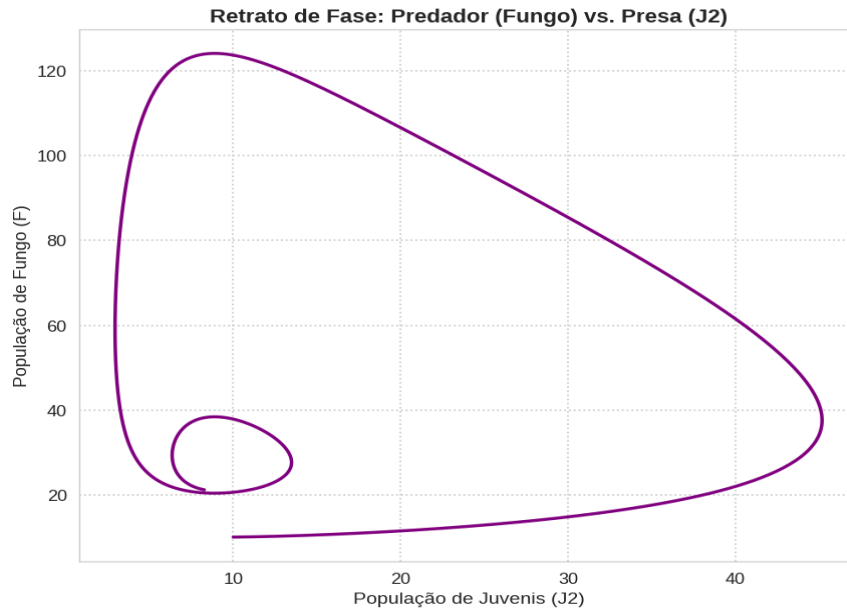


Figura 5-Retrato de Fase da Interação Predador-Presa (Fungo vs. J2)

A Figura 5 apresenta o retrato de fase da interação entre o fungo nematófago (predador) e os juvenis J2 (presa), eliminando a variável tempo para focar na dependência mútua entre as populações. O sistema exibe um ciclo limite estável, caracterizado por oscilações periódicas e defasadas. A trajetória demonstra que um aumento na densidade da presa (movimento para a direita) é seguido por um aumento na densidade do predador (movimento para cima). O subsequente aumento da predação leva a uma redução na população de presas (movimento para a esquerda), o que, por sua vez, causa um declínio na população do predador por escassez de recursos (movimento para baixo), fechando o ciclo. Este comportamento é consistente com os modelos clássicos de Lotka-Volterra, indicando uma coexistência dinâmica estável.

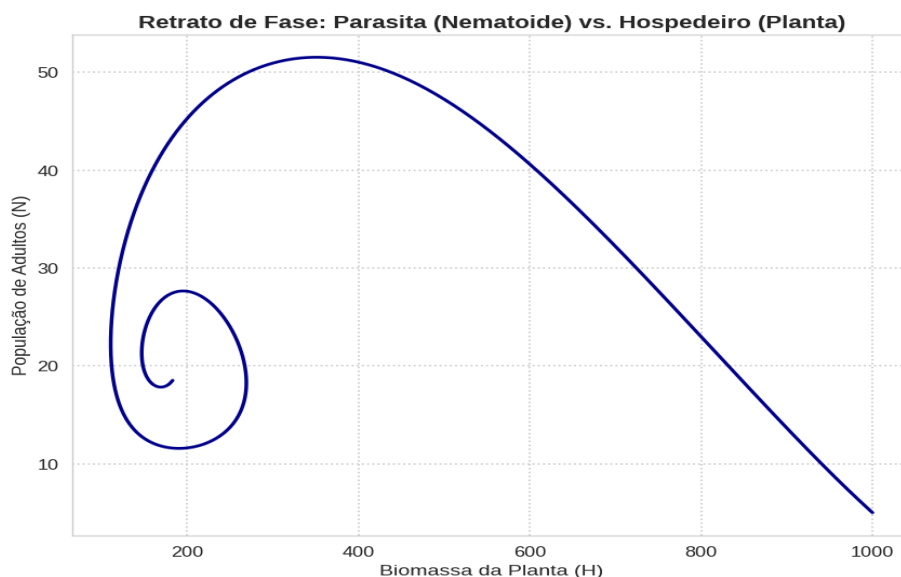


Figura 6- Retrato de Fase da Interação Parasita-Hospedeiro (Nematoide vs. Planta)

A relação entre o nematoide adulto (parasita) e a biomassa da planta (hospedeiro) é explorada no retrato de fase da Figura 6. A trajetória descreve uma espiral convergente, indicando que o sistema evolui através de oscilações amortecidas em direção a um atrator de ponto fixo. Este ponto representa um equilíbrio estável no qual as populações do parasita e do hospedeiro coexistem com densidades que não levam ao colapso de nenhuma das partes. A estabilidade deste equilíbrio é uma propriedade emergente do sistema regulado como um todo, mediada indiretamente pela ação do fungo, que atua como um fator estabilizador ao limitar o crescimento excessivo do parasita.

