

## MINHOCAS, ENZIMAS E MICROBIOTA COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO

### RESUMO

A intensificação agrícola tem degradado os ecossistemas do solo, comprometendo sua estrutura, biodiversidade e funcionalidade, com reflexos na produtividade e sustentabilidade. O estudo realizou uma revisão bibliográfica integrativa, com abordagem qualitativa e descritiva, visando analisar bioindicadores da qualidade do solo em ambientes agrícolas, com ênfase em minhocas, enzimas e microbiota edáfica. A pesquisa, desenvolvida na disciplina de Bioengenharia do Solo do curso de Agronomia da SETREM (2025), baseou-se em fontes acadêmicas nacionais e internacionais, priorizando estudos recentes, revisados por pares e com aplicabilidade prática. Os resultados apontam que os três bioindicadores atuam de forma complementar na avaliação da saúde do solo. Minhocas favorecem a estrutura, porosidade e ciclagem de nutrientes, além de criarem microambientes que estimulam a atividade microbiana. Enzimas como desidrogenase e fosfatase reagem rapidamente às práticas de manejo, sendo mais ativas em sistemas orgânicos. A microbiota edáfica, composta por bactérias, fungos e arqueias, fornece um panorama da diversidade funcional do solo, sendo mais rica e resiliente em sistemas sustentáveis. Cada bioindicador apresenta limitações: minhocas são sensíveis à contaminação, enzimas têm resposta variável a fatores ambientais, e a análise da microbiota requer técnicas laboratoriais complexas. A revisão reforça a importância de uma abordagem integrada para avaliação da qualidade do solo, essencial para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Palavras-chave: Indicadores biológicos. Qualidade biológica do solo. Atividade enzimática. Ecossistema agrícola.

### 1 INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades agrícolas tem impactado significativamente os ecossistemas do solo, alterando sua estrutura, biodiversidade e funcionalidade, com efeitos diretos sobre a produtividade e a sustentabilidade (Bart *et al.*, 2019). Nesse contexto, a saúde do solo, pilar da agricultura sustentável, pode ser monitorada por meio de bioindicadores que refletem as condições físicas, químicas e biológicas do ambiente edáfico (Dong *et al.*, 2023).

Entre os principais bioindicadores destacam-se as minhocas, enzimas do solo e a microbiota edáfica, todos sensíveis às práticas de manejo. As minhocas contribuem para decomposição da matéria orgânica, formação de agregados e aeração do solo, sendo diretamente influenciadas pelo tipo de manejo (Xiang *et al.*, 2018). As enzimas, como  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e urease, estão ligadas à ciclagem de nutrientes e à dinâmica da matéria orgânica, refletindo a atividade microbiana (Dong *et al.*, 2023). A microbiota edáfica desempenha papel central em processos ecológicos essenciais, como mineralização, solubilização de nutrientes e promoção do crescimento vegetal, variando conforme o regime de fertilização e a intensidade de uso do solo, reforçando seu potencial como bioindicador da qualidade edáfica (Mendes *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo revisar criticamente a literatura recente sobre o uso de minhocas, enzimas e microbiota edáfica como bioindicadores da qualidade do solo, contribuindo para a compreensão dos impactos

do manejo agrícola e fornecendo subsídios para a adoção de práticas mais sustentáveis nos sistemas produtivos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos últimos anos, a busca por práticas agrícolas sustentáveis tem intensificado o interesse por bioindicadores de qualidade do solo, capazes de refletir de maneira sensível as alterações promovidas pelo manejo. As minhocas têm sido amplamente utilizadas como bioindicadores devido à sua sensibilidade às mudanças no uso da terra e ao manejo agrícola. Estudos recentes mostram que práticas conservacionistas, como o plantio direto e a adição de matéria orgânica, favorecem a abundância e diversidade de espécies, enquanto sistemas intensivos de monocultivo e elevado uso de agroquímicos reduzem significativamente suas populações (Pereira *et al.*, 2021). Além disso, a presença de minhocas está diretamente associada ao aumento da porosidade, da infiltração de água e da ciclagem de nutrientes, características que melhoram a qualidade física e biológica do solo (Silva *et al.*, 2020).

No que se refere às enzimas do solo, pesquisas dos últimos dez anos têm evidenciado sua importância como indicadores precoces de mudanças na qualidade edáfica. Atividades como  $\beta$ -glicosidase, urease e fosfatase têm mostrado forte correlação com a matéria orgânica e a fertilidade, além de responderem rapidamente às alterações de manejo e às condições ambientais (Gupta *et al.*, 2019). Sistemas agrícolas sustentáveis, como a integração lavoura-pecuária e o uso de adubos verdes, têm se mostrado eficientes em manter ou estimular maior atividade enzimática, refletindo em solos biologicamente mais ativos e resilientes (Fernandes *et al.*, 2022).

