



Biodiversidade Parasitária, Biotecnologia e Meio Ambiente: Abordagens Integradas para o Controle Sustentável de Nematódeos Gastrintestinais em Ruminantes

Parasitic Biodiversity, Biotechnology and Environment: Integrated Approaches to Sustainable Control of Gastrointestinal Nematodes in Ruminants

Thalia Caldas da Silva

Joana Kellany Gonçalves de Andrade

Janaina Marques do Nascimento

José Gracione do Nascimento Sousa Filho

Elinalva da Silva Moraes

Danilo Costa dos Santos

Maciel Gomes da Silva

Maycon Rodrigo de Souza Diniz

Heitor Emanuel Monteles Sousa

Ivo Alexandre Leme da Cunha

Resumo: As parasitoses gastrintestinais em ruminantes representam um dos principais entraves à produção animal sustentável nos trópicos, combinando elevado impacto econômico, consequências ecológicas decorrentes do uso intensivo de anti-helmínticos e implicações para a conservação da biodiversidade nos agroecossistemas. A resistência parasitária aos fármacos disponíveis emergiu como fenômeno global crítico, associado ao uso indiscriminado de anti-helmínticos sem suporte diagnóstico adequado, e vem sendo relacionada a impactos negativos sobre a biodiversidade da fauna coprófaga, a qualidade dos solos e a contaminação de recursos hídricos. Nesse contexto, biotecnologias alternativas como o controle biológico por fungos nematófagos, o uso de plantas bioativas ricas em compostos fitoquímicos e o diagnóstico molecular emergem como estratégias promissoras para a transição a sistemas de manejo parasitário mais sustentáveis. O paradigma da Saúde Única (One Health) oferece o referencial integrador necessário para articular saúde animal, saúde humana e conservação ambiental em estratégias que considerem a complexidade ecológica dos agroecossistemas tropicais. Este capítulo discute, com base em revisão narrativa de literatura, as interfaces entre biodiversidade parasitária, biotecnologia e meio ambiente no contexto do controle de nematódeos gastrintestinais em ruminantes, destacando as abordagens integradas mais promissoras para a sustentabilidade dos sistemas de produção animal.

Palavras-chave: nematódeos gastrintestinais; resistência anti-helmíntica; controle biológico; Saúde Única; agroecossistemas tropicais.

Abstract: Gastrointestinal parasitoses in ruminants represent one of the main constraints to sustainable animal production in the tropics, combining high economic impact, ecological consequences arising from the intensive use of anthelmintics, and implications for biodiversity

conservation in agroecosystems. Parasitic resistance to available drugs has emerged as a critical global phenomenon, associated with the indiscriminate use of anthelmintics without adequate diagnostic support, and has been linked to negative impacts on the biodiversity of coprophagous fauna, soil quality, and contamination of water resources. In this context, alternative biotechnologies such as biological control by nematophagous fungi, the use of bioactive plants rich in phytochemical compounds, and molecular diagnostics emerge as promising strategies for transitioning to more sustainable parasite management systems. The One Health paradigm provides the integrative framework needed to articulate animal health, human health, and environmental conservation in strategies that account for the ecological complexity of tropical agroecosystems. This chapter discusses, based on a narrative literature review, the interfaces between parasitic biodiversity, biotechnology, and the environment in the context of gastrointestinal nematode control in ruminants, highlighting the most promising integrated approaches for the sustainability of animal production systems.

Keywords: gastrointestinal nematodes; anthelmintic resistance; biological control; One Health; tropical agroecosystems.

