

A tecnologia de bioanálise do solo como ferramenta para a melhoria da rotina agrícola

DOI: 10.5281/zenodo.17014823

Paulo Resende Neto^{a*}

Brazil has an extensive territory with different biomes and climates, which results in a great diversity of soils, many of which are highly fragile. The operations applied in soil preparation are directly associated with the quality and quantity of plant residues present, leaving their biological signature on the environment. Over the last 20 years, Embrapa has dedicated itself to the selection of biological components, resulting in the creation of Soil Bioanalysis Technology, which uses two soil enzymes, arylsulfatase and β -glucosidase. The company has trained laboratories to make the use of this technology viable for Brazilian farmers. This article aims to discuss some of the basic characteristics and parameters of the method, as well as presenting and comparing different results obtained by various authors who have applied BioAS in different contexts.

O Brasil possui um extenso território com diferentes biomas e climas, o que resulta em uma grande diversidade de solos, muitos dos quais são altamente frágeis. As operações aplicadas no preparo do solo estão diretamente associadas à qualidade à quantidade de resíduos vegetais presentes deixando sua assinatura biológica no ambiente. A Embrapa ao longo dos últimos 20 anos, tem se dedicado à seleção de componentes biológicos resultando na criação da Tecnologia de Bioanálise do Solo, que através de duas enzimas do solo, arilsulfatase e β -glicosidase. Desde então, a Embrapa tem capacitado laboratórios para tornar o uso dessa tecnologia viável aos agricultores brasileiros. Este trabalho propõe um diálogo sobre alguma das características fundamentais e os parâmetros do método, além de apresentar e comparar diferentes resultados obtidos por diversos autores que aplicaram a Tecnologia de Bioanálise do Solo em diferentes contextos.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: pauloresendeneto15@hotmail.com

Palavras-chave: Enzimas; Embrapa; arilsulfatase; β -glicosidase.

Recebido em 01 de junho de 2025,

Aprovado em 15 de agosto de 2025,

Publicado em 31 de agosto de 2025.

Introdução

Um solo saudável é biologicamente ativo, sendo capaz de armazenar água, sequestrar carbono e promover a degradação de pesticidas, entre outros importantes serviços ecossistêmicos. Tradicionalmente, os sistemas de manejo conservacionistas e as análises de rotina dos solos agrícolas consideravam majoritariamente apenas parâmetros químicos e físicos. No entanto, essas abordagens mostraram-se insuficientes para explicar determinadas tribulações, como a ocorrência de solos quimicamente semelhantes com produtividades significativamente distintas. Esse cenário evidenciou a necessidade de incorporar parâmetros relacionados ao funcionamento biológico do solo, como os chamados bioindicadores, essenciais para um monitoramento mais completo da saúde do solo em escala agrícola.^{1,2}

O Brasil possui um extenso território com diferentes biomas e climas, o que resulta em uma grande diversidade de solos, muitos dos quais são altamente frágeis. O uso e o manejo inadequados desses solos têm contribuído significativamente para sua degradação, o que ressalta a importância da determinação da atividade enzimática como ferramenta

estratégica para o diagnóstico precoce da qualidade do solo. A intensidade das operações aplicadas no preparo do solo está diretamente associada à qualidade e à quantidade de resíduos vegetais presentes, impactando no funcionamento biológico dos sistemas agrícolas e eficácia dos métodos. Dessa forma, diferentes sistemas de manejo deixam sua assinatura biológica no ambiente.^{2,3,4}

Elementos químicos como carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo compõem a estrutura das moléculas orgânicas, e sua dinâmica no solo está diretamente ligada à atividade biológica. Na degradação da matéria orgânica (MO), a heterogeneidade estrutural dos biopolímeros exige a ação conjunta de diferentes classes de enzimas, responsáveis por reduzi-los a monômeros disponíveis para o consumo microbiano. Sendo assim, as enzimas extracelulares exercem um papel essencial na decomposição dos compostos orgânicos.³

