

CAPÍTULO 6

Bioindicação da qualidade do solo: papel ecológico e funcional da macrofauna edáfica

Wagner Gonçalves de Sá, Márcio Menegussi Menon, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7.c6>

Resumo

A macrofauna edáfica, composta por invertebrados com tamanho corporal superior a 2 mm — como minhocas, cupins e formigas —, constitui um componente essencial dos ecossistemas terrestres. Esses organismos exercem funções ecológicas fundamentais, como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a engenharia do solo, promovendo melhorias em sua estrutura física e fertilidade. Devido à sua sensibilidade a alterações ambientais e à capacidade de responder rapidamente às mudanças no uso e manejo do solo, a macrofauna edáfica tem sido amplamente reconhecida como bioindicadora eficiente da qualidade do solo. Esta revisão bibliográfica aborda a importância funcional da macrofauna, caracteriza seus principais grupos taxonômicos, descreve os métodos tradicionais e inovadores de avaliação, analisa seu papel na detecção de impactos antrópicos e discute as perspectivas para o uso desses organismos no monitoramento ambiental em distintos biomas e sistemas agrícolas, contribuindo para a sustentabilidade e conservação dos recursos edáficos.

Palavras-chave: Macrofauna edáfica. Bioindicadores ambientais. Qualidade do solo. Monitoramento ecológico. Conservação do solo.

1. Introdução

A qualidade do solo é um conceito dinâmico e multifacetado, fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas. Ela reflete a capacidade de um solo em funcionar como um sistema vivo, sustentando a produtividade vegetal e animal, mantendo a qualidade da água e do ar, e promovendo a saúde humana e ambiental (Doran; Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997; Crespo; Souza, 2018; 2023).

Cabe considerar que a biologia do solo compreende o conjunto de organismos que vivem total ou parcialmente nesse ambiente, incluindo bactérias, fungos, nematoides, artrópodes e minhocas. Esses organismos integram uma rede trófica complexa e funcional, responsável pela manutenção da dinâmica e da produtividade dos ecossistemas terrestres (Siqueira *et al.*, 2004).

A diversidade biológica do solo está intimamente relacionada à estabilidade ecológica e à prestação de serviços ecossistêmicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, a formação e estruturação do solo, o controle biológico natural de pragas e doenças e o sequestro de carbono, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e naturais (Figura 1).



Figura 1. Principais processos e funções dos organismos do solo. Fonte: Siqueira *et al.*, 2004.

Em um cenário global de crescente demanda por alimentos, fibras e energia, aliado às pressões ambientais decorrentes das mudanças climáticas e da degradação da terra, o monitoramento e a avaliação da qualidade do solo se tornam imperativos. Métodos tradicionais, baseados principalmente em análises físico-químicas, fornecem dados essenciais, mas muitas vezes são insuficientes para capturar a complexidade e a dinâmica dos processos biológicos que regem a fertilidade e a resiliência do solo (Chapman *et al.*, 2018; Souza, 2018).

Nesse contexto, a utilização de bioindicadores tem ganhado proeminência como uma abordagem mais holística e sensível às alterações ambientais. Bioindicadores são organismos ou comunidades que, por sua presença, ausência, abundância ou comportamento, fornecem informações sobre o estado do ambiente (Pankhurst *et al.*, 1997; Bünemann *et al.*, 2018; Rangel, 2023).

Entre os diversos grupos de organismos que habitam o solo, a macrofauna edáfica se destaca por sua relevância ecológica e sua clara resposta a distúrbios. Esses invertebrados — incluindo minhocas (Annelida), cupins (Isoptera), formigas (Hymenoptera), besouros (Coleoptera) e suas larvas — são componentes-chave da teia alimentar do solo e desempenham funções vitais que impactam diretamente os serviços ecossistêmicos, como a ciclagem de nutrientes, a formação de agregados e a regulação hídrica (Lavelle *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2021).

A sensibilidade da macrofauna às mudanças no manejo do solo, como a conversão de uso da terra, a intensidade do revolvimento e a aplicação de insumos agrícolas, faz dela um termômetro eficaz da saúde do solo, permitindo diagnósticos precisos sobre o impacto de diferentes práticas e a eficácia de estratégias de recuperação (Baretta *et al.*, 2011; Tsiafouli *et al.*, 2015; Rangel, 2023).

Dessa forma, a análise da macrofauna edáfica permite verificar, por meio de bioindicadores, os estágios de recuperação ambiental, uma vez que a composição, a abundância e a atividade das comunidades edáficas refletem o grau de restabelecimento das funções ecológicas do solo. De maneira geral, solos com maior teor de matéria orgânica tendem a abrigar comunidades mais diversificadas e abundantes, evidenciando relações diretas entre a qualidade da

matéria orgânica, a estrutura trófica da macrofauna e o funcionamento ecossistêmico (Faria, 2021; Souza; Fonseca, 2023).

Assim, compreender a dinâmica desses organismos e sua interação com os atributos físicos e químicos do solo é essencial para o manejo sustentável e para a avaliação da recuperação e conservação dos ecossistemas edáficos.

