

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Instituto de Química - Curso QUÍMICA TECNOLÓGICA

PAULO RESENDE NETO

Qualidade dos solos da Chapada dos Veadeiros avaliada por indicadores enzimáticos, mineralógicos e carbono orgânico

BRASÍLIA - DF

2026

PAULO RESENDE NETO

Qualidade dos solos da Chapada dos Veadeiros avaliada por indicadores enzimáticos, mineralógicos e carbono orgânico

Trabalho apresentado à Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientador: Profa. Dra. Fernanda Vasconcelos de Almeida
Coorientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

BRASÍLIA

2026

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o amor, incentivo e apoio incondicional ao longo desta jornada. Seus ensinamentos, valores e carinho foram fundamentais para a formação do profissional e do homem que sou hoje.

Aos meus orientadores, pela confiança em meu potencial, pelas orientações e pela dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu colega Washington, pela disponibilidade e pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos, pelos momentos compartilhados, pelo incentivo e por tornarem essa trajetória mais leve.

"Ninguém me esperava. Tudo me aguardava". - Patti Smith

RESUMO

A Chapada dos Veadeiros, inserida no bioma Cerrado, enfrenta diferentes formas de uso e manejo do solo que comprometem os serviços ecossistêmicos. A avaliação da Saúde do Solo é fundamental para compreender seu potencial de recuperação. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a atividade biológica de solos submetidos a distintos históricos de manejo. Para isso, foram determinadas as atividades das enzimas β-glicosidase e Arilsulfatase, além da caracterização mineralógica das amostras por Difração de Raios X e da análise elementar de Carbono Orgânico Total, buscando identificar possíveis relações entre esses parâmetros. Os resultados demonstraram que o Organossolo apresentou as maiores atividades enzimáticas e os maiores teores de carbono orgânico entre as amostras avaliadas, resultado compatível com as características desse tipo de solo. O Pasto Abandonado apresentou atividade enzimática superior à da Agrofloresta e da Área Degradada com Remoção de TopSoil, enquanto a Agrofloresta exibiu desempenho intermediário. Em contraste, a Área Degradada com Remoção de TopSoil registrou os menores níveis de atividade enzimática e de carbono orgânico, refletindo os impactos da remoção da camada superficial do solo sobre a microbiota e a matéria orgânica. A Difração de Raios X revelou predominância de quartzo (SiO_2), caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$) e gibbsita ($Al(OH)_3$) em todas as amostras, resultado compatível com a natureza altamente intemperizada dos solos da região e com o papel atribuído à matriz mineral na estabilização da matéria orgânica e da atividade enzimática. A integração entre indicadores biológicos, mineralógicos e elementares mostrou-se uma abordagem eficiente para a avaliação da Saúde do Solo, permitindo identificar diferentes níveis de degradação e o potencial de recuperação de ecossistemas do Cerrado.

Palavras-chave: Cerrado. Saúde do Solo. Enzimas. Difração de Raio-X. Carbono Orgânico.

ABSTRACT

Chapada dos Veadeiros, situated in the Cerrado biome, faces various types of land use and land management practices that compromise its ecosystem services. Assessing Soil Health is essential to understanding this region's potential recovery. Within this context, the present work aims to evaluate the biological activity of soils exposed to different land management histories. Therefore, the activities of the enzymes β-glycosidase and arylsulfatase were determined, alongside the mineralogical characterization of the samples via X-ray Diffraction and total organic carbon, in order to identify possible relationships between these parameters. The results demonstrated that the Organosol exhibited the highest enzymatic activities and the highest organic carbon contents among the evaluated samples, consistent with the characteristics of this soil type. The Abandoned Pasture showed higher enzymatic activity, the Agroforestry system presented intermediate values, and the Degraded Area with Topsoil Removal exhibited the lowest enzymatic activity and organic carbon contents, reflecting the impacts of topsoil removal on soil microbiota and organic matter. . X-ray Diffraction revealed a predominance of quartz (SiO_2), kaolinite ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$), and gibbsite ($Al(OH)_3$) in all samples, a result consistent with the highly weathered nature of the region's soils and with the role of the mineral matrix in stabilizing organic matter and enzymatic activity. The integration of biological, mineralogical, and elemental indicators proved to be an effective approach for assessing Soil Health, allowing for the identification of different levels of degradation and the recovery potential of Cerrado ecosystems.

Keywords: Cerrado. Soil Health. X-ray Diffraction. Organic Carbon.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Registros fotográficos da área de estudo e das atividades de coleta de solo na Chapada dos Veadeiros	15
Figura 2 -	Área de coleta das amostras	26
Figura 3 -	Fluxograma do procedimento de β-glicosidase	27
Figura 4 -	Fluxograma do procedimento de Arilsulfatase	28
Figura 5 -	Difração dos Raios X de amostras de solo coletadas nas Chapada dos Veadeiros	31

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Atividade Enzimática média nas amostras de solo coletadas na Chapada dos Veadeiros 30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa
BioAS	Tecnologia de Bioanálise de Solo
GLI	β-glicosidase
ARIL	Arilsulfatase
COT	Carbono Orgânico Total
NT	Nitrogênio Total
SS	Saúde do Solo
DRX	Difração de Raios X
COS	Carbono Orgânico do Solo
MIQS	Sistema Integrado de Qualidade do Microbioma
MUB	Modified Universal Buffer
PNG	P-nitrofenil glicosídeo
THAM	Tris(hidroximetil)aminometano
PNS	P-nitrofenol sulfatado
pNP	P-nitrofenol

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Beta
%	Porcentagem
μ	Micro
θ	Teta
°	Grau

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.3	OBJETIVO GERAL	20
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.5	JUSTIFICATIVA	20
2	**REVISÃO TEÓRICA**	21
2.1	EXPANSÃO AGRÍCOLA DO CERRADO E DESAFIOS PARA RECUPERAÇÃO DO SOLO	21
2.2	ÁREAS DE ESTUDO E SISTEMAS DE MANEJO	22
2.3	SAÚDE DO SOLO COMO INDICADOR DA FUNCIONALIDADE DOS ECOSSISTEMAS	23
2.4	TECNOLOGIA DE BIOANÁLISE DE SOLO	24
2.5	MINERALOGIA DO SOLO E SEU PAPEL NA ANÁLISE DA SAÚDE DO SOLO	24
2.6	ANÁLISE MULTIELEMENTAR COMO INDICADOR DA SAÚDE DO SOLO	25
3	**PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**	26
3.1	AMOSTRAGEM	26
3.2	PROCEDIMENTO DA BETA-GLICOSIDASE	27
3.3	PROCEDIMENTO DA ARILSULFATASE	27
3.4	ANÁLISE DE MINERALOGIA	28
3.5	ANÁLISE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL	28
4	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	29
4.1	ANÁLISE ENZIMÁTICA	29
4.2	ANÁLISE DE MINERALOGIA	31
4.3	ANÁLISE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL	32
5	**CONCLUSÕES**	34
	BIBLIOGRAFIA	36

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com suas 27 unidades federativas e uma área de aproximadamente 850 milhões de hectares, destaca-se entre os maiores produtores agrícolas do mundo em razão de seu clima predominantemente favorável e às vastas áreas adequadas para o desenvolvimento agrícola. Atualmente, o país já se destaca entre os dez maiores exportadores de produtos agrícolas do mundo e a expectativa é de que essa posição se fortaleça ainda mais com o aumento da produção e exportação (*Dias et al., 2016; Pereira et al., 2026)*.

Esse crescimento foi impulsionado, sobretudo, pela expansão da fronteira agrícola e pelo desenvolvimento de tecnologias que viabilizaram a produção em regiões tropicais, permitindo a incorporação de extensas áreas do Cerrado ao sistema produtivo nacional. Entre 1990 e 2000, a área cultivada de soja dobrou, enquanto a produção quase quadruplicou, impulsionada pela intensa mecanização agrícola. Estima-se que a produção brasileira de grãos, como a soja, tenha aumentado 29,4 % entre 2015 e 2025, com a sua exportação prevista para crescer 51,2 % (*Dias et al., 2016; Pereira et al., 2026)*.

