



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Dissertação de Mestrado nº 239

Matheus Pereira Araujo Santos

**BIOINDICADORES ENZIMÁTICOS (β -glicosidase e Arilsulfatase) E TEOR DE
CARBONO EM ORGANOSSOLO EM ÁREA DEGRADADA: VARIAÇÃO
ESPACIAL NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UnB).**

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

Brasília - DF
2025

BIOINDICADORES ENZIMÁTICOS (β -glicosidase e Arilsulfatase) E TEOR DE CARBONO EM ORGANOSSOLO EM ÁREA DEGRADADA: UM ESTUDO ESPACIAL NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UnB).

Matheus Pereira Araujo Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências como requisito para o título de grau de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha (Orientador)

Prof. Dr. Elder Yokoyama (UnB)

Prof. Dra. Débora Nogueira Lopes (UFG)

Brasília - DF
2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com
os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

PP436b Pereira, Matheus
 BIOINDICADORES ENZIMÁTICOS (?-glicosidase e Arilsulfatase)
 E TEOR DE CARBONO EM ORGANOSSOLO EM ÁREA DEGRADADA:
 VARIAÇÃO ESPACIAL NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UnB) / Matheus
 Pereira; orientador Luciano Soares. Brasília, 2025.
 68 p.

 Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)
 Universidade de Brasília, 2025.

 1. Enzimas. 2. Qualidade do solo. 3. Organossolo. 4.
 Beta-glicosidase. 5. Arilsulfatase. I. Soares, Luciano ,
 orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A Universidade de Brasília e ao Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências pela oportunidade e infraestrutura que foram dadas.

Ao meu orientador Luciano Soares da Cunha pela orientação, disposição em ajudar e paciência nos últimos dois anos.

Aos professores Uidemar Moraes Barral, Elder Yokoyama e Fernanda Vasconcelos de Almeida pelas disciplinas ministradas e inúmeras orientações.

Aos técnicos de laboratório Priscila Ferreira Reis (LabMOS/FAV), Myller de Sousa Tonhá (IG), Flávio Henrique Freitas (IG) e Jéssica (AQQUA/IQ) que auxiliaram na execução das análises.

A minha mãe Meire, ao meu pai Amadeu e a minha irmã Sarah pelo apoio incondicional, carinho e oportunidades.

Aos meus queridos e estroinas amigos pelo apoio e pelos momentos inesquecíveis que passamos.

RESUMO

Esta dissertação explora a utilização de enzimas β -glicosidase e a arilsulfatase para avaliar a qualidade do solo em uma área degradada do bioma Cerrado com ocorrência de um organossolo, na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). O estudo integra uma revisão sistemática da literatura sobre indicadores de qualidade do solo e uma pesquisa de campo, analisando parâmetros físico-químicos, biológicos e mineralógicos. A revisão destacou a falta de padronização metodológica e a necessidade de valores de referência para enzimas em diferentes tipos de solo. O estudo de campo revelou variações espaciais entre a atividade enzimática da arilsulfatase com a atividade enzimática da β -glicosidase e o teor de carbono orgânico, apesar da homogeneidade mineralógica, sugerindo que fatores locais e de manejo influenciam esses parâmetros. Conclui-se que a combinação de indicadores biológicos e físico-químicos fornece uma avaliação mais abrangente da qualidade do solo, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável.

Palavras-chave: Qualidade do Solo, Enzimas, Organossolo, β -glicosidase, Arilsulfatase, Cerrado.

ABSTRACT

This dissertation explores the use of β -glucosidase and arylsulfatase enzymes to assess soil quality in a degraded area of the Cerrado biome with an organosol, at Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). The study integrates a systematic literature review on soil quality indicators and field research, analyzing physicochemical, biological, and mineralogical parameters. The review highlighted the lack of methodological standardization and the need for reference values for enzymes in different soil types. The field study revealed spatial variations between arylsulfatase enzymatic activity, β -glucosidase activity, and organic carbon content, despite mineralogical homogeneity, indicating that local and management factors influence these parameters. It is concluded that the combination of biological and physicochemical indicators provides a more comprehensive assessment of soil quality and is essential for the development of sustainable management strategies.

Keywords: Soil Quality, Enzymes; Organosol, β -glucosidase, Arylsulfatase, Cerrado.

LISTA DE SIGLAS

AQUA	Laboratório de Quimiometria e Química Ambiental
CHNS-O	Análise Elementar de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Enxofre e Oxigênio
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAL/UnB	Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília
FAO	Food and Agriculture Organization
FAV	Faculdade de Agronomia e Veterinária
FERTBIO	Amostra padronizada para análise de Fertilidade Química e Microbiológica
IG	Instituto de Geociências
IQ	Instituto de Química
MO	Matéria Orgânica
MUB	Modified Universal Buffer
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNG	p-Nitrofenil- β -D-Glicopiranosídeo
pNP	p-Nitrofenol
PNS	p-Nitrofenil Sulfato
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SPD	Sistema de Plantio Direto
SPR	Sistema de Preparo Reduzido
TCD	Detector de Condutividade Térmica
THAM	Tris-Hidroximetil-Aminometano
TOT	Amostra Total
UnB	Universidade de Brasília

ABREVIações

Abs Média	Absorbância Média
Atv. Enzima	Atividade Enzimática
Conc.	Concentração

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura 1: Número de publicações por ano.....	16
Figura 2: Áreas de pesquisa associadas a publicações com tema central em indicadores de qualidade do solo.....	17

ARTIGO 2

Figura 1: Mapa de localização dos pontos amostrados e da Fazenda Água Limpa.....	41
Figura 2: Curva analítica obtida por meio das leituras de absorbância das soluções.....	42

LISTA DE TABELAS E QUADROS

ARTIGO 1

Quadro 1: Parâmetros delimitadores utilizados na identificação e seleção dos artigos utilizados.....	19
Tabela 1: Resultados dos artigos científicos focados na utilização de enzimas.....	21
Tabela 2: Resultados focados em indicadores de qualidade do solo.....	28

ARTIGO 2

Tabela 1: Coordenadas UTM de todos os pontos de coleta.....	41
Tabela 2: Quantidade de reagentes da curva padrão para β -glicosidase.....	43
Tabela 3: Quantidade de reagentes da curva padrão para Arilsulfatase.....	43
Tabela 4: Resultados da difratometria.....	47
Tabela 5: Valores percentuais de carbono orgânico total obtidos para cada amostra de solo coletada nos oito pontos da área de estudo.....	48
Tabela 6: Valores de absorbância, concentração de p-nitrofenol e atividade enzimática da β -glicosidase em cada amostra de solo.....	49
Tabela 7: Valores de absorbância, concentração de p-nitrofenol e atividade enzimática da Arilsulfatase em cada amostra de solo.....	50

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	11
CAPÍTULO 2: ARTIGO 1 - Bioindicadores enzimáticos (β-glicosidase e arilsulfatase) e teor de carbono em Organossolo em área degradada: um estudo espacial na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).....	13
RESUMO.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4 RESULTADOS.....	20
5 DISCUSSÃO.....	31
5 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35
CAPÍTULO 3: ARTIGO 2 - Bioindicadores enzimáticos (β-glicosidase e arilsulfatase) e teor de carbono em Organossolo em área degradada: um estudo espacial na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).....	38
RESUMO.....	38
1. INTRODUÇÃO.....	39
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
2.1 Área de Estudo.....	40
2.2 Coleta e preparação de solo.....	41
2.3 Análises do solo.....	42
3. RESULTADOS.....	47
4. DISCUSSÃO.....	51
5. CONCLUSÃO.....	53
6. REFERÊNCIAS.....	54
CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO.....	57
CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
APÊNDICE	62

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O Cerrado ocupa uma área de cerca de 2 milhões de km², equivalente a 23% do território brasileiro (Ratter et al. 1997), sendo considerado o segundo maior bioma brasileiro em extensão. Os solos do Cerrado são conhecidos por serem altamente intemperizados, ácidos, pobres em nutrientes e ricos em óxidos de ferro e alumínio (Lopes et al. 1977). Entretanto, além desses solos minerais predominantes, também ocorrem Organossolos, geralmente associados a veredas e ambientes úmidos. Esses solos orgânicos possuem elevada acumulação de matéria orgânica, grande capacidade de retenção de água e importância estratégica para o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade, além de serem altamente suscetíveis à degradação quando drenados ou submetidos a uso inadequado (Santos et al. 2018).

Com a expansão da atividade agropecuária no Cerrado, cresceu a preocupação com a qualidade dos solos desse bioma, tanto por razões econômicas quanto ambientais. Solos saudáveis desempenham papel fundamental no sequestro de carbono, na manutenção da biodiversidade, na regulação dos ciclos hidrológicos e na produtividade agrícola (Embrapa, 2022). Entretanto, o aumento das atividades antrópicas no Cerrado tem intensificado os processos de degradação, exigindo novas estratégias de monitoramento e recuperação ambiental. Nos últimos anos, os indicadores de qualidade do solo passaram a incluir, além de parâmetros físico-químicos, aspectos biológicos, como a atividade enzimática do solo, em especial a β -glicosidase e a arilsulfatase (Sinsabaugh et al. 2008). Essas enzimas, por estarem diretamente associadas aos ciclos do carbono e do enxofre, respectivamente, são ferramentas sensíveis para detectar alterações na qualidade do solo (Bastida et al. 2008), sendo capazes de refletir condições de degradação ou recuperação.

Neste contexto, esta dissertação foi estruturada a partir de dois estudos complementares. O primeiro é uma revisão sistemática da literatura científica sobre enzimas e indicadores de qualidade do solo, principalmente no bioma Cerrado. A partir da aplicação do Método Direto, foram realizadas buscas nas bases Web of Science e Scopus, seguidas por uma análise de co-citação e filtragem dos artigos mais relevantes. Esse trabalho revelou três questões principais: (1) a ausência de padronização nos métodos analíticos; (2) a falta de valores de referência para enzimas em diferentes solos; e (3) a necessidade de integração entre parâmetros físicos, químicos e biológicos para uma avaliação mais precisa da qualidade do solo. O segundo estudo é uma pesquisa exploratória realizada em um organossolo de uma área degradada localizada na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB), no Distrito Federal. Neste trabalho, foram realizadas análises de atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, além de mineralogia e teor de carbono orgânico do solo. Os resultados mostraram que, apesar da homogeneidade mineralógica entre os pontos amostrados, indicando que todos os pontos correspondiam a um mesmo solo, houve uma variação entre as atividades enzimáticas e os teores de carbono, sugerindo que fatores de manejo e ambientais locais são os principais responsáveis pelas diferenças observadas.

Ao articular esses dois estudos, a dissertação busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre o uso de enzimas em áreas degradadas e destacar a relevância dos bioindicadores como instrumentos práticos para monitoramento do solo, especialmente no Cerrado brasileiro.

CAPÍTULO 2: ARTIGO 1

(Publicado em 21/01/2025)

Revista DELOS DOI: 10.55905/rdelosv18.n63-165 ISSN: 1988-5245

Indicadores de Qualidade do Solo que utilizam parâmetros físico-químicos e microbiológicos: Uma revisão Sistemática da Literatura com o Método Direto.

Soil Quality Indicators that use physical-chemical and microbiological parameters: A Systematic Review of the Literature with the Direct Method.

Indicadores de Calidad del Suelo que utilizan parámetros físico-químicos y microbiológicos: Una Revisión Sistemática de la Literatura con el Método Directo.

Matheus Pereira Araujo Santos
Mestrando em Geociências Aplicadas e Geodinâmica
Instituição: Universidade de Brasília (UNB)
Endereço: Brasília – Distrito Federal, Brasil
E-mail: matheuspereirasantos.07024@gmail.com

Luciano Soares da Cunha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade de Brasília (UNB)
Endereço: Brasília – Distrito Federal, Brasil
E-mail: luciano.soares.unb@gmail.com

Uidemar Moraes Barral
Doutor em Produção Vegetal
Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)
Endereço: Brasília – Distrito Federal, Brasil
E-mail: uidemar.barral@unb.br

Fernanda Vasconcelos de Almeida
Doutora em Química
Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Endereço: Brasília – Distrito Federal, Brasil
E-mail: fernandaalmeida@unb.br

Ana Louise Monteiro de Arruda
Graduanda em Química
Instituição: Universidade de Brasília (UNB)
Endereço: Brasília – Distrito Federal, Brasil
E-mail: louiseana67@gmail.com

RESUMO

Indicadores de qualidade do solo são instrumentos de avaliação e acompanhamento muito importantes e práticos em atividades de recuperação de áreas degradadas e monitoramento de áreas agrícolas. Esses indicadores podem incluir parâmetros físicos, químicos e biológicos que fornecem uma visão abrangente sobre o estado de conservação ou degradação do solo. Este trabalho realizou uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre indicadores de qualidade do solo, analisando a evolução do conhecimento científico a partir dos seus fundamentos e principais características. Como técnica de RSL utilizou-se o Método Direto a partir da definição da questão principal: Quais parâmetros físicos, químicos e biológicos são utilizados como indicadores para avaliar a qualidade de solos do bioma Cerrado? Com isso foi realizada a definição das palavras-chave, sua composição em Strings e demais parâmetros delimitadores. As buscas retornaram 104 artigos (Web of Science) e 73 (Scopus). Com esses resultados foi realizada uma análise de co-citação para identificar os artigos com maior força de ligação. Os resultados obtidos para o bioma Cerrado destacam: 1º) Falta de padronização dos métodos analíticos; 2º) Ausência de valores de referência para indicadores microbiológicos em relação ao tipo de solo; 3º) A combinação de diferentes tipos de indicadores permite uma avaliação abrangente da qualidade do solo. Por fim, foi possível afirmar que estudos futuros devem focar na integração de indicadores adaptados a diferentes biomas e condições de uso do solo para um entendimento mais completo para auxiliar em práticas de manejo sustentáveis e na mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Cerrado, Enzimas, Solos, Qualidade do Solo, Estoque de Carbono.

ABSTRACT

Soil quality indicators are very important and practical assessment and monitoring tools for activities involving the recovery of degraded areas and monitoring of agricultural areas. These indicators may include physical, chemical and biological parameters that provide a comprehensive view of the state of soil conservation or degradation. This study conducted a systematic literature review (SLR) on soil quality indicators, analyzing the evolution of scientific knowledge based on their foundations and main characteristics. The SLR technique used was the Direct Method based on the definition of the main question: Which physical, chemical and biological parameters are used as indicators to assess soil quality in the Cerrado biome? This was followed by the definition of keywords, their composition in Strings and other delimiting parameters. The searches returned 104 articles (Web of Science) and 73 (Scopus). With these results, a co-citation analysis was performed to identify the articles with the greatest link strength. The results obtained for the Cerrado biome highlight: 1) Lack of standardization of analytical methods; 2) Absence of reference values for microbiological indicators in relation to soil type; 3) The combination of different types of indicators allows a comprehensive assessment of soil quality. Finally, it was possible to state that future studies should focus on the integration of indicators adapted to different biomes and land use conditions for a more complete understanding to assist in sustainable management practices and in the mitigation of climate change.

Keywords: Cerrado, Enzymes, Soils, Soil Quality, Carbon Stock.

RESUMEN

Los indicadores de calidad del suelo son herramientas de evaluación y seguimiento muy importantes y prácticas en las actividades de recuperación de zonas degradadas y seguimiento de zonas agrícolas. Estos indicadores pueden incluir parámetros físicos, químicos y

biológicos que proporcionen una visión integral del estado de conservación o degradación del suelo. Este trabajo realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) sobre indicadores de calidad del suelo, analizando la evolución del conocimiento científico a partir de sus fundamentos y principales características. Como técnica RSL se utilizó el Método Directo definiendo la pregunta principal: ¿Qué parámetros físicos, químicos y biológicos se utilizan como indicadores para evaluar la calidad de los suelos en el bioma Cerrado? Con esto se definieron las palabras clave, su composición en Strings y otros parámetros delimitantes. Las búsquedas arrojaron 104 artículos (Web of Science) y 73 (Scopus). Con estos resultados se realizó un análisis de cocitaciones para identificar los artículos con mayor fuerza de vínculo. Los resultados obtenidos para el bioma Cerrado destacan: 1º) Falta de estandarización de métodos analíticos; 2º) Falta de valores de referencia para indicadores microbiológicos en relación al tipo de suelo; 3º) La combinación de diferentes tipos de indicadores permite una evaluación integral de la calidad del suelo. Finalmente, se pudo afirmar que los estudios futuros deberían centrarse en la integración de indicadores adaptados a diferentes biomas y condiciones de uso de la tierra para una comprensión más completa que ayude en prácticas de gestión sostenible y mitigación del cambio climático.