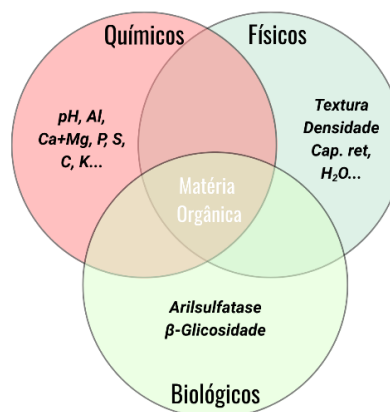
A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), ao longo dos últimos 20 anos, tem se dedicado à seleção de componentes biológicos (bioindicadores) robustos, capazes de proporcionar uma análise mais precisa e eficiente

do solo brasileiro. Esse esforço resultou na criação da Tecnologia de Bioanálise do Solo (BioAs), que incorporou bioindicadores às análises convencionais, uma vez que esses apresentam maior sensibilidade às alterações na matéria orgânica do solo (MOS) e refletem, com maior precisão, incluindo sua saúde, qualidade e fertilidade. Com o uso do BioAs, agricultores que enfrentam dificuldades no manejo do solo passam a dispor de meios para identificar o que foi desencadeado, quando, por que e como agir, além de interpretar corretamente os resultados. Após múltiplos testes, foram selecionadas duas enzimas do solo: a arilsulfatase (ARYL) e a β -glicosidase (GLU).^{1,2,5}

A ARYL é uma enzima pertencente ao grupo das *sulfatases*, responsável por catalisar a hidrólise de ésteres sulfatos arílicos, desempenhando um papel crucial no ciclo do enxofre no solo. Já a GLU é uma enzima essencial em processos como a decomposição da celulose, atuando na etapa final da conversão da celobiose e de outros oligossacarídeos em glicose. Essa enzima também está diretamente relacionada à atividade microbiana e à disponibilidade de carbono no solo, sendo um importante indicador da dinâmica da matéria orgânica, visto que a capacidade do solo de estabilizar e proteger enzimas está relacionada à sua capacidade de armazenar e estabilizar a MO.^{1,2,6}

Fundamentada na abordagem *SoilBio*, também conhecida como abordagem ecológica do solo, essa metodologia integra diferentes áreas do conhecimento das ciências da natureza, como a microbiologia, química e física do solo. A Embrapa tem capacitado laboratórios de análise de solo para tornar o uso do *SoilBio* viável aos agricultores brasileiros, por meio da iniciativa chamada Rede Embrapa de BioAS, através da padronização de métodos e protocolos, aliada a testes de proficiência adequados, torna-se possível realizar comparações de medições em nível nacional. Desde julho de 2020, o *SoilBio* tem servido como uma estrutura de apoio a extensionistas, agrônomos e cientistas do solo, auxiliando produtores brasileiros na avaliação da saúde do solo (SH). Isso evidencia a relevância dos bioindicadores de qualidade (SQ) e SH para o desempenho econômico e a sustentabilidade das propriedades agrícolas.^{1,2}

Figura 1. Parâmetros da Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS). Extraído e adaptado da referência 1.



Os trabalhos referenciados neste artigo propõem um diálogo em torno das características fundamentais e parâmetros que possibilitaram a Embrapa a desenvolver e aplicar uma tecnologia eficaz no cenário de agricultura brasileiro. Além de pontuar alguns resultados obtidos por diferentes autores.

Metodologia

A elaboração e escrita deste artigo compila informações de artigos disponibilizados em plataformas como a Web of Science, Elsevier por meio do portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que graças à Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), permite o acesso gratuito a conteúdos assinados para estudantes de comunidades federadas, como a Universidade de Brasília (UnB), por meio do login com seu e-mail institucional. Além de também conter artigos encontrados conforme o auxílio do Google Scholar. O conteúdo apresentado no artigo foi obtido através das seguintes palavras-chave: “Enzimas”, “Embrapa”, “Arilsulfatase” e “ β -glicosidase”.

Resultados e discussão

Ação Enzimática

O entendimento do ciclo do carbono no solo é fundamental para compreender a atuação da enzima GLU, uma vez que esse ciclo envolve o sequestro, a liberação e a transformação da MO. O processo inicia-se com a deposição de resíduos vegetais na superfície e no interior do solo, compostos majoritariamente por polissacarídeos como a celulose. A decomposição dessa matéria orgânica é realizada por uma comunidade microbiana diversificada, que secreta enzimas específicas para degradar as cadeias de celulose em unidades menores. Nesse contexto, a β -glicosidase atua na

etapa final da degradação, hidrolisando a celobiose e outros oligossacarídeos em glicose, molécula que serve como fonte primária de energia e carbono para os microrganismos do solo.^{3,8}