A princípio, a expansão agrícola no Cerrado ocorreu por meio do desmatamento da vegetação nativa para a implantação de áreas destinadas à agricultura, à pecuária e à urbanização. Esse processo foi intensificado, especialmente, na região do MATOPIBA, acrônimo para os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, reconhecida como a principal fronteira agrícola do país. Essa região concentra elevadas taxas de conversão da cobertura vegetal, favorecidas pela menor proteção legal conferida ao bioma Cerrado em comparação com a Amazônia. Além da perda de biodiversidade, essa transformação compromete importantes serviços ecossistêmicos, uma vez que o Cerrado desempenha papel estratégico na recarga de aquíferos e na manutenção das principais bacias hidrográficas brasileiras *(Dias et al., 2016; Pereira et al., 2026)*.

Diferentemente dos ecossistemas florestais, cerca de 87 % do carbono do Cerrado encontra-se armazenado abaixo da superfície, principalmente nas raízes e no solo, caracterizando o bioma como uma "floresta invertida". Dessa forma, intervenções que removem a vegetação ou degradam a estrutura do solo promovem a liberação de grandes estoques de carbono, comprometendo a funcionalidade ecológica e a capacidade de recuperação desses ambientes *(Dias et al., 2016; Pereira et al., 2026)*.

Um solo saudável, por sua vez, é definido como um sistema vivo e dinâmico que possui a capacidade contínua de funcionar como um ecossistema vital para sustentar a produtividade biológica, promover a qualidade do ar e da água, assim como manter a saúde de plantas e animais. Além da fertilidade, esse conceito abrange a multifuncionalidade do solo, incluindo serviços ecossistêmicos essenciais, como o sequestro de carbono e a regulação de fluxos hídricos. Tradicionalmente, as análises de rotina no Brasil situavam-se apenas em parâmetros químicos e físicos, uma abordagem considerada reducionista e insuficiente para explicar o por que solos com composições químicas semelhantes apresentam produtividades significativamente distintas *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2020)*.

Diante dessa lacuna, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em 2020, apresentou a Tecnologia de Bioanálise de Solo (BioAS). Essa inovação incorporou o componente biológico às análises convencionais, permitindo acessar o que se define como a "assinatura biológica" do solo, que reflete o histórico de manejo e o estado de conservação do ecossistema *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2020)*. A tecnologia baseia-se na quantificação da atividade de duas enzimas: a β-glicosidase (GLI), fundamental no ciclo biogeoquímico do carbono ao controlar a liberação de glicose para os microrganismos, e a Arilsulfatase (ARIL), peça-chave no ciclo do enxofre e diretamente associada à taxa de renovação da biomassa fúngica *(Mendes et al., 2024; Carneiro et al., 2024)*.

Este estudo, por sua vez, concentra-se na Chapada dos Veadeiros, situada no bioma Cerrado (Figura 1), reconhecido como um dos principais pontos de biodiversidade global e um ecossistema vital de transição entre diversos biomas brasileiros. Os solos predominantes nesta região são os Latossolos, caracterizados por serem profundos, altamente intemperizados, ácidos e com baixa fertilidade natural, apresentando limitações intrínsecas, como baixa capacidade de troca catiônica e teores reduzidos de matéria orgânica *(Mendes et al., 2019; Lima et al., 2024)*.

Somando-se à fragilidade pedológica, o Cerrado possui um clima tropical com sazonalidade marcante, em que o rigoroso período de inverno seco, abril a setembro, submete a microbiota do solo a um severo estresse hídrico *(Mendes et al., 2020; Carneiro et al., 2024*). Essa alternância sazonal impõe ciclos naturais de dessecação e reumedecimento que afetam a sobrevivência e a atividade dos microrganismos, tornando a preservação da funcionalidade biológica um desafio

crítico para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e da produtividade biológica *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021)*.

Figura 1 – Registros fotográficos da área de estudo e das atividades de coleta de solo na Chapada dos Veadeiros



Latossolos presentes no Cerrado são marcados pela interação entre a fração argila, rica em caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$), e os óxidos de ferro e alumínio, o que promove a formação de macroagregados estáveis que atuam na proteção física e na estabilização do carbono orgânico, reduzindo sua exposição à mineralização microbiana *(Almeida et al., 2021; Mendes et al., 2020)*.

Essa constituição mineralógica influencia diretamente a dinâmica bioquímica, pois enzimas como a GLI e a ARIL possuem alta afinidade pelas superfícies minerais, interagindo com suas cargas por meio de processos de adsorção. Sendo assim, a compreensão dos atributos mineralógicos torna-se indispensável, visto que a matriz mineral é o suporte fundamental para a agregação e para a proteção da matéria orgânica. Portanto, as associações organominerais garantem a persistência da atividade biológica e a "memória biológica" do solo, tornando a mineralogia um fator determinante na capacidade de resiliência e na

saúde desses ecossistemas tropicais *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021)*.

Além dos atributos biológicos e mineralógicos, a análise dos teores de Carbono Orgânico Total (COT) e nitrogênio total (NT) constitui uma ferramenta complementar para a avaliação da Saúde do Solo (SS). Esses elementos representam os principais reservatórios que sustentam a atividade microbiana e os processos de ciclagem de nutrientes, permitindo inferir o potencial de armazenamento de matéria orgânica, a estabilidade do sistema e sua capacidade de recuperação frente aos diferentes usos e manejos do solo (*Almeida et al., 2021*).

A avaliação da atividade das enzimas GLI e ARIL em áreas degradadas na Chapada dos Veadeiros justifica-se por serem bioindicadores altamente sensíveis, capazes de detectar alterações na SS com maior antecedência do que atributos químicos ou físicos tradicionais (*Sobucki et al., 2021; Notaro et al., 2018; Carneiro et al., 2024*). Enquanto a GLI é fundamental no ciclo do carbono, atuando na etapa final da despolimerização da celulose para liberar glicose como fonte de energia microbiana, a ARIL desempenha um papel crucial no ciclo do enxofre, mediando a mineralização desse nutriente para as plantas *(Carneiro et al., 2024; Sobucki et al., 2021; Yu et al., 2023)*.

O uso desses atributos bioquímicos permite acessar a "memória biológica" do solo e quantificar com precisão o impacto da degradação antrópica e a eficácia de processos de restauração ecológica. Assim, esses bioindicadores fornecem subsídios para o diagnóstico precoce da degradação e para a promoção de sistemas de manejo mais resilientes, garantindo a sustentabilidade dos agroecossistemas e a conservação dos recursos naturais em longo prazo *(Carneiro et al., 2024; Sobucki et al., 2021)*.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A região Centro-Oeste brasileira, caracterizada pelo predomínio do bioma Cerrado, apresentauma área potencial agrícola de aproximadamente 70 milhões de hectares, constituindo, juntamente com a região Sul, uma das maiores reservas mundiais de terras agricultáveis. Ao todo, possui mais de 24,84 milhões de hectares cultivados com culturas anuais; no entanto, esses solos sofreram grave degradação e rápido esgotamento de seus estoques de carbono orgânico do solo (COS), associado ao cultivo intensivo, à baixa entrada de resíduos de culturas e à alta taxa de mineralização do COS *(Mendes et al., 2024)*.

Com a implementação da BioAS, o cenário transita de um paradigma mineralista para uma abordagem sistêmica, em que a atividade microbiana é reconhecida como o motor da fertilidade e da resiliência do solo. A Chapada dos Veadeiros, por sua alta biodiversidade e fragilidade pedológica, predominantemente constituídos por Latossolos altamente intemperizados, configura-se como um cenário estratégico para avaliar se esses bioindicadores são capazes de diagnosticar precocemente o estágio de degradação dos ecossistemas *(Mendes et al., 2024)*.