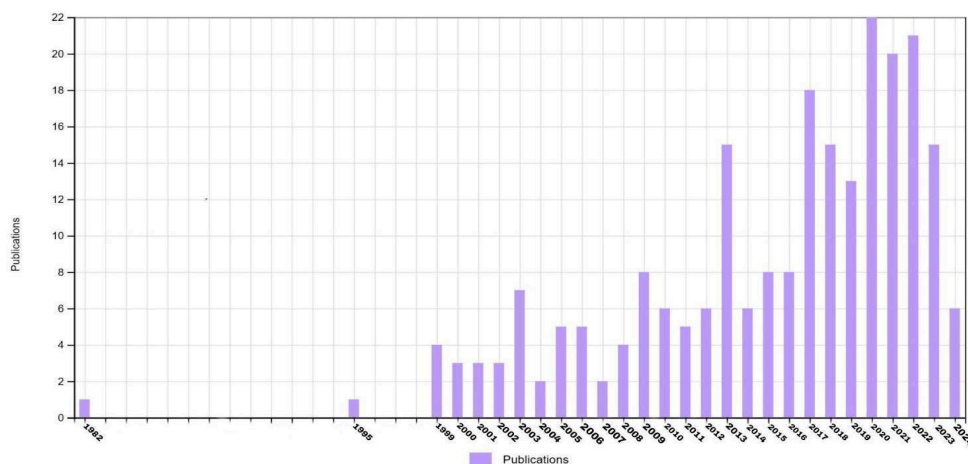
Palabras clave: Cerrado, Enzimas, Suelos, Calidad del Suelo, Stock de Carbono.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural importante para os seres vivos devido ao fato de ser responsável por sustentar diversas atividades antrópicas e naturais, incluindo a produção de alimentos, construção de infraestruturas, regulação dos ciclos hidrológicos, sequestro de carbono e preservação da biodiversidade (Santos M.P.A. 2023). Porém, assim como vários recursos presentes na superfície do planeta Terra, também está sujeito à degradação, afetando consideravelmente a sua capacidade de cumprir com suas funções ambientais.

Estudos com indicadores de qualidade cada vez mais precisos vêm sendo desenvolvidos devido à importância ambiental do solo e sua relação com a produção de alimentos a nível mundial (Peixoto *et al.* 2010; de Carvalho Mendes *et al.* 2012; Sobucki *et al.* 2021). A série temporal de publicações do banco de dados Web of Science mostra claramente o aumento do interesse nesse tema, com 4 artigos publicados em 1999 e um ápice de 22 publicações em 2020, resultando em um aumento de 450%. É importante salientar que muitos desses artigos focaram-se na análise de solos do Cerrado brasileiro, que nas últimas décadas se tornou uma das maiores fronteiras agrícolas do mundo.

Figura 1: Número de publicações por ano, começando em 1982 e terminando em 2024. Apesar do número de publicações não apresentar um crescimento constante, a partir de 2018 houve um aumento muito expressivo em relação a anos anteriores.



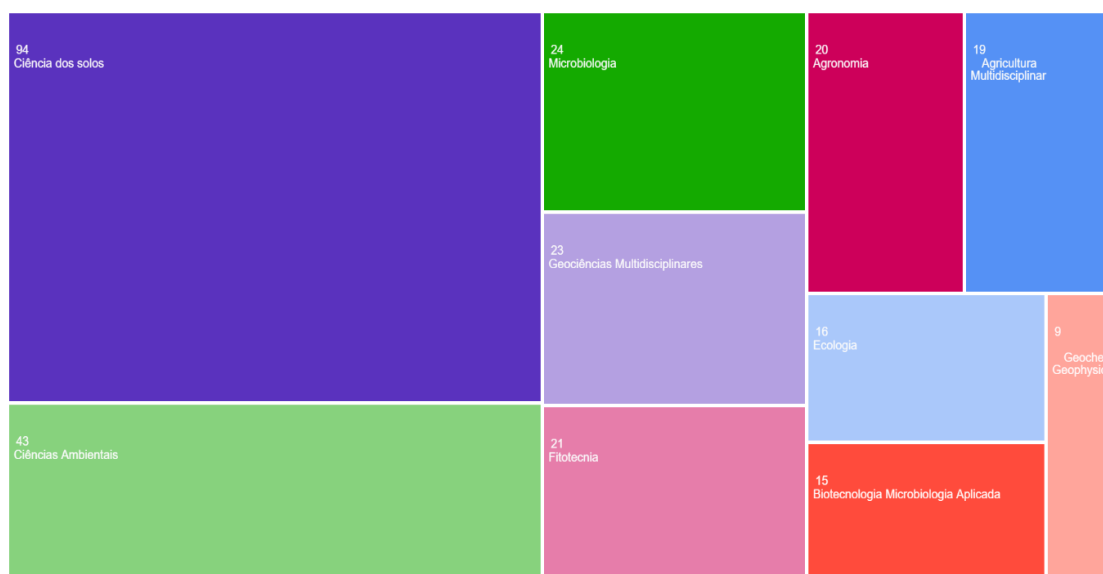
Fonte: Web of Science

Um indicador de qualidade do solo pode ser definido como uma propriedade mensurável que influencia a capacidade de um solo de desempenhar uma determinada função, com esse indicador podendo ser físico, químico ou biológico (Acton et al. 1993). A combinação de diferentes indicadores de qualidade pode fornecer um entendimento mais abrangente e preciso da saúde do solo (de Carvalho Mendes et al. 2021), usando para isso análises de uma diversidade de parâmetros como atividade enzimática (Bandick et al. 1999; Kandeler et al. 1999; Acosta-Martínez et al. 2007; Stott et al. 2009; de Castro Lopes et al. 2013; Vinhal-Freitas et al. 2013; Vinhal-Freitas et al. 2017; de Castro Lopes et al. 2018; de Carvalho Mendes et al. 2019; de Carvalho Mendes et al. 2021), biomassa microbiana (Anderson et al. 1993; Kandeler et al. 1999; Gil-Sotres et al. 2005; Vinhal-Freitas et al. 2013; de Carvalho Mendes et al. 2019) e pH (Anderson et al. 1993, Vinhal-Freitas et al. 2017, de Carvalho Mendes et al. 2021), com cada um sendo influenciado por outros parâmetros como mineralogia, textura do solo e matéria orgânica.

Entretanto, a interpretação de vários indicadores não é algo trivial e necessita de mais estudos devido à complexidade de padronização para diferentes tipos de solo, práticas de manejo e variação espacial. A ausência de protocolos para amostragem e análises laboratoriais é um fator determinante para essa dificuldade, muito por causa da multidisciplinaridade que envolve o tema (Gil-Sotres et al. 2005, Batista et al. 2008). Essa diversidade pode ser percebida quando se analisa a quantidade de artigos publicados por áreas de pesquisa, com trabalhos tanto da área ambiental quanto da área agrícola (Figura 2). Isso indica que os estudos sobre qualidade do solo são relevantes não apenas para a produção

agrícola, mas também para a sustentabilidade ambiental, a conservação da biodiversidade e para o entendimento de processos ecológicos importantes.

Figura 2: Áreas de pesquisa associadas a publicações com tema central em indicadores de qualidade do solo. As áreas do conhecimento que mais publicaram artigos foram a Ciência dos Solos (94) e Ciências Ambientais (43), além de Microbiologia, Geociências Multidisciplinares, Fitotecnia, Agronomia, Ecologia, entre outros. A quantidade elevada de publicações ocorrendo em diversas áreas evidencia a multidisciplinaridade do tema.



Fonte: Web of Science, 2024

Diante disso, faz-se necessário o desenvolvimento de uma Revisão Sistemática de Literatura, com este estudo focando na abordagem dos principais indicadores de qualidade do solo a partir da evolução do conhecimento científico nesta área. Além disso, são discutidas as vantagens e limitações dos indicadores utilizados e suas aplicações práticas na avaliação da qualidade dos solos do bioma Cerrado.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Uma Revisão Sistemática de Literatura é uma técnica de investigação científica que tem como objetivo reunir, avaliar criticamente e conduzir uma síntese dos resultados de múltiplos estudos primários (Benefield, 2003). Entende-se por estudos primários os artigos científicos que fornecem os dados ou evidências empíricas que serão analisados e sintetizados na revisão. Com essa técnica é possível identificar lacunas de conhecimento em um determinado tema, resumir estudos relevantes e realizar uma análise qualitativa dos dados

extraídos (Rasol et al. 2022), detectando até mesmo tendências e direções de pesquisas futuras.

Como parte do método para elaboração de uma Revisão Sistemática de Literatura tem-se: (1) Elaboração de um protocolo básico, que inclui a formulação da questão principal da pesquisa, definição de palavras-chave, seleção de bases de dados, estabelecimento de parâmetros delimitadores e critérios de inclusão e exclusão; (2) Busca de artigos nas bases de dados; (3) Seleção dos artigos encontrados de acordo com critérios de inclusão e exclusão; (4) Extração dos dados usando uma tabela síntese; e (5) Análise dos dados extraídos. Esses passos são fundamentais para garantir que a revisão sistemática seja rigorosa, explícita e eficaz na redução da margem de parcialidade na condução do estudo, um problema comum em outros métodos de revisão (Benefield, 2003; Rasol et al. 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão sistemática presente neste estudo sobre indicadores de qualidade do solo teve como princípio o estabelecimento de um quadro de parâmetros delimitadores com base em palavras-chave relacionadas ao tema que foram usadas para pesquisas nas bases de dados científicos Web of Science (<http://webofscience.com/>) e Scopus (<http://scopus.com/>). A seleção das palavras-chave foi feita em duas etapas. Na primeira etapa utilizou-se palavras relacionadas ao tema em bases não estruturadas (Google Scholar) e em artigos já conhecidos sobre o tema. Na 2ª etapa utilizou-se as palavras-chave já identificadas nas bases WOS e Scopus como uma busca preliminar. A partir dos resultados iniciais foram identificadas novas palavras-chave. Com isso, foram construídas composições de palavras-chave (*Strings*) para otimizar as buscas. As *strings* com maior número de resultados encontrados foram as selecionadas para realizar a busca final dos artigos abordados nesta revisão (Quadro 1).

A busca pelas *strings* selecionadas resultou em uma ampla variedade de artigos potencialmente relevantes para o tema, cuja lista com registros completos foi exportada em formato “.txt” para o software VosViewer com o objetivo de realizar uma análise de cocitação para se obter os trabalhos mais mencionados entre os autores. Ao final, foi exportada uma lista com 104 artigos provenientes do Web of Science e 73 artigos da Scopus, totalizando 177 artigos.

A etapa seguinte foi realizar uma filtragem com base em critérios de inclusão e exclusão, considerando a relevância para o tema de pesquisa. Artigos que não estavam alinhados com o tema ou que apresentavam baixa qualidade metodológica foram excluídos, restando 57. Em seguida, utilizou-se o software Mendeley Reference Manager (Elsevier,

v.2.114) para organizar os artigos selecionados em grupos temáticos, o que facilitou a categorização e a análise dos resultados. Desses 57 artigos, 35 foram desconsiderados por entrarem em temáticas secundárias, tornando a revisão mais abrangente do que o necessário. Essas temáticas incluem desde a dinâmica do sequestro de carbono e impactos no clima global até matéria orgânica e suas interações com a parte mineral do solo. Sendo assim, os 22 artigos restantes foram separados em dois grupos com as temáticas: (1) enzimas e solo e (2) de indicadores de qualidade de solo.

Quadro 1: Parâmetros delimitadores utilizados na identificação e seleção dos artigos utilizados nesta RSL sobre indicadores de qualidade do solo.

Itens	Parâmetros
Questão Principal	Quais parâmetros físicos, químicos e biológicos podem ser utilizados como indicadores para avaliar a qualidade de solos do bioma Cerrado?
Palavras-chave estruturadas (strings)	TS=(cerrado AND enzymes AND soils) OR TS=(Soil quality AND enzymes AND Carbon Stock).
Base de Dados	Web of Science e Scopus.
Critérios de Inclusão (I)/Exclusão (E)	Tipo de publicação: Artigos disponíveis no Portal CAPES. Idioma: Inglês. Área da pesquisa: Sem restrição. (I) Pesquisas relacionadas a indicadores de qualidade do solo e enzimas. (I) Artigos científicos completos disponíveis no Portal CAPES (E) Não está no idioma selecionado; (E) Registros sem abstract. (E) Teses e Dissertações.

Fonte: Elaborado pelos autores

Ao final, foi elaborada uma tabela-síntese padronizada para os dois grupos de artigos para uma melhor visualização de todos os pontos relevantes dos estudos. As tabelas estão estruturadas em colunas que incluem informações importantes como: referência do artigo, objetivo, bioma e tipo de solo, uso do solo, parâmetros físico-químicos analisados, parâmetros biológicos analisados, principais resultados e conclusões. Durante esta etapa, foi testado o uso de inteligência artificial no processo de extração dos dados dos artigos por meio da ferramenta Scispace (<https://typeset.io/>), porém como não houve um resultado satisfatório, o processo acabou sendo realizado de forma manual.

4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no grupo de artigos científicos focados na temática de enzimas e solo. O grupo é composto por 12 artigos publicados entre os anos de 1992 e 2017, representando 54,5% do total de artigos utilizados nesta RSL e abordando desde solos de regiões temperadas até solos do bioma Cerrado.

Predominantemente, os artigos têm o objetivo de pesquisar as comunidades microbianas do solo, examinando particularmente o impacto de diferentes práticas agrícolas na atividade enzimática. Também identificam e validam parâmetros bioquímicos e biológicos, o que inclui enzimas e biomassa microbiana (Bandick et al. 1999; Kandeler et al. 1999; Acosta-Martínez et al. 2007; de Castro Lopes et al. 2015), como indicadores confiáveis para avaliar a qualidade do solo. Fornecem dados que podem ser usados para desenvolver práticas de manejo que melhoram a saúde do solo e a produtividade agrícola, oferecem estratégias para preservar a matéria orgânica e o carbono no solo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, além de destacarem áreas onde mais pesquisas são necessárias, como a regulação microbiana da síntese, secreção e sobrevivência das enzimas (Burns et al. 2013) e o papel dos filossilicatos na proteção do carbono (Barre et al. 2014).

Tabela 1: Resultados dos artigos científicos focados na utilização de enzimas. Obs: COT (Carbono Orgânico Total); MO (Matéria Orgânica); CTC (Capacidade de Troca de Cátions); SPR (Sistema de Preparo Reduzido).

Referência	Objetivo	Bioma (Tipo de Solo)	Uso do Solo	Parâmetros Físico-Químicos	Parâmetros Biológicos	Principais Resultados	Conclusões
Dick R.P. 1992.	Revisar os efeitos de longo prazo dos sistemas agrícolas nos parâmetros bioquímicos do solo.	-	Áreas Agrícolas	Granulometria, concentração de nutrientes e pesticidas na superfície do solo.	Enzimas urease, fosfatase ácida, protease, arilsulfatase, invertase, amidase e desidrogenas e, biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes.	Correções do solo e rotação de culturas são cruciais para manter a atividade microbiana do solo. Fertilizantes inorgânicos podem aumentar a atividade biológica do solo	A variação dos parâmetros biológicos entre os tipos de solo torna difícil a medição independente sem um controle ou tratamento comparativo.

