

**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAV**

**Nematoides fitoparasitas: métodos de controle e mecanismos de sobrevivência.**

**REJANE VALERIANO DA SILVA**

**BRASÍLIA - DF**

**2022**

**REJANE VALERIANO DA SILVA**

**Nematoides fitoparasitas: métodos de controle e mecanismos de sobrevivência.**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Agronomia para a obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

**Orientador:** Prof. Dr. Cleber Furlanetto

**Coorientador:** Dr. Thales Lima Rocha

**BRASÍLIA - DF**

**2022**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Para João (*in memoriam*), Maria (*in memoriam*),  
Joaquim, Sebastiana, Eliana, Hélio, Eni, Romilda  
e Roberto. Para Kaíque (*in memoriam*), meu  
querido e grande amigo que estará para sempre em  
meu coração. Para todos os meus sobrinhos.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem o qual eu nada posso fazer, por me ter concedido chegar até aqui e, que sei, continuará me conduzindo pelos bons caminhos, me fazendo alcançar todos os meus objetivos. Agradeço por Ele ter sempre colocado pessoas maravilhosas em minha vida, que me ajudaram nas necessidades próprias de cada tempo vivido. Agradeço ainda pelas dificuldades no percurso, que por vezes me fizeram vacilar, pensando estar só, mas que foram importantes para o meu crescimento pessoal. Entendi que d'Ele emanam todas as boas coisas e, no momento certo, Ele as faz acontecer.

Agradeço aos meus avós maternos, João (*in memoriam*) e Maria (*in memoriam*), por terem me ensinado na prática o significado do que é verdadeiramente o amor ao meu semelhante. Pessoas simples, grandes na fé, de sabedoria extraordinária e um coração bondoso.

Agradeço aos meus pais, Joaquim e Sebastiana, por terem me criado de acordo com os valores cristãos, me ensinando a única coisa sem a qual eu não poderia viver, que é o amor a Deus. Agradeço pelo esforço empenhado em minha educação, exemplificando com suas próprias vidas, que importa ser bom. Que vale a pena ser gentil, de boa índole, ajudar o próximo, enfim, dar sempre o melhor de si.

Agradeço aos meus irmãos, Eliana, Hélio, Eni, Romilda e Roberto, pessoas que não tenho nem palavras para descrever o quão são importantes para mim. Agradeço pelos conselhos, pelas boas conversas, pelas histórias engraçadas desde a infância, acompanhadas de muitas gargalhadas. Agradeço por sempre me desejarem força, me incentivando a não desistir dos meus sonhos, mesmo diante de tantas dificuldades. Agradeço ainda pela ajuda de custo nos últimos tempos, que me possibilitou completar os estudos com um pouco mais de tranquilidade.

Agradeço à minha amiga Natália Manami Higa Jimenez, por compartilhar comigo seus anseios, dúvidas, 'medos', enfim, todas estas inquietudes próprias da vida acadêmica. Essas nossas conversas me fizeram entender que eu não estava só neste caminho fantástico na busca pelo conhecimento, mas que por vezes é bastante desafiador. Que na verdade, a maioria das pessoas comungam das mesmas 'aflições' que eu enfrentei e ainda enfrento.

Agradeço ao meu coorientador, Dr. Thales Lima Rocha, por toda confiança depositada em mim, pela amizade, pela paciência, pela generosidade e, o grande coração. Agradeço pelos ensinamentos/conhecimentos dispensados a mim. Agradeço pelas conversas sempre tão cheias

de sabedoria, por todo apoio e, pelo olhar terno quando a insegurança me cerceava. Agradeço pelo exemplo de fé e alegria. Agradeço acima de tudo, pela oportunidade de eu me aventurar pelos fascinantes caminhos da ciência.

Agradeço à Universidade de Brasília por todo o aparato colocado à minha disposição ao longo destes cinco anos. Agradeço à FAV-UnB (Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - UnB) pelo exímio corpo docente, que propiciou um ensino de qualidade.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Cleber Furlanetto, pela boa vontade em me orientar nessa fase crucial do curso. Agradeço por todos os semestres em que me deu aula, ensinando com dedicação e serenidade, o apaixonante mundo da nematologia vegetal. Agradeço pela parceria na realização deste trabalho e por sempre me acolher e atender positivamente, todas as vezes que lhe procurei pedindo ajuda.

Agradeço às professoras Dra. Nara Oliveira Silva Souza e Dra. Michelle Souza Vilela por prontamente atenderem ao meu pedido de colaborar com este trabalho, como membros da banca examinadora.

Agradeço às colegas de trabalho, Paula Darliny Silva Ferreira e Adriana Andrade Ferreira pela ajuda, torcida e carinho de sempre.

Agradeço aos meus colegas de curso que se fizeram mais presentes em minha vida durante a graduação, pelos momentos de descontração que tornaram os dias mais leves.

Agradeço a sociedade em geral, que por meio de contribuições mantém o funcionamento das universidades públicas, o que permitiu que eu tivesse acesso ao ensino superior.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste sonho.

Com o coração cheio de alegria e gratidão, gostaria de externar o meu muito obrigada a todos vocês.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.*

***Arthur Schopenhauer***

**Nematoides fitoparasitas: métodos de controle e mecanismos de sobrevivência.**

**REJANE VALERIANO DA SILVA**

APROVADO EM 05/10/2022, PELA BANCA EXAMINADORA:

**Professor Dr. Cleber Furlanetto**

Orientador - Universidade de Brasília

Instituto de Biologia - IB / Departamento de Fitopatologia

**Professora Dra. Nara Oliveira Silva Souza**

Examinadora - Universidade de Brasília

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAV

**Professora Dra. Michelle Souza Vilela**

Examinadora - Universidade de Brasília

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAV

**BRASÍLIA - DF**

**2022**



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>14</b>
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>14</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Nematoides parasitas de plantas.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.2 Métodos de Controle de fitonematoides.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.2.1 Controle Varietal.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1.2.2 Controle Cultural .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.2.3 Controle Químico .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.2.4 Controle Biológico .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.2.5 Controle Alternativo .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2 Mecanismos de sobrevivência .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.1 Quiescência .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.1.1 Anidrobiose .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.1.2 Anoxibiose .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.1.3 Criobiose.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.2 Diapausa.....</b>	<b>28</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>30</b>
<b>6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>30</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

**J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub>, J<sub>3</sub> e J<sub>4</sub>** - Juvenis de primeiro, segundo, terceiro e quarto estágio respectivamente.

**RFLPs** - *Restriction Fragment Length Polymorphisms* (Polimorfismo do comprimento do fragmento de restrição).

**AFLPs** - *Amplified Fragment Length Polymorphisms* (Polimorfismo de comprimento de fragmento amplificado).

**RAPDs** - *Random Amplified Polymorphic DNA* (DNA polimórfico amplificado aleatório).

**SCAR** - *Sequence Characterized Amplified Region* (Região amplificada caracterizada por sequência).

**R** - Resistente.

**ONU** - Organização das Nações Unidas.

**CONAB** - Companhia Nacional de Abastecimento.

**RNA-seq** - RNA sequenciamento.

**ROS** - *Reactive Oxygen Species* (Espécies reativas de oxigênio).

**cGMP** - Monofosfato de guanosina cíclica.

**STS** - *Sequence Tagged Site* (Locais marcados por sequência).

**p.H** - potencial hidrogeniônico

**mRNA** - Messenger RNA (RNA mensageiro)

## RESUMO GERAL

SILVA, Rejane Valeriano da. **Nematoides fitoparasitas: métodos de controle e mecanismos de sobrevivência**. 2022. 35f. Monografia. Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil.

A agricultura brasileira tem crescido consideravelmente em importância nas últimas décadas, conferindo ao país o *'status'* de celeiro do mundo. De acordo com as projeções de crescimento da população mundial para os próximos anos, a produção de alimentos deverá ser mais eficiente no que tange ao ganho em produtividade e sustentabilidade, para continuar suprindo a demanda global. Nesse âmbito, o Brasil que é um país essencialmente agrícola, figura como um dos grandes *'players'* da produção global de alimentos. Contudo, alguns entraves como intempéries climáticas e ocorrência de pragas, por exemplo, devem ser transpostos a fim de aumentar a produtividade e qualidade dos alimentos. Atualmente, um dos problemas mais preocupantes nos sistemas agrícolas é a ocorrência de fitonematoides, dada a complexidade de manejo desses organismos e dificuldade de erradicação após a sua introdução em uma área. A erradicação de fitonematoides em áreas agrícolas é dificultada pelas estratégias de sobrevivência adquiridas, pelos diferentes grupos de nematoides, durante o processo evolutivo. Tais estratégias consistem em manter o nematoide viável mesmo em condições adversas como, escassez hídrica, temperaturas extremas, solos com elevada salinidade, hipoxia, dentre outras. Conhecer as rotas metabólicas que desencadeiam esses processos, os *'times'* e o *'start'* que o nematoide precisa para recuperar a atividade e, o quanto pode durar estes mecanismos, são essenciais para a estruturação de manejo eficiente, baseado na biologia do patógeno. Nesse âmbito, foi de realizada uma revisão de literatura acerca dos métodos de controle e os diferentes mecanismos de sobrevivência de nematoides parasitas de plantas, visando elucidar quais métodos desencadeiam, mantêm e cessam os processos metabólicos que viabilizam a ocorrência de tais mecanismos, e com isso, sintetizar informações que poderão auxiliar na tomada de decisão, no manejo eficiente desses fitoparasitas.