2. A macrofauna edáfica e suas funções na qualidade do solo

A macrofauna edáfica compreende uma ampla variedade de invertebrados que vivem total ou parcialmente no solo, desempenhando papéis fundamentais nos processos ecossistêmicos e na manutenção da qualidade edáfica (Figura 2).



Figura 2. Macrofauna edáfica do solo. Fonte: gerada por IA - https://gemini.google.com/app/b840864e06d398c9?is_sa=1&is, 2025.

Esses organismos influenciam diretamente a estrutura física, a fertilidade e a dinâmica biogeoquímica do solo, sendo considerados componentes-chave dos serviços ecossistêmicos. Os principais grupos incluem:

- **Anelídeos (Minhocas)** – consideradas os “engenheiros do ecossistema” mais proeminentes, as minhocas exercem profunda influência na estrutura e fertilidade do solo (Edwards; Bohlen, 1996; Jouquet *et al.*, 2016). Elas

fragmentam e incorporam a matéria orgânica, formando galerias que aumentam a porosidade, a aeração e a infiltração de água. Seus coprólitos³, ricos em nutrientes, favorecem a formação de agregados estáveis, elevando a capacidade de retenção hídrica e a resistência à erosão (Blanchart *et al.*, 2004; Scheu, 2015). Por esses motivos, a biomassa e a diversidade de minhocas são frequentemente utilizadas como indicadores diretos da qualidade do solo.

- **Isoptera (Cupins)** – de particular relevância em regiões tropicais e subtropicais, os cupins são engenheiros de ecossistemas essenciais. Suas estruturas de ninhos e galerias influenciam de maneira expressiva a estrutura do solo, a ciclagem de nutrientes e a dinâmica hídrica. Além disso, atuam como importantes decompositores de lignina e celulose, contribuindo para a ciclagem de carbono e nitrogênio (Bignell; Eggleton, 2000; Jouquet *et al.*, 2016). Entretanto, determinadas espécies podem comportar-se como pragas agrícolas ou florestais, demandando manejo integrado.

- **Hymenoptera (Formigas)** – as formigas exercem funções ecológicas múltiplas. Suas extensas redes de túneis e câmaras promovem a aeração e a mistura do solo. Muitas espécies são predadoras, desempenhando papel relevante no controle biológico de pragas, enquanto outras são dispersoras de sementes (mirmecocoria⁴), influenciando a regeneração natural e a dinâmica da vegetação (Folgarait, 1998; Rangel, 2023).

- **Coleoptera (Besouros)** – diversas famílias de besouros, como *Scarabaeidae* e *Tenebrionidae*, participam ativamente do funcionamento do ecossistema edáfico. As larvas de escarabeídeos, em especial, são detritívoras ou rizófagas⁵, enquanto muitos adultos atuam como predadores ou saprófagos. Sua presença, abundância e diversidade podem refletir a saúde ecológica do solo e a disponibilidade de recursos alimentares (Baretta *et al.*, 2014).

- **Diplopoda (Miriápodes – Piolhos-de-cobra)** – esses organismos são detritívoros eficientes, contribuindo para a fragmentação da matéria orgânica e

³ São aglomerados de solo e matéria orgânica digeridos e excretados por minhocas: em outras palavras, são as fezes das minhocas.

⁴ Tipo de dispersão de sementes realizada por formigas: um fenômeno ecológico fascinante e bastante importante para muitos ecossistemas, especialmente florestais.

⁵ Designa organismos que se alimentam de raízes.

para a ciclagem de nutrientes, especialmente em solos com elevada quantidade de serapilheira (Bradford *et al.*, 2021).

2.1. Funções ecológicas

As funções ecológicas da macrofauna edáfica estão intimamente ligadas à qualidade e sustentabilidade do solo, impactando diversos processos fundamentais (Figura 3).



Figura 3. Efeito do manejo antrópico na população e diversidade de meso e macrofauna do solo (modificado de Edwards e Lofty, 1969). Fonte: Brown *et al.*, 2015. In: <https://agroadvance.com.br/blog-macrofauna-edafica-do-solo/>.

Destacam-se, principalmente:

- **Processamento da matéria orgânica:** a fragmentação e incorporação da matéria orgânica pela macrofauna aceleram a decomposição, promovendo a liberação de nutrientes e a formação de húmus, com reflexos diretos na fertilidade (Tian *et al.*, 1997; Lavelle *et al.*, 2006).
- **Melhoria da estrutura do solo:** a atividade de organismos engenheiros, como minhocas e cupins, cria macroporos que favorecem a infiltração de água, aumentam a aeração e reduzem a compactação e a erosão, resultando em solos mais estáveis e resilientes (Jones *et al.*, 1990; Blanchart *et al.*, 2004).

- **Ciclagem de nutrientes:** ao digerirem a matéria orgânica, esses organismos mineralizam elementos essenciais como nitrogênio, fósforo e enxofre, tornando-os disponíveis para as plantas e demais microrganismos do solo (Lavelle *et al.*, 2006).

- **Regulação biológica:** muitos grupos da macrofauna, como aranhas e alguns besouros, exercem papel de predadores, controlando populações de pragas e contribuindo para o equilíbrio trófico e a estabilidade ecológica do solo (Bardgett; van der Putten, 2014).