Delimitado nesse contexto, o presente estudo restringe-se espacialmente a solos provenientes de uma única fazenda localizada na região da Chapada dos Veadeiros, contemplando cinco áreas com diferentes históricos de uso e distintos níveis de degradação associados à pressão antrópica. Essa condição constitui um importante modelo para o estudo das possibilidades de recuperação do ecossistema, configurando a propriedade como uma área de interesse para estudos sobre qualidade biológica do solo *(Carneiro et al., 2009; Lima et al., 2024)*. Foram selecionados ambientes representativos que incluem, Agrofloresta, Organossolo, Pasto Abandonado, Área Degradada com Remoção de TopSoil e Cerrado (Branco), este último constituído por vegetação nativa e utilizado como área de referência. Os ambientes avaliados apresentam distintos históricos de uso e diferentes graus de alteração na estrutura, no conteúdo de matéria orgânica e na funcionalidade biológica do solo. Dessa forma, a investigação concentra-se em condições nas quais os processos de degradação podem comprometer a dinâmica microbiana e os serviços ecossistêmicos do solo.

As Agroflorestas se caracterizam pela integração de espécies arbóreas, plantas herbáceas e, em alguns casos, animais, estruturadas com base nos princípios de sucessão ecológica e da elevada biodiversidade. O Organossolo apresenta elevado teor intrínseco de matéria orgânica, o que demanda estratégias de manejo voltadas à preservação desses estoques de carbono orgânico no solo (COS). O Pasto Abandonado apresenta certo grau de degradação física e biológica, mas mantém elevado potencial de recuperação. Por sua vez, a Área Degradada com Remoção de TopSoil caracteriza-se pela perda da camada superficial fértil do solo, resultando em severa redução dos estoques de matéria orgânica e da atividade biológica. Sua recuperação depende da recomposição dessa camada e do estabelecimento de cobertura vegetal, preferencialmente com gramíneas, capazes de promover proteção térmica, retenção de umidade e reativação dos ciclos

biogeoquímicos e da atividade biológica do solo *(Mendes et al., 2019; Almeida et al., 2021)*.

Complementando a análise da dinâmica biológica, foram caracterizados os atributos mineralógicos das amostras, uma vez que a matriz mineral do solo constitui um suporte físico-químico na qual ocorrem interações essenciais para manutenção da saúde do solo. As enzimas presentes no solo interagem com as cargas superficiais desses minerais, podendo ser adsorvidas às partículas de argilominerais *(Mendes et al., 2024; Sobucki et al., 2021)*. Logo, a técnica de Difração de Raios X (DRX) torna-se essencial para a identificação das fases cristalinas predominantes, como a caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$) e os óxidos de ferro e alumínio (gibbsita e hematita), típicos dos Latossolos altamente intemperizados do Cerrado *(Mendes et al., 2024; Lima et al., 2024)*. O fenômeno de adsorção de enzimas à superfície de argilominerais e óxidos permite sua estabilização e proteção contra a degradação, por meio de interações físico-químicas, principalmente eletrostáticas, favorecidas pelo pH levemente ácido e pelas propriedades da matriz mineral do solo. Esse processo é indispensável para a manutenção da variedade enzimática que compõe a "memória biológica" do solo *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021)*.

Além da avaliação bioquímica, a análise elementar de carbono e nitrogênio constitui uma ferramenta complementar para a interpretação da qualidade do solo. Enquanto a atividade das enzimas GLI e ARIL reflete a intensidade dos processos biológicos associados à ciclagem de nutrientes, os teores de carbono orgânico e nitrogênio total permitem quantificar os estoques que sustentam essa atividade. Desta forma, a integração desses parâmetros possibilita avaliar não apenas o funcionamento biológico atual do sistema, mas também sua capacidade de armazenar matéria orgânica e manter a fertilidade do solo ao longo do tempo (*Silva et al., 2018; Mendes et al., 2024)*.

Dessa forma, a integração entre os indicadores bioquímicos, elementares e mineralógicos permite uma avaliação mais abrangente da qualidade do solo, contribuindo para a compreensão dos mecanismos envolvidos na degradação e no potencial de recuperação de áreas submetidas a diferentes formas de uso e manejo na Chapada dos Veadeiros.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A pesquisa parte do reconhecimento de uma situação amplamente discutida na literatura, mas ainda insuficientemente compreendida em sua totalidade: a degradação dos solos decorrente da conversão da vegetação nativa para usos antrópicos, como a expansão agropecuária do bioma Cerrado. Esse processo tem sido associado à redução dos estoques de carbono orgânico e à perda da funcionalidade ecossistêmica, comprometendo a capacidade do solo de sustentar a produtividade biológica e os serviços ambientais. Tal cenário evidencia um descompasso entre a complexidade dos processos que regem a SS e as abordagens tradicionalmente utilizadas para sua avaliação *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2020)*.

A problemática reside nas limitações das análises de solo convencionalmente adotadas. Embora forneçam informações relevantes sobre atributos físicos e químicos, essas abordagens podem ser insuficientes para explicar possíveis diferenças de desempenho produtivo e a resiliência ambiental entre solos com características semelhantes. Além disso, a degradação do solo compromete não apenas a produtividade e os serviços ecossistêmicos, mas também dificulta a compreensão dos mecanismos envolvidos em sua recuperação, evidenciando a necessidade de indicadores capazes de diagnosticar diferentes estágios de degradação e restauração ecológica *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021)*.

Nesse contexto, apesar dos avanços recentes proporcionados pela tecnologia BioAS, que incorpora indicadores biológicos por meio da atividade enzimática, a literatura ainda aponta limitações importantes. Entre elas, destaca-se a insuficiência de estudos voltados à calibração desses bioindicadores em diferentes contextos de uso e manejo. Adicionalmente, observa-se uma lacuna no entendimento das interações entre a atividade biológica e a matriz mineral do solo, particularmente no que se refere ao papel da mineralogia na estabilização e proteção da atividade enzimática em ambientes tropicais altamente intemperizados *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021)*.

Sob essa perspectiva, evidencia-se a necessidade de abordagens integradas que considerem simultaneamente os componentes biológicos, elementares e mineralógicos do solo, a fim de aprimorar a interpretação de sua funcionalidade, estado de conservação e potencial de recuperação. É a partir dessa defasagem entre a necessidade de um diagnóstico mais sistêmico e as limitações das metodologias atuais que se delimita o problema de pesquisa. Logo, formula-se a seguinte pergunta norteadora: de que maneira a atividade das enzimas avaliadas

pela tecnologia BioAS, integrada aos atributos elementares de carbono e nitrogênio e à caracterização mineralógica por DRX, pode contribuir para a interpretação da assinatura biológica, do estado de saúde e do potencial de recuperação de solos submetidos a diferentes níveis de degradação e sistemas de manejo na região da Chapada dos Veadeiros *(Rodrigues et al., 2022)*.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade e o potencial de recuperação de solos submetidos a diferentes históricos de uso e níveis de degradação na região da Chapada dos Veadeiros, bem como analisar sua funcionalidade por meio da integração de indicadores bioquímicos, elementares e mineralógicos, complementada pela análise das relações entre esses parâmetros e por estimativas de seu comportamento.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Determinar a atividade das enzimas arilsulfatase (ARIL) e β-glicosidase (GLI) em amostras de solo por meio da Tecnologia BioAS.
b) Caracterizar a mineralogia das amostras de solo por Difração de Raios X (DRX).
c) Determinar os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) das amostras de solo por análise elementar.
d) Correlacionar os indicadores bioquímicos, elementares e mineralógicos, visando compreender as relações entre a atividade enzimática, a composição mineralógica e os teores de carbono e nitrogênio, como subsídio para a avaliação da qualidade e do potencial de recuperação dos solos.