INTRODUÇÃO

A produção de ruminantes nos sistemas agropecuários tropicais enfrenta um desafio sanitário de caráter estrutural e crescente: as parasitoses gastrintestinais causadas por nematódeos. Esses organismos, pertencentes principalmente às famílias Trichostrongylidae e Strongylidae, causam perdas produtivas expressivas em bovinos, ovinos, caprinos e bubalinos, comprometendo o ganho de peso, a produção de leite, a fertilidade dos rebanhos e, nos casos de alta intensidade parasitária, levando à morte dos animais (Kaplan e Vidyashankar, 2020). Em regiões de clima tropical, onde temperatura e umidade favorecem o desenvolvimento e a sobrevivência das larvas infectantes nas pastagens ao longo de grande parte do ano, o impacto das parasitoses é ainda mais pronunciado, configurando um dos principais gargalos técnicos e econômicos da pecuária familiar (Hoste *et al.*, 2023).

Por décadas, o enfrentamento das parasitoses gastrintestinais baseou-se quase exclusivamente no uso de anti-helmínticos químicos. Embora eficazes a curto prazo, essa dependência unilateral gerou consequências graves e interligadas: de um lado, a emergência e disseminação de populações parasitárias resistentes aos principais grupos farmacológicos disponíveis; de outro, impactos ambientais progressivos decorrentes da excreção de resíduos farmacológicos ativos nas fezes dos animais tratados, com efeitos documentados sobre a biodiversidade dos agroecossistemas, a qualidade dos solos e a integridade de recursos hídricos (Rose Vineer *et al.*, 2020; Gómez-Varela *et al.*, 2021). Essas dimensões revelam que o controle parasitário em ruminantes transcende o âmbito da clínica veterinária e se insere, de pleno direito, nas discussões sobre biologia da conservação, biotecnologia ambiental e saúde ecossistêmica.

A emergência do paradigma da Saúde Única (One Health) oferece o referencial teórico adequado para compreender e enfrentar essas interdependências. Ao reconhecer que a saúde humana, animal e ambiental são dimensões indissociáveis

e mutuamente condicionantes, a Saúde Única propõe abordagens colaborativas, multissetoriais e transdisciplinares para problemas sanitários que ultrapassam as fronteiras entre espécies e ecossistemas (Lamas e Arenas-Gamboa, 2024; Dalla Costa *et al.*, 2021). No âmbito das parasitoses de ruminantes, essa perspectiva orienta a transição de modelos de controle reativos e quimioterápicos para estratégias integradas que articulem diagnóstico preciso, biotecnologias sustentáveis e conservação da biodiversidade funcional dos agroecossistemas.

Este capítulo discute, com base em revisão narrativa da literatura científica recente, as interfaces entre biodiversidade parasitária, biotecnologia e meio ambiente no contexto do controle de nematódeos gastrintestinais em ruminantes. O objetivo é apresentar e articular as abordagens integradas mais promissoras para a sustentabilidade dos sistemas de produção animal, com ênfase nos agroecossistemas tropicais brasileiros.

PERCURSO METODOLÓGICO

Este capítulo foi elaborado a partir de revisão narrativa da literatura científica sobre os temas biodiversidade parasitária em ruminantes, impactos ambientais de anti-helmínticos, biotecnologias de controle parasitário e manejo integrado de parasitas sob o paradigma da Saúde Única. A busca bibliográfica foi realizada nas plataformas Consensus e SciSpace, abrangendo periódicos indexados em bases internacionais. Foram priorizados artigos de revisão sistemática, meta-análises e estudos experimentais publicados principalmente entre 2018 e 2025, em periódicos classificados nos estratos superiores do sistema Qualis. A legislação brasileira relevante foi consultada nos portais oficiais do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e da Presidência da República. A síntese temática foi conduzida de forma analítica e crítica, buscando articular os eixos biológico, biotecnológico e ambiental em torno das questões centrais do manejo sustentável de parasitas em sistemas de produção de ruminantes.