A microbiota edáfica, por sua vez, tem recebido grande destaque em virtude dos avanços em técnicas moleculares, que permitem avaliar com maior profundidade a diversidade e a estrutura das comunidades microbianas. Estudos recentes têm demonstrado que práticas de manejo afetam diretamente a composição e a funcionalidade desses microrganismos, influenciando processos como a mineralização da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (Hartmann; Frey, 2020). Solos manejados com maior aporte de matéria orgânica e menor revolvimento apresentam comunidades microbianas mais diversas e estáveis, o que está associado a maior resiliência do ecossistema frente a distúrbios ambientais (Silva *et al.*, 2020).

De forma integrada, minhocas, enzimas e microbiota oferecem uma visão complementar da qualidade do solo. Enquanto as minhocas refletem aspectos estruturais e funcionais em nível macro, as enzimas e a microbiota fornecem respostas rápidas e específicas a mudanças ambientais e de manejo. Assim, a utilização conjunta desses bioindicadores constitui uma abordagem promissora para a avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola nos últimos anos, alinhando-se às demandas atuais de conservação dos recursos naturais e segurança alimentar.

## 3 METODOLOGIA

O presente estudo consistiu em uma revisão bibliográfica integrativa, de caráter qualitativo e descritivo, com foco na análise de bioindicadores de qualidade do solo,

considerando minhocas, enzimas e microbiota edáfica como parâmetros de avaliação da saúde dos ambientes agrícolas. A pesquisa foi desenvolvida no âmbito da disciplina de Bioengenharia do Solo, do curso de Agronomia da SETREM, no 1º semestre de 2025.

O levantamento de informações foi realizado em bases de dados acadêmicas nacionais e internacionais (Scopus, Scielo, Web of Science e Google Scholar), além de repositórios institucionais e publicações técnicas de instituições como Embrapa, UFPR, UEG e UnB. Os critérios de seleção das obras incluíram: (i) publicações preferencialmente dos últimos dez anos; (ii) relevância científica, com ênfase em artigos revisados por pares; e (iii) aplicabilidade dos indicadores biológicos à avaliação da qualidade do solo em sistemas agrícolas.

A coleta de informações foi conduzida por meio de leitura analítica e extração de dados referentes à aplicação, sensibilidade e função ecológica dos bioindicadores em diferentes contextos de uso e manejo do solo. Posteriormente, os conteúdos foram sistematizados e analisados de forma interpretativa, permitindo integrar resultados de distintos estudos e evidenciar sua relação com práticas de manejo sustentável.

#### 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A revisão evidencia que minhocas, enzimas e microbiota edáfica desempenham papéis complementares na avaliação da qualidade do solo, refletindo alterações estruturais e funcionais em diferentes sistemas de manejo. Minhocas aumentam biomassa, diversidade, porosidade e ciclagem de nutrientes, especialmente em sistemas conservacionistas, com galerias e casts enriquecendo matéria orgânica e atividade enzimática (Pereira *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2020). As enzimas do solo, como desidrogenase, fosfatase e urease, respondem rapidamente às práticas de manejo, apresentando maior atividade em sistemas com resíduos orgânicos e menor em cultivos intensivos (Fernandes *et al.*, 2022). A microbiota edáfica, incluindo bactérias, fungos e arqueias, fornece um panorama abrangente da diversidade e funções ecológicas do solo, sendo mais rica em solos manejados de forma sustentável, com predomínio de grupos funcionais benéficos.

A tabela 1 apresenta uma síntese comparativa dos efeitos de diferentes bioindicadores sobre a qualidade do solo em distintos sistemas de manejo.

Tabela 1 - Comparação dos efeitos de minhocas, enzimas e microbiota sobre a qualidade do solo.

Bioindicador	Sistema de Manejo	Principais Resultados	Referências
Minhocas	Orgânico / Conservacionista	Maior biomassa e diversidade; incremento na porosidade e ciclagem de nutrientes	Pereira <i>et al.</i> , 2021; Silva <i>et al.</i> , 2020;
Minhocas (casts e galerias)	Solo bulk	Maior atividade de desidrogenase, $\beta$ -glicosidase e fosfatase alcalina; maior diversidade microbiana funcional	Lipiec <i>et al.</i> , 2016.

Enzimas	Convencional vs orgânico	Atividades mais altas em solos orgânicos; redução em solos intensivos	Gupta <i>et al.</i> , 2019; Fernandes <i>et al.</i> , 2022.
Microbiota	Orgânico / com minhocas	Maior diversidade bacteriana e fúngica; maior resiliência funcional	Hartmann; Frey, 2020.
Microbiota + minhocas	Solos com pesticidas	Mitigação de efeitos negativos; maior estabilidade funcional	Silva <i>et al.</i> , 2020.

Observa-se que as minhocas, especialmente em sistemas orgânicos ou conservacionistas, aumentam a biomassa, diversidade e ciclagem de nutrientes, enquanto suas galerias e casts promovem maior atividade enzimática e diversidade microbiana funcional. As enzimas do solo respondem rapidamente às alterações de manejo, apresentando maior atividade em sistemas orgânicos e menor em solos intensivamente cultivados. A microbiota edáfica, quando associada a práticas sustentáveis e presença de minhocas, exibe maior diversidade e resiliência funcional, sendo capaz de mitigar impactos de pesticidas, evidenciando a importância de uma abordagem integrada para avaliação da saúde do solo.