1.5 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de avançar na compreensão da Saúde do Solo frente ao cenário de intensificação agrícola no bioma Cerrado. O uso intensivo do solo tem resultado na redução dos estoques de carbono orgânico e na perda de funcionalidades ecossistêmicas essenciais, evidenciando os limites das abordagens tradicionais de avaliação da qualidade do solo.

Nesse contexto, destaca-se uma lacuna, uma vez que as análises

convencionalmente utilizadas ainda se baseiam predominantemente em atributos químicos e físicos, os quais, embora relevantes, não são suficientes para explicar a complexidade dos processos que regulam a produtividade e a resiliência dos sistemas agrícolas. Esse cenário reforça a necessidade de incorporar indicadores biológicos que permitam uma interpretação mais sensível e integrada do solo enquanto um sistema vivo *(Mendes et al., 2024; Sobucki et al., 2021).*

A adoção de bioindicadores enzimáticos representa um avanço nesse sentido, ao possibilitar o acesso à “assinatura biológica” do solo e à sua dinâmica funcional. No entanto, ainda são escassos os estudos que integram esses indicadores biológicos à caracterização mineralógica e à avaliação dos estoques de carbono e nitrogênio do solo, especialmente em ambientes altamente intemperizados como os do Cerrado. Considerando que a matéria orgânica atua tanto como fonte de energia para a microbiota quanto como mecanismo de estabilização da atividade enzimática, e que a matriz mineral exerce papel determinante na proteção desses compostos, compreender essas interações torna-se fundamental para uma avaliação mais completa da SS e de sua capacidade de recuperação frente aos processos de degradação *(Mendes et al., 2024; Rodrigues et al., 2022).*

Do ponto de vista prático, a pesquisa se justifica pelo potencial de contribuir para o desenvolvimento de ferramentas mais eficazes de diagnóstico e monitoramento da qualidade do solo, permitindo a identificação precoce de alterações funcionais que não seriam detectadas por métodos tradicionais. A integração entre indicadores bioquímicos, elementares e mineralógicos possibilita uma compreensão mais abrangente dos mecanismos relacionados à degradação e ao potencial de recuperação dos solos. Em consequência, os resultados podem subsidiar estratégias mais sustentáveis de manejo, restauração de áreas degradadas e conservação dos recursos naturais, especialmente em regiões de elevada relevância ecológica, como o Cerrado.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 EXPANSÃO AGRÍCOLA DO CERRADO E DESAFIOS PARA RECUPERAÇÃO DO SOLO

O Cerrado consolidou-se como uma das principais fronteiras agrícolas do mundo, sendo responsável por parcela expressiva da produção nacional de grãos. O desenvolvimento de cultivos adaptados às condições tropicais, associado ao

avanço tecnológico promovido pela Embrapa, permitiu a expansão de culturas, como a soja, para áreas como o MATOPIBA, anteriormente consideradas inadequadas à agricultura intensiva *(Klein et al., 2021).*

Entre 1996 e 2019, a produção nacional aumentou de aproximadamente 23 milhões para 123 milhões de toneladas, representando um incremento próximo de 100 milhões de toneladas, o maior crescimento absoluto entre os países produtores da América do Sul. No cenário internacional, o Brasil passou a ocupar posição de liderança, superando os Estados Unidos na safra 2020-2021, com produção estimada em 131 milhões de toneladas, além de responder por cerca de 83 milhões de toneladas exportadas, frente às aproximadamente 56 milhões de toneladas exportadas pelos Estados Unidos *(Klein et al., 2021).*

O crescimento da produção foi acompanhado pela rápida expansão da fronteira agrícola sobre áreas de vegetação nativa do Cerrado. Embora a Amazônia concentre grande parte das políticas de conservação, o Cerrado apresenta taxas históricas de desmatamento igualmente preocupantes e dispõe de reduzida proteção legal, com aproximadamente 2,2 % de sua área inserida em unidades de conservação de proteção integral. A conversão da vegetação nativa em sistemas agrícolas e pecuários promove alterações profundas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, comprometendo sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais *(Klein et al., 2021; Nero et al., 2025).*

Nesse sentido, a recuperação de áreas degradadas tornou-se um dos principais desafios para a sustentabilidade da agricultura brasileira. Esse processo depende não apenas da recomposição da cobertura vegetal, mas também do restabelecimento da matéria orgânica, da atividade microbiana e das interações organominerais, fundamentais para a retomada dos ciclos biogeoquímicos, da funcionalidade biológica do solo e da prestação de serviços ecossistêmicos. Assim, a atividade enzimática, a caracterização mineralógica e os estoques de carbono assumem papel central na avaliação da SS e do potencial de recuperação de ecossistemas degradados *(Nero et al., 2025).*

2.2 ÁREAS DE ESTUDO E SISTEMAS DE MANEJO

As amostras analisadas neste estudo são provenientes de uma fazenda localizada na região da Chapada dos Veadeiros, anteriormente utilizada para atividades agropecuárias e atualmente destinada ao desenvolvimento de pesquisas voltadas ao monitoramento da qualidade do solo e à avaliação de diferentes

estratégias de manejo. A utilização de áreas com histórico de uso agropecuário permite investigar como diferentes formas de ocupação e recuperação influenciam os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

Entre os sistemas avaliados, destaca-se a Agrofloresta, que representa uma estratégia de manejo sustentável baseada na integração entre espécies arbóreas e cultivos agrícolas, promovendo maior diversidade biológica, aporte contínuo de resíduos vegetais e incremento gradual da matéria orgânica do solo *(Liao et al., 2025; Mendes et al., 2019).*

O Organossolo, por sua vez, constitui uma classe de solo caracterizada pelo elevado acúmulo natural de matéria orgânica, atuando como um importante reservatório de carbono e apresentando elevada funcionalidade biológica.

O Pasto Abandonado corresponde a uma área anteriormente destinada à atividade pecuária, estabelecida pela substituição da vegetação nativa por gramíneas forrageiras, cuja elevada produção radicular favorece o aporte contínuo de biomassa ao solo *(Lima et al., 2024).*

Em contraste, a Área Degradada com Remoção de TopSoil representa uma condição de intensa perturbação, caracterizada pela retirada da camada superficial do solo, onde se concentram a maior parte da matéria orgânica, da biomassa microbiana e das raízes finas. A perda dessa fração reduz significativamente a atividade biológica e compromete os processos de ciclagem de nutrientes *(Salazar et al., 2023).*

Como área de referência, utilizou-se a vegetação nativa, denominada Cerrado (Branco), empregada como parâmetro comparativo para a interpretação da funcionalidade biológica dos diferentes sistemas de manejo avaliados.

2.3 SAÚDE DO SOLO COMO INDICADOR DA FUNCIONALIDADE DOS ECOSSISTEMAS

A avaliação do solo esteve, por décadas, restrita à sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas, priorizando aspectos relacionados à fertilidade química e à produtividade agrícola. Entretanto, o avanço do conhecimento sobre os processos ecológicos evidenciou que essa abordagem é insuficiente para representar a complexidade do solo. Nesse contexto, consolidou-se o conceito de SS, definido como a capacidade contínua do solo de funcionar como um sistema vivo e multifuncional, mantendo sua produtividade biológica, regulando a qualidade da água e do ar e sustentando a saúde das plantas, dos animais e dos seres humanos *(Mendes et al., 2024).*

A multifuncionalidade do solo, por sua vez, é o elo que conecta a sua saúde à integridade dos ecossistemas. Essa abordagem vai além da produção de culturas e passa a incluir diversos serviços ecossistêmicos vitais, agrupados em categorias como provisão de alimentos, fibras e biocombustíveis; regulação dos fluxos hídricos, sequestro de carbono e degradação de agrotóxicos; e suporte, que engloba a ciclagem de nutrientes e o habitat para a biodiversidade *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2021).*

A fertilidade continua sendo um atributo essencial; entretanto, representa apenas uma das dimensões da SS. Solos com características químicas semelhantes podem apresentar diferentes níveis de produtividade e resiliência, evidenciando que atributos biológicos e físicos também influenciam seu funcionamento. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de ampliar a visão tradicional, reconhecendo o solo como um sistema dinâmico e dependente da interação entre matéria orgânica, organismos edáficos e matriz mineral *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2021).*

Em razão dessa natureza multifuncional, a avaliação da SS requer a utilização de indicadores capazes de representar diferentes processos ecológicos, permitindo uma avaliação mais abrangente da funcionalidade do solo e de sua capacidade de recuperação frente aos processos de degradação.