Bandick et al. 1999.	Investigar os efeitos do manejo de campo nas enzimas e determinar indicadores sensíveis de qualidade do solo.	Oeste úmido e semi-árido leste do Oregon.	Cultivo de vegetais parcelas com uso de resíduos.	Hidrólise da FDA, que é uma medida da atividade microbiana no solo.	β -glucosidas e, β -galactosidase, amidase, arilsulfatase, desaminase, hidrólise de diacetato de fluoresceína, invertase, celulase e urease.	As atividades enzimáticas são mais altas em campos de relva contínua e em sistemas cultivados com cobertura ou resíduos orgânicos.	A desaminase não foi um bom indicador da qualidade. A β -glucosidase é um ensaio relevante para refletir os efeitos do manejo do solo.
Kandeler et al. 1999.	Investigar a influência do preparo do solo nas propriedades microbianas e avaliar a dinâmica temporal da biomassa microbiana e das atividades enzimáticas.	(Chernossolo Háplico).	Área Agrícola.	Mineralização de N, atividade de protease, xilanase e fosfatase alcalina.	Biomassa microbiana	Biomassa e processos microbianos variam com o tipo de preparo do solo e data de amostragem. A xilanase foi maior na camada superficial do solo em SPR..	Atributos biológicos são ferramentas confiáveis para detectar mudanças precoces na dinâmica e distribuição dos processos microbianos nos solos.
Baldock et al. 2000.	Compreender o papel da matriz do solo e dos minerais na proteção da MO contra	-	-	Matriz do solo, morfologia e estrutura química da MO, natureza	Capacidade dos organismos decompositores de degradar e mineralizar	Os minerais do solo protegem a MO contra a oxidação biológica. A estabilização	Partículas minerais e matriz do solo controlam o conteúdo de MO.

	ataque biológico.			química da fração mineral, status de base e teores de óxidos de Al e Fe.	MO..	da MO depende das propriedades minerais e da estrutura orgânica.	
Kaiser et al. 2000	Discutir a possibilidade de preservação sortiva da matéria orgânica do solo e avaliar a relação entre matéria orgânica do solo e superfícies minerais.	Floresta Temperada (Espodossolos, Vertissolos, Molissolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos).	Área florestal.	Sorção de MO, propriedades de superfície da fase mineral sorvente e óxidos e hidróxidos de Al e Fe.	Concentração de MO do solo associada à matriz mineral.	Tanto a concentração de MO associada à matriz mineral, quanto a sorção de MO dissolvida estão relacionadas a fases minerais reativas, como oxihidróxidos de Al e Fe.	A preservação da matéria orgânica no solo é influenciada pela estrutura química da MO dissolvida e pelas propriedades da matriz mineral.
Acosta-Martínez et al. 2007.	Avaliar enzimas envolvidas na ciclagem de (C), (N), (P) e (S) em diferentes solos.	Floresta Tropical (Latossolo, Argissolos e Cambissolo).	Pastagem, floresta e áreas agrícolas.	pH do solo.	β -glicosidase, α -galactosidase, β -glucosaminidas, fosfatase ácida e arilsulfatase.	Latossolo tem maiores valores em todas as enzimas. Argissolo tem maior fosfatase ácida e arilsulfatase.	Enzimas são bons indicadores de qualidade do solo e refletem as principais reações bioquímicas de transformação

							o de nutrientes C, N, P e S.
Sinsabaugh. et al. 2008.	Conduzir uma análise em escala global das atividades enzimáticas do solo e determinar a relação entre elas e concentração de MO.	-	-	Clima e pH do solo.	Enzimas e potencial enzimático de hidrolização da MO do solo vinculado à disponibilida de de substrato.	O potencial enzimático do solo para hidrolisar MO está relacionado à disponibilida de de substrato, pH e demanda microbiana de nutrientes.	As atividades enzimáticas estão relacionadas ao pH do solo e pouco relacionadas à temperatura média anual e à precipitação.
Eusterhues et al. 2011.	Identificar combinações preferenciais de matéria orgânica com alguns grupos minerais para avaliar processos pedogenéticos.	Floresta Temperada (Espodossolo Háptico, Cambissolo Distrófico).	Áreas Florestais.	Granulometria, pH do solo, CTC, COT e Óxido de Fe.	-	Óxidos de Fe foram mais correlacionados estatisticamente com o C orgânico ligado ao minerais. Associações organominerais dos solos superficiais contêm maior MO.	No espodossolo háptico e cambissolo distrófico, os óxidos de Fe foram as fases minerais mais vitais para formação de associações organominerais.
Burns et al. 2013.	Investigar as maneiras pelas quais os	-	-	Temperatura, potencial hídrico e pH do solo	Biomassa microbiana e atividades enzimáticas	Comunidades microbianas contribuem	Mais informações são necessárias

	micro-organismos e suas enzimas superam as propriedades inibitórias da matriz do solo.				extracelulares.	para a liberação de nutrientes em solos reumedecidos. A detecção de quórum regula a secreção enzimática.	sobre a regulação microbiana da síntese, secreção e sobrevivência das enzimas. O uso das enzimas pode facilitar a biorremediação e o sequestro de C.
Barre et al. 2014.	Revisar a capacidade de diferentes filossilicatos de proteger o estoque de carbono.	-	-	pH do solo e mineralogia dos filossilicatos.	COT	A mineralogia do filossilicato influencia a estabilização do C orgânico, enquanto CTC e área específica afetam a proteção.	Filossilicatos podem influenciar a proteção do estoque de carbono, mas seu papel ainda exige mais investigação.
De Castro Lopes et al. 2015.	Avaliar os efeitos da secagem ao ar e armazenamento de enzimas de	Cerrado (Latosolo Argiloso)	Áreas cultivadas e não cultivadas	Granulometria pH do solo Concentração de Al, Ca, Mg, K e P.	COT β -glucosidase e, fosfatase ácida e arilsulfatase.	A β -glucosidase e arilsulfatase sofrem pouca influência nos	A secagem ao ar pode ser usada na análise da β -glucosidase e da arilsulfatase

	Latossolos do Cerrado.					processos analisados. Fosfatase ácida sofre grande influência.	em latossolos.
Kumar et al. 2017.	Investigar os efeitos dos agregados do solo na atividade enzimática extracelular (EEA).	(Luvisolo Háplico).	Cultivo de milho.	Tamanho dos agregados, teor de umidade, C e N total, pH do solo.	β -1,4-glicosidase, β -1,4-N-acetilglucosaminidase, L-leucina aminopeptidase, fosfatase ácida. Biomassa microbiana.	Raízes estimulam atividade microbiana e enzimática no solo. Biomassa microbiana diminui com agregados menores, porém enzimas específicas tem o efeito oposto.	A atividade enzimática é mais alta em microagregados livres devido ao melhor suprimento de exsudatos radiculares, água, nutrientes e oxigênio.

Fonte: Elaborado pelos autor

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no grupo de artigos científicos focados na temática de indicadores de qualidade. O grupo é composto por 10 artigos publicados entre os anos de 1993 e 2021, representando 45.4% do total de artigos utilizados nesta RLS.

Todos os artigos focam na identificação e utilização de indicadores de qualidade para monitorar o solo em diversos tipos pedológicos e de uso, especialmente no Cerrado brasileiro (de Castro Lopes *et al.*, 2013; Vinhal-Freitas *et al.*, 2013; Vinhal-Freitas *et al.*, 2017; de Castro Lopes *et al.*, 2018; de Carvalho Mendes *et al.*, 2019; de Carvalho Mendes *et al.*, 2021).

Nesses artigos são recomendados alguns indicadores práticos e sensíveis para monitorar a qualidade do solo, como as enzimas β -glucosidase, arilsulfatase e fosfatase (Stott *et al.*, 2009; Vinhal-Freitas *et al.*, 2013; de Carvalho Mendes *et al.*, 2019; de Carvalho Mendes *et al.*, 2021), biomassa microbiana (Vinhal-Freitas *et al.*, 2013) e coeficiente metabólico de CO_2 (Anderson *et al.*, 1993). Ressaltam que há a necessidade de padronização dos métodos analíticos e a compilação de bancos de dados para a comparação e interpretação consistente dos resultados, melhorando a confiabilidade das avaliações de qualidade do solo (Gil-Sotres *et al.*, 2005; Batista *et al.*, 2008).

Alguns estudos atentam para o impacto das práticas de manejo do solo, como sistemas de plantio direto (SPD), plantio convencional e monoculturas, sobre os indicadores de qualidade do solo (Vinhal-Freitas *et al.*, 2017; Stott *et al.*, 2009). Estes estudos concluíram que o plantio direto tende a melhorar os indicadores biológicos de qualidade do solo, enquanto outros sistemas, como o cultivo intensivo de cana-de-açúcar e sistemas florestais de pinheiros, causam degradação ou perda de carbono orgânico.

Tabela 2: Resultados focados em indicadores de qualidade do solo. Obs: SPD (Sistema de Plantio Direto); SF (Sistema Florestal); CTC (Capacidade de Troca de Cátions).

Referência	Objetivo	Bioma (Solo)	Uso do Solo	Parâmetros Físico-Químicos	Parâmetros Biológicos	Principais Resultados	Conclusões
Anderson et al. 1993.	Investigar o CO ₂ como parâmetro de mudanças bioenergéticas.	Floresta temperada	-	Quantificação de CO ₂ - pH do solo	Biomassa Microbiana	Biomassa microbiana e as taxas de de CO ₂ são mais baixas em condições ácida.	Coefficiente metabólico de CO ₂ é parâmetro útil em mudanças bioenergéticas.
Gil-Sotres et al. 2005.	Avaliar a qualidade do solo usando propriedades bioquímicas.	-	-	Capacidade de mineralização do nitrogênio.	Biomassa microbiana, atividade enzimática de fosfatase, urease e β -glucosidase.	Existem contradições sobre a eficácia das propriedades bioquímicas.	Necessidade de padrões em métodos analíticos.
Bastida et al. 2008.	Revisar índices de qualidade do solo.	-	-	Densidade aparente, agregados estáveis, cdt e pH.	Quociente met., biomassa microbiana, desidrogenase, fosfatase.	Parâmetros bioquímicos são úteis para avaliar a qualidade do solo.	Pouca padronização em avaliar a qualidade do solo.
Stott et al. 2009.	Algoritmo de descrever a atividade de β -glucosidase.	Campos (Solos siltosos).	Área agrícola de trigo e girassol.	Textura do solo.	Teor de Carbono Orgânico, teor de matéria orgânica e enzima	A β -glucosidase é sensível às condições ambientais.	A inclusão da β -glucosidase aumenta a sensibilidade da avaliação da qualidade do

					β -glucosidase.		solo.
de Castro Lopes et al. 2013.	Apontar valores de referência para indicadores microbianos.	Cerrado (Latos. Vermelho Distrófico)	Plantio de soja e milho.	Nível de P do solo e respiração basal do solo.	Teor de COT Enzimas.	Solos produtivos associado à biomassa microbiana, respiração e atividade enzimática.	Atributos microbianos do solo são indicadores de mudanças na qualidade do solo.
Vinhal-Freitas et al. 2013.	Comparar impactos do uso da terra nos indicadores.	Cerrado (Latossolo Vermelho Argiloso).	Área de plantação.	Carbono orgânico do solo, nitrogênio e fósforo.	Carbono da biomassa microbiana e enzimas β -glicosidase e desidrogenase.	O SPD impacta positivamente os indicadores.	Recomenda-se β -glucosidase e carbono de biomassa microbiana.
Vinhal-Freitas et al. 2017.	Avaliar os efeitos do uso da terra e da textura do solo sobre indicadores de qualidade no bioma Cerrado.	Cerrado (Latossolo Vermelho Distrófico).	Cerrado nativo, pastagens e agroecossistemas de cana-de-açúcar.	Textura do solo, pH do solo e concentração de Al e N.	Atividade microbiana, enzimas β -glucosidase, urease, fosfatase e arilsulfatase	O cultivo canavieiro tem maior impacto nas frações orgânicas do solo. O solo argiloso é mais sensível ao uso da terra do que o franco-argilo-arenoso.	As classes texturais do solo são importantes na avaliação da função e qualidade do solo em ecossistemas tropicais.
De Castro Lopes et al. 2018.	Monitorar a variação temporal de biomassa microbiana e	Cerrado (Latossolo Vermelho Distrófico).	Área agrícola (soja).	-	Carbono Orgânico Total Enzimas arilsulfatase,	Arilsulfatase e fosfatase ácida apresentaram baixa	Independente do sistema de manejo, biomassa microbiana,

	enzimas em um conjunto de tratamentos sob SPD e sob plantio convencional .				fosfatase ácida e β -glucosidase.	variação temporal. Houve aumentos consistentes de β -glucosidase sob SPD.	arilsulfatase e fosfatase ácida apresentaram baixa variação temporal.
De Carvalho Mendes et al. 2019.	Definir limites críticos para qualidade do solo utilizando COT e enzimas.	Cerrado (Latossolo e Argiloso).	Parcelas experimentais e fazendas comerciais.	COT	Biomassa microbiana β -glucosidase, arilsulfatase, fosfatase ácida e desidrogenase	A amostragem seca ao ar preservou a ordenação dos tratamentos.	As determinações de enzimas do solo são mais vantajosas e podem ser realizadas diretamente em amostras de solo secas ao ar.
De Carvalho Mendes et al. 2021.	Avaliar as relações entre o índice de qualidade e a produtividade e acumulada relativa de grãos e o C orgânico.	Cerrado (Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso).	Área agrícola de milho e soja.	pH do solo, concentração de P e K e CTC	Enzimas β -glicosidase e arilsulfatase	O índice de qualidade proposto associou-se positivamente com a produtividade relativa acumulada de grãos.	A combinação de indicadores químicos e biológicos em diferentes funções do solo e no SQI mostrou-se uma estratégia simples e útil para avaliar a qualidade em latossolos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

5 DISCUSSÃO

Antes da recente adoção de indicadores biológicos na avaliação da qualidade do solo, os indicadores físico-químicos eram as principais ferramentas para esse trabalho, com as análises de agregados do solo, superfícies minerais, pH, textura do solo, teor de carbono e concentração de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, sendo bastante usadas (Anderson et al. 1993; Stott et al. 2009; Vinhal-Freitas et al. 2013; de Carvalho Mendes et al. 2019). O pH é o parâmetro físico-químico mais utilizado nas análises de qualidade devido ao fato de ser sensível a uso de corretivos, águas residuais e a sua facilidade de medição (Bastida et al. 2008), porém é mais útil em solos agrícolas do que naturais (Acosta-Martínez et al., 2007; Eusterhues et al. 2011; Burns et al. 2013; de Carvalho Mendes et al. 2021). Isso pode ser explicado pelo fato do pH apresentar uma grande variação em solos naturais sem necessariamente indicar problemas ou degradação ambiental, enquanto em solos agrícolas o pH é reflexo direto do manejo e tem um impacto mais direto na produção e qualidade.

A estabilidade dos agregados do solo é outro parâmetro usado e serve principalmente para verificar a resistência do solo à erosão. Além disso, este fator pode ser correlacionado com parâmetros biológicos (Kumar et al. 2017), pois microagregados livres contribuem para uma maior atividade enzimática no solo devido ao melhor suprimento de exsudatos radiculares, água, nutrientes e oxigênio, podendo proteger a matéria orgânica. Entretanto, a análise dos agregados é mais útil em solos agrícolas do que em solos naturais (Bastida et al. 2008), pois é mais sensível a manejos mais abruptos sobre a estrutura do solo, algo que não acontece tanto em condição sem atividade agrícola mecanizada.

A literatura abordada vem sustentando que os indicadores microbiológicos têm se mostrado eficientes na avaliação da qualidade do solo devido a sua sensibilidade na detecção de pequenas mudanças que ocorram no solo (Sinsabaugh et al. 2005; Stott et al. 2009; Burns et al. 2013). Isso fez com que esses indicadores fossem usados para analisar os impactos do uso da terra sobre os solos, especialmente no Cerrado (Vinhal-Freitas et al. 2013; de Castro Lopes et al. 2018). Esses estudos mostraram que a atividade microbiana e enzimática pode indicar o tipo de uso e manejo mais adequado para preservar a saúde do solo. O plantio direto, por exemplo, se destacou como a melhor opção em comparação com outros tipos de manejo. Entretanto, as pesquisas iniciais com indicadores não apresentavam uma padronização de procedimentos nas análises (Bandick et al. 1999; Acosta-Martínez et al. 2007; Vinhal-Freitas et al. 2013; Kumar et

al. 2017; de Castro Lopes et al. 2018). Essas diferenças de manuseio de amostras e técnicas diferentes de pré-tratamento em laboratório eram responsáveis por causar uma elevada variabilidade nos resultados, impactando na interpretação realizada em diferentes laboratórios (Gil-Sotres et al. 2005). Além disso, a ausência de valores de referência para esses indicadores fazia com que pesquisadores fossem obrigados a realizar comparações entre diferentes tratamentos, algo que dificultava a inclusão desse parâmetro em análises rotineiras (Dick R.P. 1992).

Alguns trabalhos recentes se dedicaram à determinação de padrões de pré-tratamento e valores de referência, especialmente em solos do bioma Cerrado (de Castro Lopes et al. 2013; de Carvalho Mendes et al. 2019). Um desses trabalhos traz o conceito de amostras de solo FERTBIO (de Carvalho Mendes et al. 2019), que padroniza o tempo de amostragem e pré-tratamento da amostra para análises de fertilidade química do solo (FERT) e microbiológica (BIO). Ele resultou no estabelecimento de tabelas com limites críticos para indicadores microbiológicos aplicados a amostras de solo secas ao ar provenientes de Latossolos Vermelhos Distróficos argilosos do Cerrado, facilitando a interpretação de valores individuais de indicadores microbianos independente de um controle ou tratamento comparativo. Por outro lado, pelo fato de ser aplicado a um tipo de solo e bioma específico, a interpretação dos indicadores microbianos precisa ser ajustada regionalmente.

Entre os indicadores microbiológicos mais eficientes e analisados, destacam-se as enzimas. Estes indicadores são proteínas que catalisam reações bioquímicas do solo, vistas como essenciais para a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica. Atualmente, existe uma ampla gama de enzimas utilizadas (β -glucosidase, Arilsulfatase, Urease, Fosfatase Ácida, Desidrogenase), mas a β -glucosidase, do ciclo do carbono, e a arilsulfatase, do ciclo do enxofre, destacam-se entre elas. Em estudos na última década, essas enzimas ganharam maior atenção (Vinhel-Freitas et al. 2013; de Castro Lopes et al. 2015; Kumar et al. 2017; de Castro Lopes et al. 2018; de Carvalho Mendes et al. 2021) devido ao seu baixo custo, eficiência para a detecção de mudanças e por estarem associadas à processos essenciais do solo, como decomposição da matéria orgânica e liberação de íons de sulfato, respectivamente. Um dos importantes avanços laboratoriais foi a adoção do método de secagem ao ar, que potencializa os efeitos positivos do uso de enzimas devido ao fato de manter a amostra estável por um longo período e facilitar o manuseio e armazenamento sem prejudicar o

resultado da análise (Bandick et al. 1999; de Castro Lopes et al. 2015; de Carvalho Mendes et al. 2019). Devido a isso, as enzimas estão sendo usadas para estudos em muitos lugares do mundo e apresentando resultados favoráveis, incluindo nos Estados Unidos (Bandick et al. 1999), na América Central (Acosta-Martínez et al. 2007), na Alemanha (Eusterhues et al. 2011; Kumar et al. 2017) e no Brasil (de Castro Lopes et al. 2015; de Castro Lopes et al. 2013; Vinhal-Freitas et al. 2013; de Castro Lopes et al. 2018; de Carvalho Mendes et al. 2019; de Carvalho Mendes et al. 2021).