4.2. Comparação entre cenários

A análise comparativa dos cenários com e sem fungo evidencia que, embora as populações de nematoides apresentem picos iniciais semelhantes, a inoculação de *P. lilacinum* reduziu a amplitude dos ciclos populacionais e favoreceu a recuperação parcial da biomassa vegetal. Em termos práticos, isso significa que o biocontrole não eliminou totalmente a população de *M. javanica*, mas foi capaz de diminuir a intensidade dos surtos e prolongar a estabilidade do sistema.

4.3. Implicações práticas

Esses resultados reforçam a ideia de que, em campo, o uso de *P. lilacinum* pode não ser suficiente para erradicar o patógeno, mas é eficaz em reduzir as infestações a níveis menos prejudiciais, contribuindo para ganhos de produtividade e sustentabilidade. Essa interpretação está alinhada aos relatos de El-Ashry *et al.* (2021) e Santos e Martinelli (2022), que descrevem reduções entre 45–70% em índices de galhas e massas de ovos.

4.4. Originalidade do estudo

A originalidade do presente trabalho reside na aplicação de modelagem matemática e simulação computacional para prever a eficácia do biocontrole, uma abordagem ainda pouco explorada em estudos com *M. javanica*. O uso desse recurso permitiu identificar padrões de oscilação populacional, pontos de equilíbrio e o papel crítico do tempo de inoculação para o sucesso do manejo.

4.5. Potencial de replicação do modelo

Embora este estudo tenha se concentrado na interação entre *M. javanica* e *P. lilacinum*, o modelo desenvolvido é flexível e pode ser parametrizado para outros nematoides de importância agrícola, como *M. incognita* e *M. enterolobii*, bem como para outros microrganismos antagonistas, incluindo *Pochonia chlamydosporia* e *Trichoderma* spp. Essa característica amplia o potencial de aplicação da ferramenta, tornando-a útil em diferentes sistemas de cultivo.

As principais vantagens dessa replicação são: (i) a possibilidade de generalizar o modelo para diferentes patossistemas; (ii) a capacidade de prever cenários de infestação antes da validação experimental, reduzindo custos e tempo de pesquisa; (iii) a otimização de estratégias de manejo, como o momento de inoculação do agente de biocontrole; e (iv) o apoio ao manejo integrado de pragas (MIP), por meio da simulação de sistemas agrícolas menos dependentes de químicos.

4.6. Limitações e perspectivas

Apesar da consistência dos resultados com a literatura, os picos secundários de adultos e juvenis revelam limitações do modelo, como a ausência de variabilidade ambiental,

estocasticidade populacional e interações com outros microrganismos do solo. Nesse sentido, estudos futuros podem integrar dados experimentais de campo para calibrar parâmetros e testar hipóteses geradas pelas simulações. Além disso, a associação de *P. lilacinum* com práticas como rotação de culturas ou coaplicação com bactérias promotoras de crescimento pode ampliar a eficácia do manejo integrado, conforme sugerido por Contreras-Soto *et al.* (2025).

5. Conclusões

Em síntese, a modelagem proposta contribui para o avanço no entendimento das interações entre planta, nematoide e fungo, além de oferecer uma ferramenta computacional que pode apoiar a tomada de decisão em estratégias agrícolas mais sustentáveis e menos dependentes de insumos químicos.

O grande achado deste trabalho foi demonstrar que a modelagem matemática aplicada ao biocontrole de nematoides pode servir como ferramenta preditiva, replicável a outros microrganismos e espécies de nematoides, oferecendo subsídios inovadores para o manejo integrado de pragas.