**Palavras-chave:** Diapausa, quiescência, anidrobiose, anoxibiose, criobiose, manejo.

## **GENERAL ABSTRACT**

SILVA, Rejane Valeriano da. **Phytoparasitic nematodes: control methods and survival mechanisms.** 2022. 35f. Monography. University of Brasília (UnB), Brasília, Federal District, Brazil.

Brazilian agriculture has grown considerably in importance in recent decades, giving the country the 'status' of the world's breadbasket. According to world population growth projections for the coming years, food production should be more efficient in terms of productivity and sustainability gains, in order to continue supplying global demand. In this context, Brazil, which is essentially an agricultural country, figures as one of the great 'players' of global food production. However, some obstacles such as weather conditions and the occurrence of pests, for example, must be overcome in order to increase productivity and food quality. Currently, one of the most worrying problems in agricultural systems is the occurrence of nematodes, given the complexity of managing these organisms and the difficulty of eradicating them after their introduction in an area. The eradication of nematodes in agricultural areas is hampered by the survival strategies acquired by different groups of nematodes during the evolutionary process. Such strategies consist of keeping the nematode viable even under adverse conditions such as water scarcity, extreme temperatures, soils with high salinity, hypoxia, among others. Knowing the metabolic routes that trigger these processes, the 'times' and 'start' that the nematode needs to recover activity and how long these mechanisms can last are essential for structuring an efficient management, based on the biology of the pathogen. In this context, a literature review was carried out on the control methods and the different mechanisms of survival of plant parasitic nematodes, aiming to elucidate which methods trigger, maintain and stop the metabolic processes that enable the occurrence of such mechanisms, and with that, synthesize information that may help in decision making, in the efficient management of these phytoparasites.

**Keywords:** Diapause, quiescence, anhydrobiosis, anoxybiosis, cryobiosis, management.

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades mais antigas do mundo, tendo seu surgimento datando de cerca de 10.000 anos atrás e, nasceu a partir da observação do homem primitivo, ao perceber que quando uma determinada estrutura vegetal – a semente – ao se desprender da planta mãe e se acomodar no solo, dava origem a uma nova planta (Feldens, 2018). O homem deixou de ser nômade, passou a cultivar a terra e tornou-se sedentário. O surgimento da agricultura está então intrinsecamente ligado ao estabelecimento do homem em determinados locais, onde se fixou, dando início às comunidades. Desde então, a produção de alimentos passou a ser atividade essencial para o homem (Almeida, 2022).

Com a modernização do novo mundo, as revoluções que ocorreram ao longo da história e o forte êxodo rural decorrente deste período, houve a necessidade da especialização dos cultivos agrícolas, para atender toda a demanda originada por estes movimentos. Nesse sentido, o homem do campo começou a ter que produzir para si e para o homem urbano, e a agricultura deixou de ser uma atividade de subsistência somente e passou a ser também uma operação de cunho comercial. Aliado a isso, o aumento da população mundial ao longo do tempo, pressionou para se buscar cada vez mais incrementos de produtividade (Pinsky, 2011).

O crescimento demográfico e a produção de alimentos devem ser diretamente proporcionais. Segundo a ONU, em seu relatório *World Population Prospects 2022*, a população mundial deverá ser de 8,5 bilhões de pessoas em 2030 e de 9,7 bilhões em 2050. Nesse sentido, a demanda global pela produção agrícola deve aumentar bastante nos próximos decênios, exigindo uma maior eficiência dos processos produtivos. O Brasil, que é um país essencialmente agroprodutor, é peça fundamental para a garantia da segurança alimentar, pois vem se consolidando como um importante ‘*player*’ na produção e exportação de *commodities*, bem como de outros produtos do ramo agrícola (Conceição & Conceição, 2014).

No Brasil, o setor agropecuário é responsável por aproximadamente ¼ do PIB, sendo um fator de peso na balança comercial (CNA, 2021). A produção de grãos é um segmento de destaque pois vem quebrando recordes de produtividade safra após safra. De acordo com a Conab, a estimativa para o ciclo 2021/2022 é de aproximadamente 272,5 milhões de toneladas (CONAB, 2022). Embora os números sejam bastante animadores, a agricultura no Brasil e em todo o mundo enfrenta diversos obstáculos de produção, tais como intempéries climáticas e a ocorrência de pragas, por exemplo. Dentre os fatores que mais causam perdas de produtividade na agricultura está o parasitismo por fitonematoides (Soares et al., 2016).

Os prejuízos causados em decorrência do ataque de nematoides às plantas cultivadas, atingem a cifra de mais de US\$ 100 bilhões em todo o mundo. O manejo destes patógenos é extremamente complexo e, uma vez presentes em uma área de produção, sua eliminação é praticamente impossível. Seu controle é majoritariamente realizado via aplicação de nematicidas químicos sintéticos, contribuindo para uma menor eficiência do processo de produção, pois geralmente são moléculas enquadradas no grupo de maior classe toxicológica, figurando um risco à saúde humana, aos animais e ao meio ambiente (Tejo et al., 2020).

O ataque de nematoides às plantas cultivadas representa atualmente uma das maiores preocupações por parte dos agricultores, em razão das expressivas perdas de produção causadas por estes patógenos (Singh et al., 2015). O alto custo dos nematicidas químicos sintéticos e a elevada toxicidade dessa classe de pesticidas requer uma aplicação eficaz, visando reduzir os custos de produção e, por conseguinte, aumentar a eficiência do processo produtivo, além de o objetivo principal que é a supressão desses fitoparasitas na área agrícola (Oka, 2020). Contudo, a capacidade de nematoides adotarem mecanismos de sobrevivência, figura um entrave no controle destes organismos, permitindo que sob condições desfavoráveis, estes continuem viáveis no solo, sementes ou no interior de tecidos vegetais. A complexidade de nível bioquímico envolvida nestas estratégias, dificulta a compreensão dos processos que acontecem durante esse período de dormência, como por exemplo, qual rota metabólica ‘engatilha’ tal mecanismo e, quanto tempo o nematoide leva para recuperar sua motilidade e poder de infecção após as condições ambientais se tornarem novamente favoráveis à continuidade do seu ciclo biológico (Perry & Wharton, 2011).

O fato de os nematoides parasitas de plantas terem desenvolvido meios de sobreviver sob condições extremas, contribuiu para que estes patógenos perdurassem nas áreas de produção, ocasionando ‘booms’ de infestação de tempos em tempos (Perry & Wharton, 2011). A escassez de estudos sobre o assunto, figura o baixo alcance de informação acerca do mesmo, prejudicando o seu entendimento e, conseqüentemente, sua resolução.

## **2. OBJETIVO**

Realizar uma busca literária, dos métodos de controle e os diferentes mecanismos de sobrevivência de nematoides parasitas de plantas, visando elucidar quais métodos desencadeiam, mantêm e cessam os processos metabólicos que viabilizam a ocorrência de tais mecanismos, e com isso sintetizar informações que poderão auxiliar na tomada de decisão, no manejo eficiente desses fitoparasitas.