No cerrado brasileiro, o uso da β -glucosidase e da arilsulfatase demonstrou resultados satisfatórios principalmente para monitoramento de mudanças no solo em resposta a práticas de manejo. Para facilitar a interpretação das análises, há na literatura abordada nesta pesquisa algumas tabelas com classes interpretativas de valores das enzimas em função da produtividade relativa acumulada (de Castro Lopes et al. 2013) e do carbono orgânico do solo (de Carvalho Mendes et al. 2019), porém apenas para Latossolo Vermelho Distrófico argiloso do Cerrado. A pesquisa mais recente estabelece valores considerados baixos, moderados e adequados para amostras de solo úmido na fase de florescimento e para amostras de solo seco ao ar na fase pós-colheita. Para a β -glucosidase em amostras de solo úmido, valor menor que 106 μg p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} é considerado baixo, de 107 a 209 é considerado moderado e acima de 210 é adequado. Para a arilsulfatase em amostras de solo úmido, valor menor que 44 μg p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} é considerado baixo, de 45 a 115 é considerado moderado e acima de 116 é adequado. Já para a β -glucosidase em amostras de solo seco ao ar, valor menor que 66 μg p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} é considerado baixo, de 67 a 115 é moderado e maior que 116 é adequado. Por fim, para a arilsulfatase em amostras de solo seco ao ar, valor menor que 30 p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} é considerado baixo, de 31 a 70 é moderado e acima de 71 é adequado.

Já a mineralogia desempenha um papel importante na liberação de nutrientes e estrutura do solo, com pesquisas fazendo associações diretas deste parâmetro com outros indicadores de qualidade. A sorção de matéria orgânica dissolvida em superfícies minerais é um processo chave para a preservação da matéria orgânica no solo (Kaiser et al. 2000; Baldock et al. 2000). Minerais que contêm alumínio e ferro, como os óxidos e hidróxidos, são importantes para a sorção da matéria orgânica dissolvida, pois formam ligações fortes com grupos ácidos orgânicos. Algo semelhante foi identificado em Eusterhues et al (2011) onde se constatou que

óxidos de ferro e silicatos de alumínio são as fases minerais mais significativas para a formação de associações organominerais em um Espodossolo Háptico e em um Cambissolo Distrófico. Uma abordagem mineralógica focando em filossilicatos foi realizada para avaliar seu papel na proteção do estoque de carbono, que contribui para a qualidade do solo. Entretanto, apesar de sugerir que a mineralogia dos filossilicatos pode ter uma importância significativa na estabilização do carbono orgânico do solo e na resposta dos estoques de carbono às mudanças no uso da terra, o estudo conclui que o seu papel ainda não está completamente compreendido e exige mais pesquisas a respeito.

5 CONCLUSÃO

Os artigos revisados evidenciam que os indicadores biológicos compostos por enzimas e biomassa microbiana desempenham um papel fundamental na avaliação da qualidade do solo e são eficazes na detecção de mudanças sutis no solo sob diferentes práticas de manejo. A β -glucosidase e a arilsulfatase destacam-se devido à sua eficiência, custo-benefício e relevância na ciclagem de nutrientes essenciais. Os indicadores físico-químicos continuam desempenhando um papel importante na avaliação da qualidade, tendo seu efeito potencializado principalmente quando abordados de forma integrada.

A literatura revisada destaca a importância da padronização dos métodos analíticos e a necessidade de valores de referência para os indicadores microbiológicos. Essa carência é um desafio significativo nesta área de pesquisa, pois pode causar uma variabilidade nos resultados e dificuldade na interpretação e comparação entre estudos. O uso combinado de indicadores bioquímicos, biológicos e físico-químicos proporciona um entendimento mais abrangente para a avaliação da qualidade do solo, algo que permite a identificação de práticas de manejo que promovam as melhores condições para a manutenção da saúde do solo e a produtividade agrícola, enquanto contribuem para a mitigação das mudanças climáticas.

Portanto, embora os indicadores microbiológicos tenham se mostrado altamente sensíveis e promissores, a continuidade das pesquisas nessa temática é essencial para resolver as lacunas de conhecimento existentes, especialmente em relação à padronização de métodos e de referências mais consolidadas para uma melhor interpretação para cada tipo de solo.

Estudos futuros devem focar em ambientes naturais considerando técnicas que integrem diferentes indicadores orientados por tipos pedológicos específicos. Desta forma, será possível

que haja um avanço mais consolidado em referências para melhores interpretações de como está a qualidade de solo quando vista sob a óptica dos indicadores microbiológicos.

REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTÍNEZ, V. et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, v. 35, n. 1, p. 35-45, 2007.

ACTON, D. F. et al. A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. A Program to Assess and Monitor Soil Quality in Canada: Soil Quality Evaluation Program Summary. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada: Ottawa, Ontario, 1993.

ANDERSON, T. et al. The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25, 393–395, 1993.

BALDOCK, J. A. et al. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic geochemistry*, v. 31, n. 7-8, p. 697-710, 2000.

BANDICK, A. K. et al. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil biology and biochemistry*, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, 1999.

BARRÉ, P. et al. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects. *Geoderma*, v. 235, p. 382-395, 2014.

BASTIDA, F. et al. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, v. 147, n. 3-4, p. 159-171, 2008.

BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 58, p. 216-234, 2013.

CASTRO LOPES, A. A. et al. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013.

CASTRO LOPES, A. A. et al. Air-drying and long-term storage effects on β -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical Savannah Oxisol. *Applied Soil Ecology*, v. 93, p. 68-77, 2015.

CASTRO LOPES, A. A. et al. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 12, p. 72-82, 2018.

DE CARVALHO MENDES, I. et al. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. *Plant and Soil*, v. 359, p. 183-195, 2012.

DE CARVALHO MENDES, I. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. *Applied Soil Ecology*, v. 139, p. 85-93, 2019.

DE CARVALHO MENDES, I. et al. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 10, p. 1-64, 2019.

DICK, R. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 40, n. 1-4, p. 25-36, 1992.

DORAN, J. W. et al. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America, p. 3-21, 1994.

EUSTERHUES, K. et al. Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: Importance of specific surface area, iron oxides and micropores. *European Journal of Soil Science*, v. 56, n. 6, p. 753-763, 2005.

FELFILI, J. M. et al. Legislação Ambiental: APA Gama e Cabeça de Veado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, 2002.

GIL-SOTRES, F. et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil biology and biochemistry*, v. 37, n. 5, p. 877-887, 2005.

KAISER, K. et al. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. *Organic geochemistry*, v. 31, n. 7-8, p. 711-725, 2000.

KANDELER, E. et al. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and fertility of soils*, v. 28, p. 343-351, 1999.

KULINSKA, D. et al. Enzyme activities in "Cerrado" soils in Brazil. *Pedobiologia*, v. 24, p. 101-107, 1982.

KUMAR, A. et al. Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil. *Geoderma*, v. 306, p. 50-57, 2017.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

PUGLISI, E. et al. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 38, n. 7, p. 1673-1681, 2006.

PASCUAL, J. A. et al. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 32, n. 13, p. 1877-1883, 2000.

PEIXOTO, R. S. et al. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 98, p. 403-413, 2010.

RASOL, M. et al. GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights. *Construction and Building Materials*, v. 324, p. 126686, 2022.

SANTOS, M. P. A. Utilização da Equação Universal de Perda de Solos na análise da suscetibilidade erosiva na bacia do Ribeirão do Gama, Distrito federal. Monografia (Bacharelado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. 2023.

SINSABAUGH, R. L. et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology letters*, v. 11, n. 11, p. 1252-1264, 2008.

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

STOTT, D. E. et al. Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, n. 1, p. 107-119, 2010.

VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. *Vadose Zone Journal*, v. 12, n. 1, p. 1-8, 2013.

VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological indicators*, v. 74, p. 182-190, 2017.

CAPÍTULO 3: ARTIGO 2

BIOINDICADORES ENZIMÁTICOS (β -glicosidase e Arilsulfatase) E TEOR DE CARBONO EM ORGANOSSOLO EM ÁREA DEGRADADA: UM ESTUDO ESPACIAL NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UnB).

Matheus Pereira Araújo Santos¹, Luciano Soares da Cunha², Fernanda Vasconcelos de Almeida³, Uidemar Moraes Barral².

1 - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica - Universidade de Brasília - (PPGGAG/UnB).

2 - Instituto de Geociências - Universidade de Brasília (IG/UnB).

3 - Instituto de Química - Universidade de Brasília (IQ/UnB).

ABSTRACT

The activity of the enzymes β -glucosidase and arylsulfatase has been recognized as a sensitive indicator of soil quality. This study aimed to assess the activity of these enzymes, the organic carbon content, and the mineralogy in a degraded Histosol at Água Limpa Farm (FAL/UnB), located in the Cerrado biome. The study area is situated along the banks of the Ribeirão do Gama stream, in a pasture established on previously vegetated land. A total of 26 soil samples were collected from eight points along a transect, and laboratory analyses were conducted to evaluate biological, chemical, and mineralogical properties. Results showed β -glucosidase activity ranging from 22.55 to 36.48 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, and arylsulfatase from 63.92 to 232.62 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, with carbon contents varying between 14.70% and 19.72%. A contrasting spatial pattern was observed between the two enzymes, indicating different responses to local conditions. It is concluded that the analyzed parameters are effective for diagnosing the quality of degraded Histosols, and that multiparametric approaches offer a robust basis for guiding soil restoration strategies in anthropogenically impacted areas of the Cerrado.

Keywords: Soil Quality, Enzymes, Organosol, β -glucosidase, Arylsulfatase, Cerrado.

RESUMO

A atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase tem sido reconhecida como um indicador sensível da qualidade do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar a atividade dessas enzimas, o teor de carbono orgânico e a mineralogia em um organossolo de uma área degradada na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB), Distrito Federal. Foram coletadas 26 amostras em oito pontos ao longo de uma reta com 140 metros de comprimento para a realização de análises laboratoriais das propriedades biológicas, químicas e mineralógicas. Os resultados revelaram atividade de β -glicosidase entre 22,55 e 36,48 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (micrograma de p-nitrofenol por grama de solo seco por hora), e de arilsulfatase entre 63,92 e 232,62 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, com teores de carbono variando de 14,70% a 19,72%. Foi observado um padrão espacial contrastante entre as duas enzimas, indicando respostas distintas a fatores locais. Conclui-se que os parâmetros analisados são eficientes para diagnosticar a qualidade de organossolos, e que abordagens multiparamétricas fornecem uma base mais robusta para a recuperação de áreas sob pressão antrópica no Cerrado.

Palavras-chave: Qualidade do Solo, Enzimas, Organossolo, β -glicosidase, Arilsulfatase, Cerrado.

1. INTRODUÇÃO

O solo é fonte de uma grande diversidade de microrganismos que desempenham funções essenciais para o equilíbrio do ecossistema, especialmente no que se refere à ciclagem de nutrientes (Jiao et al. 2019). A atividade metabólica dos microrganismos é mediada por enzimas extracelulares que participam diretamente da decomposição da matéria orgânica e da liberação de nutrientes essenciais (Zhang et al. 2011). Entre essas enzimas, destacam-se a β -glicosidase, diretamente envolvida no ciclo do carbono, e a arilsulfatase, relacionada ao ciclo bioquímico da liberação de enxofre. A atividade dessas enzimas reflete mudanças no funcionamento do solo e são consideradas bioindicadores sensíveis de qualidade.

A qualidade do solo é a capacidade de um solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais (Doran et al. 1994). Nos últimos anos, tem crescido o interesse pelo uso das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase como bioindicadores para avaliação da qualidade de solos, especialmente em áreas agrícolas. Isso ocorre devido a facilidade de medição e sua relação com a biologia do solo (Dick, 1994), o que as torna eficientes em detectar mudanças sutis de forma precoce, principalmente após mudanças de uso e manejo.

O Brasil possui um grande território e diferentes climas, resultando em uma ampla diversidade de solos, muitos dos quais são altamente frágeis (Mendes et al. 2018). No contexto do bioma Cerrado, marcado por uma biodiversidade abrangente e intensa atividade antrópica, os organossolos desempenham papel crucial no armazenamento de carbono e na regulação hidrológica. Entretanto, processos de degradação decorrentes do uso inadequado da terra têm comprometido suas funções ecológicas. Assim, a caracterização da atividade enzimática desses solos pode fornecer informações importantes para a avaliação da qualidade do solo e o desenvolvimento de estratégias de recuperação.

Diante disto, esta pesquisa teve o objetivo de determinar a atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase em um organossolo de uma área degradada inserida no bioma Cerrado localizada nas dependências da Fazenda Água Limpa, às margens do córrego Ribeirão do Gama, Distrito Federal. Como ferramentas complementares, serão empregadas análises do teor de carbono orgânico e de mineralogia com o intuito de auxiliar na compreensão dos fatores que influenciam a assinatura enzimática e a funcionalidade do solo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O local onde a pesquisa foi conduzida encontra-se nas dependências da Fazenda Água Limpa, uma Fazenda Experimental e Estação Ecológica da Universidade de Brasília de 4.000 hectares situada na Região Administrativa do Park Way, Distrito Federal. A fazenda foi escolhida devido à existência de outros grupos de pesquisa conduzindo estudos na área, proximidade com a Universidade de Brasília e à ocorrência específica de um organossolo em uma área considerada degradada.

A área de estudo corresponde a um local onde anteriormente havia uma mata de galeria, uma fitofisionomia florestal com ocorrência no Cerrado que se forma próximo à córregos e rios de pequeno porte (Ribeiro et al. 1998). Hoje, o local encontra-se parcialmente desmatado, com pastagem ocupando parte da área da vegetação original, algo que favoreceu o surgimento de espécies exóticas invasoras, como a braquiária. A área também é caracterizada pela ocorrência de um organossolo háplico, um solo originado de sedimentos orgânicos, típico de áreas de baixadas úmidas ou alagadas. No caso da área de estudo, esse solo se encontra próximo às margens do córrego Ribeirão do Gama, um tributário da bacia do Lago Paranoá, que nasce à oeste, na Área de Proteção de Manancial do Catetinho e se estende por 20,76 km para leste.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é Tropical de Savana (CWA) com duas estações bem definidas: uma chuvosa, entre o mês de outubro e abril, e uma seca, entre o mês de maio e setembro, com um índice médio pluviométrico anual variando entre 1.100mm e 1.600mm. As temperaturas médias anuais variam entre 19°C e 23°C, com o período mais quente ocorrendo entre setembro e outubro, quando há registros de máximas de 30°C, e o período mais frio ocorrendo entre junho e julho, com registros de mínimas de 13°C (CODEPLAN, 2020). A área de estudo está inserida no contexto geológico do Grupo Paranoá, mais especificamente na Formação Ribeirão do Torto, caracterizada pela ocorrência de ardósias roxas e vermelhas com bandas brancas (Rodolfo Junior et al. 2015). Em relação à geomorfologia, o local está situado em uma área de dissecação intermediária da Depressão do Lago Paranoá, com um relevo local plano a suave ondulado.

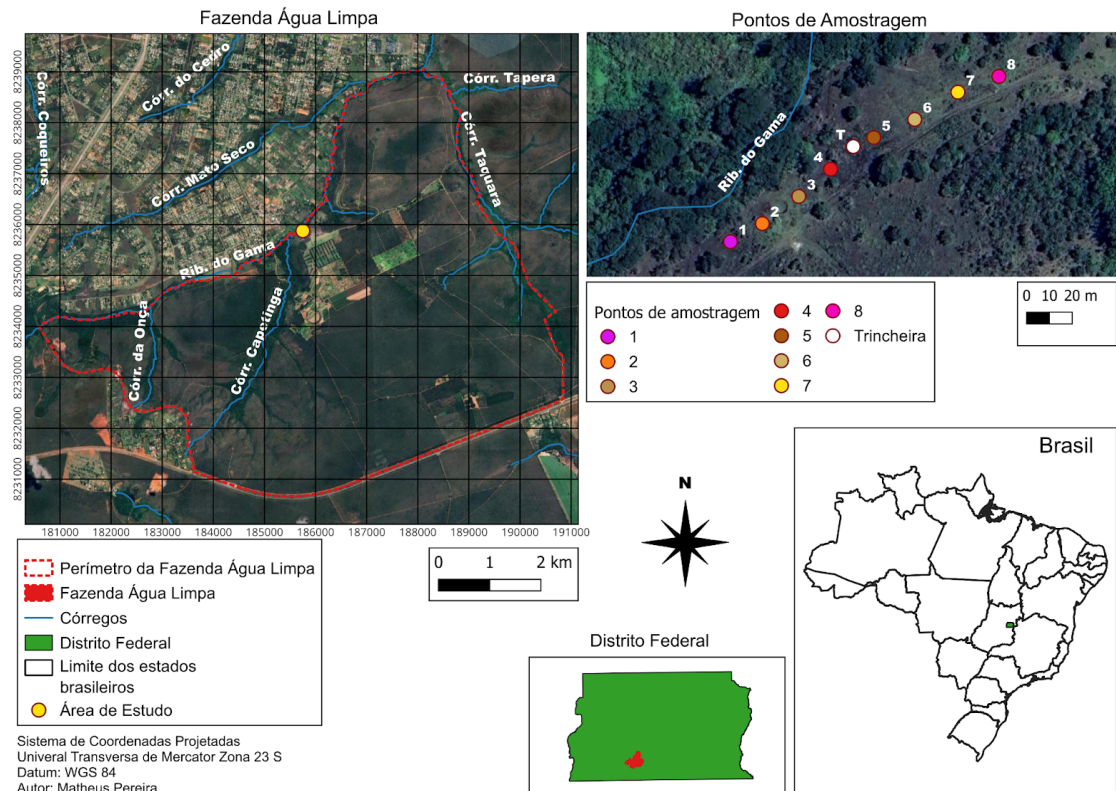


Figura 1: Mapa de localização dos pontos amostrados e da Fazenda Água Limpa. Fonte: Autor, 2025.