BIODIVERSIDADE PARASITÁRIA E AGROECOSSISTEMAS TROPICAIS

Os parasitas constituem um dos grupos biológicos mais diversos e ecologicamente relevantes do planeta. Presentes em todos os ecossistemas e em representantes de praticamente todos os grandes grupos taxonômicos, os parasitas desempenham funções essenciais na regulação de populações hospedeiras, na modulação de interações interespecíficas e na estruturação das teias alimentares (Dobson *et al.*, 2020). Não obstante sua relevância ecológica, os parasitas são, historicamente, os organismos menos considerados em estratégias de conservação da biodiversidade, tratados quase exclusivamente como ameaças à saúde animal ou humana e raramente como componentes legítimos do patrimônio biológico dos ecossistemas (Carlson *et al.*, 2023; Poulin *et al.*, 2023).

No contexto dos agroecossistemas, a biodiversidade parasitária de ruminantes é vasta e ecologicamente complexa. Os nematódeos gastrintestinais, principal grupo de parasitas em bovinos, ovinos e caprinos nos trópicos, compreendem dezenas de espécies com nichos ecológicos, ciclos de vida e sensibilidades farmacológicas distintos. Espécies como *Haemonchus contortus*, *Trichostrongylus spp.*, *Cooperia spp.* e *Ostertagia spp.* coexistem nos rebanhos em proporções que variam conforme as condições climáticas, as práticas de manejo e a pressão seletiva exercida pelo uso de anti-helmínticos, configurando comunidades parasitárias dinâmicas e ecologicamente estruturadas (Kaplan e Vidyashankar, 2020; Hoste *et al.*, 2023).

Dobson *et al.* (2020) argumentam, em proposta abrangente de conservação de parasitas em escala global, que a perda de diversidade parasitária pode ter consequências ecológicas imprevisíveis, incluindo a desestabilização de teias alimentares e a alteração de pressões seletivas sobre hospedeiros. No contexto dos agroecossistemas, a perspectiva de Poulin *et al.* (2023) é igualmente relevante: os parasitas não são simplesmente inimigos a serem erradicados, mas componentes funcionais dos ecossistemas cujo manejo deve considerar tanto a sanidade dos hospedeiros quanto a integridade das comunidades ecológicas nas quais estão inseridos. Essa perspectiva fundamenta a necessidade de estratégias de controle parasitário que sejam ecologicamente informadas, distinguindo entre a presença de parasitas em níveis toleráveis, compatível com a homeostase do agroecossistema, e a infestação em cargas prejudiciais à produção e ao bem-estar animal.

A dinâmica das populações de nematódeos gastrintestinais nos agroecossistemas tropicais é fortemente influenciada por fatores ambientais e pelo manejo das pastagens. Hoste *et al.* (2023) destacam que as interações entre animais, plantas e parasitas nos sistemas de pastejo são multidimensionais: enquanto determinadas plantas podem exercer efeito anti-helmíntico direto por meio de compostos secundários, a diversidade florística das pastagens, a densidade animal e os ciclos de rotação determinam, em grande medida, o grau de contaminação larval e, portanto, o risco de infecção dos rebanhos. A manutenção da biodiversidade funcional das pastagens, incluindo a diversidade vegetal e a fauna do solo, é assim um componente relevante das estratégias de controle parasitário baseadas em princípios agroecológicos (Martinez-Ortiz de Montellano *et al.*, 2021).

A fauna coprófaga, especialmente os besouros estercoleiros (Scarabaeidae), desempenha papel particularmente importante na regulação natural das parasitoses gastrintestinais. Ao enterrar e fragmentar as fezes dos ruminantes, esses insetos reduzem o tempo de sobrevivência das larvas infectantes no ambiente, contribuindo para a diminuição da contaminação das pastagens. A degradação dessa fauna por resíduos de anti-helmínticos nas fezes representa, portanto, não apenas um impacto sobre a biodiversidade, mas a destruição de um serviço ecossistêmico de relevância direta para a sanidade dos rebanhos, criando um paradoxo no qual o próprio controle parasitário convencional contribui para ampliar a vulnerabilidade dos agroecossistemas.

IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DE ANTI-HELMÍNTICOS

O uso intensivo de anti-helmínticos nos sistemas de criação de ruminantes tem implicações ambientais que transcendem os limites da propriedade rural. A maior parte das classes farmacológicas empregadas no controle parasitário, em especial as lactonas macrocíclicas (ivermectina, moxidectina, doramectina) e os benzimidazóis, é excretada nas fezes dos animais tratados em formas biologicamente ativas, com alta persistência ambiental e potencial tóxico para organismos não-alvo (Gómez-Varela *et al.*, 2021). Esses resíduos contaminam os solos das pastagens, afetam a fauna decompositora, alcançam corpos d'água superficiais e lençóis freáticos, configurando um problema de poluição ambiental de amplo alcance e ainda insuficientemente considerado nas políticas de gestão do uso de medicamentos veterinários.

Os impactos sobre a fauna coprófaga constituem um dos efeitos ambientais mais bem documentados das lactonas macrocíclicas. Schürmann *et al.* (2021) demonstraram que resíduos de ivermectina em esterco bovino armazenado mantêm toxicidade significativa para invertebrados terrestres e aquáticos mesmo após meses de armazenagem, e que a aplicação desse esterco contaminado nas pastagens como fertilizante representa um vetor eficiente de dispersão ambiental do composto. Os autores identificaram efeitos letais e subletais em besouros estercoleiros, minhocas e invertebrados aquáticos, evidenciando que os impactos ultrapassam o solo das pastagens e atingem ecossistemas aquáticos adjacentes. Bao *et al.* (2023) reforçam esse quadro ao demonstrar que, ao contrário de compostos fitoquímicos alternativos como timol e carvacrol, os anti-helmínticos convencionais exercem efeito deletério sobre os besouros estercoleiros, prejudicando os serviços ecossistêmicos que esses insetos prestam na decomposição das fezes e no controle natural das larvas parasitárias.

A contaminação de recursos hídricos por resíduos anti-helmínticos é outro problema de crescente preocupação ambiental e de saúde pública. Gómez-Varela *et al.* (2021), em análise espaço-temporal da ocorrência de resíduos anti-helmínticos em águas subterrâneas, identificaram a presença de benzimidazóis, avermectinas e outros compostos em concentrações ambientalmente relevantes em poços e fontes localizados em áreas de pecuária intensiva. Além da contaminação de águas subterrâneas, estudos indicam a presença de resíduos anti-helmínticos em corpos d'água superficiais e em sedimentos de ambientes aquáticos próximos a pastagens, com efeitos documentados sobre zooplâncton e invertebrados bentônicos (Bao *et al.*, 2023). Em regiões tropicais onde o consumo de água subterrânea sem tratamento é comum entre as populações rurais, esse fenômeno adquire dimensão de saúde pública que ilustra concretamente a interconexão entre saúde animal, ambiental e humana preconizada pelo paradigma da Saúde Única.

O Marco Regulatório brasileiro avança progressivamente na regulamentação do uso de antiparasitários veterinários. A Portaria SDA/MAPA n. 35, de 31 de janeiro de 2020, submeteu à consulta pública projeto de Instrução Normativa que atualiza os critérios e procedimentos para avaliação de eficácia, segurança e rotulagem

de produtos antiparasitários de uso veterinário, incluindo categorias como anti-helmínticos, carrapaticidas e anticoccidianos (MAPA, 2020). A Portaria MAPA n. 798, de 15 de maio de 2023, por sua vez, consolidou e modernizou os requisitos para fabricação e uso de produtos veterinários na alimentação animal, estabelecendo exigências mais rigorosas para o licenciamento e o controle de qualidade (MAPA, 2023). Contudo, a dimensão ambiental do problema exige que a regulação avance além dos critérios de eficácia e segurança para os animais-alvo, incorporando sistematicamente a avaliação de riscos ecotoxicológicos para organismos não-alvo e para os ecossistemas onde os produtos são aplicados.