Em síntese, a macrofauna edáfica atua como um elo vital entre os processos físicos, químicos e biológicos do solo, sendo indispensável para a manutenção da fertilidade, o funcionamento dos ecossistemas e o monitoramento da sustentabilidade ambiental.

A macrofauna do solo desempenha papéis ecológicos fundamentais, influenciando diretamente a estrutura, a fertilidade e a funcionalidade dos ecossistemas terrestres. Esses organismos estão envolvidos em processos como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a bioturbação e o controle biológico de pragas e doenças, sendo, portanto, indicadores sensíveis da qualidade do solo e da sustentabilidade dos agroecossistemas (Figura 4).



Figura 4. Macrofauna edáfica e o manejo sustentável do solo: Fonte: <https://agroadvance.com.br/blog-macrofauna-edafica-do-solo/>. Foto: Mateos, 2016.

A função específica desempenhada por cada organismo, ou os processos ecológicos mediados por ele, podem alocá-lo em uma ou mais dessas categorias. De maneira geral, a produtividade dos ecossistemas é fortemente influenciada pela qualidade e pela saúde do solo — atributos que, por sua vez, são determinados pela ação integrada desses grupos funcionais (Kibblewhite; Ritz; Swift, 2008).

3. Métodos de avaliação da macrofauna edáfica

A avaliação da macrofauna edáfica envolve a quantificação e qualificação de organismos por meio de diferentes técnicas de amostragem, cuja escolha depende dos objetivos da pesquisa, dos grupos taxonômicos de interesse e das características do ambiente estudado. Entre os principais métodos, destacam-se:

- **Armadilhas de Queda (*Pitfall Traps*):** utilizadas para capturar organismos que se movem na superfície do solo, como besouros carábídeos, aranhas e formigas (Southwood; Henderson, 2000). Essas armadilhas fornecem informações sobre a atividade e diversidade da fauna epigeica, complementando dados obtidos por escavação.
- **Armadilhas de Isca:** empregam materiais orgânicos específicos (ex.: papelão ondulado para minhocas, madeira para cupins) para atrair determinados grupos da fauna (Satchell, 1969; Jones; Espey, 1999). São métodos seletivos e úteis para avaliar a atividade funcional de grupos específicos.
- **Extração por Termo-fototropismo (*Berlese-Tullgren*):** embora tradicionalmente aplicada à mesofauna, pode ser adaptada com funis maiores para extrair certos grupos da macrofauna de amostras de serapilheira e solo (Crossley; Blair, 1991).
- **Coleta por Repelentes Químicos/Irrigação:** a aplicação de soluções de formol ou mostarda na superfície do solo estimula a emergência de invertebrados, especialmente minhocas, facilitando a coleta e quantificação (Raw, 1962).

- **Método Monolítico (TSBF – *Tropical Soil Biology and Fertility*):** consiste na escavação de blocos de solo de dimensões padronizadas (geralmente 25 × 25 × 30 cm) e na triagem manual dos organismos *in situ* ou em laboratório (Anderson; Ingram, 1993; Brown *et al.*, 2004). Esse método, amplamente adotado em estudos comparativos, fornece dados robustos de abundância, biomassa e riqueza taxonômica de todos os grupos da macrofauna. Embora trabalhoso, é considerado o mais representativo da comunidade edáfica (Figura 6).



Figura 6. Metodologia TSBF. A – Introdução do monólito no solo por ação mecânica; B – Remoção da serapilheira para extração com sacos de Winkler; C – Organização da área para extração do monólito; D – Extração do monólito; E – Limpeza e organização do monólito; F – Estratificação do monólito, em que o estrato mais profundo (20–30 cm) foi removido; G – Revisão manual do estrato superficial (= A); H – Revisão manual do estrato B. Fonte: <https://www.researchgate.net/journal/Biodiversity-Data-Journal-1314>.

Após a coleta, os organismos são identificados até o nível taxonômico mais prático (ordem, família ou espécie), contados e pesados para determinação da biomassa úmida ou seca. A análise de dados permite estimar parâmetros como abundância (número de indivíduos por área), riqueza taxonômica (número de táxons), biomassa (massa total por área) e índices de diversidade (Shannon-Wiener, Simpson) (Magurran, 2004).

A integração dessas informações com atributos físico-químicos e microbiológicos do solo fornece uma visão abrangente da qualidade edáfica e do funcionamento ecológico. Assim, a macrofauna edáfica, quando avaliada de forma sistemática, constitui uma ferramenta poderosa de diagnóstico ambiental, capaz de refletir o estado de conservação, degradação ou recuperação de ecossistemas sob diferentes sistemas de uso e manejo.

4. A macrofauna edáfica como indicadora de impactos antrópicos

A macrofauna edáfica, devido à sua alta sensibilidade a distúrbios ambientais, constitui um biomarcador robusto para a avaliação da sustentabilidade dos sistemas de uso e manejo do solo. As variações em sua abundância, composição e diversidade refletem rapidamente alterações físicas, químicas e biológicas do ambiente edáfico.