2.4 TECNOLOGIA DE BIOANÁLISE DE SOLO

A BioAS, desenvolvida pela Embrapa, fundamenta-se na quantificação da atividade das enzimas GLI e ARIL, relacionadas, respectivamente, aos ciclos biogeoquímicos do carbono e do enxofre. Esses bioindicadores apresentam elevada sensibilidade às alterações provocadas pelo uso e manejo do solo, possibilitando a detecção precoce de mudanças na funcionalidade biológica antes que modificações nos atributos químicos e físicos sejam observadas *(Mendes et al., 2020).*

A interpretação dos resultados é realizada por meio do módulo Sistema Integrado de Qualidade do Microbioma (MIQS), que integra a atividade enzimática às análises convencionais e classifica a SS em três funções principais: ciclagem de nutrientes (F1), armazenamento de nutrientes (F2) e suprimento de nutrientes (F3). Portanto, a BioAS permite acessar a denominada "assinatura biológica" do solo, fornecendo um diagnóstico mais abrangente de sua funcionalidade e constituindo uma ferramenta promissora para o monitoramento da degradação e da recuperação de diferentes sistemas de manejo *(Mendes et al., 2020).*

2.5 MINERALOGIA DO SOLO E SEU PAPEL NA ANÁLISE DA SAÚDE DO SOLO

A mineralogia do solo constitui um componente valioso para a compreensão da SS, uma vez que a matriz mineral atua como o principal suporte físico-químico para a estabilização da matéria orgânica e da atividade biológica. Nos Latossolos do Cerrado, predominam argilominerais, como a caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$), e óxidos de ferro e alumínio, como a gibbsita ($Al(OH)_3$) e a hematita, minerais que apresentam elevada afinidade por compostos orgânicos e exercem papel determinante na dinâmica dos processos biogeoquímicos *(Carneiro et al., 2009; Lima et al., 2024).*

As superfícies desses minerais favorecem a adsorção de enzimas extracelulares, protegendo-as da degradação. Além disso, as interações entre minerais, matéria orgânica e agregados do solo contribuem para a proteção física do carbono orgânico e para a manutenção da chamada "memória biológica" do solo. Logo, a caracterização mineralógica por DRX constitui uma ferramenta complementar às análises biológicas e elementares, permitindo visualizar a composição mineral dos ecossistemas *(Sobucki et al., 2021)*.

2.6 ANÁLISE MULTIELEMENTAR COMO INDICADOR DA SAÚDE DO SOLO

O COT é um dos principais indicadores da SS, por refletir a capacidade do sistema em armazenar matéria orgânica e sustentar sua atividade biológica. Além de constituir a principal reserva de energia para a microbiota, influenciando diretamente a ciclagem de nutrientes e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Portanto, alterações nos estoques de carbono decorrentes do uso e manejo do solo repercutem sobre a funcionalidade biológica, tornando esse atributo um importante indicador da qualidade e da resiliência dos ecossistemas *(Silva et al., 2018; Almeida et al., 2021).*

A análise multielementar de carbono e nitrogênio complementa essa avaliação ao quantificar os estoques elementares responsáveis pela manutenção da matéria orgânica do solo. A interpretação conjunta desses parâmetros com os indicadores biológicos permite compreender não apenas a intensidade da atividade microbiana, mas também a capacidade do solo em conservar carbono, sustentar os ciclos biogeoquímicos e responder aos processos de degradação e recuperação. Assim, a integração entre COT, nitrogênio total e atividade enzimática fornece uma abordagem sistêmica da SS, relacionando o funcionamento biológico aos estoques de matéria orgânica que sustentam a estabilidade e a resiliência dos ecossistemas

(Silva et al., 2018; Almeida et al., 2021).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 AMOSTRAGEM:

As amostras analisadas neste projeto foram provenientes da coleta conduzida pelo professor Dr. Luciano S. da Cunha e pela professora Dra. Fernanda Vasconcelos de Almeida, em uma fazenda (Figura 2), no início de outubro, período caracterizado pela transição entre o fim da estação seca, compreendida entre os meses de maio e setembro, e o início da estação chuvosa. A fazenda, anteriormente utilizada para atividades agropecuárias, é atualmente destinada à realização de estudos sob diferentes condições de manejo, nas quais foram coletadas amostras para o monitoramento da saúde do solo:

- P1: Cerrado (Branco) - Coordenadas: -14.1756, -47.64325;
- P2: Agrofloresta - Coordenadas:-14.17474, -47.64322;
- P3: Organossolo - Coordenadas: -14.16926, -47.64444;
- P4: Pasto Abandonado - Coordenadas: -14.17162, -47.64246;
- P5: Área Degradada com Remoção de TopSoil - Coordenadas: -14.17394, -47.64073;

Figura 2 – Área de coleta das amostras



Nota: Imagens coletadas do Google Earth.

Em cada ponto, conforme convencionalmente adotado nos protocolos da Embrapa, foram realizados furos de amostragem com profundidade de até 10 cm, utilizando um perfurador de solo. As amostras coletadas foram acondicionadas em recipientes plásticos, devidamente identificadas, lacradas e encaminhadas ao laboratório.

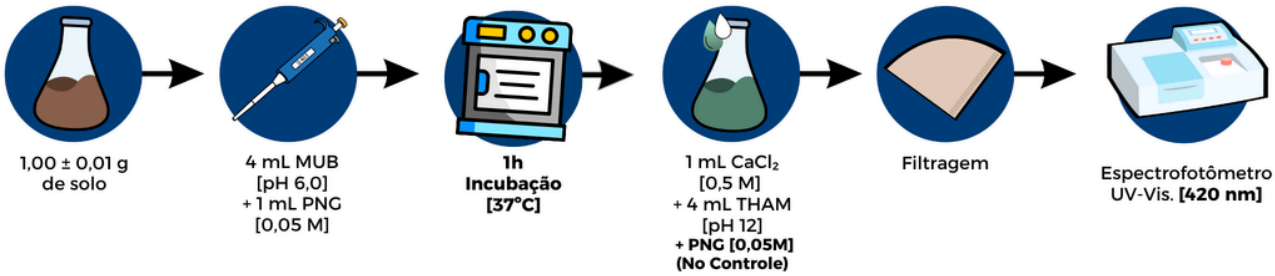
O ensaio de atividade enzimática requisitou um preparo prévio das amostras, que foram pesadas e secas sob condições naturais durante uma semana. Posteriormente, as amostras destinadas às análises enzimáticas foram peneiradas em malha de 2 mm. Essa etapa do experimento foi realizada no Laboratório de Quimiometria e Química Ambiental do Instituto de Química da UnB.

Para os ensaios de DRX e COT, as amostras também foram peneiradas em malha de 2 mm, reservadas em recipientes plásticos, com sua devida identificação, lacradas e encaminhadas aos respectivos laboratórios responsáveis pelas análises.

3.2 PROCEDIMENTO DA BETA-GLICOSIDASE:

O experimento foi aplicado em quintuplicata, utilizando-se 1 g de solo peneirado em cada erlenmeyer, sendo um deles reservado para o controle. O fluxograma (Figura 3) para o preparo do ensaio segue a adição de 4 mL de Modified Universal Buffer (MUB) (pH 6) e seguido de 1 mL de p-nitrofenil glicosídeo (PNG) (0,05 M), exceto no controle.