## **3. METODOLOGIA**

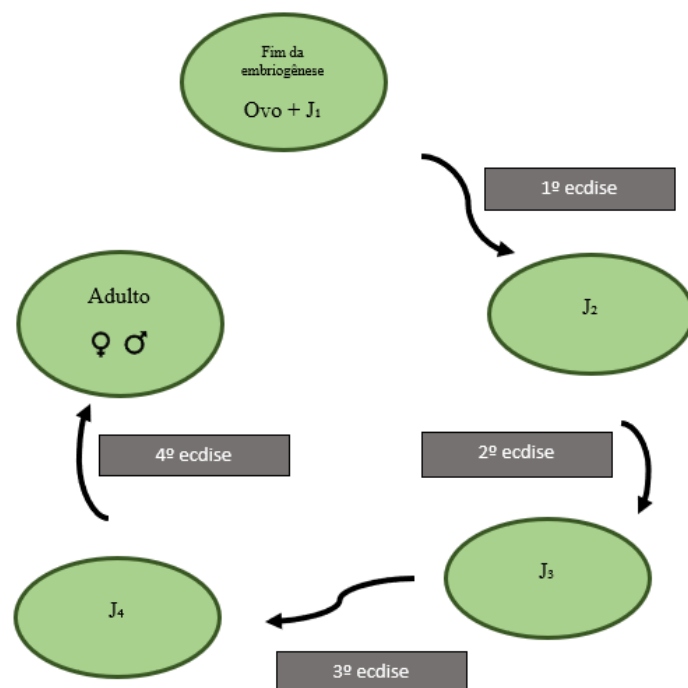
Foi realizado um levantamento bibliográfico e uma breve revisão da literatura. A coleta de dados foi realizada por meio de fichamentos, leitura de pressupostos teóricos e críticos, encontrados em livros, artigos, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, revistas e em meio digital. A seleção dos dados teve como base exploratória diferentes métodos de controle empregados no manejo de nematoides parasitas de plantas, além de abordar os mecanismos de sobrevivência adotados por estes organismos, visando contribuir para o entendimento das estratégias envolvidas na adaptação e persistência destes patógenos em áreas de produção agrícola. A estratégia de busca foi baseada na utilização de palavras-chave em diferentes plataformas digitais como o Portal de Periódicos da CAPES, Google Scholar e Scopus. As buscas foram realizadas com as seguintes palavras-chave: Survival of plant-parasitic nematodes, Controle de fitonematoides, Diapausa, Quiescência e Sobrevivência de nematoides. Foram considerados textos nos idiomas inglês, chinês e português.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Nematoides parasitas de plantas

O grupo dos nematoides apresenta uma grande diversidade, constituído de mais de 30.000 espécies descritas, sendo que deste total 10% são parasitas de plantas (Agroinsight, 2021). São pertencentes ao Reino Animalia, Filo Nemata (ou Nematoda), são multicelulares, triploblásticos, pseudocelomados, ecdisozoários, protostômios e de simetria bilateral. Os fitonematoides estão inseridos nas Classes Enoplea e Chromadorea, sendo que a maioria das espécies e as de importância econômica estão nesta última. Em Enoplea, apenas alguns poucos exemplares de nematoides fitoparasitas estão presentes. São dotados de sistema digestório, respiratório, circulatório, excretor-secretor, nervoso e reprodutor (Ferraz, 2018).

Em geral, os nematoides parasitas de plantas possuem corpo filiforme, apresentando leve afilamento nas regiões cefálica e caudal, seu comprimento varia de 0,25mm a 1,0mm salvo raras exceções, onde há ocorrência de espécimes que atingem tamanho de até 4,0mm. O ciclo de vida dos fitonematoides constitui 6 fases bem definidas, denominadas estádios, a saber: ovo, juvenil de primeiro estágio, juvenil de segundo estágio, juvenil de terceiro estágio, juvenil de quarto estágio e, adulto (Coyne et al.,2007), como apresentado na figura 1.



**Figura 1.** Fluxograma simplificado demonstrando o ciclo de vida comum à maioria das espécies de nematoides parasitas de plantas. Fonte: Do autor.



Nematoides parasitas de plantas possuem um aparato bucal, denominado estilete, o qual é utilizado para perfurar os tecidos vegetais, propiciando a infecção e alimentação pelo patógeno. No que tange a relação planta-patógeno, os nematoides podem ser ectoparasitas migratórios, ectoparasitas sedentários, semi endoparasitas migratórios, semi endoparasitas sedentários, endoparasitas migratórios e endoparasitas sedentários (Michereff, 2001).

Os nematoides fitoparasitas estão elencados como um dos principais grupos responsáveis por perdas agrícolas em todo o mundo. Na tabela 1 estão representados os nematoides parasitas de plantas de maior importância para a agricultura. Essa expressiva importância se dá em razão de sua distribuição cosmopolita, alto grau de polifagia por inúmeras espécies, severidade dos danos causados às culturas, altas taxas de reprodução em alguns gêneros e capacidade de persistência sob condições adversas. Todas essas adaptações implicam em uma maior dificuldade de se controlar esses parasitas, tornando seu manejo extremamente complexo. Normalmente, são adotadas um conjunto de técnicas, oriundas dos diferentes métodos de controle, para a supressão de nematoides em áreas infestadas, visando manter a densidade populacional do patógeno abaixo do nível de dano econômico. Dentre as principais práticas empregadas com o objetivo de se controlar fitonematoides estão a utilização de nematicidas químicos sintéticos, produtos de controle biológico, uso de cultivares resistentes, rotação/sucessão com culturas não hospedeiras, cobertura do solo, incorporação de espécies botânicas antagônicas ao patógeno e consorciação com plantas armadilhas (Costa, 2021).

**Tabela 1.** Principais Gêneros e Espécies dos fitonematoides de maior importância agrícola.

<b>Gênero</b>	<b>Espécie</b>	<b>Designação</b>
<b>Meloidogyne</b>	<i>Meloidogyne</i> spp.	Nematoide das galhas
<b>Heterodera/Globodera</b>	<i>Heterodera</i> spp./ <i>Globodera</i> spp.	Nematoide dos cistos
<b>Pratylenchus</b>	<i>Pratylenchus</i> spp.	Nematoide das lesões radiculares
<b>Radopholus</b>	<i>Radopholus similis</i>	Nematoide cavernícola da bananeira
<b>Ditylenchus</b>	<i>Ditylenchus dipsaci</i>	Nematoide do bulbo do alho
<b>Bursaphelenchus</b>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Nematoide da murcha dos pinheiros
<b>Rotylenchulus</b>	<i>Rotylenchulus reniformis</i>	Nematoide reniforme
<b>Xiphinema</b>	<i>Xiphinema index</i>	Nematoide de adaga
<b>Nacobbus</b>	<i>Nacobbus aberrans</i>	Falso-nematoide-das-galhas
<b>Aphelenchoides</b>	<i>Aphelenchoides besseyi</i>	Nematoide da ponta branca do arroz

Fonte: Jones et al., 2013. Adaptado.

#### 4.1.2 Métodos de Controle de fitonematoides

A ocorrência de nematoides fitoparasitas em áreas exploradas para atividade agrícola é relatada como sendo de grande importância pois, uma vez presente em sistemas agricultáveis,

sua erradicação é praticamente impossível. Ademais, não raro, o ataque de nematoides às plantas cultivadas resultam em perdas expressivas, sendo em muitos casos, um limitante de produtividade (Corte et al., 2014). Para amenizar os efeitos negativos da incidência desses patógenos sobre as culturas, é preciso ter conhecimento de quais espécies estão presentes na área e sua biologia e, ainda, a adoção de um manejo equilibrado, constituído dos diferentes métodos de controle, visando manter a comunidade de nematoides parasitas de plantas abaixo do limiar de dano econômico (Ritzinger & Fancelli, 2006).

Algumas práticas de controle de fitonematoides foram amplamente utilizadas no passado, mas caíram em desuso pelo fato de que sua realização trazia alguns inconvenientes como, alto custo de implantação ou impossibilidade de cultivo da área por períodos relativamente longos, por exemplo. Entre as atividades tidas como obsoletas no controle de nematoides fitoparasitas estão o uso de descargas elétricas, de radiações ionizantes, inundação do solo e solarização (Ferraz & Brown, 2016). Embora algumas dessas práticas ainda possam ser realizadas em certos locais, normalmente não apresentam vantagem econômica frente à métodos mais difundidos na atualidade, sendo os controles varietal, cultural, químico e biológico, métodos de controle mais comumente empregados visto que a associação destes resulta em um manejo mais eficiente desta classe de parasitas (Bellé & Fontana, 2018).

#### **4.1.2.1 Controle Varietal**

Consiste no cultivo de plantas resistentes a nematoides, sendo considerado um método de simples implantação e que não causa impactos negativos ao meio ambiente, despontando como altamente requerido do ponto de vista da sustentabilidade. Contudo, o uso desta tecnologia apresenta como limitação o fato de que é baixo o número de variedades resistentes disponíveis e, estas cultivares geralmente resistem a infecção de uma ou poucas espécies de nematoides (Ferraz & Freitas, 2008).

Este método baseia-se na descoberta de genes resistentes a fitonematoides, oriundos de germoplasma de materiais selvagens e posterior inserção em plantas de interesse comercial, no intuito de impedir a infecção pelo parasita e, por conseguinte, obter maiores índices de produtividade e lucratividade. Para a investigação de genes R são realizados testes moleculares como RFPLs, AFLPs, RAPDs, SCAR e STS. Destacam-se os casos de descoberta do gene *Mi* de tomate para resistência a *Meloidogyne incognita*, *Gpa-2* de batata para resistência a *Globodera pallida*, *Hero A* de tomate para resistência a *Globodera rostochiensis* e, *Hs 1* de beterraba para resistência a *Heterodera schachtii* (Silva & Figueiredo, 2018).