6. Referências

- BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C.; MEADE, D. B. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. 12. ed. Hoboken: Wiley, 2022.
- CIANCIO, A.; VERDEJO-LUCAS, S.; ESCUDERO, N.; MINTO, L. Modeling root-knot nematode regulation by the biocontrol fungus *Pochonia chlamydosporia*. *Frontiers in Fungal Biology*, v. 3, p. 900974, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.900974>.
- CONTRERAS-SOTO, B. A.; TOVAR-PEDRAZA, J. M.; SOLANO-BÁEZ, A. R.; BAYARDO-ROSALES, H.; MÁRQUEZ-LICONA, G. 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: <https://doi.org/10.3390/jof11070517>.
- DAHLIN, P., ET AL. (2019). Integrated control of *Meloidogyne incognita* in tomatoes using fluopyram and *Purpureocillium lilacinum* strain 251. *Crop Protection*, 124, 104853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219419302200>
- DE OLIVEIRA, M. M. T., ET AL. (2024). *Family ties: Root-root communication within Solanaceae*. *Plant Science*, 343, 112079. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168945224002309>
- DESAEGER, J.; WRAM, C.; ZASADA, I. New reduced-risk agricultural nematicides – rationale and review. *Journal of Nematology*, v. 52, e2020-31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-091>.
- DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V. *Damage caused by Meloidogyne javanica and Pratylenchus zeae to sugarcane cultivars*. *Scientia Agricola*, v. 76, n. 5, p. 436-442, 2019.
- EL-ASHRY, R. M.; OSMAN, G. Y.; ELSAYED, H. E.; ABDEL-MONAIM, M. F.; HASSAN, M. H. Integrated management of *Meloidogyne incognita* on tomato using combinations of abamectin, *Purpureocillium lilacinum*, rhizobacteria, and botanicals compared with nematicide. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, v. 31, n. 93, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00438-x>
- FORTNUM, B. A. (1991). Biomass Partitioning in Tomato Plants Infected with *Meloidogyne incognita*. *Journal of Nematology*, 23(4), 447-454. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60820000/Manuscripts/1991/Man268.pdf>
- FRANCL, L. J. The disease triangle: a plant pathological paradigm revisited. *The Plant Health Instructor*, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHI-T-2001-0517-01>
- GIANNAKOU, I. O.; KONSTANTINIDOU, E. D.; PAPADAKIS, J. S. Efficacy of *Purpureocillium lilacinum* in combination with chitosan for the control of *Meloidogyne javanica*. *Biocontrol Science and Technology*, v. 30, n. 10, p. 1067–1082, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1756227>

GUPTA, R., SHARMA, G. C., & PRIYANKA, S. (2018). *Life table of Meloidogyne incognita (Southern root-knot nematode) on tomato*. Journal of Entomology and Zoology Studies, 6(4), 251-256. Disponível em: <https://www.entomoljournal.com/archives/2018/vol6issue4/PartE/6-4-5-961.pdf> [2]

ISAAC, G. S., ET AL. (2024). *Efficacy of Purpureocillium lilacinum AUMC 10149 as biocontrol agent against root-knot nematode Meloidogyne incognita infecting tomato plant*. Brazilian Journal of Biology, 84, e259453. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/GNX5mWgysYcyp8hTdjSXN4t/?format=html&lang=en>

KAUR, T., ET AL. (2016). *Effect of different temperatures on the egg hatching of root-knot nematode, Meloidogyne incognita*. Journal of Insect Science, 29(1), 123-126.

KHAN, M.; TANAKA, K. *Purpureocillium lilacinum* for plant growth promotion and biocontrol against root-knot nematodes infecting eggplant. PLoS ONE, v. 18, n. 3, e0283550, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283550>.

KUMAR, A.; SINGH, S.; YADAV, S.; KUMAR, S.; PATHAK, M. Two candidate *Meloidogyne javanica* effector genes, *mjshkt* and *mjput3*: a functional investigation of their roles in regulating nematode parasitism. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, v. 36, n. 2, p. 79–94, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1094/MPMI-10-22-0212-R>.

LÓPEZ-LIMA, D., ET AL. (2023). *Metarhizium carneum* Formulations: A Promising New Alternative for the Biological Control of Root-Knot Nematodes (*Meloidogyne* spp.). *Insects*, 14(10), 830. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10574380/>

LU, C. J., ET AL. (2022). Survival and infectivity of second-stage root-knot nematode *Meloidogyne incognita* juveniles depend on lysosome-mediated lipolysis. *PLoS Pathogens*, 18(2), e1010296. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8861644/> [5] [6]

MACHADO, A. C. Z. Current nematode threats to Brazilian agriculture. *Current Agricultural Science and Technology*, v. 20, n. 1, p. 26–35, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18539/cast.v20i1.3737>

MACHARIA, T. N.; DUONG, T. A.; MOLELEKI, L. N. *In silico* secretome analyses of the polyphagous root-knot nematode *Meloidogyne javanica*: a resource for studying *M. javanica* secreted proteins. *BMC Genomics*, v. 24, n. 296, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-023-09366-6>.