Figura 3 – Fluxograma do procedimento de β-glicosidase

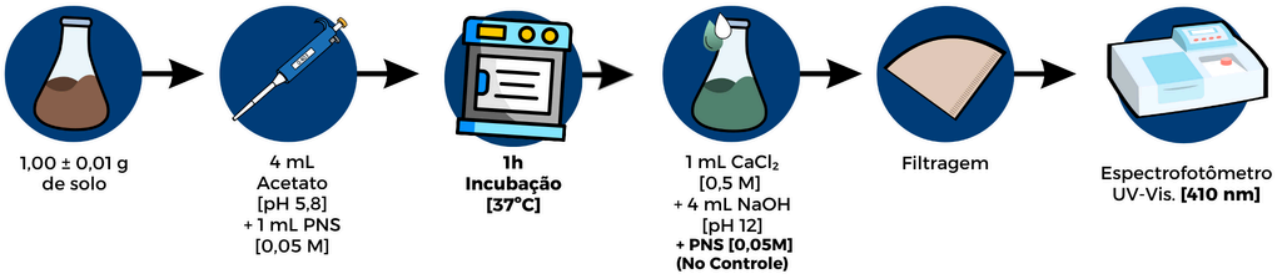


A fim de preparar uma curva analítica, com a micropipeta, foram adicionados reagentes na seguinte ordem: água, p-nitrofenol (pNP), cloreto de cálcio ($CaCl_2$) e tris(hidroximetil)aminometano (THAM) na faixa de concentração de 25 a 250 µg de pNP. A leitura foi realizada no comprimento de onda de 420 nm.

3.3 PROCEDIMENTO DA ARILSULFATASE:

O experimento foi aplicado em quintuplicata, utilizando-se 1 g de solo peneirado em cada erlenmeyer, sendo um deles reservado para o controle. O fluxograma (Figura 4) para o preparo do ensaio segue a adição de 4 mL tampão acetato (pH 5,8) e seguido de 1 mL de p-nitrofenol sulfatado (PNS) (0,05 M), exceto no controle.

Figura 4 – Fluxograma do procedimento de Arilsulfatase



A curva analítica foi preparada com o auxílio de uma micropipeta, adicionando-se os reagentes na seguinte ordem: água, pNP, $CaCl_2$ e hidróxido de sódio (NaOH), na faixa de concentração de 25 a 250 µg de pNP. Em seguida, a solução foi filtrada e transferida para uma cubeta, sendo a leitura realizada em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm.

3.4 ANÁLISE DE MINERALOGIA:

A análise de DRX foi realizada em um difratômetro operado a 35 kV e 15 mA, equipado com um detector DTEX/ULTRA. Amostras provenientes dos diferentes tratamentos aplicados às parcelas de solo foram analisadas, sendo a amostra total submetida a uma varredura no intervalo de 2θ de 2° a 60°. Essa etapa ocorreu no Laboratório de Difratometria do Instituto de Geociências da UnB.

3.5 ANÁLISE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL:

As amostras destinadas à análise elementar foram previamente peneiradas numa malha de 2 mm. Para cada determinação, utilizou-se aproximadamente entre 0,5 e 1,0 mg de amostra, disposta em cadinhos de estanho e pesada em uma ultra microbalança de alta precisão (Ultra Microbalance AD6, Perkin Elmer).

A determinação dos teores totais de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram realizadas em um analisador elementar CHN (EA 2400 Series II), equipado com colunas de combustão e de redução operando, respectivamente, a 925 °C e 640 °C. Durante o procedimento, as amostras foram submetidas à combustão em

atmosfera controlada, utilizando hélio como gás de arraste, enquanto oxigênio e nitrogênio auxiliaram nas reações químicas necessárias para a conversão dos elementos em gases detectáveis, uma mistura de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), água (H_2O), nitrogênio (N), pelo equipamento. Após a passagem pelas colunas, os produtos gerados foram quantificados automaticamente pelo sistema de detecção do analisador *(Atkins et al., 2008).*

Previamente às análises, foram realizadas a calibração e verificação das condições operacionais do equipamento por meio da utilização de uma substância padrão de referência, a acetanilida (C_8H_9NO) Os resultados obtidos foram monitorados considerando os limites aceitáveis de erro analítico, garantindo a confiabilidade dos dados experimentais armazenados no software do equipamento. A etapa foi realizada pela Central Analítica, do Instituto de Química, UnB.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo em destaque contempla análises de atividade enzimática (ARIL e GLI), mineralógicas e de COT, com o objetivo de compreender como as diferentes técnicas aplicadas a cinco amostras de solo fornecem variáveis valiosas para o entendimento e monitoramento desses sistemas.

4.1 ANÁLISE ENZIMÁTICA:

Por meio da espectrofotometria UV-Vis, foram determinadas as absorbâncias das soluções padrão de pNP, preparadas em concentrações conhecidas para as enzimas GLI e ARIL. A partir dessas leituras, foram construídas as curvas analíticas para GLI (Equação 1) e ARIL (Equação 2):

$$Y= 0,0105x + 0,040 \quad (1)$$

$$Y= 0,0104x + 0,103 \quad (2)$$

Ambas as equações apresentaram coeficiente de determinação superior a 0,99, indicando que a relação entre os valores obtidos de concentração (x) e sua respectiva absorbância (y) é linear para ambas as enzimas. As equações de regressão obtidas para cada enzima permitem calcular a atividade enzimática das diferentes amostras estudadas (Tabela 1) (ANVISA, 2017).

Tabela 1 – Atividade Enzimática média nas amostras de solo coletadas na Chapada dos Veadeiros

Amostras	β-glicosidase	Arilsulfatase
	μg pNP g^{-1} h^{-1}	
Cerrado (Branco)	30,81 ± 0,84	10,57 ± 0,95
Agrofloresta	29,06 ± 1,12	11,28 ± 7,68
Organossolo	58,82 ± 3,05	96,27 ± 1,57
Pasto Abandonado	44,83 ± 2,16	79,94 ± 8,27
Área Degradada com Remoção de TopSoil	7,73 ± 0,43	< Limite de Detecção

Nota: 5 replicatas para cada amostra analisada.

A comparação das atividades de GLI e ARIL entre os diferentes sistemas de manejo e a área de Cerrado (Branco), por meio do teste t de Student, evidenciou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,001$). A predominância da atividade da ARIL pode indicar uma estratégia metabólica da microbiota voltada à intensificação da mineralização do enxofre orgânico, uma vez que essa enzima é induzida em condições de baixa disponibilidade de sulfato e atua na conversão de compostos orgânicos sulfurados em formas assimiláveis pelas plantas e pelos microrganismos *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2021).*

Embora o presente estudo não tenha determinado os teores de enxofre nem caracterizado a comunidade microbiana, esse comportamento é compatível com áreas em regeneração natural, nas quais ocorre a reorganização gradual da microbiota do solo e o restabelecimento dos ciclos biogeoquímicos. Dessa forma, a elevada atividade da ARIL sugere que, apesar do histórico de perturbação agropecuária, o solo preserva importante capacidade funcional para a ciclagem de nutrientes, evidenciando potencial de resiliência e de recuperação dos processos biológicos *(Mendes et al., 2024; Mendes et al., 2021).*

Entre as amostras analisadas, o Organossolo apresentou as maiores atividades enzimáticas, resultado compatível com suas características de elevado acúmulo de matéria orgânica e maior atividade biológica, no qual há disponibilidade de substrato para a atividade microbiana, além de promover a estabilização e a proteção das enzimas estudadas por meio da formação de complexos organominerais *(Evangelista et al., 2012).*