BIOTECNOLOGIAS APLICADAS AO CONTROLE PARASITÁRIO SUSTENTÁVEL

A convergência entre a crise da resistência anti-helmíntica e os impactos ambientais do controle quimioterápico convencional estimulou o desenvolvimento de um amplo espectro de biotecnologias alternativas para o manejo das parasitoses gastrintestinais em ruminantes. Essas abordagens, que incluem o controle biológico por fungos nematófagos, o uso de plantas bioativas e compostos fitoquímicos, e as ferramentas diagnósticas moleculares e clínicas de precisão, não se propõem a substituir integralmente o controle quimioterápico, mas a integrá-lo em estratégias de manejo que reduzam a pressão seletiva sobre as populações parasitárias e preservem, simultaneamente, a eficácia dos fármacos disponíveis e a biodiversidade dos agroecossistemas (Waghorn *et al.*, 2020; Rinaldi *et al.*, 2021).

Controle Biológico por Fungos Nematófagos

O controle biológico de nematódeos gastrintestinais por fungos nematófagos representa uma das biotecnologias mais estudadas no campo da parasitologia veterinária sustentável, com décadas de investigação científica e crescente maturidade tecnológica. Espécies como *Duddingtonia flagrans*, *Monacrosporium thaumasium* e *Pochonia chlamydosporia* são capazes de capturar, parasitar e destruir larvas infectantes de nematódeos nas fezes e nas pastagens, reduzindo significativamente a contaminação ambiental e, conseqüentemente, a carga parasitária dos rebanhos (Bassetto *et al.*, 2025; Rinaldi *et al.*, 2021).

O mecanismo de ação de *D. flagrans* é particularmente adequado para uso prático em sistemas de produção: seus clamidósporos, resistentes ao trânsito gastrointestinal dos animais, são administrados oralmente e excretados viáveis nas fezes, onde germinam e capturam as larvas infectantes exatamente no ponto crítico de transmissão parasitária. Esse sítio de ação garante eficácia elevada sem impacto direto sobre os hospedeiros ou sobre os ecossistemas adjacentes, distinguindo o controle biológico dos anti-helmínticos convencionais em termos de perfil ambiental (Mendoza-de Gives, 2022). A aprovação do primeiro produto comercial à base de *D. flagrans* para uso em ovinos no Brasil, recentemente documentada por Kasaija *et al.* (2025), sinaliza a transição dessa tecnologia da bancada laboratorial para

o mercado, com perspectivas concretas de adoção em escala em sistemas de produção familiar.

Mendoza-de Gives (2022) amplia a perspectiva sobre os fungos nematófagos ao demonstrar que esses organismos constituem também plataformas biotecnológicas com aplicações potenciais em bioprocessos, produção de enzimas e compostos bioativos de interesse industrial e veterinário, reforçando seu valor além do controle biológico *stricto sensu*. Rinaldi *et al.* (2021), em revisão abrangente dos métodos biológicos de controle de nematódeos gastrintestinais, situam os fungos nematófagos dentro de um conjunto mais amplo de ferramentas biológicas, incluindo nematódeos entomopatogênicos e antagonistas microbianos, e apontam que a combinação estratégica entre controle biológico e tratamento anti-helmíntico seletivo representa o modelo de maior potencial para sistemas de produção sustentáveis.

Plantas Bioativas e Compostos Fitoquímicos

O uso de plantas bioativas ricas em compostos secundários com atividade anti-helmíntica constitui outra frente biotecnológica de grande interesse científico e prático, especialmente em regiões tropicais de alta diversidade florística. Os taninos condensados, presentes em diversas leguminosas forrageiras e em subprodutos agroindustriais, têm sido extensivamente estudados por seus efeitos diretos sobre as larvas e adultos de nematódeos gastrintestinais e por sua capacidade de reduzir a excreção de ovos pelas fêmeas parasitas demonstraram que subprodutos agroindustriais contendo taninos condensados, quando incorporados à alimentação de ruminantes, reduzem significativamente a contaminação larval das pastagens, configurando alternativa viável e de baixo custo para integrar programas de controle parasitário em sistemas de agricultura familiar (Paoletti *et al.*, 2022).