- **Uso e manejo do solo:**

A conversão de florestas nativas em áreas agrícolas e a intensificação do manejo — com práticas como aração convencional, uso intensivo de fertilizantes sintéticos e pesticidas — resultam em expressiva redução da abundância e diversidade da macrofauna (Paoletti *et al.*, 1991; Baretta *et al.*, 2008; Tsiafouli *et al.*, 2015) (Figura 7). Em contrapartida, sistemas de manejo conservacionistas, como o plantio direto, os sistemas agroflorestais e a agricultura orgânica, promovem o restabelecimento de comunidades mais diversas e abundantes, evidenciando uma melhor qualidade e estabilidade do solo (Brown *et al.*, 2004; Pelosi *et al.*, 2014; Crespo; Souza, 2023) (Figura 8).

- **Contaminação do Solo:**

A presença de contaminantes tais como metais pesados, pesticidas e hidrocarbonetos, pode causar efeitos letais e subletais na macrofauna, afetando parâmetros como sobrevivência, reprodução, crescimento e comportamento (Frampton; van Gestel, 2010; Vasseur *et al.*, 2020). As minhocas, em especial, são amplamente utilizadas em ensaios ecotoxicológicos para determinar a toxicidade de substâncias química e resídua no solo, sendo reconhecidas como organismos modelo para esse tipo de avaliação.



Figuras 7 e 8. Área de pastagem degradada (Baixa diversidade); e Área recuperada com SAFs (Alta diversidade). Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2024.

- **Degradação do Solo e Desertificação:**

Solos degradados, caracterizados por baixa matéria orgânica, compactação e perda de estrutura, abrigam comunidades de macrofauna empobrecidas. O monitoramento desses organismos pode indicar áreas sob risco de desertificação e avaliar a eficácia de práticas de recuperação e restauração edáfica (Lavelle *et al.*, 2006; Egidio; Souza, 2025).

- **Mudanças Climáticas:**

Variações nos regimes de temperatura e precipitação afetam a fenologia, distribuição e atividade da macrofauna, influenciando processos fundamentais do solo, como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de carbono (Bradford *et al.*, 2011; Crespo; Souza, 2023.). A macrofauna, portanto, também desempenha papel relevante na mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas.

5. Fatores que influenciam a macrofauna edáfica

A camada superficial do solo abriga a maior parte dos organismos que compõem a macrofauna edáfica, sendo, portanto, a região mais sensível às práticas de manejo agrícola. A agricultura intensiva, caracterizada pelo uso

expressivo de insumos externos, tem potencial para provocar alterações significativas na estrutura das comunidades de macroinvertebrados do solo, modificando sua biomassa e abundância (Marchão *et al.*, 2009; Baretta *et al.*, 2011).

Diversos fatores influenciam a diversidade e a abundância da macrofauna edáfica, incluindo a cobertura e o tipo de vegetação, a topografia (como declividade e posição fisiográfica), as condições climáticas (temperatura, umidade relativa, vento e precipitação), além de características edáficas, como teor de matéria orgânica, umidade, estrutura, textura e tipo de solo (Louback *et al.*, 2023). Fatores históricos, de origem geológica ou antrópica, também exercem influência significativa sobre essas comunidades (Melo *et al.*, 2009).

As modificações na macrofauna podem resultar de mudanças no habitat, da disponibilidade de recursos alimentares, da formação de microclimas e das práticas de manejo adotadas (Merlim *et al.*, 2005). A interação entre fatores abióticos e bióticos é determinante na composição e distribuição da macrofauna, podendo inclusive provocar seu deslocamento ou redução populacional (Oliveira, 2013; Souza, 2023).

Diante de pressões ambientais, os organismos bioindicadores tendem a responder de forma previsível a distúrbios, apresentando alterações nos padrões de diversidade, crescimento, reprodução e distribuição das espécies. Essas mudanças constituem importantes indicadores da qualidade ambiental e da integridade dos ecossistemas (Chapman *et al.*, 2018; Hoffmann *et al.*, 2019).

A exploração inadequada da vegetação, especialmente pela remoção de espécies florestais, representa uma ameaça direta à macrofauna, acarretando modificações estruturais no ecossistema (Córdova; Chaves; Manfredi-Coimbra, 2009; Souza, 2015). Pesquisas conduzidas por Caproni *et al.* (2011) e Pasqualin *et al.* (2012) reforçam que as atividades antrópicas, sobretudo o manejo inadequado do solo, impactam significativamente a composição e funcionalidade da fauna edáfica. Por outro lado, a manutenção da cobertura vegetal na superfície do solo favorece a sobrevivência e o equilíbrio desses organismos, uma vez que os chamados “engenheiros do ecossistema” intensificam sua atividade, promovendo a aeração e a heterogeneidade do ambiente (Barros *et al.*, 2003; Rangel, 2023).

Estudos de Baretta *et al.* (2011) demonstram que o sistema de plantio direto tende a apresentar maior diversidade de grupos da macrofauna, resultado da rotação de culturas e da ampliação da diversidade vegetal. Além disso, observa-se maior densidade de predadores das ordens *Arachnida* e *Chilopoda*, o que contribui para o controle biológico de pragas agrícolas. Em comparação com sistemas de sucessão de culturas, segundo Baretta *et al.* (2014), a rotação proporciona maior diversidade biológica do solo, independentemente do período de amostragem (inverno ou verão).