#### 4.1.2.2 Controle Cultural

Diversas espécies botânicas apresentam potencial de supressão a fitonematoides pela produção de compostos alelopáticos, por meio de seu metabolismo secundário. Geralmente estas plantas são utilizadas em consorciação e sucessão às culturas de interesse, ou ainda, incorporadas ao solo, como forma de adubação verde. Um inconveniente desta técnica é que as espécies de nematoides mais problemáticas nos cultivos agrícolas, normalmente infectam uma ampla gama de espécies vegetais, sendo preciso um estudo sistemático acerca das espécies de nematoides presentes na área, sua biologia e plantas hospedeiras, objetivando reduzir de forma eficiente a população dos nematoides estabelecidos nos agroecossistemas (Mello et al., 2006).

O manejo de plantas tigueras consiste numa importante prática no controle cultural de fitonematoides pois contribuem para a persistência destes parasitas. Igual cuidado deve ser observado em relação às plantas daninhas, visto que muitas espécies podem ser boas hospedeiras de nematoides, considerando o alto grau de polifagia de alguns nematoides de importância econômica (Favoreto et al., 2019).

Diversas espécies de plantas de famílias botânicas como Fabaceae, Poaceae e Brassicaceae têm reconhecida relevância no manejo de fitonematoides. *Crotalaria* spp., *Tagetes* spp., *Arachis* sp. são exemplos de espécies vegetais relatadas como eficientes na redução populacional de algumas espécies de nematoides fitoparasitas (Inomoto, 2016). De acordo com Favoreto et al., (2019) gramíneas como *Urochloa* spp. e aveia preta são indicadas como plantas de cobertura e/ou de sucessão no controle de espécies de fitonematoides.

#### 4.1.2.3 Controle Químico

Devido à grande eficiência reprodutiva de diversos gêneros de fitonematoides, altas densidades populacionais destes parasitas são atingidas em curtos espaços de tempo, levando muitos produtores a optarem pelo uso de nematicidas químicos sintéticos, visando uma rápida supressão do patógeno na área. A utilização desta classe de pesticidas, porém, tem sido cada vez mais questionada, tendo em vista que geralmente são moléculas classificadas como de alto grau toxicológico, figurando risco à saúde humana, animal e ao meio ambiente. Além disso, estes produtos são de alto custo, onerando significativamente o processo de produção (Hahn et al., 2018).

Geralmente, os nematicidas químicos sintéticos são aplicados via sulco de plantio ou no tratamento de sementes. Estes pesticidas apresentam alto residual como meio de otimizar o

controle dos fitonematoides, porém, essa característica tem implicações como a redução de microrganismos benéficos, uma vez que apresentam ingredientes ativos de alta toxicidade e são normalmente, não seletivos. Outra questão preocupante e que pode ser observada frente a utilização destes agrotóxicos, é a detecção de resíduos no produto final, elevando o risco de consumo pela população (Tejo et al., 2020).

Com o advento da agricultura de precisão, tecnologias como aplicações direcionadas permitiram o uso mais racional dos pesticidas sintéticos, reduzindo os custos operacionais e o impacto negativo sobre a comunidade microbiana local, pois com o uso de ferramentas como o sensoriamento remoto, é possível identificar os ‘*hot spots*’ e abandonar o método de aplicação em área total (Carneiro, 2022). Contudo, a minimização do uso de agrodefensivos sintéticos tende a ser cada vez mais requisitada nos sistemas de produção agrícola.

#### **4.1.2.4 Controle Biológico**

O controle biológico de fitonematoides se dá pela ação de um ou mais organismos vivos sobre estes parasitas, reduzindo suas populações ou ainda, interferindo negativamente sobre a sua eficiência. Este método tem por base o antagonismo entre distintos agentes de ocorrência natural no ambiente, mas que por vezes são introduzidos nos sistemas agrícolas, tendo em vista maximizar a supressão destes fitopatógenos. Estão envolvidos modos de ação como antibiose, predação, parasitismo, exsudação de compostos tóxicos, indução de resistência nas plantas, entre outros (Soares et al., 2016). Os grupos de microrganismos comumente utilizados como inimigos naturais no controle de fitonematoides são os fungos e as bactérias. *Trichoderma* spp. são eficientes no parasitismo de nematoides, apresentando em sua morfologia, estruturas hábeis na captura destes fitopatógenos. *Bacillus* e *Azospirillum* são exemplos de gêneros de bactérias relatados por apresentarem espécies eficientes no controle de nematoides parasitas de plantas (Domingues et al., 2022).

No geral, as bactérias antagônicas aos fitonematoides são endofíticas facultativas e possuem diferentes modos de ação, podendo atuar diretamente sobre o alvo, pela extrusão de substâncias tóxicas que são absorvidas pelos ovos, interferindo negativamente na eclosão e motilidade dos estádios infectantes ou, ainda, de forma indireta, alterando os compostos exsudados pelas plantas, impedindo que o nematoide reconheça a hospedeira, uma vez que são guiados por quimiotaxia. Ademais, estes microrganismos atuam contribuindo para o desenvolvimento vegetal induzindo a produção de compostos benéficos para as plantas, tais

como enzimas, antibióticos e fitohormônios e, ainda, melhorando a assimilação de nitrogênio e a capacidade fotossintética. (Domingues et al., 2022).

Embora o uso de microrganismos para controlar fitonematoides seja um método altamente requerido do ponto de vista ecológico, a produção massal de muitos agentes de controle não é trivial, figurando um entrave no desenvolvimento de tais produtos. Reduzido tempo de prateleira e manutenção de estabilidade a campo destas tecnologias também despontam como gargalos na utilização de bionematicidas. Para Lima et al. (2019), a eficácia do controle biológico de nematoides fitoparasitas é dependente de fatores edáficos como p.H, umidade, aeração, temperatura, comunidade microbiana existente, entre outros, que influenciam na capacidade de atuação do produto microbiológico.

#### **4.1.2.5 Controle Alternativo**

Diante das limitações apresentadas pelos principais métodos de controle de fitonematoides, o desenvolvimento de soluções capazes de integrar o manejo dessa classe de parasitas é de grande valia e tem sido objeto de estudo de vários grupos de pesquisa. Uma medida que vem sendo difundida como ‘tecnologia verde’ para controlar nematoides é a utilização de moléculas fitoquímicas, oriundas de extratos botânicos. As plantas produzem por meio do seu metabolismo secundário, uma série de classes de compostos alelopáticos para sua proteção, como terpenos, alcaloides, cumarinas, ácidos orgânicos, flavonóides, taninos, entre outros (Ferreira, 2018).

A utilização de extratos de plantas no controle de nematoides apresenta vantagens em relação aos produtos químicos sintéticos, como a degradação mais eficiente, menor toxidez por serem menos concentrados e de fontes naturais, possibilidade de diversos modos de ação, dificultando o desenvolvimento de resistência pelo patógeno (Coimbra et al., 2006).

De modo geral, o controle eficiente de nematoides fitoparasitas consiste na identificação correta das espécies presentes na área por meio de análises laboratoriais e conhecimento da biologia das mesmas, círculo de hospedeiras, adoção de práticas conservacionistas e principalmente, realizar a integração dos diferentes métodos e táticas de controle na supressão de fitonematoides (Favoreto et al., 2019).

#### **4.2 Mecanismos de sobrevivência**

Os nematoides parasitas de plantas desenvolveram ao longo da sua evolução, a capacidade de perdurarem no ambiente por meio de mecanismos altamente especializados a fim

de garantir a perpetuação de suas espécies. Além de algumas estratégias como a alta capacidade reprodutiva e a colocação de ovos em matriz gelatinosa, como acontece em alguns gêneros, os nematoides fitoparasitas adquiriram como vantagem evolutiva, a possibilidade de permanecerem viáveis por muito tempo em ambientes cujas condições são desfavoráveis à ocorrência do seu ciclo biológico. Essas técnicas podem propiciar que estes fitopatógenos retomem sua atividade e poder de infecção das plantas quando as condições ambientais se tornem novamente apropriadas ao seu desenvolvimento. Elas são geralmente enquadradas em duas classes, denominadas quiescência e diapausa, ou ainda tratadas de forma mais genérica, apenas como dormência.

A quiescência é um método que engloba várias dessas técnicas de sobrevivência, como a anidrobiose, a osmobiiose e, a criobiiose, entre outras e, é prontamente reversível assim que as condições sejam novamente favoráveis à continuidade do seu desenvolvimento, diferentemente do que acontece na diapausa, onde o nematoide precisa de estímulos endógenos mais complexos para voltar a atividade (Ferraz & Brown, 2016).

Uma estratégia de resistência comum a várias espécies de nematoides é a formação do chamado '*dauer larvae*', que consiste na indução de dormência do parasita em situações como ausência de planta hospedeira, baixa disponibilidade de alimento e altas densidades populacionais, por exemplo. A ocorrência deste fenômeno não é estágio dependente e medidas como a redução da permeabilidade na cutícula e retenção da cutícula de mudas passadas, visando aumentar a proteção no solo, são comumente empregadas durante o processo de formação (McSORLEY, 2003). Esse estágio resistente é amplamente estudado utilizando como referência o nematoide de vida livre, considerado um organismo modelo, *Caenorhabditis elegans*.