MELAKEBERHAN, H., & FERRIS, H. (1988). *Growth and energy demand of Meloidogyne incognita on susceptible and resistant Vitis vinifera cultivars*. Journal of Nematology, 20(2), 302-310. Disponível em: <https://journals.flvc.org/jon/article/view/69212> [15]

MORENO-GAVÍRA, A.; HUERTAS, V.; DIÁNEZ, F.; SÁNCHEZ-MONTESINOS, B.; SANTOS, M. *Paecilomyces* and its importance in the biological control of agricultural pests and diseases. *Plants*, v. 9, n. 12, p. 1746, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9121746>.

NAGACHANDRABOSE, S., ET AL. (2018). Liquid bioformulations for the management of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* in tomato. *Crop Protection*, 112, 293-300. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219418302497>

NICOL, J. M.; TURNER, S. J.; COYNE, D. L.; DE NIJS, L.; HOCKLAND, S.; MAAFI, Z. T. Current nematode threats to world agriculture. In: JONES, J.; GHEYSEN, G.; FENOLL, C. (ed.). *Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions*. Dordrecht: Springer, 2011. p. 21–43. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-0434-3_2.

PARAJULI, G., KEMERAIT, R., & TIMPER, P. (2014). *Improving suppression of Meloidogyne spp. by Purpureocillium lilacinum strain 251*. *Nematology*, 16(6), 711-719. Disponível em: https://brill.com/view/journals/nemy/16/6/article-p711_7.xml

PLOEG, A. T., & MARIS, P. C. (1999). Effects of temperature on the duration of the life cycle of a *Meloidogyne incognita* population. *Nematology*, 1(4), 389-393. Disponível em: https://brill.com/view/journals/nemy/1/4/article-p389_5.xml [4]

RUMBOS, C. I., & KIEWNICK, S. (2006). *Effect of Plant Species on Persistence of Paecilomyces lilacinus Strain 251 in Soil and on Root Colonization by the Fungus*. *Plant and Soil*, 289(1-2), 227-237. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-005-6804-1>

SALINIER, J., ET AL. (2019). Root Architectural Trait Diversity in Aubergine (*Solanum melongena*) and Related Wild Species. *Plants*, 8(11), 475. Disponível em: https://cbgg.hapres.com/htmls/CBGG_1067_Detail.html

SANTOS, R. S.; MARTINELLI, P. R. P. Controle biológico de *Meloidogyne* spp. com fungos nematófagos em cultivo de cenoura. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 12, e157111234301, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34301>

SASSER, J. N.; FRECKMAN, D. W. A world perspective on nematology: the role of the society. In:

VEECH, J. A.; DICKSON, D. W. (ed.). *Vistas on Nematology*. Hyattsville: Society of Nematologists, 1987. p. 7–14.

SONG, H.; LIN, B.; HUANG, Q.; SUN, T.; WANG, W.; LIAO, J.; ZHUO, K. The *Meloidogyne javanica* effector *mj2g02* interferes with jasmonic acid signalling to suppress cell death and promote parasitism in *Arabidopsis*. *Molecular Plant Pathology*, v. 22, n. 10, p. 1288–1301, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.13111>

CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho apresentou e avaliou um modelo matemático tri-trófico (planta–*Meloidogyne javanica*–*Purpureocillium lilacinum*) inspirado em Lotka–Volterra, resolvido numericamente em Python, para simular cenários de biocontrole em condições teóricas. As simulações mostraram que a inoculação de *P. lilacinum* reduz de forma consistente as populações de juvenis (J2) e adultos do nematoide, amortece os ciclos populacionais e favorece a recuperação parcial da biomassa vegetal, ainda que não promova erradicação completa do patógeno. A análise de sensibilidade destacou a taxa de infecção do fungo como parâmetro crítico para o sucesso do manejo, bem como o timing de aplicação como fator estratégico para estabilizar o sistema.

No plano aplicado, os resultados corroboram evidências experimentais da literatura de que *P. lilacinum* é eficaz em reduzir a pressão parasitária a níveis economicamente toleráveis, contribuindo para a sustentabilidade do manejo e para a diminuição da dependência de nematicidas químicos. O modelo, ao fornecer previsões rápidas e controladas de “e se?”, configura-se como ferramenta de apoio à decisão para orientar janelas de aplicação, combinações com outras táticas (rotação de culturas, consórcios microbianos) e metas de supressão.