Sistemas agrícolas alternativos, fundamentados em princípios ecológicos, oferecem abrigo e alta disponibilidade de matéria orgânica para micro e macrorganismos, reduzindo perturbações intensivas e favorecendo a recuperação da fauna edáfica (Lima *et al.*, 2010). Assim, compreender a interação entre as propriedades do solo e os organismos que nele habitam é essencial para orientar práticas de manejo sustentáveis e promover o uso racional dos recursos naturais na produção agrícola (Silva *et al.*, 2011) (Figura 9).



Figura 9. Sítio Jaqueira Agroecologia, Alegre, ES: área degradada há 30 anos e nos dias atuais – elevada biodiversidade. Fonte: Acervo Sítio Jaqueira, 2023.

Embora ainda haja escassez de estudos brasileiros que investiguem os fatores responsáveis pelo desequilíbrio das comunidades de macrofauna

edáfica, a literatura existente indica que as práticas de manejo inadequado do solo e a remoção de espécies florestais estão entre os principais agentes de impacto (Baretta *et al.*, 2014; Rangel, 2023).

6. Perspectivas futuras

O uso da macrofauna edáfica como bioindicadora vem ganhando destaque, impulsionado pela necessidade global de monitoramento ambiental e de manejo sustentável dos solos. As tendências atuais de pesquisa e aplicação apontam para abordagens mais integradas e tecnológicas:

- **Integração de Múltiplos Bioindicadores:**

A combinação da macrofauna com outros indicadores biológicos (microrganismos, mesofauna), além de parâmetros físicos e químicos do solo, é essencial para uma avaliação mais holística da saúde edáfica (Rutgers *et al.*, 2009; Bünemann *et al.*, 2018).

- **Abordagens Funcionais:**

O enfoque na diversidade funcional — que considera os papéis ecológicos, grupos tróficos e funções de engenharia do ecossistema — amplia o potencial preditivo sobre a capacidade do solo de fornecer serviços ecossistêmicos, como decomposição, estruturação e regulação hídrica (Cardoso *et al.*, 2013).

- **Ferramentas moleculares e ômicas⁶:**

Avanços em técnicas moleculares, como DNA barcoding, metagenômica e metabarcoding, permitem identificar com alta precisão a diversidade da macrofauna, incluindo espécies crípticas, e compreender suas interações ecológicas e funções genéticas (Wall *et al.*, 2015).

- **Monitoramento em longo prazo e redes globais:**

⁶ Referem-se a um conjunto de áreas da biologia moderna que estudam, de forma ampla e integrada, os componentes moleculares de um organismo — como genes, proteínas, metabólitos e microrganismos — buscando compreender como eles interagem e funcionam em conjunto.

A criação de redes de monitoramento contínuo em diferentes biomas e sistemas produtivos é essencial para detectar tendências temporais da macrofauna e avaliar a eficácia de práticas de manejo sustentável. Iniciativas internacionais, como a *Global Soil Biodiversity Initiative* (GSBI), têm promovido a padronização de metodologias e o intercâmbio global de dados (Orgiazzi *et al.*, 2016).

- **Aplicação em políticas públicas e extensão rural:**

A tradução do conhecimento científico sobre a macrofauna edáfica em políticas públicas e programas de extensão é fundamental para incentivar práticas agrícolas e florestais que conservem a biodiversidade do solo e fortaleçam a sustentabilidade dos sistemas produtivos (FAO, 2020).

Em síntese, a macrofauna edáfica constitui um dos pilares da saúde e funcionalidade dos ecossistemas terrestres. Sua utilização como bioindicadora oferece uma perspectiva abrangente e sensível para compreender a qualidade do solo e os impactos das atividades humanas. O fortalecimento das pesquisas nesse campo e sua integração às práticas de manejo e políticas ambientais são fundamentais para garantir a conservação dos solos e a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais à vida.

As perspectivas futuras para o estudo e a aplicação da macrofauna edáfica como bioindicadora de qualidade do solo apontam para um avanço significativo na integração entre ecologia do solo, manejo sustentável e monitoramento ambiental. A crescente demanda por sistemas produtivos menos dependentes de insumos externos e ambientalmente equilibrados tem impulsionado o interesse científico e prático por abordagens que incorporem indicadores biológicos como ferramentas de gestão territorial (Baretta *et al.*, 2014; Lavelle *et al.*, 2016).

Nos próximos anos, espera-se uma ampliação do uso de métodos padronizados e georreferenciados para o monitoramento da macrofauna, permitindo comparações entre biomas e sistemas de manejo. O desenvolvimento de protocolos simplificados e economicamente acessíveis poderá favorecer a adoção desses indicadores por produtores rurais, técnicos e

instituições de extensão, fortalecendo políticas públicas voltadas à conservação do solo e da biodiversidade (Decaëns *et al.*, 2018).