2.2 Coleta e preparação de solo

As amostras de solo foram coletadas em janeiro de 2025, durante a estação chuvosa, em 8 pontos diferentes com um espaçamento de 20 metros entre cada um, ao longo de uma linha reta com 140 metros de comprimento seguindo a direção SW-NE. Em cada ponto de amostragem, foram coletadas 3 amostras de solo a uma profundidade de 15 a 20 centímetros, totalizando 26 amostras. Os buracos de amostragem foram feitos com um perfurador de solo a gasolina e as amostras foram cuidadosamente retiradas com um plástico. Uma vez retiradas, as amostras foram devidamente identificadas, lacradas e levadas para o Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UnB).

Tabela 1: Coordenadas UTM de todos os pontos de coleta.

Pontos	Latitude (UTM)	Longitude (UTM)
PT1	8235811	185652
PT2	8235819	185666
PT3	8235831	185682
PT4	8235843	185696

Ponto de controle	8235853	185706
PT5	8235857	185715
PT6	8235865	185733
PT7	8235877	185752
PT8	8235884	185770

As amostras foram inicialmente colocadas em um recipiente, pesadas e secas ao ar durante uma semana no laboratório. Após esse período, foram realizadas novas pesagens para confirmar a secagem do solo. Uma vez secas, as amostras utilizadas para as análises de enzimas foram peneiradas em uma peneira de 2 milímetros e depois passaram por um processo de coleta de resíduos vegetais, como galhos, raízes e folhas, com o uso de uma pinça. Já as amostras usadas para as análises de carbono e raio X passaram por uma coleta de resíduos vegetais, foram trituradas em um almofariz de ágata e peneiradas em uma peneira de 0,150 milímetros.

2.3 Análises do solo

Para a realização das análises de teor de carbono, foi pesado 1 grama de cada amostra de solo em cápsulas de estanho para depois serem acomodadas em um analisador elementar Eurovector EuroEA3000 CHNS-O do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo da Faculdade de Agronomia e Veterinária (FAV) da Universidade de Brasília (UnB). Antes do início das análises, foram utilizados solos padrão (solo 1 e 2) e acetanilida para a calibração do analisador elementar. O solo 1 tinha uma composição de 3,5% de carbono e 0,21% de nitrogênio, enquanto o solo 2 tinha 0,73% de carbono e 0,06% de nitrogênio. Uma vez no analisador, as cápsulas com os solos foram submetidas a combustão, momento no qual ocorre uma separação dos gases resultantes e a detecção pelo método de detector de Condutividade Térmica (TCD). O resultado do teor de carbono é exibido no software Callidus em porcentagem, juntamente com dados de nitrogênio e hidrogênio.

Antes de iniciar a análise das enzimas no Laboratório de Quimiometria e Química Ambiental (AQQUA) do Instituto de Química (IQ) da Universidade de Brasília (UnB), foi necessário o preparo da curva analítica. Para isso, 6 béqueres foram identificados como C (controle), 1, 2, 3, 4 e 5. Com uma micropipeta foram transferidas as soluções conforme descritas na tabela 1 e 2. O volume final de cada solução padrão é de 10,00 ml, composto de

água, p-nitrofenol, CaCl_2 e THAM, na curva da β -glicosidase (Tabela 2), e água, p-nitrofenol, CaCl_2 e NaOH, na curva da Arilsulfatase (Tabela 3).

Tabela 2: Quantidade de reagentes da curva padrão para β -glicosidase. Os volumes foram preparados com diferentes concentrações de solução padrão diluída, CaCl_2 e tampão THAM pH 12, com volume final padronizado em 10 mL.

	Água (mL)	Solução Padrão Diluída (mL)	CaCl_2 (mL)	THAM pH 12 (mL)
Controle	5	0	1	4
1	4	1	1	4
2	3	2	1	4
3	2	3	1	4
4	1	4	1	4
5	0	5	1	4

Tabela 3: Quantidade de reagentes da curva padrão para Arilsulfatase. As soluções foram preparadas com diferentes concentrações de p-nitrofenol diluído, CaCl_2 e NaOH, com volume final de 10 mL.

	Água (mL)	Solução Padrão Diluída (mL)	CaCl_2 (mL)	NaOH (mL)
Controle	5	0	1	4
1	4	1	1	4
2	3	2	1	4
3	2	3	1	4
4	1	4	1	4
5	0	5	1	4

Após o preparo das soluções, todas foram homogeneizadas e levadas para leitura em um espectrofotômetro. A primeira leitura realizada foi a do controle, apenas uma vez, seguida pela leitura em triplicata das soluções 1, 2, 3, 4 e 5. Para a obtenção do gráfico e da equação da reta, foi necessário o valor das leituras e a concentração de solução padrão em cada ponto da curva. Para a descoberta da concentração, aplicou-se a equação:

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad (1)$$

Onde,

C1 = Concentração de p-nitrofenol na Solução Padrão.

V1 = Volume de Solução Padrão adicionado de acordo com a tabela 1.

V2 = Volume final após a adição de todos os reagentes (10 mL).

C2 = Concentração final.

O modelo da equação da reta é: $y = ax + b$, onde Y é a absorbância, x é a concentração de p-nitrofenol, a e b são o intercepto e a inclinação. No exemplo a seguir (Figura 2) $a = 0,1064$ e $b = 0,0164$.

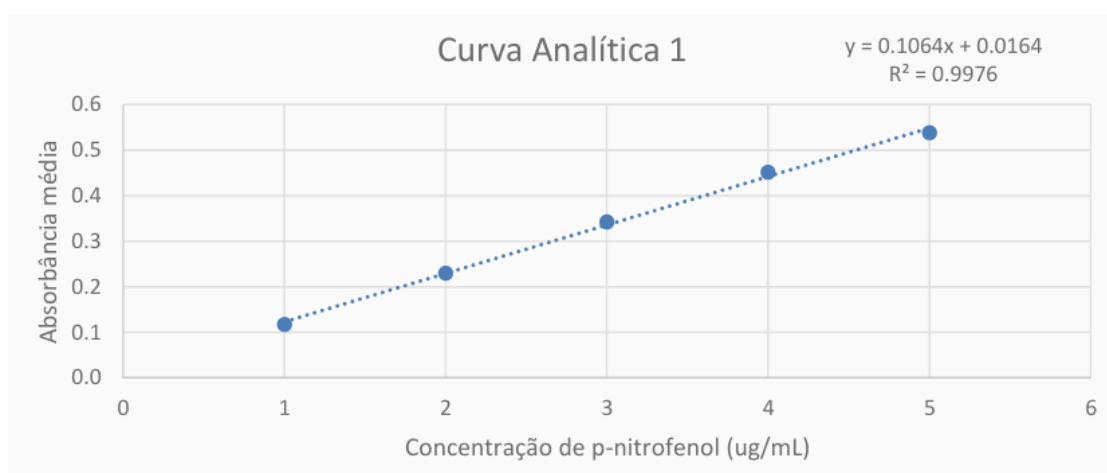


Figura 2: Curva analítica obtida por meio das leituras de absorbância das soluções apresentadas nas tabelas 1 e 2 e a concentração de solução padrão.

Conforme o método descrito por Tabatabai (1994), Dick et al. (1996), Deng et al. (2011), Klose et al. (2011) e Acosta-Martinez et al. (2021), a atividade da β -glicosidase foi obtida utilizando p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo PNG 0,025 M como substrato. Para o início das análises de cada amostra, foram utilizados 3 erlenmeyers de 50 mL contendo 1,0 g de solo cada, sendo um utilizado como controle. Em seguida, foi adicionado 4,0 mL de solução MUB (*Modified Universal Buffer*) pH 6 em todos os erlenmeyers e 1,0 mL de PNG (0,025 M), com exceção do controle. Os erlenmeyers foram fechados com rolhas de borracha e incubados a 37°C por 1 hora. Após a incubação, foram adicionados 1,0 mL de CaCl_2 (0,5 M), 4,0 mL de Tris-Hidroximetil Aminometano (THAM pH 12), em todos os erlenmeyers, e 1,0 mL de PNG (0,025 M) nos controles. O conteúdo dos erlenmeyers foi filtrado em papel de filtro e a intensidade da coloração amarela do filtrado foi determinada com base na sua absorbância em um espectrofotômetro a 420 nm. A quantidade de p-nitrofenol (pNP) formada em cada amostra foi calculada com base em uma curva analítica preparada com concentrações conhecidas de μg de p-nitrofenol por mL^{-1} . Já a atividade enzimática foi

expressa em μg de p-nitrofenol liberado por hora por grama de solo seco (μg de p-nitrofenol $\text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$ solo seco) de acordo com o método de determinação utilizado pela Embrapa que, adaptado de Tabatabai (1994), consiste da não adição de tolueno.

Para a análise da atividade de Arilsulfatase foi utilizado o p-nitrofenil sulfato PNS 0,025 M como substrato. Com 1,0 g de solo devidamente pesado, foi adicionado 4,0 mL de tampão acetato pH 5,8 em todos os erlenmeyers e 1 mL de PNS (0,025 M), com exceção do controle. Os erlenmeyers foram fechados com rolhas e incubados a 37°C por 1 hora. Após a incubação, foram adicionados 1,0 mL de CaCl_2 (0,5 M), 4,0 mL de NaOH pH 12, em todos os erlenmeyers, e 1,0 de PNS 0,025 M no controle. O conteúdo dos erlenmeyers foi filtrado em papel de filtro e a intensidade da coloração amarela do filtrado foi determinada em um espectrofotômetro usando um comprimento de onda de 410 nm.

Para a realização do raio X no Laboratório de Difractometria do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, inicialmente foi realizada a confecção da lâmina para amostra total. Nesta etapa, seguindo a metodologia do próprio laboratório, foi colocada uma porção do material (moído ou macerado) sobre uma lâmina de vidro, com outra lâmina auxiliar executamos movimentos desordenados, com a finalidade de desorientar os minerais presentes na amostra. Posteriormente foi utilizado o difratômetro RIGAKU, modelo ULTIMA IV, equipado com tubo de cobre e filtro de níquel sob 35 kV, 15 mA, e detector DTEX/ULTRA. A varredura foi realizada no intervalo de 2θ de 2° a 60° para a amostra total (TOT). Após a confecção da lâmina da fração total, foi realizada uma análise para determinar o tipo de argila presente na amostra por meio dos processos de fração argila não glicolada, fração argila glicolada com o etilenoglicol e fração argila aquecida.

Antes da análise da fração argila, foram transferidos cerca de 2,5 g de amostra de solo para um tubo de centrifugação de 50 mL, tipo falcon, para depois serem transferidos para uma centrífuga IEC CL31R Multispeed. A primeira configuração foi feita a 750RPM por 7 minutos a 30°C, com o objetivo de separar o material mais pesado (maior densidade) do de menor densidade que ficará em suspensão, compondo a fração argila. O material em suspensão foi transferido para um novo tubo falcon, preenchido novamente com água destilada até 50 mL e posteriormente foi inserido para a centrífuga, onde foi submetido a uma configuração de 3.000RPM por 30 minutos à 30°C, visando a decantação da fração argila no tubo. Após a conclusão do processo de decantação da fração argila, ocorreu o descarte da água, mantendo apenas a parte da amostra com granulometria do tamanho argila, que ficam aderidas no fundo ou nas paredes do tubo. Esse material foi homogeneizado com pequena quantidade de água residual e transferido para uma lâmina de microscopia. Com outra lâmina

do mesmo tipo, foi realizado um movimento de “vai e volta” com a finalidade de orientar a fração argila. Posteriormente ocorreu a secagem da lâmina a temperatura ambiente.

Na análise da fração argila não glicolada, foi utilizado um difratômetro RIGAKU, modelo ULTIMA IV, equipado com tubo de cobre e filtro de níquel sob 35 kV, 15 mA, e detector DTEX/ULTRA. A varredura foi realizada no intervalo de 2θ de 2° a 40° , com passo de $0,05^\circ$ e velocidade 5° por minuto. Para a fração argila glicolada foi inserida a lâmina de microscopia em um dessecador de vidro com etilenoglicol e gerado um vácuo no interior do recipiente, através de uma bomba de vácuo, deixando-a ligada por 15 minutos. Após este tempo, a bomba de vácuo foi desligada, permanecendo o vácuo no interior do dessecador por 12hs. Passando esse período, a lâmina foi processada novamente no difratômetro. Por fim, a fração argila aquecida, a lâmina foi inserida em um forno Mufla durante 270 minutos à uma temperatura de 490°C . Após o resfriamento da lâmina, ela é processada novamente no difratômetro.

2.4 Processamento dos dados

Para a obtenção da atividade enzimática, primeiro utilizou-se os valores das absorvâncias das amostras, juntamente com a equação da reta $y = ax + b$ presente no gráfico da curva analítica, para aplicá-los na seguinte equação com o objetivo de descobrir a concentração de p-nitrofenol ($\mu\text{g/mL}$):

$$C = \frac{X - b}{a} \quad (2)$$

Onde,

C = concentração de p-nitrofenol na suspensão de solo, em $\mu\text{g/mL}$.

X = Absorvância média da amostra.

b = Inclinação

a = Intercepto

Com a concentração, foi possível obter a atividade enzimática de cada amostra utilizando a seguinte equação:

$$\text{Atividade enzimática no solo: } p\text{-nitrofenol } (\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}) = \frac{C \times V}{g \times t} \quad (3)$$

Onde,

C = concentração de p-nitrofenol na suspensão de solo, em $\mu\text{g/mL}$

g= peso do solo seco ao ar (g)

t= tempo de incubação (h)

V= volume da suspensão do solo (10,0 mL)

Para o processamento das análises de raio X, foi realizada a interpretação dos dados com o software Jade 9.4.0.0. O programa analisa os dados de difratometria das amostras, apontando os picos dos minerais presentes e comparando-os com padrões conhecidos de um banco de dados cristalográfico.

3. RESULTADOS

Quando observado o resultado das análises de raio X, é possível perceber que há pouca ou nenhuma variação mineralógica entre todos os pontos amostrados (Tabela 4). Em todas as amostras existe uma presença marcante de quartzo SiO_2 , mineral residual e resistente ao intemperismo, além de caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, um argilomineral 1:1 pouco expansivo típico de solos altamente intemperizados. Apesar da dificuldade de detecção em alguns gráficos, há nas amostras analisadas a presença de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), um mineral de hidróxido de alumínio também comum em solos intemperizados.

Tabela 4: Resultados da difratometria. Obs.: O símbolo “x” significa presença do mineral no difratograma. O símbolo “o” significa ausência do mineral.

Minerais	Fórmula Química	PT 1	PT 2	PT 3	PT 4	PT 5	PT 6	PT 7	PT 8
Quartzo	SiO_2	x	x	x	x	x	x	x	x
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	x	x	x	x	x	x	x	x
Kaolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	x	x	x	x	x	x	x	x
Rutilo	TiO_2	x	x	x	x	x	x	x	x
Anatásio	TiO_2	x	x	x	x	o	x	x	x
Diásporo	$\text{AlO}(\text{OH})$	x	o	o	o	o	o	o	o
Sapronita	$\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	x	x	x	x	x	x	x	x

As médias dos teores de carbono variaram entre 14,70% e 19,72%, com uma média geral de 17,5%. A média das amostras dos pontos 2 (19,72%) e 5 (19,42%) destacaram-se por seus elevados teores de carbono orgânico total, enquanto o ponto 8 apresentou o menor teor (14,70%). Na totalidade, os níveis de carbono são todos acima de 8% (80 g/kg^{-1}),

confirmando que o solo amostrado nos pontos estudados ao longo do transecto pode estar sob um horizonte orgânico. Apesar de alguns valores mais altos, é possível notar uma tendência de queda nos níveis de carbono ao longo dos pontos, principalmente entre os pontos 5 e 8 (Tabela 5).

Tabela 5: Valores percentuais de carbono orgânico total obtidos para cada amostra de solo coletada nos oito pontos da área de estudo. Os resultados são expressos em triplicata por ponto, acompanhados da média.