A glicose gerada é essencial para sustentar o metabolismo microbiano e alimentar ciclos biogeoquímicos secundários, como os do nitrogênio e do fósforo. O carbono derivado da matéria orgânica pode ser incorporado à biomassa microbiana ativa ou estabilizado como MOS. Assim, a GLU desempenha um papel crucial em um ponto de bifurcação no ciclo do carbono, influenciando tanto a respiração microbiana quanto o acúmulo de carbono estável no solo.^{3,8}

O ciclo do enxofre, por sua vez, envolve a transformação de formas orgânicas em inorgânicas desse nutriente essencial à síntese de aminoácidos e proteínas pelas plantas. A maior parte do enxofre no solo está presente em formas orgânicas, como ésteres de sulfato associados a resíduos vegetais e à biomassa microbiana morta. A enzima ARYL catalisa a hidrólise das ligações sulfato-éter, liberando o sulfato, principal forma assimilável de enxofre pelas plantas. Posteriormente, o sulfato pode ser absorvido pelas raízes, lixiviado com a água de drenagem, ou ainda reincorporado à MO por meio da ação de microrganismos. Em solos tropicais, onde os teores de enxofre mineral são naturalmente baixos, a eficiência desse ciclo depende fortemente da atividade microbiana e da presença da enzima arilsulfatase.^{3,6,9}

Fundamentos

As enzimas selecionadas, como evidenciadas, a arilsulfatase e β -glicosidase, possuem fundamentação científica que respalda sua utilização como indicadoras da memória microbiana do manejo do solo, uma vez que representam o somatório das atividades enzimáticas associadas a microrganismos, plantas e até animais, bem como de gerações passadas de organismos anteriormente presentes no ambiente edáfico. Essas enzimas, compreendidas como enzimas extracelulares livres, estão associadas à fração não viva do solo e acumulam-se ao longo do tempo, sendo protegidas da degradação por proteases devido à sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica, a qual no caso específico da ARYL e da GLU, sabe-se que uma parte significativa de sua atividade enzimática está relacionada à fração abiótica.^{1,2}

A atividade enzimática, por sua vez, em estágios intermediários de aumento, reflete diretamente a intensificação da atividade biológica, o que indica que o sistema está

favorecendo o acúmulo de MOS e, consequentemente, promovendo melhorias na qualidade do solo. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de utilizar bioindicadores mais adequados às condições específicas de cultivo, uma vez que seus valores individuais ainda carecem de interpretação consolidada. Diferentemente dos indicadores químicos tradicionais, cujos níveis de suficiência estão relativamente bem estabelecidos para cada nutriente e tipo de solo, considerando como variáveis a textura respectiva e o teor de MOS.^{1,2,7}

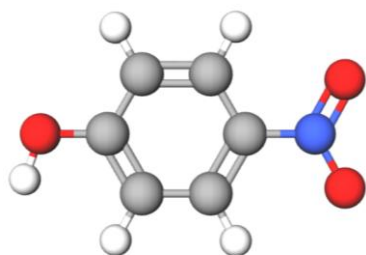
A proposta do BioAS foi fundamentada nas relações dos bioindicadores com o Rendimento Relativo Acumulado (RRA) do cultivo de grãos de soja e milho, bem como também os teores de MOS. Todos os atributos microbiológicos estudados demonstraram correlação positiva com o RRA e com a MOS, o que permitiu, por meio de análises de regressão, a definição de classes de suficiência para cada indicador, conforme os seguintes critérios: RRA abaixo de 40% representa uma baixa suficiência; entre 41% e 80%, suficiência moderada; e acima de 80%, suficiência adequada.^{1,2}

Procedimento

O procedimento experimental pode apresentar pequenas variações conforme a quantidade de amostras e replicatas aplicadas, porém, sempre respeitando as condições adequadas de pH e tempo de incubação específicas para cada enzima, bem como seguindo os protocolos estabelecidos pela Embrapa. No artigo de Mendes et al, foram analisadas amostras de solos altamente intemperizados, característicos de regiões intertropicais, classificados como Oxisolos. As coletas foram realizadas em parcelas experimentais localizadas na Embrapa Cerrados, em Planaltina, município do Distrito Federal, em dois períodos distintos, sendo cada amostra composta por 20 subamostras por parcela. Para as análises microbiológicas, as amostras do manejo foram peneiradas em malhas com abertura entre 2 mm e 4 mm, armazenadas em temperatura ambiente e buscando preservar a umidade natural do momento da coleta.^{10,11}