Outro campo promissor diz respeito à integração entre os dados biológicos e tecnológicos, por meio do uso de ferramentas de sensoriamento remoto, modelagem espacial e inteligência artificial. Essas tecnologias podem aprimorar a compreensão das relações entre a macrofauna e variáveis ambientais, auxiliando na identificação precoce de processos de degradação e na avaliação da eficiência de práticas conservacionistas (Silva *et al.*, 2020).

Além disso, a incorporação da macrofauna edáfica em programas de pagamento por serviços ecossistêmicos e em estratégias de certificação agroecológica representa uma oportunidade de valorização econômica e ambiental desses organismos. Ao reconhecer a importância ecológica de grupos funcionais como minhocas, formigas e cupins — engenheiros do ecossistema que influenciam a estrutura e a fertilidade do solo —, amplia-se a compreensão do solo não apenas como um substrato físico, mas como um sistema vivo e dinâmico essencial à sustentabilidade agrícola (Swift *et al.*, 2010; Bignell *et al.*, 2011; Rangel, 2023).

Por fim, a formação de redes de pesquisa interdisciplinares e a inclusão de comunidades locais em projetos participativos de monitoramento podem fortalecer a educação ambiental e a gestão compartilhada dos recursos naturais. Essa aproximação entre ciência, sociedade e práticas agroecológicas reforça a necessidade de conservar a biodiversidade subterrânea como fundamento para a resiliência ecológica e a segurança alimentar em longo prazo.

6. Considerações

Considerando a importância da macrofauna do solo para o funcionamento dos ecossistemas terrestres, é possível afirmar que esses organismos representam um componente-chave na manutenção da fertilidade e na regulação dos processos biogeoquímicos do solo. A partir das informações abordadas neste capítulo, percebe-se que a macrofauna do solo desempenha uma ampla variedade de funções ecológicas, incluindo a fragmentação e incorporação da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a aeração, a

melhoria da drenagem e da estrutura do solo, o aumento da biodiversidade e o controle populacional de outros organismos edáficos.

Sua composição, abundância e diversidade refletem de forma sensível as condições ambientais e as práticas de manejo, tornando a macrofauna indicadores valiosos da saúde do ecossistema terrestre. A influência de fatores abióticos, bióticos e antrópicos evidencia a complexidade dos sistemas edáficos e reforça a necessidade de abordagens integradas para monitoramento e conservação.

Práticas de manejo sustentável, como sistemas agroflorestais, rotação de culturas, plantio direto e manutenção de cobertura vegetal, favorecem a diversidade funcional e a resiliência da macrofauna, contribuindo para a sustentabilidade agrícola e a preservação dos serviços ecossistêmicos. Apesar de sua importância, a macrofauna do solo ainda é frequentemente negligenciada em estudos ecológicos, o que limita a compreensão dos processos que ocorrem no solo e suas consequências para o meio ambiente.

O avanço das pesquisas em monitoramento biológico, incluindo métodos funcionais, moleculares e de longo prazo, amplia a capacidade de avaliação da qualidade do solo, permitindo diagnósticos mais precisos sobre impactos antrópicos e estratégias de recuperação. Além disso, a incorporação da macrofauna em políticas públicas, programas de extensão rural e estratégias de valorização ambiental reforça sua relevância prática, social e ecológica.

Em síntese, a macrofauna edáfica constitui um pilar essencial para a compreensão da dinâmica do solo, sendo indispensável para garantir a conservação da biodiversidade subterrânea, a produtividade sustentável e a resiliência dos ecossistemas frente às pressões ambientais e às demandas humanas. Portanto, é fundamental intensificar pesquisas para aprofundar o conhecimento sobre sua ecologia e seu papel central na manutenção dos ecossistemas terrestres, promovendo práticas de manejo e conservação mais eficientes e sustentáveis.

7. Referências

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. (Eds.). **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. CAB International. 1993.

BARDGETT, R. D.; van der PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 505-511, 2014.

BARETTA, D. *et al.* Fauna edáfica e qualidade do solo. **Tópicos em ciência do solo**, v. 7, p. 119-170, 2011.

BARETTA, D. *et al.* Soil fauna and its relation with environmental variables in soil management systems. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 871-879, 2014.

BARETTA, D.; BROWN, G. G.; CARDOSO, E. J. B. N.; FREITAS, S. S. de. Macrofauna do solo em diferentes biomas e sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1475-1484, 2008.

BARROS, E. *et al.* Development of the soil macrofauna community under silvopastoral and agrosilvicultural systems in Amazonia. **Pedobiologia**, v. 47, n. 3, p. 273-280, 2003.

BIGNELL, D. E.; EGGLETON, P. Termites in ecosystems. In: ABE, T.; BIGNELL, D.; HIGASHI, M. (Eds.). **Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology**, p. 363-387. Kluwer Academic Publishers. 2000.

BLANCHART, E.; ALEGRE, J.; ALBRECHT, A.; DUBOIS, P. Impact of earthworms on the physical properties of soils in humid tropical ecosystems. In: EDWARDS, C. A. (Ed.). **Earthworm ecology** (2nd ed., p. 313-339). CRC Press. 2004.