Amostras	C%	Amostras	C%
PT1A	16,866	PT5A	19,493
PT1B	18,372	PT5B	19,26
PT1C	18,703	PT5C	19,503
Média 1	17,98	Média 5	19,42
PT2A	20,2	PT6A	21,053
PT2B	19,648	PT6B	19,818
PT2C	19,315	PT6C	11,069
Média 2	19,72	Média 6	17,31
PT3A	16,49	PT7A	15,8
PT3B	17,069	PT7B	16,634
PT3C	17,287	PT7C	15,805
Média 3	16,95	Média 7	16,08
PT4A	17,567	PT8A	15,059
PT4B	18,737	PT8B	14,982
PT4C	18,524	PT8C	14,067
Média 4	18,28	Média 8	14,70

Em relação às atividades da enzima β -glicosidase, as médias variaram de 22,55 a 36,48 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, com uma média geral de 29,50. Na tabela 5, é possível notar três valores médios mais altos nos pontos 4, 5 e 6, porém quando observada as outras médias, é possível perceber uma tendência sutil de queda ao longo dos pontos, algo também observado nas análises de carbono.

Tabela 6: Valores de absorbância, concentração de p-nitrofenol ($\mu\text{g/mL}$) e atividade enzimática ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) da β -glicosidase em cada amostra de solo. As análises foram realizadas em triplicata por ponto.

Amostra	Abs média (nm)	Conc. ($\mu\text{g/mL}$)	Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)	Amostra	Abs média (nm)	Conc. ($\mu\text{g/mL}$)	Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)
PT1A	0,42756	3,86	38,64	PT5A	0,40334	2,93	29,33
PT1B	0,31624	2,82	28,18	PT5B	0,39182	2,85	28,53
PT1C	0,28041	2,48	24,81	PT5C	0,50563	4,31	43,06
Média 1 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			30,55	Média 5 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			33,64
PT2A	0,31112	2,77	27,70	PT6A	0,49414	4,21	42,06
PT2B	0,27237	2,41	24,06	PT6B	0,39230	3,31	33,12
PT2C	0,35623	3,19	31,94	PT6C	0,35176	2,96	29,60
Média 2 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			27,90	Média 6 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			34,92
PT3A	0,23681	2,07	20,72	PT7A	0,42096	3,06	30,56
PT3B	0,31954	2,85	28,49	PT7B	0,36403	2,66	26,60
PT3C	0,21269	1,84	18,45	PT7C	0,29078	2,15	21,50
Média 3 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			22,55	Média 7 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			26,22
PT4A	0,32026	2,68	26,80	PT8A	0,35095	2,57	25,69
PT4B	0,53728	3,87	38,66	PT8B	0,29767	2,20	21,98
PT4C	0,51614	4,40	43,99	PT8C	0,31923	2,35	23,48
Média 4 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			36,48	Média 8 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			23,71

Nas atividades da enzima Arilsulfatase, as médias variaram de 63,92 a 232,62 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, com média geral de 168,12 $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$. O maior valor foi observado no ponto 6, enquanto o menor foi observado no ponto 1. Mesmo com a diversidade de resultados, a tabela 7

apresentou valores médios com uma tendência positiva ao longo dos pontos, contrastando com os resultados de carbono e β -glicosidase.

Tabela 7: Valores de absorbância, concentração de p-nitrofenol ($\mu\text{g/mL}$) e atividade enzimática ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) da Arilsulfatase em cada amostra de solo. As análises foram realizadas em triplicata por ponto.

Amostra	Abs média (nm)	conc ($\mu\text{g/mL}$)	Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)	Amostra	Abs média (nm)	conc ($\mu\text{g/mL}$)	Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)
PT1A	0,83537	6,81	68,10	PT5A	2,30162	20,58	205,82
PT1B	0,71120	5,58	55,82	PT5B	1,98812	17,65	176,55
PT1C	0,83297	6,72	67,86	PT5C	1,55647	13,62	136,24
Média 1 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			63,92	Média 5 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			172,87
PT2A	2,25358	20,84	208,38	PT6A	2,32628	21,56	215,57
PT2B	2,09208	19,24	192,40	PT6B	2,64118	24,67	246,71
PT2C	2,13317	19,65	196,47	PT6C	2,52848	23,56	235,57
Média 2 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			199,08	Média 6 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			232,62
PT3A	1,55873	13,96	139,65	PT7A	2,18708	20,18	201,80
PT3B	2,27982	21,10	210,97	PT7B	1,82018	16,55	165,51
PT3C	1,69230	15,29	152,86	PT7C	1,92857	17,62	176,23
Média 3 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			167,83	Média 7 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			181,18
PT4A	1,48175	12,93	129,27	PT8A	1,95148	17,85	178,49
PT4B	1,90407	16,87	168,70	PT8B	2,18770	20,19	201,86
PT4C	1,69420	14,91	149,10	PT8C	1,71300	15,49	154,91
Média 4 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			149,02	Média 8 Atv. Enzima ($\mu\text{g g h}$)			178,42

4. DISCUSSÃO

A difratometria realizada em todos os pontos amostrados ao longo da área estudada, mesmo com espaçamento de apenas alguns metros entre si, demonstrou uma homogeneidade na composição mineralógica. Isso indica que as variações detectadas nas atividades enzimáticas e nos teores de carbono não estão relacionadas a diferenças entre tipos de solo, mas sim a fatores relacionados ao uso, manejo, degradação ou recuperação local. A mineralogia atua, portanto, como um fator de controle importante na validação dos outros resultados obtidos, pois prova que não houve uma diferença nas amostras de solo nos pontos estudados e permite uma análise mais confiável da variação espacial do teor de carbono orgânico e da atividade enzimática no solo.

O carbono orgânico é considerado um dos principais indicadores da qualidade do solo, pois desempenha um papel vital na regulação de uma ampla gama de funções biológicas e processos ecossistêmicos, como mobilização de nutrientes, ciclagem, disponibilidade, sequestro e dinâmica global de carbono (Yang et al. 2022). A análise dos dados de carbono orgânico total e da atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase revelou padrões diferenciados ao longo dos pontos amostrados, com uma variação de 34,15% entre o menor e o maior valor. O teor de carbono orgânico apresentou uma leve tendência decrescente conforme foi se aproximando do ponto 8, porém o coeficiente de variação entre os pontos foi de apenas 9,22%, indicando que, apesar da diferença aparente, os teores estão relativamente uniformes do ponto de vista estatístico. Tendo em vista que todas as amostras foram coletadas em uma área relativamente pequena sob o mesmo tipo de solo, essa baixa variação é esperada devido às características pedológicas comuns em todos os pontos amostrados.

Quando comparada com os padrões de outros trabalhos em outros tipos de solo, percebe-se que a atividade de β -glicosidase no solo avaliado pode ser considerada baixa, com o maior valor registrado sendo de $36,48 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Importante salientar que a comparação com outros tipos de solo foi feita devido à dificuldade de achar trabalhos similares em organossolos, principalmente em áreas degradadas. Stott et al. (2009) propôs que o nível de atividade de β -glicosidase adequado em um Latossolo Vermelho distrófico sob condições de alta temperatura e alta precipitação seria de $160 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Entretanto, diferente da área de estudo deste trabalho, a maioria dos solos analisados por Stott et al. (2009) estava em áreas agrícolas adequadamente manejadas ou naturais com pouca ou nenhuma intervenção antrópica. Até mesmo em algumas áreas naturais, como visto no trabalho de Castro Lopes *et*

al. (2013) em Latossolos argilosos do Cerrado brasileiro, os resultados de β -glicosidase podem ser baixos, quando comparados com áreas agrícolas. No Cerrado, mesmo em solos com alto teor de carbono, pode haver baixa atividade de β -glicosidase. Apesar de parecer contraditório, essa anomalia aparente se explica pela qualidade da matéria orgânica. Nos solos nativos e não agrícolas, os resíduos vegetais são mais complexos e recalcitrantes (difíceis de decompor), o que limita a atuação da β -glicosidase (Peixoto et al. 2010). Vale ressaltar que essa enzima é um catalisador na última etapa do processo de decomposição da celulose, hidrolisando o resíduo de celobiose antes de liberar açúcares simples (Chaves *et al.*, 2024). Se os resíduos vegetais são difíceis de degradar desde o início, essa enzima é menos demandada e, portanto, sua atividade no solo tende a ser mais baixa. A primeira vista, até mesmo a relação C/N do solo poderia estar ligada, pois quando alta (> 20), há uma limitação de nitrogênio e a matéria orgânica se decompõe mais dificilmente. Por outro lado, quando a relação é baixa (< 15), a matéria orgânica se decompõe mais rápido, enquanto que moderada (15 - 20), há um certo equilíbrio (Brandy et al. 2009). No caso do organossolo da Fazenda Água Limpa, a relação C/N é alta nos primeiros pontos e moderada nos últimos, porém quando aplicada a correlação de Pearson, há uma correlação negativa fraca ($- 0,36$) e estatisticamente insignificante ($p > 0,05$), indicando que não é um fator tão contribuinte.

O comportamento da atividade de β -glicosidase também poderia estar relacionado ao nível de decomposição da matéria orgânica presente. Esse nível de decomposição pode ser avaliado por meio da Escala de Decomposição de von Post, que classifica o grau de decomposição de 1 (matéria orgânica pouco decomposta, com estruturas vegetais preservadas) até 10 (matéria orgânica totalmente decomposta, sem estruturas reconhecíveis) (Embrapa, 2017). Em solos onde predominam estágios iniciais na escala, com material orgânico fibroso (grau 1 a 4), seria esperado uma menor atividade de β -glicosidase, justamente pela menor disponibilidade de substratos acessíveis à enzima, enquanto em estágios mais avançados, com material orgânico sáprico (grau 7 a 10), essa atividade tende a ser mais elevada devido à maior quantidade de celulose parcialmente degradada disponível para a ação enzimática.

A redução observada neste trabalho na atividade de β -glicosidase ao longo dos pontos, cerca de 61,78% entre o valor mais alto e o mais baixo, inicialmente corrobora com a tendência de decréscimo do carbono orgânico. Quando realizada uma análise de correlação de Pearson, observa-se uma correlação moderada entre a atividade de β -glicosidase e o teor de

carbono ($r = 0,56$), porém estatisticamente não significativo ($p > 0,05$). Uma relação similar foi vista no trabalho de Stott *et al.* (2009), onde foi demonstrado que uma correlação direta entre o conteúdo de carbono orgânico do solo e a atividade da β -glicosidase nem sempre é forte, especialmente em sistemas instáveis ou degradados, onde vários fatores além do conteúdo de carbono podem limitar a atividade enzimática.

Em contrapartida, a atividade da arilsulfatase apresentou uma tendência de aumento expressiva de 56,10% entre os pontos 2 e 8, alcançando valores superiores a $230 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ nos últimos pontos, o que é considerado um valor adequado quando comparado com trabalhos que definiram limites críticos para essa enzima, mesmo estudando latossolos de áreas agrícolas no Cerrado, como Castro Lopes *et al.* (2018). Neste trabalho mencionado, foram considerados adequados valores acima de $145 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para áreas com plantio direto e acima de $105 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para áreas de lavoura convencional. Essa enzima está presente no ciclo de liberação de enxofre (S) e é responsável por catalisar a hidrólise de ésteres sulfatados para liberar SO_4^{2-} no solo. O aumento da atividade enzimática de arilsulfatase pode ser resultado da presença de resíduos orgânicos ricos em enxofre, mudanças de pH e até mesmo devido à baixa relação C/S nos materiais orgânicos (Cardoso *et al.* 1992).

A discrepância observada entre essas enzimas pode sugerir que diferentes processos bioquímicos estão ocorrendo simultaneamente no solo, ressaltando a natureza diferenciada das respostas bioquímicas de uma área, mesmo sob o mesmo tipo de solo e de manejo. O contraste observado entre os padrões de β -glicosidase e arilsulfatase reforça também a importância da utilização de múltiplos indicadores na avaliação da qualidade do solo devido à possibilidade de se obter uma análise mais ampla das condições do solo. Por esse motivo, indicadores isolados podem não refletir fielmente a complexidade dos processos biogeoquímicos do solo, especialmente em áreas degradadas ou em estágio inicial de recuperação. Assim, a adoção de índices multiparamétricos, que integrem variáveis químicas, físicas e biológicas, constitui uma abordagem mais robusta e informativa para o monitoramento da sustentabilidade do uso do solo.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, aliada à análise de carbono orgânico total e à composição

mineralógica, constitui um conjunto eficaz para a avaliação da qualidade de horizontes orgânicos superficiais em áreas degradadas. A homogeneidade mineralógica entre os pontos amostrados validou a interpretação dos dados biológicos e químicos, permitindo uma análise confiável das variações funcionais do solo. A tendência de redução nos teores de carbono e na atividade da β -glicosidase indica possíveis áreas de maior degradação ou limitação da decomposição microbiana, enquanto o aumento acentuado da atividade da arilsulfatase ao longo dos pontos sugere a presença de resíduos orgânicos ricos em enxofre e um possível início de processo de recuperação ecológica.

A metodologia empregada neste estudo, o que inclui todo o processo de coleta e preparo das amostras até a padronização das análises laboratoriais, também oferece um protocolo sólido e reprodutível para futuras investigações. Ou seja, é possível realizar uma replicabilidade espacial do método, um aspecto essencial para o desenvolvimento de modelos multiparamétricos de qualidade do solo.

Portanto, os dados apresentados fornecem subsídios importantes para o entendimento da funcionalidade de solos com horizontes orgânicos sob pressão antrópica, bem como para o desenvolvimento de práticas mais eficientes de monitoramento da qualidade do solo. Também destacando o papel crucial das enzimas como ferramentas diagnósticas para a determinação da saúde do solo, sobretudo em ecossistemas frágeis do bioma Cerrado.

6. REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; VEUM, K. S.; NUNES, M. R.; DICK, R. P. Metabolic activity – enzymes. In: KARLEN, D. L.; STOTT, D. E.; MIKHA, M. M. (org.). Laboratory methods for soil health analysis. Soil Health Series, v. 2. Madison: Soil Science Society of America. p. 194-250, 2021.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Porto Alegre: Bookman, 2009.

CARDOSO, E. J. B. N. *et al.* Microbiologia do solo. Campinas: Sociedade Brasileira de ciência do solo, 1992.

CASTRO LOPES, A. A. *et al.* Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. Soil Science Society of America Journal, v. 77, n. 2, p. 461- 472, 2013.

CASTRO LOPES, A. A. *et al.* Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 12, p. 72-82, 2018.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (CODEPLAN). Atlas do Distrito Federal. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/atlas-do-distrito-federal-2020/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

CHAVES, V. B. S. *et al.* Enzymatic Activity in Different Crop Succession Systems in the Cerrado Region. *Agronomy*, v. 14, n. 4, p. 810, 2024.

DENG, S.; POPOVA, I. Carbohydrate hydrolases. In: DICK, R. P. (ed.). *Methods of soil enzymology*. Madison: Soil Science Society of America. (SSSA Book Series, 9). p. 851-209, 2011.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, v. 35, p. 107-124, 1994.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America. (SSSA Special Publication, 49). p. 247-271, 1996.

DORAN, J. W. *et al.* Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, v. 35, p. 1-21, 1994.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

JIAO, S. *et al.* Core microbiota in agricultural soils and their potential associations with nutrient cycling. *Msystems*, v. 4, n. 2, p. 10.1128/msystems.00313-18, 2019.

KLOSE, S.; BILEN, S.; TABATABAI, M. A.; DICK, W.; LORENZ, N.; DICK, R. P. Sulfur cycle enzymes. In: DICK, R. P. (ed.). *Methods of soil enzymology*. Madison: SSSA. (SSSA Book Series, 9). p. 125-159, 2011.

MENDES, I. C. *et al.* Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, p. 22-7, 2018.

PEIXOTO, R. S. *et al.* A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. *Antonie van Leeuwenhoek* 98, p. 403-413, 2010.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de (Ed.). *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: Embrapa-CPAC. p. 89-166, 1998.

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

SOBUCKI, L. Atividade enzimática e índices de qualidade do solo: classes de interpretação em argissolo e latossolo subtropicais. 2024.

STOTT, D. E. *et al.* Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, n. 1, p. 107-119, 2010.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P. J. (eds.). *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties*. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, p. 775-883, 1994.

YANG, S. *et al.* Soil organic carbon content and mineralization controlled by the composition, origin and molecular diversity of organic matter: A study in tropical alpine grasslands. *Soil and Tillage Research*, v. 215, p. 105203, 2022.

ZHANG, Chao *et al.* Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, v. 161, n. 3-4, p. 115-125, 2011.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO

Esta dissertação permitiu integrar uma revisão abrangente da literatura disponível sobre uso de enzimas e indicadores de qualidade do solo, oferecendo uma visão teórica e prática sobre o uso de parâmetros microbiológicos. A revisão sistemática mostrou que as enzimas β -glicosidase e arilsulfatase são ferramentas promissoras para a avaliação da qualidade do solo, mas ainda enfrentam limitações relacionadas à ausência de valores de referência regionais e de padronização metodológica.

O estudo de campo confirmou a viabilidade dessas enzimas como bioindicadores, revelando variações espaciais mesmo em pequenas áreas sob o mesmo tipo de solo e manejo. A homogeneidade mineralógica observada entre os pontos amostrados reforça que as variações nos resultados de enzimas e de carbono detectadas, apesar de não muito expressivas, são respostas às condições ambientais locais e de manejo, e não a diferenças pedológicas. Esses achados corroboram a literatura revisada e demonstram a aplicabilidade dos indicadores estudados na avaliação da qualidade do solo.