Compostos fitoquímicos monoterpênicos como timol, carvacrol e cinamaldeído têm emergido como candidatos promissores ao desenvolvimento de formulações fitoterapêuticas para uso veterinário. Bao *et al.* (2023) demonstraram a eficácia desses compostos sobre estágios larvais de nematódeos gastrintestinais aliada à ausência de toxicidade para a fauna coprófaga, representando vantagem ambiental fundamental em comparação com os anti-helmínticos convencionais. Esse perfil de segurança ecológica, combinado com a disponibilidade e o baixo custo de matérias-primas de origem vegetal, fundamenta o interesse no desenvolvimento de formulações biotecnológicas baseadas em fitoquímicos para uso em sistemas de produção sustentáveis.

Diagnóstico Molecular, Clínico e Tratamento Seletivo

O diagnóstico parasitológico de precisão constitui o fundamento técnico indispensável para qualquer estratégia de controle racional e sustentável. Falzon *et al.* (2023) sistematizam as principais ferramentas diagnósticas disponíveis para nematódeos gastrintestinais em ruminantes, incluindo a contagem de ovos por grama de fezes (OPG), a coprocultura para identificação larval, o método FAMACHA

para avaliação da anemia associada a haemonchoses, os ensaios ELISA para ostertagiose e fasciola e as técnicas moleculares de PCR e sequenciamento para identificação de espécies e detecção de resistência. Essa diversidade de ferramentas permite adaptar o protocolo diagnóstico às condições técnicas e econômicas de cada sistema produtivo, desde abordagens de campo de baixo custo até análises moleculares de alta sensibilidade e especificidade.

O diagnóstico molecular emerge como tecnologia-chave para o monitoramento da resistência anti-helmíntica. Silveira *et al.* (2020) discutem as oportunidades e desafios para a adoção de diagnósticos moleculares baseados em PCR em tempo real e sequenciamento de nova geração, argumentando que a identificação de mutações associadas à resistência em populações parasitárias de campo é essencial para orientar as escolhas terapêuticas e preservar a eficácia dos anti-helmínticos remanescentes. O tratamento seletivo direcionado (TSD), estratégia que visa tratar apenas os animais com indicadores clínicos ou parasitológicos de carga relevante, reduz a exposição das populações parasitárias aos fármacos e preserva a fração em refúgio, retardando significativamente o desenvolvimento de resistência (Kaplan e Vidyashankar, 2020; Waghorn *et al.*, 2020). A integração entre diagnóstico clínico acessível como o FAMACHA e ferramentas moleculares de maior resolução representa o espectro completo da biotecnologia diagnóstica disponível para o manejo racional das parasitoses gastrointestinais.

MANEJO INTEGRADO DE PARASITAS E O PARADIGMA DA SAÚDE ÚNICA

O Manejo Integrado de Parasitas (MIP) constitui o modelo científico que melhor sintetiza as abordagens discutidas nas seções anteriores, propondo a combinação estratégica de múltiplas ferramentas de controle, diagnóstico parasitológico periódico, tratamento seletivo, rotação de pastagens, controle biológico, fitoterapia e seleção genética, de forma contextualizada às condições ecológicas, econômicas e sociais de cada sistema produtivo (Waghorn *et al.*, 2020; Torgerson *et al.*, 2018). O MIP não é uma fórmula prescritiva, mas um processo adaptativo que exige monitoramento contínuo, capacitação técnica dos atores envolvidos e articulação entre pesquisa aplicada, extensão rural e produção. O denominador comum de todas as abordagens que compõem o MIP é a redução da pressão seletiva sobre as populações parasitárias pelo uso estratégico, e não indiscriminado, dos anti-helmínticos disponíveis.