No laboratório, a atividade da enzima GLU foi determinada por meio de análises em duplicata, com inclusão de amostra-controle. Utilizou-se o substrato sintético p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo (PNG), com incubação das amostras por uma hora. A atividade enzimática foi quantificada por espectrofotometria, com base na liberação de p-nitrofenol, sendo os resultados expressos em microgramas (μ g) de p-nitrofenol por grama de solo por hora.¹⁰

Figura 2. Estrutura Química do p-nitrofenol, obtido através do software *Molview*.



A determinação da atividade da enzima ARYL, ocorre através do substrato p-nitrofenil-sulfato de potássio (PNS). De forma semelhante ao método anterior, as amostras de solo foram incubadas com o substrato em tampão por uma hora. Após esse período, a reação foi interrompida, e o p-nitrofenol liberado também foi quantificado por espectrofotometria.¹⁰

Monitoramento da SH do solo

No trabalho de Carneiro et al, ao discutir os resultados das propriedades químicas e biológicas de solos provenientes de produções orgânicas e convencionais por meio da metodologia BioAS, observou-se ampla variação na atividade da GLU entre as amostras analisadas, com valores entre 60 e 286 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, o que representa uma variação relativa de 477%. Entretanto, apesar da alta amplitude, os resultados indicaram que a atividade da β -glicosidase não apresentou diferença estatística significativa entre os sistemas de cultivo orgânico e convencional. Essa ausência de distinção foi atribuída à aplicação frequente de resíduos orgânicos, inclusive nas propriedades convencionais, o que pode ter elevado artificialmente a atividade enzimática nesses solos.¹²

A ARYL, por outro lado, obteve resultados significativamente maiores nos solos sob manejo orgânico, com uma variação de 18 a 519 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, equivalente a um aumento relativo de 2.883%. A arilsulfatase demonstrou também uma sensibilidade estatisticamente superior nas áreas orgânicas. Visto que com a maior presença de fungos e ao uso intensivo de insumos orgânicos, fatores os quais são diretamente associados à síntese e liberação da enzima. Assim, destacando-se como um bioindicador mais eficaz para distinguir as condições do solo entre os dois sistemas, refletindo com maior precisão os efeitos da adoção de práticas tradicionais.¹²

Avaliação da atividade enzimática de solo sob cultivo de café

No trabalho de Rodrigues et al, buscou-se avaliar os efeitos do cultivo cafeeiro sobre a atividade enzimática do solo em função de dois regimes hídricos distintos, associados ou não à prática da calagem e ao cultivo de braquiária nas entrelinhas. A técnica de calagem é aplicada para diminuir a acidez do solo, além de fornecer nutrientes como o cálcio e magnésio para as plantas. Enquanto, a braquiária na entrelinha é um método que protege o solo contra o impacto direto de gotas de chuva sobre a superfície, como também serve de proteção contra o superaquecimento do solo.^{13,14,15}

A atividade da GLU foi significativamente influenciada pela presença da braquiária, tanto na estação chuvosa quanto na seca. Durante o período seco, a cobertura vegetal promoveu um aumento de até 56% na atividade dessa enzima, em comparação com áreas descobertas. Os diferentes regimes hídricos, por outro lado, não afetaram diretamente a atividade da β -glicosidase, indicando que sua variação está mais relacionada à adição de resíduos orgânicos e à manutenção da cobertura vegetal.¹³

A ARYL, por sua vez, demonstrou maior sensibilidade a múltiplos fatores de manejo. A presença de braquiária foi o principal fator de incremento da atividade dessa enzima, com aumentos médios de até 58% durante a estação seca. Observou-se ainda uma interação significativa entre regime hídrico e cobertura vegetal, sendo que a combinação de irrigação e braquiária resultou nos maiores valores enzimáticos. Esse resultado sugere que a arilsulfatase é um bioindicador altamente sensível às condições biológicas e físico-químicas do solo sob cultivo de café.¹³

Conclusões

A Tecnologia de Bioanálise do Solo, desenvolvida pela Embrapa, configura-se como uma ferramenta inovadora e estratégica para o monitoramento da SH e SQ em sistemas agrícolas. Ao incorporar análises de bioindicadores enzimáticos como a β -glicosidase e a arilsulfatase às análises convencionais, o BioAS amplia a compreensão da funcionalidade do solo, permitindo a detecção precoce de alterações biológicas que impactam diretamente a produtividade. Essa abordagem evidencia a dinâmica da matéria orgânica e dos ciclos biogeoquímicos de nutrientes, proporcionando um diagnóstico mais completo e funcional da qualidade do solo para os agricultores brasileiros.