Esse fenômeno é frequentemente observado em nematoides de vida livre, dados sua ocorrência nos mais diversos habitats, seu comprimento bastante reduzido e sua baixa capacidade de dispersão de forma independente. Dessa forma, situações hostis como escassez de alimento, estresse hídrico ou temperaturas extremas, por exemplo, induzem o início de formação do chamado estágio '*dauer larvae*' como um meio de o nematoide perdurar em condições adversas, uma vez que não é possível escapar rapidamente de tais ambientes em razão do seu baixo poder de motilidade (Grant & Viney, 2011).

De acordo com Grant & Viney (2011), o fenômeno dauer não consiste apenas na interrupção do ciclo de vida do nematoide, mas sim na formação de um estágio de

desenvolvimento especializado. Segundo os mesmos autores, o evento tem seu estabelecimento pleno na fase de juvenil de terceiro estágio ( $J_3$ ), embora seu início se dê no final do estágio  $J_1$ . Assim, próximo de sofrer a primeira ecdise, se as condições para a continuidade do ciclo biológico não forem favoráveis, as reservas energéticas que seriam empregadas na transformação do juvenil do segundo estágio ( $J_2$ ) são mobilizadas para a formação do '*dauer larvae*'. O processo inclui alterações bioquímicas como a deposição de uma cutícula modificada, mais resistente, visando suportar as adversidades do meio até que as condições *in situ*, propícias ao desenvolvimento do nematoide, sejam reestabelecidas.

Os nematoides das galhas e dos cistos são comumente relatados como os de maior importância econômica, visto a extensão dos prejuízos causados nos cultivos agrícolas por estes grupos. A adoção de táticas como a sintetização de matriz mucilaginosa e formação do cisto pelas fêmeas dos gêneros *Meloidogyne* e, *Heterodera* e *Globodera*, respectivamente, são importantes estratégias de persistência no solo. Além de figurar uma barreira física de proteção, a matriz gelatinosa faz associação simbiótica com bactérias que exsudam compostos tóxicos a muitos microrganismos potenciais predadores dos ovos (Orion et al., 2001). A mucilagem tem ainda papel importante na proteção contra a dessecação do solo pois à medida que a umidade vai diminuindo e atingindo níveis críticos, as camadas mais externas da matriz perdem água mais rapidamente fazendo com que ela sofra encolhimento e torne-se mais rígida, exercendo pressão mecânica sobre os ovos e, conseqüentemente, inibindo a eclosão. A formação de cistos, por sua vez, consiste no bronzeamento da cutícula de fêmeas mortas fertilizadas, por ação da polifenoloxidase, originando uma estrutura endurecida e escura que servirá de proteção para os ovos. A permeabilidade alterada da parede do cisto contribui para a retenção de água, protegendo os nematoides de dessecação. Nesse sentido, a casca do ovo em ambos os casos, figuram também uma estrutura de proteção (Perry & Moens, 2011).

Segundo Gaur et al. (1995) a eclosão das larvas de alguns nematoides de cistos como *Heterodera cajani* e *Heterodera sachari* é fortemente influenciada pela presença de hospedeira. De acordo com os autores, fêmeas infectando plantas em final de ciclo, induzem modificações bioquímicas nos ovos para que as larvas só eclodam mediante presença da hospedeira, por meio de estímulos de exsudatos radiculares. Assim, quando a planta infectada entra em senescência, reservas lipídicas diferenciadas são sintetizadas nos ovos, visando suprir a demanda energética da larva no período de entressafra.

#### **4.2.1 Quiescência**

A quiescência em nematoides parasitas de plantas pode ser entendida como uma resposta metabólica do organismo ante condições ambientais desfavoráveis ao seu desenvolvimento. É um termo genérico que engloba estratégias de resistência a situações edafoclimáticas estressantes tais como ressecamento e salinidade do solo, temperaturas extremas, baixo teor de oxigênio, ausência de hospedeira, entre outros. Esse mecanismo é prontamente reversível quando o ambiente retoma o estado favorável à continuidade do ciclo biológico do patógeno (McSORLEY, 2003). A tabela 2 traz exemplos de estresses ambientais que induzem quiescência em fitonematoides. Normalmente, os nematoides parasitas de plantas, adotam um estágio quiescente a fim de sincronizar seu desenvolvimento concomitante ao desenvolvimento da planta hospedeira, elevando a obtenção de sucesso no parasitismo, uma vez que a recuperação da atividade e eclosão são ativadas por estímulos químicos, oriundos dos compostos exsudados pela hospedeira. Essa estratégia é um tipo de quiescência própria de interações de especificidade do patógeno para a espécie parasitada (Polomares-Rius et al., 2012).

**Tabela 2.** Terminologia aplicada a estados quiescentes de nematoides.

<b>Estresse ambiental</b>	<b>Estado quiescente em resposta ao estresse</b>
<b>Dessecação</b>	Anidrobiose
<b>Baixa temperatura</b>	Criobiose
<b>Estresse osmótico</b>	Osmobiose
<b>Baixo oxigênio</b>	Anoxibiose

Fonte: Mc SORLEY, 2003. Adaptado.

#### **4.2.1.1 Anidrobiose**

A anidrobiose é o tipo mais frequente de quiescência e trata do estado que o nematoide assume diante da dessecação do ambiente, por meio da desidratação do espécime, mantendo-se viável por longos períodos, até que a umidade do meio seja restabelecida. Os nematoides, em diferentes proporções entre as espécies, são animais que apresentam alta capacidade de resistir à escassez hídrica, o que contribui para a sua persistência na área e sua ocorrência global (Treonis & Wall, 2005). Essa estratégia é adotada por diversos grupos de nematoides que quando expostos ao meio sob condição de redução drástica de umidade, diminuem o seu metabolismo à níveis muito baixos. Com a minimização da taxa metabólica, as reservas energéticas são poupadas e o nematoide mantém-se viável por longos períodos. A entrada em estado anidrobiótico por nematoides é totalmente induzida pela dessecação do meio e inicia-se

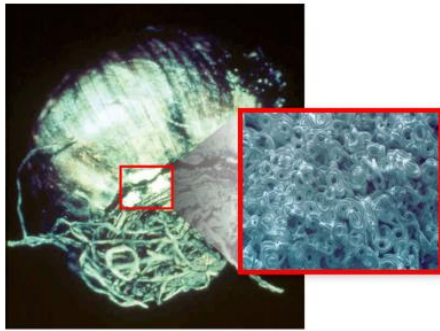


com a perda gradativa de água pelo espécime, reduzindo de 75-80% em situações normais para 2-5% em nematoides dormentes. Ao longo do processo, ocorrem eventos como o aumento nos níveis de trealose e glicerol, rearranjo de tecidos e organelas e a diminuição na permeabilidade da cutícula. Outro evento típico dentre os nematoides anidrobióticos é o comportamento de enrolarem seus corpos serpentiformes em espiral, objetivando diminuir a superfície de contato da cutícula com o ambiente seco e, por conseguinte, atenuar a sua desidratação (Neves et al., 2012). Na figura 2, um espécime anidrobiótico de *Scutellonema cavensesi* apresentando desidratação parcial do corpo retrata este comportamento (Ferraz & Brown, 2016).



**Figura 2.** Espécime de *Scutellonema cavensesi* em anidrobiose, com o corpo parcialmente desidratado, obtido de solo exposto a seca prolongada no Senegal (África), de até 9 meses de duração. (de Y. Demeure). Fonte: Ferraz & Brown, 2016.

Juvenis de quarto estágio de *Ditylenchus dipsaci* formam agregados com milhares de exemplares, como resposta comportamental à dessecação, onde as larvas mais externas ressecam e morrem, conferindo porém, proteção para as larvas localizadas no interior do aglomerado, denominado lã de lagarta, como visto na figura 3. Essa estratégia é também visualizada em espécimes de *Anguina tritici* e *Anguina amsinckia*, onde há a ocorrência de agregação de larvas esguias no estágio J<sub>2</sub> e, larvas compreendendo uma miscelânea de estádios onde normalmente os nematoides permanecem enrolados respectivamente (Perry & Moens, 2011). O nematoide reniforme *Rotylenchulus reniformis* é relatado como uma espécie que suporta de forma mais eficiente a dessecação, comparado com a maioria das espécies de nematoides fitoparasitas. Sua sobrevivência chega a sete meses na ausência de hospedeira em solo úmido e por seis meses em condições de solo seco (Torres et al., 2006).



**Figura 3.** Bulbo de narciso com acúmulo de J<sub>4</sub> de *Ditylenchus dipsaci*, como lã seca de lagarta, e uma inserção mostrando uma imagem de microscopia eletrônica de transmissão da lã de lagarta com indivíduos enrolados e aglomerados. (Fotografias cortesia de Roland N. Perry, Rothamsted Research, Harpenden, Reino Unido; Perry e Moens, 2011b.) Fonte: Jones et al., (2013) Adaptado.