BRADFORD, M. A. *et al.* Decomposers. In: WALL, D. H.; BARDGETT, R. D.; BEHAN-PELLETIER, V.; BRUSSAARD, L.; GRIFFITHS, B. S.; LOEPPMANN, S. H.; WALL, R. T.; BOHLEN, P. J. (Eds.) **Soil ecology and management: a global perspective**. p. 165-190. Cambridge University Press. 2021.

BRADFORD, M. A.; WALL, D. H.; MAESTRE, F. T. The role of soil biota in linking climate change with ecosystem functioning. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, n. 4, p. 213-220, 2011.

BROWN, G. G. *et al.* Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. **Acta zoológica mexicana (nueva serie)**, n. Especial 1, p. 79-110, 2001.

BROWN, G. G. *et al.* Earthworms as soil engineers and bioindicators. In: LAL, R. (Ed.) **Encyclopedia of Soils in the Environment** (2nd ed.). Elsevier (in press). 2021.

BROWN, G. G. *et al.* Soil macrofauna in the Brazilian Atlantic forest: effects of forest type, altitude and land use. **Forest Ecology and Management**, v. 191, n. 1-3, p. 95-108, 2004.

BÜNEMANN, E. K., BONGIORNO, G., BAI, Z., CREAMER, R. E., DE DEYN, G. B., DE GOEDE, R., FLESKENS, L., GEISSEN, V., KUYPER, T. W., MÄDER, P., PULLEMAN, M., SUKKE, W., VAN DER PLOEG, R., VAN GROENIGEN, J. W., & BRUSSAARD, L. Soil quality – A review of the current state of knowledge and future research priorities. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, n. 264, p. 214-228, 2018.

CAPRONI, A. L. et al. Diversidade da macrofauna do solo em ecossistemas no município de Rolim de Moura, RO. **Global Science and Technology**, v. 4, n. 3, 2011.

CARDOSO, E. J. B. N. *et al.* Soil fauna as an indicator of soil quality and ecosystem health. **Applied Soil Ecology**, 71, 1-10, 2013.

CHAPMAN, P. M. et al. Contrasting impacts of land-use change on phylogenetic and functional diversity of tropical forest birds. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 4, p. 1604-1614, 2018.

CÓRDOVA, M.; CHAVES, C. L.; MANFREDI-COIMBRA, S. Fauna do solo x vegetação: estudo comparativo da diversidade edáfica em áreas de vegetação nativa e povoamentos de Pinus sp. **Geoambiente on-line**, n. 12, p. 01-12, 2009.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; Silva, M. A. B. da. Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícolas: revisão de literatura. **INCAPER EM REVISTA**, v. 13, p. 06-19, 2023. Home page: <https://editora.incaper.es.gov.br/incaper-em-revista>. DOI:10.54682/ier.v.13e14.p06.19.

CROSSLEY, D. A. JR.; BLAIR, J. M. A new method for soil arthropod extraction from litter samples. **Pedobiologia**, v. 35, n. 2, p. 105-108, 1991.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZIDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment** (p. 3-21, 1994). SSSA Special Publication 35. Soil Science Society of America.

EDWARDS, C. A.; BOHLEN, P. J. **Biology and ecology of earthworms** (3rd ed.). Chapman & Hall. 1996.

EGIDIO, L. S.; SOUZA, M. N. Recuperação de áreas degradadas na Mata Atlântica: 23 anos de restauração ecológica e agrofloresta na Estância São Lucas, Guaçuí – ES. Restoration of degraded areas in the Atlantic Forest: 23 years of ecological restoration and agroforestry in the Estância São Lucas, Guaçuí - ES. Fronteiras: **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 14, p. 230-241, 2025. Home page: <https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/7988>. DOI: 10.21664/2238-8869.2025v14i3.7988.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point**. 2020.

FARIA, A. **Diversidade da fauna edáfica em sistemas integrados com milho e braquiária**. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

FOLGARAIT, P. J. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: A review. **Biodiversity and Conservation**, v. 7, n. 9, p. 1221-1244, 1998.

FRAMPTON, G. K.; VAN GESTEL, C. A. M. Earthworms as bioindicators of ecotoxicological risk. In: CAPINERA, J. M. (Ed.). **Encyclopedia of Entomology**. Springer, 2010. p. 1297-1300.

HOFFMANN, A. A. *et al.* Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. **Austral Ecology**, v. 44, n. 1, p. 3-27, 2019.

JONES, C. G.; LAWTON, J. H.; SHACHAK, M. Organisms as ecosystem engineers. **Oikos**, v. 57, n. 3, p. 373-386, 1990.

JONES, R. G.; ESPEY, E. E. An evaluation of techniques for sampling termites (Isoptera: Termitidae) in grasslands. **Sociobiology**, v. 34, n. 2, p. 405-412, 1999.

JOUQUET, P.; DAUBER, J.; LAGERLÖF, J.; LAVELLE, P.; LEPAGE, M. Soil invertebrates as ecosystem engineers: a review of concepts and current knowledge. **Pedobiologia**, v. 59, n. 6, p. 289-301, 2016.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, N. C.; DORAN, J. W.; FRANZLUEBBERS, R. G.; HARRIS, R. F. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KIBBLEWHITE, M. G.; RITZ, K.; SWIFT, M. J. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 685-701, 2008.

LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F.; MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J. P. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, suplemento 1, p. S3-S15, 2006.

LIMA, S. S. D. *et al.* Relação entre macrofauna edáfica e atributos químicos do solo em diferentes agroecossistemas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 322-331, 2010.

LOUBACK, G. C.; SOUZA, M. N.; VARDIERO, L. G. G.; CAMPOS, L. G. C.; SOUZA, E. A.; BASTOS, C. S. M. Análise da Sustentabilidade no Sítio Jaqueira Agroecologia, utilizando a ferramenta APOIA-NovoRural. **OBSERVATORIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, p. 3875-3900, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n6-043.

MAGURRAN, A. E. **Measuring biological diversity**. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.

MARCHÃO, R. L. et al. Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1011-1020, 2009.

MELO, F. V. de. et al. **A importância da meso e macrofauna do solo na fertilidade e como bioindicadores**. 2009.

MERLIM, A. D. O. et al. Soil macrofauna in cover crops of figs grown under organic management. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 57-61, 2005.

OLIVEIRA, D. **Efeitos das variáveis ambientais locais sobre a abundância, a riqueza e a biomassa da macrofauna de solo em um ecossistema semiárido no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2013.

ORGIAZZI, A. et al. **Global soil biodiversity atlas**. Luxembourg: European Commission, Publications Office of the European Union, 2016.

PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (Eds.). **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997.

PAOLETTI, M. G.; FOISSNER, W.; COLEMAN, D. C. (Eds.). **Soil biota, nutrient cycling and farming systems**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1991.

PASQUALIN, L. A. et al. Macrofauna edáfica em lavouras de cana-de-açúcar e mata no noroeste do Paraná-Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 1, p. 7-18, 2012.

PELOSI, C.; BERTRAND, M.; CAPOWIEZ, Y.; CHOISI, O.; VIALLATOUX, P. Earthworm communities in agroecosystems: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 185, p. 223-231, 2014.

RANGEL, S. S. **Formigas do solo e seu papel como bioindicadoras de restauração de ecossistemas degradados**. Dissertação (Mestrado em Agroecologia). Programa de Pós-graduação em Agroecologia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, campus de Alegre. Alegre, 2023. 54 p.

RAW, F. Studies on earthworm populations in orchards. I. Leaf burial in apple orchards. **Annals of Applied Biology**, v. 50, n. 2, p. 389-404, 1962.

RUTGERS, M.; MULDER, C.; SCHOUTEN, A. J.; VAN DER POEL, L. W. Biological soil quality: state of the art in the Netherlands. **Environmental Management**, v. 44, n. 4, p. 817-827, 2009.

SATCHELL, J. E. Methods of sampling earthworm populations. In: PHILLIPSON, J. (Ed.). **Methods of study in soil ecology: proceedings of the Paris symposium**. Paris: UNESCO, 1969. p. 209-216.

SCHEU, S. The ecology of earthworms: from individual behavior to ecosystem functioning. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 82, p. 19-32, 2015.

SILVA, R. F. D. *et al.* Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1277-1283, 2011.

SIQUEIRA, J. O.; TRANNIN, I. C. de B.; RAMALHO, M. A. P.; FONTES, E. M. G. **Interferências no agrossistema e riscos ambientais de culturas transgênicas tolerantes a herbicidas e protegidas contra insetos.** *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília, DF, v. 21, n. 1, p. 11-81, 2004. DOI: 10.35977/0104-1096.cct2004.v21.8718.

SOUTHWOOD, T. R. E.; HENDERSON, P. A. **Ecological methods**. 3. ed. Oxford: Blackwell Science, 2000.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. V. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. 348 p. **ISBN:** 978-65-84548-12-1. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-12-1>.

SOUZA, M. N. **Degradação antrópica e procedimentos de recuperação ambiental**. Balti, Moldova, Europe: Novas Edições Acadêmicas, 2018. 376 p.

SOUZA, M. N. **Mudanças no uso do solo e da água e a gestão dos recursos naturais**. Frankfurt, Alemanha: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 376 p.

SOUZA, M. N.; FONSECA, R. A. A evolução dos movimentos ambientais e o surgimento da AIA. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. V. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. 348 p. **ISBN:** 978-65-84548-12-1. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-12-1.c1>

SWIFT, M. J. *et al.* O inventário da diversidade biológica do solo: conceitos e orientações gerais. **Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade**. Lavras: Editora da UFLA, p. 23-41.2010.

TIAN, G.; KANG, B. T.; BRUSSAARD, L. Effect of litter quality on the decomposition and release of nutrients by soil fauna. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 1, p. 1603-1613, 1997.

TSIAFOULI, M. A. *et al.* Soil biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes: an overview. **Applied Soil Ecology**, v. 97, p. 1-12, 2015.

VASSEUR, P.; COSSU-LEGUILLE, C. Earthworms in ecotoxicology. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 10, p. 10587-10603, 2020.

WALL, D. H. *et al.* Soil biodiversity and human health. **Nature Reviews Microbiology**, v. 13, n. 7, p. 407-414, 2015.