Como contribuição final, ressalta-se a necessidade de avançar na construção de protocolos regionais e na elaboração de bancos de dados com valores de referência para diferentes tipos de solo. A integração entre diferentes tipos de indicadores é essencial para uma avaliação mais abrangente e eficaz, que possa subsidiar práticas de manejo adequadas.

CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA-MARTÍNEZ, V. et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, v. 35, n. 1, p. 35-45, 2007.

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; VEUM, K. S.; NUNES, M. R.; DICK, R. P. Metabolic activity – enzymes. In: KARLEN, D. L.; STOTT, D. E.; MIKHA, M. M. (org.). *Laboratory methods for soil health analysis. Soil Health Series*, v. 2. Madison: Soil Science Society of America. p. 194-250, 2021.

ACTON, D. F. *et al.* A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. A Program to Assess and Monitor Soil Quality in Canada: Soil Quality Evaluation Program Summary. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada: Ottawa, Ontario, 1993.

ANDERSON, T. *et al.* The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25, 393–395, 1993.

BALDOCK, J. A. *et al.* Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic geochemistry*, v. 31, n. 7-8, p. 697-710, 2000.

BANDICK, A. K. *et al.* Field management effects on soil enzyme activities. *Soil biology and biochemistry*, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, 1999.

BARRÉ, P. *et al.* Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects. *Geoderma*, v. 235, p. 382-395, 2014.

BASTIDA, F. *et al.* Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, v. 147, n. 3-4, p. 159-171, 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. Porto Alegre: Bookman, 2009.

BURNS, R. G. *et al.* Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 58, p. 216-234, 2013.

CARDOSO, E. J. B. N. *et al.* *Microbiologia do solo*. Campinas: Sociedade Brasileira de ciência do solo, 1992.

CASTRO LOPES, A. A. *et al.* Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013.

CASTRO LOPES, A. A. *et al.* Air-drying and long-term storage effects on β -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical Savannah Oxisol. *Applied Soil Ecology*, v. 93, p. 68-77, 2015.

CASTRO LOPES, A. A. *et al.* Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 12, p. 72-82, 2018.

CHAVES, V. B. S. *et al.* Enzymatic Activity in Different Crop Succession Systems in the Cerrado Region. *Agronomy*, v. 14, n. 4, p. 810, 2024.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (CODEPLAN). Atlas do Distrito Federal. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/atlas-do-distrito-federal-2020/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

DE CARVALHO MENDES, I. *et al.* Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. *Plant and Soil*, v. 359, p. 183-195, 2012.

DE CARVALHO MENDES, I. *et al.* Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. *Applied Soil Ecology*, v. 139, p. 85-93, 2019.

DE CARVALHO MENDES, I. *et al.* Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 10, p. 1-64, 2019.

DENG, S.; POPOVA, I. Carbohydrate hydrolases. In: DICK, R. P. (ed.). *Methods of soil enzymology*. Madison: Soil Science Society of America. (SSSA Book Series, 9). p. 851-209, 2011.

DICK, R. P. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 40, n. 1-4, p. 25-36, 1992.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, v. 35, p. 107-124, 1994.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America. (SSSA Special Publication, 49). p. 247-271, 1996.

DORAN, J. W. *et al.* *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: Soil Science Society of America, p. 3-21, 1994.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

EUSTERHUES, K. *et al.* Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: Importance of specific surface area, iron oxides and micropores. *European Journal of Soil Science*, v. 56, n. 6, p. 753-763, 2005.

FELFILI, J. M. *et al.* Legislação Ambiental: APA Gama e Cabeça de Veado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, 2002.

GIL-SOTRES, F. *et al.* Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil biology and biochemistry*, v. 37, n. 5, p. 877-887, 2005.

JIAO, S. *et al.* Core microbiota in agricultural soils and their potential associations with nutrient cycling. *Msystems*, v. 4, n. 2, p. 10.1128/msystems.00313-18, 2019.

KAISER, K. *et al.* The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. *Organic geochemistry*, v. 31, n. 7-8, p. 711-725, 2000.

KANDELER, E. *et al.* Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and fertility of soils*, v. 28, p. 343-351, 1999.

KLOSE, S.; BILEN, S.; TABATABAI, M. A.; DICK, W.; LORENZ, N.; DICK, R. P. Sulfur cycle enzymes. In: DICK, R. P. (ed.). *Methods of soil enzymology*. Madison: SSSA. (SSSA Book Series, 9). p. 125-159, 2011.

KULINSKA, D. *et al.* Enzyme activities in "Cerrado" soils in Brazil. *Pedobiologia*, v. 24, p. 101-107, 1982.

KUMAR, A. *et al.* Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil. *Geoderma*, v. 306, p. 50-57, 2017.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 41, p. 742-747, 1977.

MENDES, I. C. *et al.* Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, p. 22-7, 2018.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

PUGLISI, E. *et al.* Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 38, n. 7, p. 1673-1681, 2006.

PASCUAL, J. A. *et al.* Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 32, n. 13, p. 1877-1883, 2000.

PEIXOTO, R. S. *et al.* A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 98, p. 403-413, 2010.

RASOL, M. *et al.* GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights. *Construction and Building Materials*, v. 324, p. 126686, 2022.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany*, v. 80, p. 223-230, 1997.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de (Ed.). Cerrado: ambiente e flora. Planaltina: Embrapa-CPAC. p. 89-166, 1998.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, M. P. A. Utilização da Equação Universal de Perda de Solos na análise da suscetibilidade erosiva na bacia do Ribeirão do Gama, Distrito federal. Monografia (Bacharelado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. 2023.

SINSABAUGH, R. L. *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. Ecology letters, v. 11, n. 11, p. 1252-1264, 2008.

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

SOBUCKI, L. Atividade enzimática e índices de qualidade do solo: classes de interpretação em argissolo e latossolo subtropicais. 2024.

STOTT, D. E. *et al.* Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. Soil Science Society of America Journal, v. 74, n. 1, p. 107-119, 2010.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P. J. (eds.). Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, p. 775-883, 1994.

VINHAL-FREITAS, I. C. *et al.* Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. Vadose Zone Journal, v. 12, n. 1, p. 1-8, 2013.

VINHAL-FREITAS, I. C. *et al.* Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. Ecological indicators, v. 74, p. 182-190, 2017.

YANG, S. *et al.* Soil organic carbon content and mineralization controlled by the composition, origin and molecular diversity of organic matter: A study in tropical alpine grasslands. Soil and Tillage Research, v. 215, p. 105203, 2022.

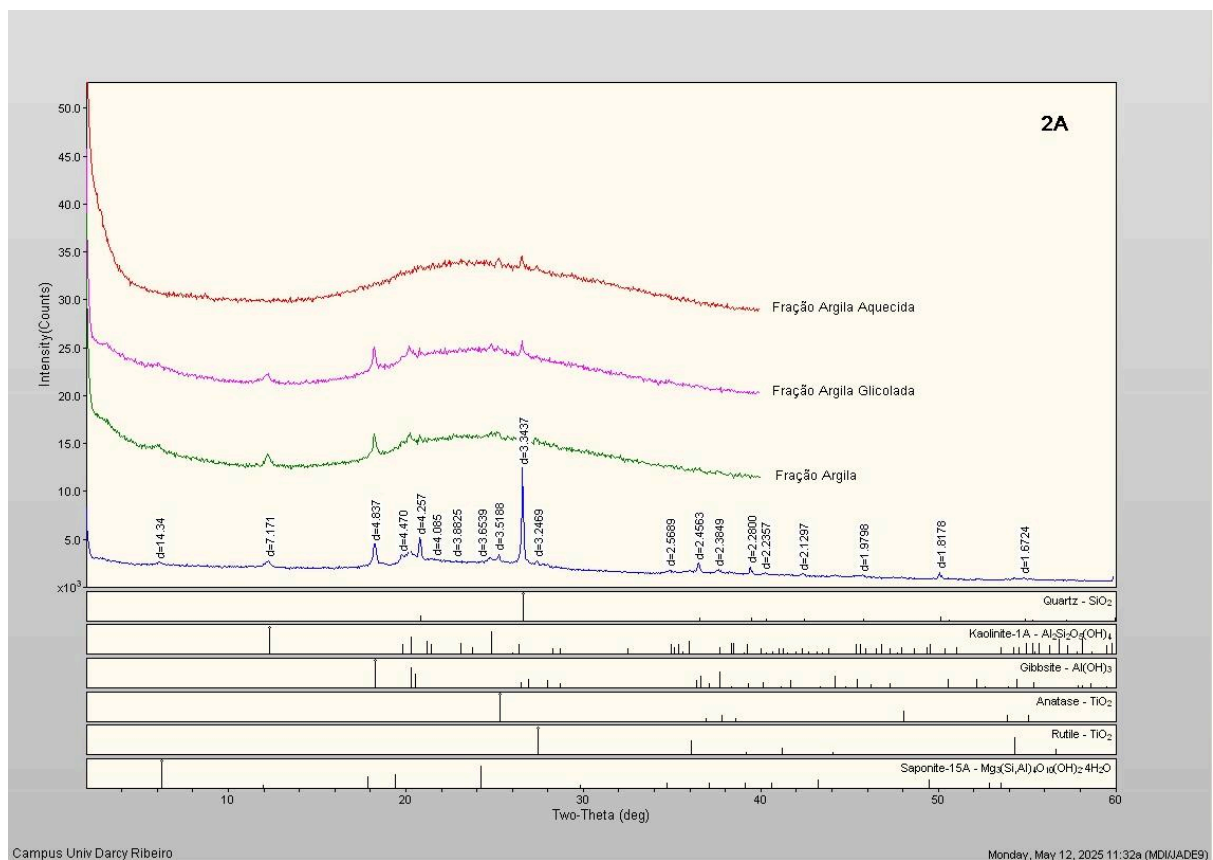
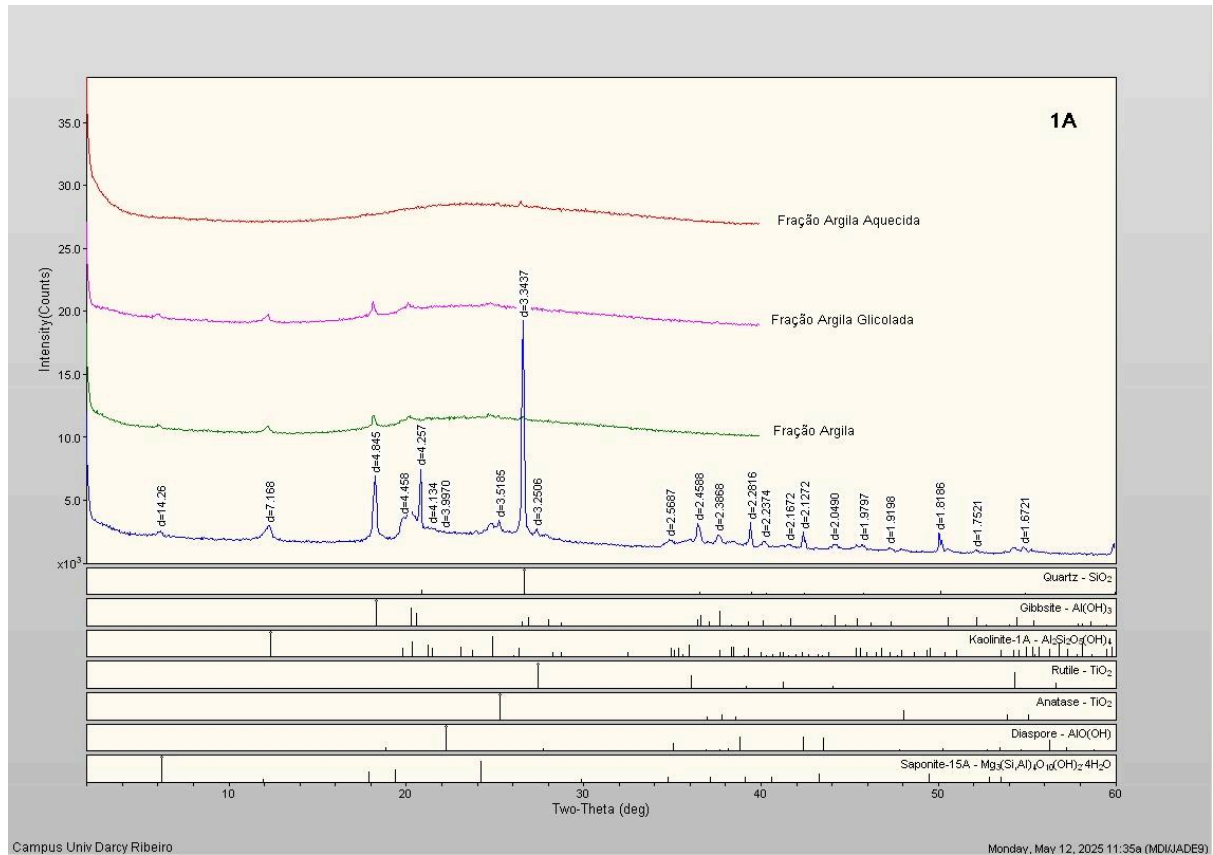
ZHANG, Chao et al. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. Geoderma, v. 161, n. 3-4, p. 115-125, 2011.

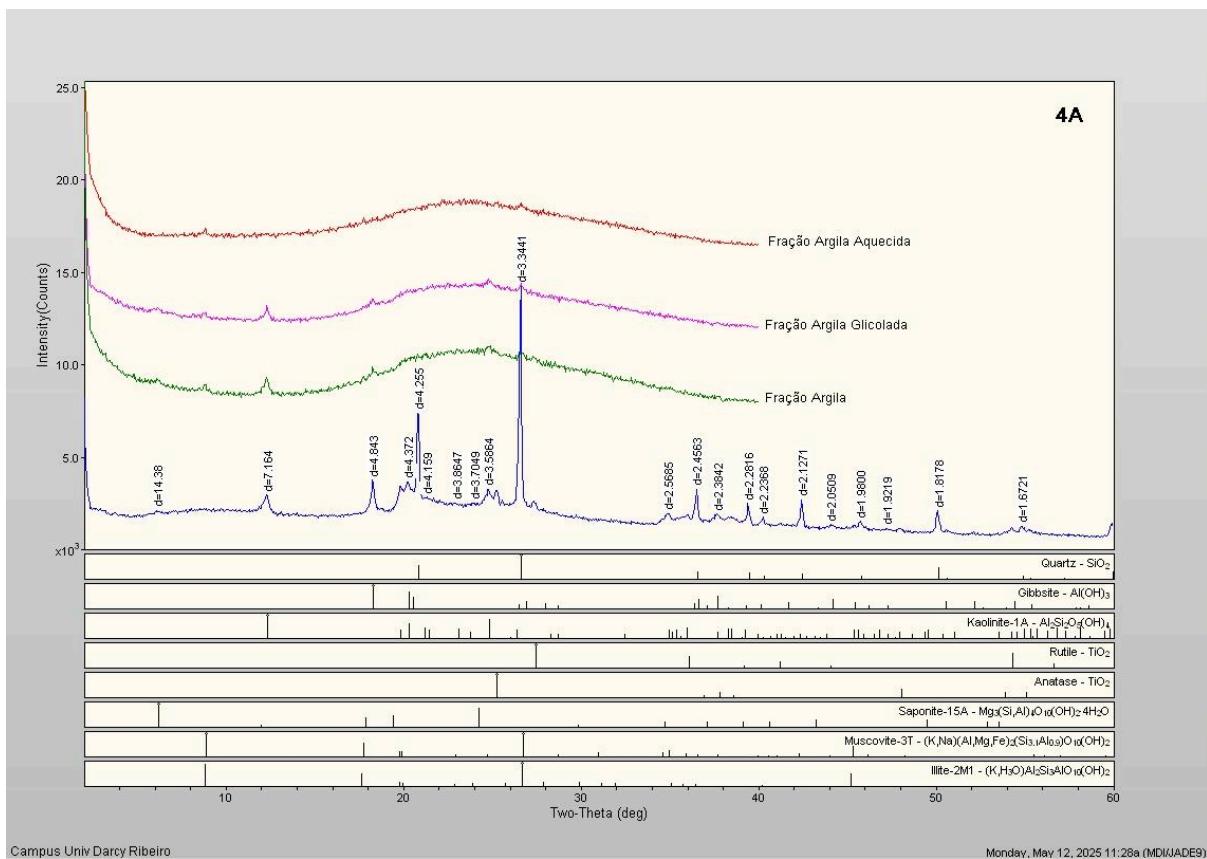
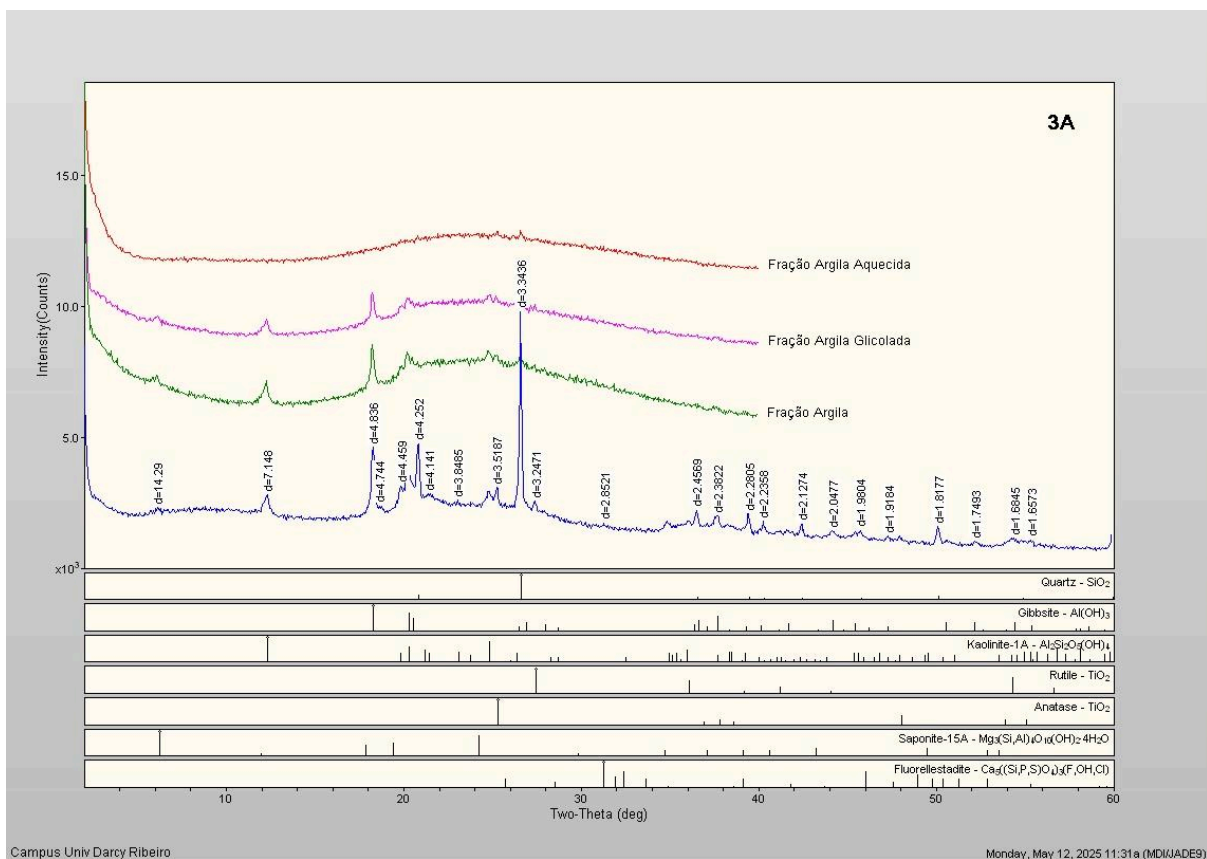
APÊNDICE