Existem duas categorias de resposta à dessecação por nematoides anidrobióticos, a desidratação de forma rápida e a desidratação de forma lenta. A principal diferença entre os indivíduos passíveis dessas duas categorias é que nematoides que são frequentemente submetidos a ambientes secos, adquirem capacidade de sobreviver à exposição abrupta e por períodos longínquos ao estresse. Nessa estratégia está envolvido o sequestro de mRNAs requeridos na síntese de moléculas protetoras e a expressão contínua das mesmas, frente à perda de água severa em curtos espaços de tempo. Esse fenômeno é observado em J<sub>4</sub> de *Ditylenchus dipsaci* dormentes, que podem permanecer em anidrobiose por um período de até 23 anos. Em contrapartida, os nematoides que se adaptam à estratégia de desidratação de forma lenta, não toleram a dessecação severa instantânea. Para entrar em anidrobiose, esse grupo precisa enfrentar quedas gradativas e moderadas de umidade, como um meio de se preparar para a dormência, quando são induzidas mudanças bioquímicas necessárias para a entrada em estado anidrobiótico (Burnell & Tunnacliffe, 2011). O período e condições de conservação de nematoides em anidrobiose é variável entre as distintas espécies (Tabela 3).

**Tabela 3.** Sobrevivência de nematoides durante longos períodos de anidrobiose.

Nematoide	Longevidade	Condições de conservação
<i>Anguina agrostis</i>	4 anos	Galhas, à temperatura ambiente
<i>Anguina amsinckia</i>	11 anos	Galhas, a 8 °C
<i>Anguina tritici</i>	32 anos	Galhas, à temperatura ambiente
<i>Ditylenchus dipsaci</i>	23 anos	Tecido vegetal, à temperatura ambiente
<i>Ditylenchus trifformis</i>	2,5 anos	Em armazém, a seco, a 24-26 °C
<i>Heterodera avenae</i>	5,5 anos	Ovos, 40% U.R., a 15 °C
<i>Heterodera glycines</i>	6 anos	Solo mantido a seco, a 8-20 °C
<i>Globodera rostochiensis</i>	25 anos	Cistos, a 4 °C
<i>Pratylenchus penetrans</i>	11 meses	Em estufa, a seco
<i>Tylenchus polyhyppus</i>	39 anos	Em planta de centeio herbarizada

Fonte: Ferraz & Brown, 2016. Adaptada de vários autores e traduzida de Ferraz & Brown (2002).

Segundo Shannon et al., (2005), o acúmulo de trealose tem sido evidenciado como um fator importante na indução do estado de anidrobiose em invertebrados como acontece com os nematoides fitoparasitas *Anguina tritici* e *Ditylenchus dipsaci*, pois há relatos de que este o alto teor deste carboidrato exerça função na proteção de membranas e proteínas, atuando como substituinte da água ligada, contribuindo para a estabilização de moléculas.

#### **4.2.1.2 Anoxibiose**

Os nematoides são organismos de distribuição ubíqua e, portanto, muitas espécies desenvolveram meios de adaptação a ambientes hostis, como forma de sobrevivência. O constante suprimento de oxigênio é uma condição requerida para o desenvolvimento satisfatório do ciclo biológico e reprodução de nematoides e, por conseguinte, influencia diretamente na taxa populacional destes organismos. Contudo, a maioria das espécies de nematoides que habitam o solo apresentam capacidade de alternar o seu metabolismo em aeróbio e anaeróbio (Cooper & Van Gundy, 1971).

Cooper et al. (1970), analisaram a exposição de espécies de nematoides a uma condição intermitente de hipóxia e relataram que a reprodução de *Hemicycliophora arenaria* em plantas de tomate cultivados em casa de vegetação foi suprimida sob imposição de baixa aeração em curtos espaços de tempo por um período de 30 dias. Foi verificado a diminuição de 80% na população do fitonematoide exposto ao tratamento com baixo oxigênio por 12 horas a cada 3 dias, em relação aos nematoides mantidos sob aeração constante e, quando o tempo de exposição foi de 24 horas, a depleção populacional foi de 94%. Sob intervalos de 5 dias, os mesmos tratamentos obtiveram 67% e 80% de redução, respectivamente. Dessa forma, maiores intervalos de exposição a condições microaeróbias têm menor influência na supressão do fitopatógeno. De modo oposto, quanto maior o tempo de submissão a baixas concentrações de oxigênio, respeitando a mesma sazonalidade, maior a redução na densidade populacional do parasita.

Compreender os efeitos de condições ambientais adversas sobre fitonematoides é de grande importância para a adequação de táticas de manejo. Irrigações frequentes em áreas agrícolas propiciam uma condição de baixo suprimento de oxigênio em camadas intermediárias do solo, promovendo a indução de anoxibiose em nematoides. Todavia, uma grande parcela de nematoides de solo são adaptados a flutuações de aeração, condição edáfica de ocorrência comum, sendo considerados aneróbios facultativos. Sob anaerobiose, os nematoides de solo podem persistir no solo por períodos variados. Solos inundados contribuem para a

sobrevivência de nematoides enquanto irrigações bem manejadas, intercalando altas e baixas concentrações de O<sub>2</sub> ou induzindo ambientes microaeróbios, podem acarretar em uma eficiente prática de manejo (Cooper et al., 1970).

Grupos de nematoides adaptados a uma condição ambiental extrema geralmente apresentam capacidades de tolerar outras situações adversas (Cooper & Van Gundy, 1971), entretanto, a combinação de condições adversas resulta na menor viabilidade de determinadas espécies. *Ditylenchus destructor* apresenta alta tolerância à baixo ou ausente oxigênio. Em um estudo recente, o referido patógeno apresentou taxa de sobrevivência de 60% em condições de hipoxia por 5 semanas a 25 °C e, sob condições de anoxia em 2 semanas, o percentual foi de 80% de sobrevivência, enquanto que para *Meloidogyne incognita* a taxa foi de 30% sob as mesmas condições. Mantendo as condições de hipóxia e anóxia e, elevando a temperatura para 35 °C, a sobrevivência sofreu diminuição acentuada, sendo letal para a maioria dos espécimes em 14 e 7 dias respectivamente. O nematoide modelo *Caenorhabditis elegans* não apresentou capacidade de resistência à baixa aeração, sendo que todos os espécimes morreram até o quarto dia, no mesmo experimento. (Sugita et al., 2022).

Segundo Sugita et al. (2022), os fatores que determinam se o nematoide desenvolverá tolerância à hipóxia ou anoxia não são esclarecidos. Como organismos anaeróbios facultativos, muitas espécies de nematoides, inclusive *D. destructor*, realizam metabolismo fermentativo utilizando glicogênio para a obtenção de energia. *D. destructor* não é inviabilizado à 35 °C, portanto, temperaturas mais elevadas estimulam o metabolismo do nematoide, esgotando as reservas energéticas necessárias para o metabolismo anaeróbio e, desse modo, a combinação de estressores térmicos e anaeróbios podem ser letais para diferentes espécies de nematoides. Outra constatação do estudo foi a observância de reservas lipídicas nos espécimes submetidos à estresse térmico e anaeróbio associados, sugerindo que essa condição ocasionou a interrupção de homeostase tecidual, causando danos aos tecidos e, conseqüentemente, formando tais estruturas.

#### **4.2.1.3 Criobióse**

A temperatura é a variável que está mais comumente associada ao poder ou restrição de atividade dos nematoides. Estes parasitas são pecilotérmicos, ou seja, regulam sua temperatura corporal de acordo com a temperatura do ambiente, o que consiste no risco de congelamento e conseqüente morte do espécime quando este passa por exposição à condições severas de frio. Nesse âmbito, nematoides que habitam regiões árticas ou que sazonalmente apresentam um

decréscimo acentuado de temperatura foram induzidos a desenvolver modificações metabólicas, para a entrada em estado inanimado, a fim de se manterem viáveis durante o período em que a condição climática desfavorável persistir. Dentre as estratégias observadas na indução da criobióse, está a modificação estrutural de lipídios sintetizados, quando é priorizado o aumento na deposição de ácidos graxos insaturados, visando propiciar a resistência de membranas à solidificação e reduzindo a chance de congelamento do organismo (Wharton, 2011).

O nematoide das galhas *Meloidogyne hapla* é um fitoparasita que apresenta grande tolerância ao frio. Esse patógeno requer uma temperatura mínima de 8,8 °C para o seu desenvolvimento, porém, tem capacidade para sobreviver a temperaturas negativas durante o estágio de ovo no solo, sendo a deposição dos ovos em massa gelatinosa, um fator que contribui fortemente para a proteção do nematoide a esse estresse ambiental. A evasão congelante, a tolerância ao congelamento e a desidratação crioprotetora são as principais estratégias de tolerância ao frio por nematoides. A evasão congelante consiste em manter o fluido corporal do nematoide em estado líquido a 0 °C evitando o seu congelamento. A tolerância ao congelamento diz respeito da capacidade de sobrevivência do espécime, mesmo quando este tem o corpo recoberto por gelo e, a desidratação crioprotetora, que é a perda de água ocasionada pelo gelo circundante, protegendo o nematoide das baixas temperaturas (Wu et al., 2018).