A integração do MIP ao paradigma da Saúde Única eleva o controle parasitário de uma estratégia sanitária setorial a uma abordagem de gestão de agroecossistemas. Ao reconhecer que a saúde animal, humana e ambiental são dimensões interdependentes, a Saúde Única fundamenta a necessidade de considerar, nas decisões de manejo parasitário, não apenas os indicadores produtivos dos rebanhos, mas também os impactos sobre a biodiversidade local, a qualidade dos solos e dos recursos hídricos, a saúde dos trabalhadores rurais e

a segurança alimentar das populações consumidoras (Lamas e Arenas-Gamboa, 2024; Morel *et al.*, 2024). Dalla Costa *et al.* (2021) documentam que, no Brasil, a Saúde Única vem sendo progressivamente incorporada em políticas públicas e em ações de pesquisa e extensão, embora persista a necessidade de maior integração entre os sistemas de vigilância sanitária animal, ambiental e humana.

Nos sistemas de agricultura familiar tropical, a implementação do MIP enfrenta desafios específicos relacionados ao acesso limitado a diagnóstico laboratorial especializado, à escassez de assistência técnica qualificada e à disponibilidade de alternativas biotecnológicas de baixo custo (Ferreira e Garcia, 2002). A superação dessas barreiras depende, em larga medida, da qualidade e da abrangência dos serviços de assistência técnica e extensão rural. A Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (PNATER), instituída pela Lei 12.188/2010, prevê, entre seus princípios orientadores, a adoção de metodologias participativas e a preferência por abordagens de base ecológica, princípios plenamente convergentes com a filosofia do MIP e da Saúde Única (Brasil, 2010). A integração entre universidades, órgãos de extensão e entidades de capacitação profissional constitui, nesse contexto, o modelo institucional mais adequado para a transferência das tecnologias de MIP para os sistemas de produção familiar.

A formação de multiplicadores do conhecimento em comunidades rurais, por meio de metodologias pedagógicas contextualizadas como a Pedagogia da Alternância, representa uma estratégia pedagógica de alto impacto para a disseminação das práticas de MIP nos territórios (Ortega *et al.*, 2022). Ao capacitar agricultores, técnicos e jovens rurais para compreender a complexidade ecológica do problema parasitário e para adotar ferramentas de diagnóstico e controle integrado, essas iniciativas contribuem para a construção de uma cultura de manejo sustentável que pode se perpetuar mesmo após o encerramento de projetos pontuais de extensão. Dumont *et al.* (2021) reforçam essa perspectiva ao demonstrar que modelos inovadores de extensão rural baseados em aprendizado de campo e em abordagens ascendentes são mais eficazes na adoção de inovações pela agricultura familiar do que os modelos tradicionais de transferência unidirecional de tecnologia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As parasitoses gastrintestinais em ruminantes constituem um problema que conecta, de forma indissociável, biologia, biotecnologia e meio ambiente. A crise da resistência anti-helmíntica e os impactos ecológicos do controle quimioterápico convencional evidenciam os limites dos modelos sanitários setoriais e a necessidade urgente de abordagens integradas, sustentáveis e ecologicamente informadas, ancoradas no paradigma da Saúde Única.

As biotecnologias emergentes de controle parasitário, com destaque para o controle biológico por fungos nematófagos, as plantas bioativas e o diagnóstico molecular, apresentam potencial científico consolidado e demonstram compatibilidade com os princípios da conservação da biodiversidade e da

sustentabilidade ambiental. Sua adoção em escala, especialmente nos sistemas de agricultura familiar tropical, depende de investimentos contínuos em pesquisa aplicada, de políticas públicas que incentivem a transição para modelos de manejo integrado e de serviços de extensão rural qualificados e comprometidos com abordagens participativas e ecológicas.

A conservação da biodiversidade parasitária e da fauna associada aos agroecossistemas tropicais, frequentemente percebida como antagonista à eficiência produtiva, deve ser reinterpretada como elemento constitutivo da resiliência sanitária dos sistemas de produção. Compreender os parasitas como componentes funcionais dos agroecossistemas, e não apenas como ameaças a serem eliminadas, é passo fundamental para o desenvolvimento de estratégias de controle que sejam, ao mesmo tempo, eficazes, economicamente viáveis e ecologicamente responsáveis.