A aplicação prática supracitada da Bioanálise do Solo tem demonstrado eficiência na diferenciação de sistemas de manejo agrícola. A GLU está diretamente associada ao ciclo do carbono, enquanto a ARYL atua no ciclo do enxofre. A resposta dessas enzimas tem se mostrado indicadores sensíveis da sustentabilidade e da qualidade biológica dos solos, especialmente em ambientes tropicais.

Portanto, o uso do BioAS não apenas qualifica o diagnóstico agrônomo, mas também oferece aos produtores e técnicos um recurso valioso para uma tomada de decisão mais fundamentada. Trata-se de uma tecnologia com potencial de acessibilidade nos diversos estados brasileiros, especialmente devido aos programas de capacitação promovidos pela Embrapa, o que reforça uma perspectiva otimista para o avanço das análises de qualidade dos solos no país.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de detalhes obtidos por artigos auxiliares são de Paulo Resende Neto.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 I. C. Mendes, G. M. Chaer, D. M. G. Sousa, F. B. Reis Junior, O. D. Dantas, M. I. L. Oliveira, A. A. C. Lopes and L. M. Souza, Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola, *Inf. Agron.*, 2020, **8**, 1–11.
- 2 I. C. Mendes, M. R. Cherubin, and Soil Science Society of America, Eds., *Soil health and sustainable agriculture in Brazil*, Wiley, Hoboken, NJ, First edition., 2024.
- 3 L. Sobucki, R. F. Ramos, L. A. Meireles, Z. I. Antonioli and R. J. S. Jacques, Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2021, **45**, e0210109.
- 4 BioAS – Tecnologia de Bioanálise de Solo - Portal Embrapa, <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6047/bioas--tecnologia-de-bioanalise-de-solo>, (accessed May 31, 2025).
- 5 BioAS, <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/86932290/bioas-rede-de-laboratorios-e-ampliada>, (accessed May 31, 2025).
- 6 M. Yu, M. Wu, F. Secundo and Z. Liu, Detection, production, modification, and application of arylsulfatases, *Biotechnology Advances*, 2023, **67**, 108207.
- 7 T.-H. Anderson and K. H. Domsch, Soil microbial biomass: The eco-physiological approach, *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**, 2039–2043.
- 8 R. Datta, Enzymatic degradation of cellulose in soil: A review, *Heliyon*, 2024, **10**, e24022.
- 9 N. Horowitz and E. J. Meurer, Oxidation of elemental sulfur in tropical soils. *Ciênc. Rural*, 2006, **36**, 822–828.
- 10 I. D. C. Mendes, L. M. D. Souza, D. M. G. D. Sousa, A. A. D. C. Lopes, F. B. D. Reis Junior, M. P. C. Lacerda and J. V. Malaquias, Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept, *Applied Soil Ecology*, 2019, **139**, 85–93.
- 11 Oxisols | Soil & Water Systems | University of Idaho, <https://www.uidaho.edu/cals/soil-orders/oxisols>, (accessed 1 June 2025).
- 12 R. G. Carneiro, C. C. Figueiredo and J. V. Malaquias, A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glicosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon, *Appl. Soil Ecol.*, 2024, **198**, 105394.

- 13 R. N. Rodrigues, F. B. Reis Junior, A. A. C. Lopes, O. C. Rocha, A. F. Guerra and A. D. Veiga, Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria, *Ciênc. Rural*, 2022, **52**, e20200532.
- 14 A. L. Giraldeli, Tudo que você precisa saber sobre calagem, <https://blog.aegro.com.br/calagem/>, (accessed June 1, 2025).
- 15 C. Fernandes, Braquiária na entrelinha do cafeeiro, <https://rehagro.com.br/blog/braquiaria-na-entrelinha-do-cafeeiro/>, (accessed June 1, 2025).