#### **4.2.2 Diapausa**

De acordo com De Guiran (1979), a diapausa consiste no cessar temporário do ciclo biológico em nematoides, sendo desencadeada por fatores endógenos ou exógenos e que não é anulada apenas com o retorno das condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento do parasita, assim como acontece na quiescência. Esse mecanismo de sobrevivência pode ser facultativo ou obrigatório e foi amplamente investigado nos nematoides de cisto da batata *Globodera pallida* e *Globodera rostochiensis* (Polomares-Rius et al., 2012).

Os nematoides de cisto da batata são pragas que causam enormes prejuízos para essa cultura nos países onde estão disseminados. *G. pallida* e *G. rostochiensis* são encontrados infestando áreas simultaneamente ou não e, o ciclo de vida desses parasitas inclui estágios de dormência (diapausa e quiescência). A idade da planta hospedeira é frequentemente relatada como um fator que influencia na alimentação da fêmea, levando ao desencadeamento de alterações bioquímicas nos juvenis, que induzem a entrada em diapausa. A quebra da dormência é iniciada via sinalização química da presença de hospedeira na área, por meio de exsudação

radicular de compostos específicos, seguida de uma série de processos metabólicos que variam entre as espécies. (Polomares-Rius et al., 2012). Embora um número significativo de nematoides sejam levados a eclodir via estímulo da hospedeira, uma parcela dos organismos dormentes necessitam de uma reestimulação para sair do estado inanimado, como estratégia de persistência no solo por maiores períodos e evitar que haja competição por alimento diante de um número elevado de nematoides eclodidos simultaneamente, comprometendo a perpetuação da espécie (Duceppe et al., 2017).

Há relatos de que nematoides dos cistos adquirem um estágio de anidrobiose para suportar longos períodos dormentes. Com a perda gradual de água, ocorre um acúmulo de trealose, gerando um estresse osmótico e por conseguinte, inibindo a movimentação da larva, acarretando na dormência. Sob condições favoráveis, há uma modificação na permeabilidade da camada lipídica presente no ovo mediada pela ação de  $\text{Ca}^{2+}$ , permitindo o escape da trealose. Posteriormente as larvas são reidratadas, recobram a motilidade e são iniciados os processos bioquímicos necessários, de acordo com o estressor ambiental que causou a dormência, para a recuperação total da atividade. Fatores genéticos, químicos e ambientais são descritos como os principais envolvidos na indução e quebra de dormência. Compostos químicos naturais ou sintéticos como a Solanoeclipina A, alfa-solanina, alfa-chaconina, ácido picrolônico e tiocianato de sódio estão presentes nos processos iniciais de eclosão em *G. rostochiensis* e *G. pallida* (Duceppe et al., 2017).

Duceppe et al. (2017) utilizando RNA-seq analisaram os genes envolvidos na eclosão dos nematoides de cisto da batata, objetivando identificar quais deles são necessários para a sobrevivência. Durante o estudo foi constatado que a saída do estado dormente de *G. pallida* e *G. rostochiensis* está associada à regulação de diversos genes. Regulação de vias antioxidantes para compensar a desintoxicação de ROS que é prejudicada pela dessecação de cistos dormentes, regulação enzimática, genes envolvidos na regulação pós transcrição e codificação para proteínas, codificação de um composto partícipe do processo que leva a síntese de cGMP são alguns dos processos observados como importantes na quebra de dormência dos nematoides dos cistos da batata.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ataque de nematoides às plantas cultivadas é considerado um dos grandes problemas da agricultura moderna em todo o mundo. A produtividade das culturas hospedeiras desse grupo de parasitas é fortemente comprometida frente à infecção pelo patógeno, acarretando em prejuízos bastante expressivos. O manejo de nematoides fitoparasitas inclui diversos métodos de controle e suas respectivas práticas, que visam manter a densidade populacional da praga, abaixo do nível de dano econômico, contudo, obter êxito na supressão de fitonematoides não é uma tarefa trivial. Ao longo da escala evolutiva, os nematoides desenvolveram mecanismos de sobrevivência como estratégia para resistirem às condições adversas, que permitem ao patógeno perdurar no ambiente por um tempo suficientemente longo, de modo a propiciar a perpetuação das espécies.

Sendo os nematoides, organismos de distribuição ubíqua, sua inevitável ocorrência em ambientes extremos ou ainda sob condição de stress requer adaptações em seu metabolismo, de modo a manter o parasita viável durante o período em que as condições ambientais não sejam favoráveis ao seu desenvolvimento, sendo desencadeadas cascatas de reações bioquímicas que podem resultar em ações como modificação na composição e permeabilidade da cutícula, alteração na porosidade da casca dos ovos, indução de um estágio de resistência ou ‘*dauer larvae*’, acúmulo de solutos, trocas iônicas, entre outras. Essas estratégias tornam o manejo dos fitonematoides bastante complexo e, a elucidação desses eventos podem contribuir para a elaboração de práticas que visam solucionar questões de como burlar esses mecanismos, por exemplo.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGROINSIGHT (2021). Diversidade dos nematoides: de parasita de baleias a parasita de plantas. Disponível em [Diversidade dos nematoides: de parasita de baleias a parasita de plantas \(agroinsight.com.br\)](https://agroinsight.com.br) Acesso em: 12/09/2022.

ALMEIDA, R.R. “Agricultura e conservação: questões históricas”; Brasil Escola. Disponível em <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/agricultura-conservacao-questoes-historicas.htm>. Acesso em 02 de Setembro de 2022.

BELLÉ, R.B.; FONTANA, D.C. Patógenos de solo: principais doenças vasculares e radiculares e formas de controle. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n.28; p. 779 – 803. 2018.

BURNELL, A.M.; TUNNACLIFFE, A. Gene induction and desiccation stress in nematodes. In: Molecular and physiological basis of nematode survival/edited by Roland N. Perry and David A. Wharton. 2011. ISBN-13: 978 1 84593 687 7.

CARNEIRO, K.M. Controle integrado de nematoides na cultura da soja. TCC (graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Barra do Garças, 2022.

CNA - PIB do agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020. 10 de março de 2021. Disponível em: [PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020 | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil \(CNA\) \(cnabrazil.org.br\)](https://www.cnabrazil.org.br/pt-br/imprensa/comunicado/2021/03/10/20210310-01) Acesso em 04/09/2022.

COIMBRA, J.L.; SOARES, A.C.F.; GARRIDO, M.S.; SOUSA, C.S.; RIBEIRO, F.L.B. Toxicidade de extratos vegetais a *Scutellonema bradys*. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.41, n.7, p.1209-1211, jul. 2006.

CONCEIÇÃO, J.C.P.R.; CONCEIÇÃO, P.H.Z. Agricultura: evolução e importância para a balança comercial brasileira. 2014. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada- Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 1990- ISSN 1415-4765

COOPER, A.F.J.; VAN GUNDY, S.D. (1971) Senescence, quiescence, and cryptobiosis. In: Zuckerman, B.M., Mai, W.F. and Rhode, R.A. (eds) Plant Parasitic Nematodes, Vol. 2. Academic Press, New York and London, pp. 297–317.

CORTE, G. D.; PINTO, F.F.; STEFANELLO, M.T.; GULART, C.; RAMOS, J.P.; BALARDIN, R.S. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos no controle de fitonematoides em soja. Ciência Rural, Santa Maria, v.44, n.9, p.1534-1540, set, 2014. ISSN 0103-8478

COSTA, M.J.N. Uso de esterco bovino e cobertura do solo no manejo de nematoides na cultura da soja. Revisão Anual de Patologia de plantas, Volume 27, p. 32-50. 2021.

COYNE, D.L.; NICOL, J.M and CLAUDIUS-COLE, B. 2007. Nematologia prática: Um guia de campo e de laboratório. SP-IPM Secretariat International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Cotonou, Benin.

DE GUIRAN, G. 1979. A necessary diapause in root-knot nematodes. Observations on its distribution and inheritance in *Meloidogyne incognita*. Revue Nematol. 2: 223-231

DOMINGUES, S. C. de O., CARVALHO, M. A. C., RABELO, H. de O., DAVID, G. Q., FURINI, T., BARRADAS, A. de C., & MARIMON JÚNIOR, B. H. (2022). Ação de agentes biológicos no controle de fitonematóides em alface. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 10(2), 157–166. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v10n2.domingues>.