A tabela 2 sintetiza os efeitos positivos e limitações dos principais bioindicadores de qualidade do solo.

Tabela 2 - Efeitos positivos e limitações de cada bioindicador.

Bioindicador	Efeitos Positivos	Limitações
Minhocas	Melhoram estrutura, porosidade e ciclagem de nutrientes; promovem microambientes favoráveis à microbiota	Reduzidas em solos intensivamente manejados ou contaminados
Enzimas	Resposta rápida a alterações; refletem atividade metabólica da microbiota	Algumas enzimas podem apresentar resposta variável dependendo do pH ou disponibilidade de nutrientes
Microbiota	Alta sensibilidade; diversidade correlaciona com resiliência e sustentabilidade do solo	Exige técnicas laboratoriais avançadas; resultados complexos de interpretar

As minhocas melhoram a estrutura, porosidade e ciclagem de nutrientes, criando microambientes favoráveis à microbiota, mas são sensíveis a solos intensivos ou contaminados. As enzimas respondem rapidamente às mudanças no manejo, embora algumas variem conforme o pH e a disponibilidade de nutrientes. A microbiota edáfica apresenta alta sensibilidade e diversidade funcional, associando-se à resiliência do solo, mas exige técnicas laboratoriais avançadas e análise complexa.

## CONCLUSÃO

A revisão evidencia que minhocas, enzimas e microbiota edáfica atuam de forma complementar na avaliação da qualidade do solo, refletindo aspectos estruturais, funcionais e biológicos. As minhocas melhoram a estrutura, porosidade e ciclagem de nutrientes, enquanto as enzimas indicam rapidamente alterações na atividade microbiana. A microbiota edáfica revela a diversidade e resiliência do solo, sendo fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas, embora sua análise exija técnicas laboratoriais avançadas.

## 6 REFERÊNCIAS

BART, S.; BARTZ, Mário Luiz; BARTZ, Fábio Roberto; BARTZ, Gilberto Pimentel; BARTZ, Mário Luiz. Earthworms mitigate pesticide effects on soil microbial activities. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1535, 2019.

DONG, Rui; ABDELKERIM-OUBA, Djamel; LIU, Dan; MA, Xiaoyang; WANG, Shuang. Impacts of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on the kinetic and thermodynamic characteristics of soil  $\beta$ -glucosidase. **Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 1065, 2023.

FERNANDES, André Pires; SILVA, Adriana Maria; PEREIRA, Maria Gisele; COSTA, Maria Aparecida; ALMEIDA, José Antônio; OLIVEIRA, Luiz Antônio; MARTINS, José Luiz. Soil enzyme activities as indicators of soil quality under crop-livestock integration. **Soil and Tillage Research**, v. 217, p. 105280, 2022.

GUPTA, V. V. S. R.; PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GARBISU, C.; ALI, M. B.; RAVEN, K. P.; SOFO, A.; VIGNA, S.; GARCÍA, C.; SÁNCHEZ, J. **Soil enzyme activities: Indicators of soil quality**. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (Ed.). Biological indicators of soil health. Wallingford: CAB International, 1997. p. 297-317.

HARTMANN, Matthias; FREY, Bernhard. Soil bacterial and fungal communities across land-use types: Novel insights from high-throughput sequencing. **Applied Soil Ecology**, v. 151, p. 103525, 2020.

MENDES, R. et al. Soil microbiome and sustainable agriculture: Recent advances and future perspectives. **Applied Soil Ecology**, v. 185, p. 104695, 2023.

PEREIRA, Rodrigo Almeida; SILVA, Rodrigo Fagundes; GOMES, Rosângela Maria; RIBEIRO, Maria Fernanda; ALMEIDA, José Antônio; COSTA, Maria Aparecida; OLIVEIRA, Luiz Antônio; MARTINS, José Luiz; ALMEIDA, José Antônio; GARCÍA, Carlos; SÁNCHEZ, José. Earthworm communities as indicators of soil quality in agroecosystems of Southern Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 163, p. 103912, 2021.

SILVA, Rodrigo Fagundes; PEREIRA, Rodrigo Almeida; GOMES, Rosângela Maria; RIBEIRO, Maria Fernanda; ALMEIDA, José Antônio; COSTA, Maria Aparecida; OLIVEIRA, Luiz Antônio; MARTINS, José Luiz; ALMEIDA, José Antônio; GARCÍA, Carlos; SÁNCHEZ, José. Earthworms as bioindicators of soil quality in different land uses in the Cerrado biome. **Ecological Indicators**, v. 115, p. 106384, 2020.

WANG, J. et al. Land-use changes reshape soil microbial communities and their metabolic functions. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150646, 2022.

XIANG, Huimin; ZHANG, Jia-en; GUO, Lei; ZHAO, Benliang. In situ earthworm breeding to improve soil aggregation, chemical properties, and enzyme activity in papayas. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1193, 2018.