REFERÊNCIAS

- BAO, W. *et al.* **Nontoxic effects of thymol, carvacrol, cinnamaldehyde, and garlic oil on dung beetles: a potential alternative to ecotoxic anthelmintics.** PLOS ONE, v. 18, n. 4, p. e0283860, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283860>
- BASSETTO, C. C. *et al.* **Nematophagous fungi to controlling gastrointestinal nematodes in small ruminants: a systematic review.** Veterinary Parasitology, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2025.110299>
- BRASIL. **Lei n. 12.188, de 11 de janeiro de 2010.** Institui a Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural para a Agricultura Familiar e Reforma Agrária (PNATER). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 jan. 2010.
- CARLSON, C. J. *et al.* Conservation of parasites: a primer. **International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife**, v. 21, p. 237-244, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2023.05.006>
- CEZAR, A. S. *et al.* **An overview of anthelmintic resistance in domestic ruminants in Brazil.** Ruminants, v. 3, n. 3, p. 185-204, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ruminants3030024>
- DALLA COSTA, F. A. *et al.* **From the approach to the concept: One Health in Latin America — experiences and perspectives in Brazil, Chile, and Colombia.** Frontiers in Public Health, v. 9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.662500>
- DOBSON, A. P. *et al.* **A global parasite conservation plan.** Biological Conservation, v. 250, p. 108596, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108596>
- DUMONT, B. *et al.* **Transforming agricultural extension service delivery through innovative bottom-up climate-resilient agribusiness farmer field**

schools. Sustainability, v. 13, n. 5, p. 2094, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052094>

FALZON, L. C. *et al.* **Practical guide to the diagnostics of ruminant gastrointestinal nematodes, liver fluke and lungworm infection: interpretation and usability of results.** Parasites and Vectors, v. 16, n. 1, p. 81, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05702-9>

FERREIRA, B.; GARCIA, R. C. **Financiamento da agricultura brasileira: avaliação do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf). Relatório de pesquisa exploratória.** Brasília: IPEA, 2002.

GÓMEZ-VARELA, A. I. *et al.* **An analysis of the spatio-temporal occurrence of anthelmintic veterinary drug residues in groundwater.** Science of the Total Environment, v. 773, p. 145054, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145054>

HOSTE, H. *et al.* **Understanding animal-plant-parasite interactions to improve the management of gastrointestinal nematodes in grazing ruminants.** Pathogens, v. 12, n. 3, p. 456, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/pathogens12030456>

KAPLAN, R. M.; VIDYASHANKAR, A. N. **Biology, epidemiology, diagnosis, and management of anthelmintic resistance in gastrointestinal nematodes of livestock.** Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice, v. 36, n. 1, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2020.01.001>

KASAIJA, P. D. *et al.* **Haemonchosis control in sheep with Duddingtonia flagrans fungi: evaluation of the first commercial product in Brazil.** Parasitologia, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/parasitologia5010001>

LAMAS, A.; ARENAS-GAMBOA, A. M. The One Health concept. **British Journal of Biomedical Science**, v. 81, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/bjbs.2024.12366>

MARTINEZ-ORTIZ DE MONTELLANO, C. *et al.* **Agroecological practices to support tropical livestock farming systems: a Caribbean and Latin American perspective.** Tropical Animal Health and Production, v. 53, n. 5, p. 468, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02669-3>

MENDOZA-DE GIVES, P. **Nematophagous fungi, an extraordinary tool for controlling ruminant parasitic nematodes and other biotechnological applications.** Biocontrol Science and Technology, v. 32, n. 5, p. 535-556, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2041528>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Portaria SDA n. 35, de 31 de janeiro de 2020. **Submete à consulta pública projeto de Instrução Normativa que aprova o Regulamento Técnico sobre Produtos Antiparasitários de Uso Veterinário.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 fev. 2020.