DUCEPPE, M.; LAFOND-LAPALME, J.; PALOMARES-RIUS, J.E.; SABEH, M.; BLOK, V.; MOFFETT, P.; MIMEE, B. Analysis of survival and hatching transcriptomes from potato



cyst nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. 2017. Scientific Reports | 7: 3882 | DOI:10.1038/s41598-017-03871-x

FAVORETO, L.; MEYER, M.C.; DIAS-ARIEIRA, C.R.; MACHADO, A.C.Z.; SANTIAGO, D.C.; RIBEIRO, N.R. Diagnose e manejo de fitonematoides na cultura da soja. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.40, n.306, p.18-29, 2019.

FELDENS, L. O homem, a agricultura e a história. Lajeado: Ed. Univates, 2018. 171 p. ISBN 978-85-8167-241-0

FERRAZ, L.C.C.B. Nematoides. In: Manual de Fitopatologia. Capítulo 13. 2018.

FERRAZ, L.C.C.B, BROWN, D.J.F. Nematologia de plantas: fundamentos e importância. Manaus: NORMA EDITORA, 2016. 251 p. Il. ISBN: 978-85-99031-26-1

FERRAZ, S.; FREITAS, L.G. O controle de fitonematoides por plantas antagonistas e produtos naturais. Departamento de Fitopatologia – UFV, 2008.

FERREIRA, A.A. Extratos aquosos radiculares de plantas da família Solanaceae exibindo atividade nematotóxica no controle de *Meloidogyne incognita*. Brasília, 2018. Dissertação de Mestrado. p.134: il. Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil.

GAUR, H.S.; BEANE, J.; PERRY, R.N. Hatching of four successive generations of *Heterodera sorghi* in relation to the age of sorghum, *Sorghum vulgare*. Fundam. appl. Nematol., 1995, 18 (6), 599-601.

GRANT, W.; VINEY, M. The Dauer Phenomenon. In: Molecular and physiological basis of nematode survival/edited by Roland N. Perry and David A. Wharton. 2011. ISBN-13: 978 1 84593 687 7.

HAHN, M.H.; DUARTE, H.S.S.; DE MIO, L.L.M.; KUHN, O.J. Levantamento bibliométrico de fungos nematófagos no controle dos nematoides das galhas. Scientia Agraria Paranaensis, Marechal Cândido Rondon, v. 17, n. 4, out./dez., p. 389-397, 2018.

INOMOTO, M.M. Manejo cultural de nematoides. Capítulo 7 In: Nematoides fitoparasitas do algodoeiro nos cerrados brasileiros: biologia e medidas de controle / editores técnicos: Rafael Galbieri e Jean Louis Belot - Cuiabá (MT), 2016. 344 p: il.; ISBN: 978-85-66457-10-0

JONES, J.T.; HAEGEMAN, A.; DANCHIN, E.G.J.; GAUR, H.S.; HELDER, J.; JONES, M.G.K.; KIKUCHI, T.; MANZANILLA-LÓPEZ, R.; PALOMARES-RIUS, J.E.; WESEMAEL, W.M.L.; PERRY, R.N. Top 10 plant-parasitic nematodes. In: Molecular plant pathology (2013) 14 (9), 946-961. Review.

LIMA, I. M.; BUONICONTRO, D.S.; ARPINI, B.S.; TEODORO, M.C.; COSTA, N.S. Gerenciamento de nematoides no sistema de produção do cafeeiro Conilon. [nematoides-inobert-2019.pdf \(incaper.es.gov.br\)](https://incaper.es.gov.br/nematoides-inobert-2019.pdf)

McSORLEY, R. Adaptations of nematodes to environmental extremes. Florida Entomologist, 86(2): 138-142 June 2003.

MELLO, A.F.S.; MACHADO, A.C.Z.; INOMOTO, M.M. Potencial de controle de Erva-de-Santa-Maria sobre *Pratylenchus brachyurus*. Fitopatologia Brasileira 31:513-516. 2006.

- MICHEREFF, S.J. Nematoides como agentes de doenças de plantas. In: Fundamentos de fitopatologia. 2001.
- NEVES, D. L., L. M. RIBEIRO, C. R. DIAS-ARIEIRA, H. D. CAMPOS, e G. C. RIBEIRO. 2012. Sobrevivência de *Pratylenchus brachyurus* em diferentes substratos, com baixo teor de umidade. *Nematropica* 42:211-217.
- OKA, Y. From Old-Generation to Next-Generation Nematicides. *Agronomy* 2020, 10(9), 1387; <https://doi.org/10.3390/agronomy10091387>
- ORION, D., KRITZMAN, G., MEYER, S., ERBE, E. and CHITWOOD, D. (2001) A role of the gelatinous matrix in the resistance of root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) eggs to microorganisms. *Journal of Nematology* 33, 203–207.
- PERRY, R.N.; MOENS, M. Survival of parasitic nematodes outside the host. In: *Molecular and physiological basis of nematode survival*/edited by Roland N. Perry and David A. Wharton. 2011. ISBN-13: 978 1 84593 687 7.
- PERRY, R.N.; WHARTON, D.A. *Molecular and physiological basis of nematode survival*. 2011. ISBN-13: 978 1 84593 687 7.
- PINSKY, J. *As primeiras civilizações*. 25 ed. – São Paulo: Contexto, 2011. ISBN 978-85-7244-178-0
- POLOMARES-RIUS, J.E.; JONES, J.T.; COCK, P.J.; CASTILLO, P.; BLOCK, V.C. Activation of hatching in diapaused and quiescent *Globodera pallida*. *Parasitology* (2013), 140, 445–454. © Cambridge University Press 2012 doi:10.1017/S0031182012001874
- RITZINGER, C.H.S.P.; FANCELLI, M. Manejo integrado de nematoides na cultura da bananeira. *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal - SP, v. 28, n. 2, p. 331-338, Agosto 2006.
- SHANNON, A.J.; BROWNE, J.A.; BOYD, J.; FITZPATRICK, D.A.; BURNELL, A.M. "The anhydrobiotic potential and molecular phylogenetics of species and strains of *Panagrolaimus* (Nematoda, Panagrolaimidae)." *The Journal of Experimental Biology*, vol. 208, no. Pt 12, 2005, pp. 2433-45.
- SILVA, J.C.P.; FIGUEIREDO, Y.F. Avanços na biotecnologia aplicada ao controle de fitonematoides. 2018. In: *Biotecnologia aplicada a fitopatologia* (pp.143-164)
- SINGH, S.; SINGH, B.; SINGH, A.P. Nematodes: A threat to sustainability of agriculture. *Procedia Environmental Sciences* 29 (2015) 215-216.
- SOARES, P.L.M.; OTOBONI, C.E.M.; BATISTA, E.S.P.; SANTOS, J.M. Agricultura de precisão e os nematoides. Capítulo 4 In: *Nematoides fitoparasitas do algodoeiro nos cerrados brasileiros: biologia e medidas de controle* / editores técnicos: Rafael Galbieri e Jean Louis Belot - Cuiabá (MT), 2016. 344 p: il.; ISBN: 978-85-66457-10-0
- SOARES, P.L.M.; SANTOS, J.M.; CARVALHO, R.B.; BARBOSA, B.F.F.; MARTINELLI, P.R.P.; PAES, V.S. Controle biológico de fitonematoides com fungos nematófagos. In:

Defensivos agrícolas naturais: uso e perspectivas / Bernardo de Almeida Halfeld Vieira... [et al.], editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2016. ISBN 978-85-7035-642-0

SUGITA, Y.; SOBAGAKI, T.; YOSHIGA, T. Low-oxygen tolerance of *Ditylenchus destructor* (Tylenchida: Anguinidae). *Applied Entomology and Zoology* (2022) 57:131–136

TEJO, D.P.; FERNANDES, C.H.S.; BURATTO, J.S. Fitonematoides e estratégias adotadas em seu controle. *Ensaio*, v. 24, n. 2, p. 126-130, 2020.

TORRES, G.R.C.; PEDROSA, E.M.R.; MOURA, R.M. Sobrevivência de *Rotylenchulus reniformis* em solo naturalmente infestado submetido a diferentes períodos de armazenamento. *Fitopatologia Brasileira* 31:203- 206. 2006.

TREONIS, A.M.; WALL, D.H. Soil nematodes and desiccation survival in the extreme arid environment of the antarctic dry valleys. *Integr. Comp. Biol.*, 45:741–750 (2005). In: *Nematode Anhydrobiosis in Soils*.

United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.

WHARTON, D.A. Cold tolerance. In: *Molecular and physiological basis of nematode survival*/edited by Roland N. Perry and David A. Wharton. 2011. ISBN-13: 978 1 84593 687 7.

WU, X.; ZHU, X.; WANG, Y.; LIU, X.; CHEN, L.; DUAN, Y. (2018). The cold tolerance of the northern root-knot nematode *Meloidogyne hapla*. *PLoS ONE* 13(1): e0190531. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190531>.