O Pasto Abandonado, por sua vez, apresentou elevada atividade enzimática, possivelmente decorrente do estresse do solo, que estimula a microbiota a intensificar a mobilização e a aquisição de nutrientes. Esse comportamento contrasta com o observado na Área Degradada com Remoção de TopSoil, onde a retirada da camada superficial reduziu drasticamente a microbiota e a

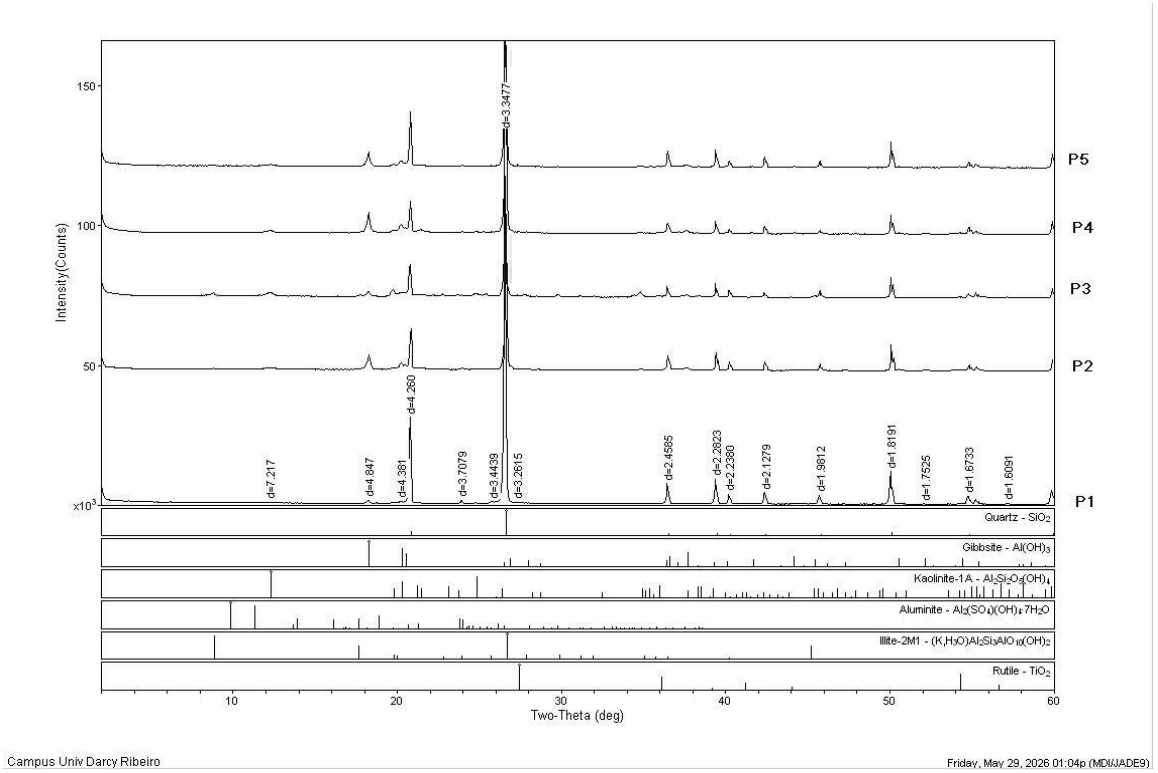
disponibilidade de carbono ativo. Em razão das características desse manejo, a atividade enzimática observada representa, predominantemente, um vestígio da matéria orgânica residual anteriormente presente na área.

Observou-se menor intensidade na atividade de GLI na amostra proveniente da Agrofloresta, indica sua complexidade bioquímica e a auto-organização dessas florestas sucessionais, caráter condizente com um ambiente mais estável, que tende a atingir um estado de fertilidade sistêmica, contendo altos estoques de energia e matéria orgânica, mas com uma baixa velocidade de fluxo devido à alta estabilização do carbono em nichos ecológicos integrados. Enquanto, a atividade de ARIL apresentou-se ligeiramente superior, o que pode estar associado à maior demanda por enxofre, à maior abundância de fungos e à presença de resíduos orgânicos ricos em compostos sulfurados que necessitam ser mineralizados *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021).*

Ao relacionar a atividade média de ARIL com a de GLI, obtidas previamente, encontrou-se, 0,34 para Cerrado (Branco), 0,39 para Agrofloresta, 1,64 para Organossolo, 1,78 para o Pasto Abandonado. A única exceção se dá na análise da Área Degradada com Remoção de TopSoil, na qual o teor de ARIL apresentou valor inferior ao limite de detecção.

4.2 ANÁLISE DE MINERALOGIA:

Figura 5– Difração dos Raios X de amostras de solo coletadas nas Chapada dos Veadeiros.



Legenda: Cerrado (Branco) (P1); Agrofloresta (P2); Organossolo (P3); Pasto Abandonado (P4); Área

Degradada com Remoção de TopSoil (P5).

A predominância de quartzo (SiO_2), caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$) e gibbsita ($Al(OH)_3$), observada em todas as amostras (Figura 5), confirma a natureza altamente intemperizada dos Latossolos coletados da Chapada dos Veadeiros. A literatura indica que a matriz mineral exerce papel importante na adsorção e estabilização das enzimas GLI e ARIL, protegendo-as de proteólise e favorecendo a manutenção da variedade enzimática no solo.

Dessa forma, a composição mineralógica contribui para a interpretação da atividade enzimática observada, como nos Organossolo, em que o elevado teor de matéria orgânica potencializa a formação de associações organominerais e de complexos enzima-compostos húmicos, favorecendo a preservação da memória biológica e da atividade enzimática associada aos ciclos do carbono e do enxofre *(Evangelista et al., 2012; Rodrigues et al., 2022).*

Nesse sentido, também é importante destacar o caráter exclusivamente qualitativo da análise. O DRX tem como objetivo identificar o tipo de matriz sólida, permitindo que os algoritmos sejam ajustados de acordo com o comportamento físico-químico esperado para cada grupo de minerais. Assim, os resultados podem reforçar as classes de suficiência obtidas para a atividade enzimática e o carbono. No presente estudo, entretanto, os solos apresentaram matrizes mineralógicas semelhantes, indicando que as diferenças observadas na atividade enzimática e na composição multielementar não são decorrentes da fração inorgânica do solo *(Evangelista et al., 2012; Rodrigues et al., 2022).*

4.3 ANÁLISE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL:

O analisador elementar foi previamente calibrado de modo a avaliar as condições gerais de funcionamento do equipamento, utilizando-se a substância padrão acetanilida (C_8H_9NO). A análise apresentou erro absoluto de 0,75 % para a leitura de carbono, indicando adequada precisão e confiabilidade analítica para as determinações realizadas. Os resultados obtidos quanto ao COT das amostras reforçam os teores enzimáticos obtidos através da técnica da BioAS e o impacto dos diferentes manejos no solo.

Os tipos de solo que apresentaram os maiores teores de COT foram o Organossolo e Pasto Abandonado, com valores de 47 g kg^{-1} e 20,5 g kg^{-1}, respectivamente. Estes resultados demonstram alta disponibilidade de carbono

orgânico nesses ambientes, a qual está diretamente relacionada à maior atividade média da enzima GLI, associada ao ciclo do carbono. As áreas de Agrofloresta e de Cerrado (Branco) (coletada na fazenda), apresentam valores médios de 14,8 g kg^{-1} e 12,7 g kg^{-1}, respectivamente, indicando maior equilíbrio entre entrada, ciclagem e estabilização da matéria orgânica. Em contrapartida, a Área Degradada com Remoção de TopSoil, provavelmente pela sua retirada da camada superior do solo, apresentou o menor teor de COT, com valor de 10 g kg^{-1}, refletindo o impacto da perda da camada superficial sobre a disponibilidade de matéria orgânica e, consequentemente, sobre a funcionalidade biológica do sistema.

A análise elementar também possibilitou a obtenção de outro parâmetro relevante para a avaliação da qualidade e dos impactos aos quais o solo foi submetido. Os teores de nitrogênio variaram entre 0,9 g kg^{-1} e 3,6 g kg^{-1}.Quando relacionados com os teores de COT, observou-se uma relação C/N variando entre 9,8 e 13,1. A elevação dessa relação está associada à maior susceptibilidade à perda de carbono pelo solo, indicando uma possível intensificação da mineralização da matéria orgânica e potencial emissão de CO_2 para a atmosfera. Neste contexto, as áreas que apresentaram as maiores relações de C/N foram o Organossolo, seguido da Agrofloresta e da Área Degradada com Remoção de TopSoil, sugerindo uma maior dinâmica de decomposição e alterações mais expressivas na ciclagem de carbono da matéria orgânica nesses sistemas.

Considerando que a matéria orgânica do solo contém, aproximadamente, 58 % de carbono em sua composição, emprega-se o Fator de Van Bemmelen (1,724), convencionalmente utilizado para converter os teores de COT em estimativas de matéria orgânica do solo (MOS) *(PRIBYL, 2010).*

$$Y = x * 1{,}724 \qquad (3)$$

Conforme a equação (3) temos a seguinte estimativa para MOS, 21,9 g kg^{-1} para o Cerrado (Branco), 25,5 g kg^{-1} para a Agrofloresta, 81,0 g kg^{-1} para o Organossolo, 35,3 g kg^{-1} para o Pasto Abandonado, e 17,2 g kg^{-1} para a Área Degradada com Remoção de TopSoil *(PRIBYL, 2010).*

Um gradiente de acúmulo de carbono pode ser observado entre os diferentes sistemas de manejo. O Organossolo apresentou o maior teor estimado de matéria orgânica, uma vez que esses solos constituem importantes reservatórios naturais de carbono. O Pasto Abandonado apresentou o segundo maior valor, possivelmente em razão do sistema radicular vigoroso dessas pastagens, que

promove um aporte constante de biomassa subterrânea, favorecendo o acréscimo dos estoques de carbono no solo, mesmo sob pressão de uso *(Evangelista et al., 2012; Mendes et al., 2020)*. Na Agrofloresta, o valor intermediário pode ser atribuído ao aporte contínuo de resíduos vegetais e à maior diversidade de espécies, fatores que contribuem para a estabilização da matéria orgânica. Em contrapartida, a Área Degradada com Remoção de TopSoil apresentou o menor teor de MOS, refletindo a remoção da camada superficial do solo e a redução do aporte de resíduos orgânicos, condições que aceleram a perda de carbono e comprometem a funcionalidade biológica do sistema. Embora amplamente empregado, esse fator também representa apenas uma estimativa *(Mendes et al., 2020; Sobucki et al., 2021).*

5 CONCLUSÕES

O presente estudo, embora inicial, demonstrou que a integração entre indicadores bioquímicos, elementares e mineralógicos constitui uma abordagem eficiente para a avaliação da Saúde do Solo em ambientes submetidos a diferentes condições de uso e degradação na Chapada dos Veadeiros, especialmente quando comparada à utilização isolada desses parâmetros. A associação entre a atividade enzimática, os estoques de carbono e a composição mineralógica permitiu compreender, de forma mais abrangente, os fatores que controlam a funcionalidade biológica desses ecossistemas.

Os resultados indicam que a atividade enzimática não depende exclusivamente dos estoques de carbono, mas da interação entre a dinâmica biológica, a disponibilidade de matéria orgânica e a matriz mineral do solo. Essa integração possibilitou identificar diferenças funcionais entre os ambientes estudados e evidenciou que áreas submetidas a alterações antrópicas ainda podem manter processos biológicos importantes, indicando potencial de recuperação quando submetidas a estratégias adequadas de manejo.

Nesse contexto, o investimento em novas tecnologias, como a BioAS, mostra-se uma estratégia promissora para complementar as análises convencionais de solo, permitindo um diagnóstico mais sensível da funcionalidade biológica e da qualidade ambiental, sobretudo quando associado à análise elementar de carbono e nitrogênio e à caracterização mineralógica, ampliando a compreensão dos processos envolvidos na degradação e na recuperação dos solos tropicais.

Como contribuição científica, este trabalho reforça a importância da

utilização integrada de indicadores biológicos, elementares e mineralógicos para o estudo da SS em ecossistemas altamente intemperizados do Cerrado, bem como da associação entre parâmetros que compõem diferentes áreas do conhecimento. Do ponto de vista prático, os resultados podem subsidiar estratégias de monitoramento, conservação e recuperação de áreas degradadas, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de manejo mais sustentáveis e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, L. L. de S. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil & Tillage Research**, [S.l.], v. 205, p. 104785, 2021.

ATKINS, P.; SHRIVER, D. *Química inorgânica*. 4. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2008. p. 210.

ANVISA. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 166, de 24 de julho de 2017. Dispõe sobre a validação de métodos analíticos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 25 jul. 2017.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 33, p. 147-157, 2009.

CARNEIRO, R. G. et al. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, [S.l.], v. 198, p. 105394, 2024.

DIAS, L. C. P. et al. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, [S.l.], v. 22, n. 8, p. 2887–2903, 2016.

EVANGELISTA, C. R. et al. Atividade enzimática do solo sob sistema de produção orgânica e convencional na cultura da cana-de-açúcar em Goiás. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1251–1262, 2012.

KLEIN, H. S. et al. The growth of the soybean frontier in South America. **Journal of Iberian and Latin American Economic History, Cambridg**e, v. 39, n. 1, p. 1–34, 2021.

LIAO, D. et al. Agroforestry soil organic carbon: microbial top regulation, mineral subsoil dominance. ***Pedosphere***, [S.l.], 2025.

LIMA, T. M. de et al. Diagnose of soil fertility properties of a representative agricultural mesoregion in the Cerrado biome as affected by land use. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.l.], v. 96, n. 4, p. e20240116, 2024.

MENDES, I. de C. et al. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 8, p. 1-11, dez. 2020

MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (ed.). **Soil health and sustainable agriculture in Brazil**. 1. ed. [S.l.]: Wiley; Soil Science Society of America, 2024.

MENDES, I. de C. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at

post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, [S.l.], v. 139, p. 85-93, 2019.

NERO, M. A. et al. Uso de recursos gratuitos de sensoriamento remoto e geoprocessamento para análise do desmatamento no bioma Cerrado em Minas Gerais. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 11, n. 1, p. 866–878, 2025.

NOTARO, K. A. et al. Enzymatic activity, microbial biomass, and organic carbon of Entisols from Brazilian tropical dry forest and annual and perennial crops. **Chilean Journal of Agricultural Research**, [S.l.], v. 78, n. 1, p. 68-78, 2018.

PEREIRA, C. C. et al. The Cerrado crisis: biodiversity, ecosystem services and conservation challenges. **Nature Conservation**, [S.l.], v. 61, p. 29–70, 2026.

PRIBYL, D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, Amsterdam, v. 156, n. 3-4, p. 75–83, 2010.

RODRIGUES, R. N. et al. Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciência Rural**, [S.l.], v. 52, n. 3, p. e20200532, 2022.

SALAZAR-FILLIPPO, A. A. et al. Ecomorphological groups in oribatid mite communities shift with time after topsoil removal – Insight from multi-trait approaches during succession in restored heathlands. ***Applied Soil Ecology***, [S.l.], v. 191, p. 105046, 2023.

SILVA, A. E. O. et al. Soil enzymatic activities in areas with stages and management of forest regeneration from Caatinga. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 405-414, abr./jun. 2018.

SOBUCKI, L. et al. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 45, p. e0210109, 2021.

YU, M. et al. Arylsulfatases: Detection, production, modification and applications. **Biotechnology Advances**, [S.l.], v. 67, p. 108207, 2023