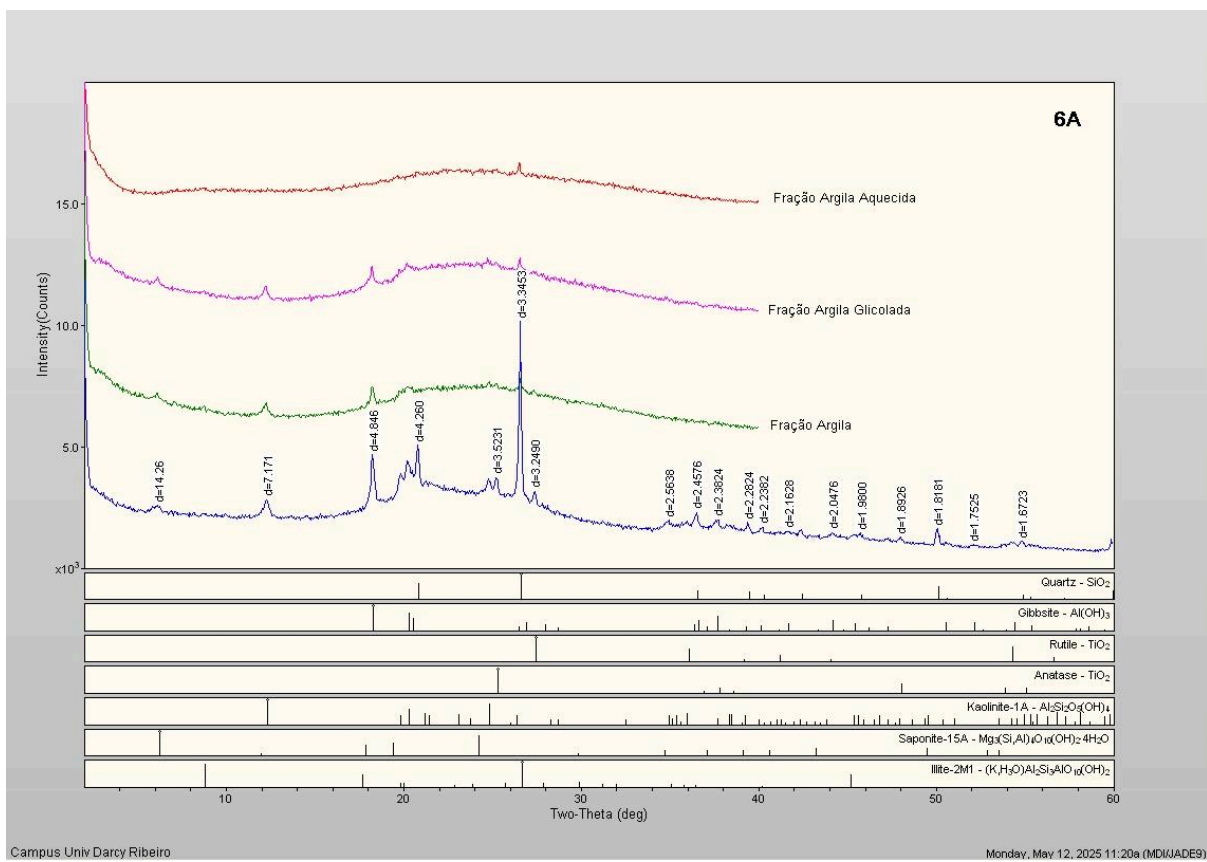
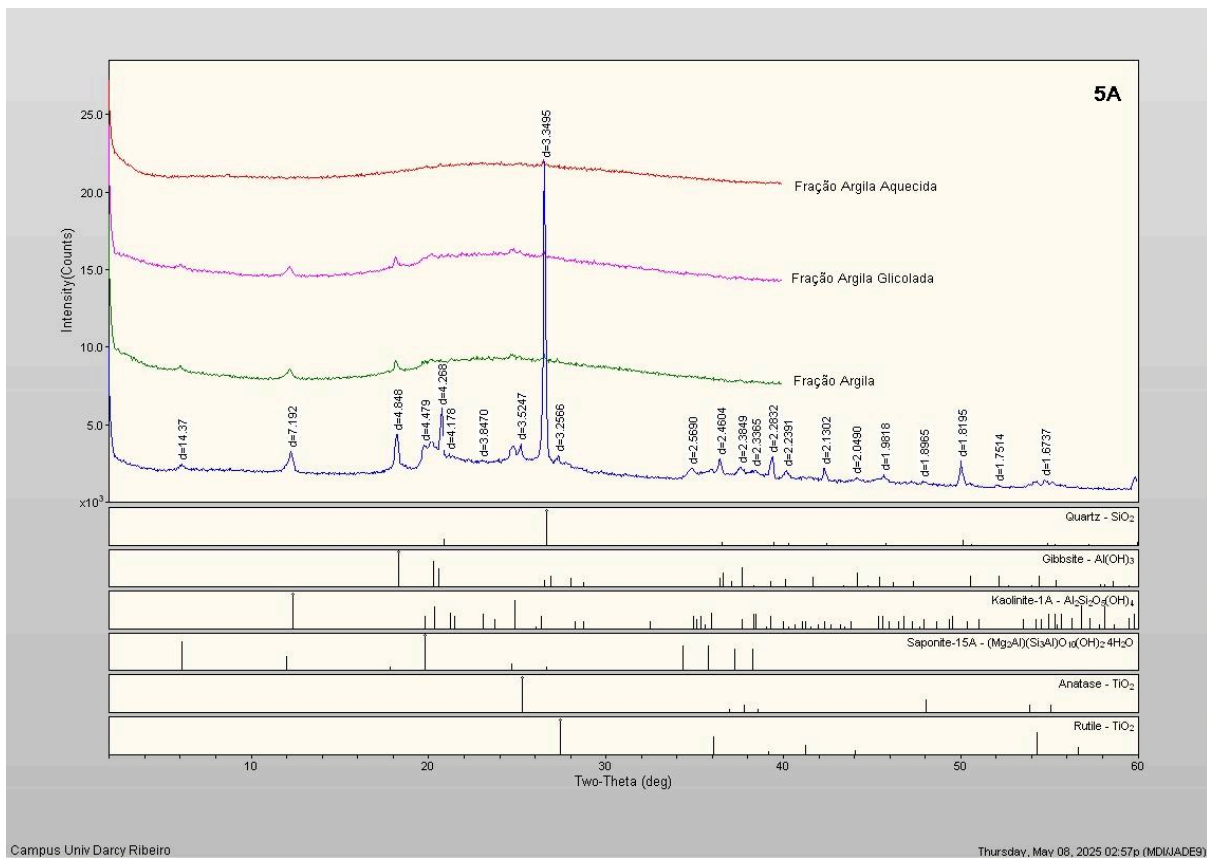
Tabela incluindo os dados de porcentagem de Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio.

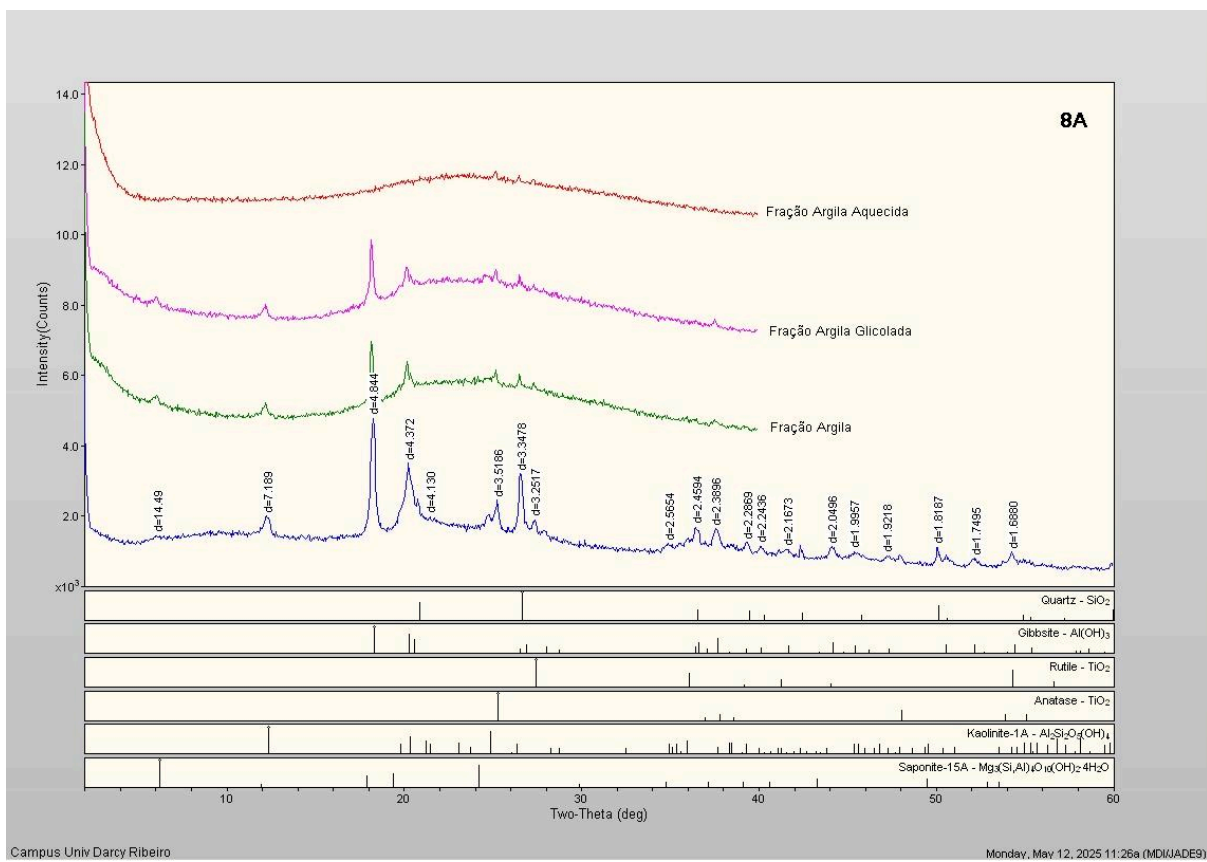
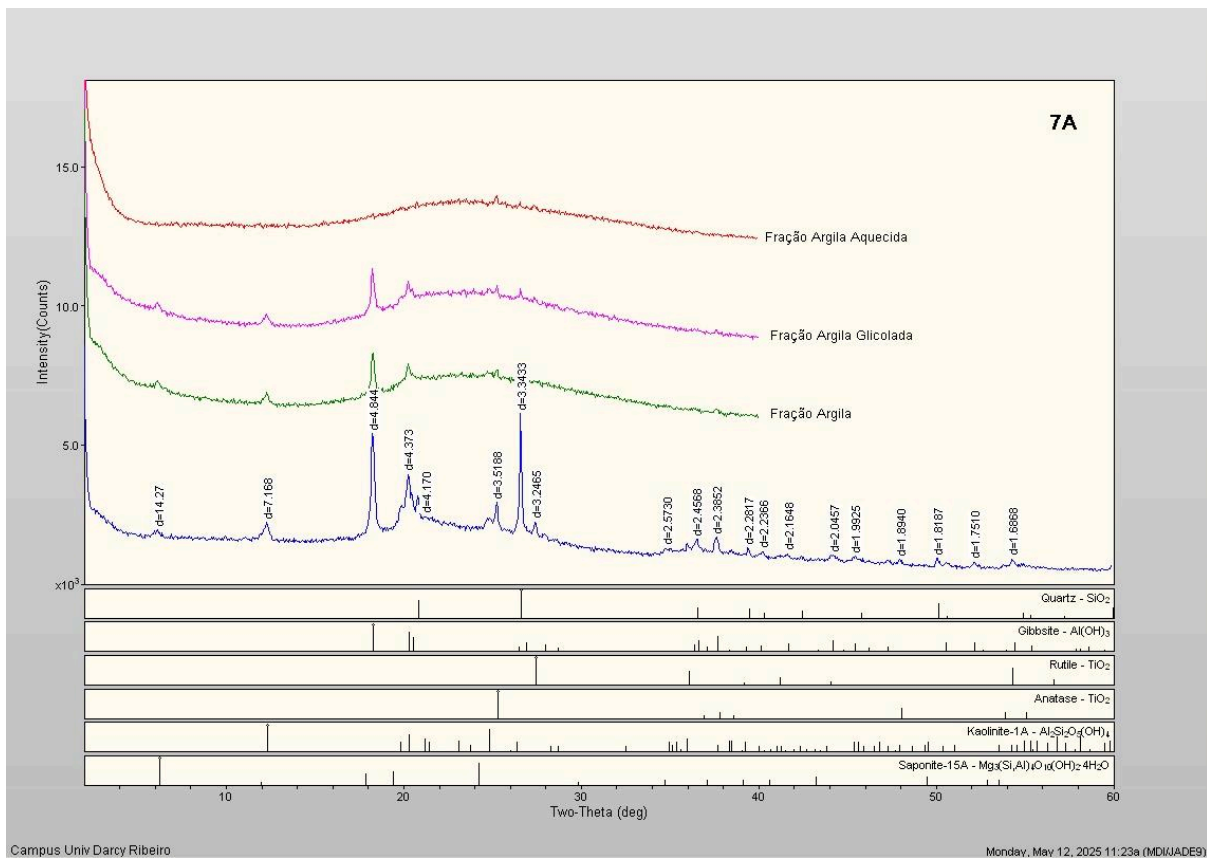
Amostra	N%	C%	H%	Amostra	N%	C%	H%
PT1A	0,754	16,866	7,335	PT6A	1,069	21,053	7,411
PT1B	0,806	18,372	7,489	PT6B	1,041	19,818	7,569
PT1C	0,725	18,703	7,115	PT6C	0,865	11,069	7,818
PT2A	0,98	20,2	6,649	PT7A	0,883	15,8	7,489
PT2B	0,925	19,648	7,489	PT7B	0,878	16,634	7,733
PT2C	0,948	19,315	7,65	PT7C	0,901	15,805	7,411
PT3A	0,794	16,49	7,26	PT8A	0,867	15,059	7,733
PT3B	0,798	17,069	7,26	PT8B	0,88	14,982	7,335
PT3C	0,843	17,287	7,26	PT8C	0,796	14,067	7,26
PT4A	0,825	17,567	7,411	Acetanilide	10,556	72,302	6,712
PT4B	0,929	18,737	7,489	Acetanilide	10,161	69,828	6,712
PT4C	0,903	18,524	7,818	Solo 2	0,032	0,681	
PT5A	0,87	19,493	7,489	Solo 1	0,245	3,412	
PT5B	0,93	19,26	7,489	Solo 1	0,226	3,675	
PT5C	0,894	19,503	7,335				

Gráficos com o resultado mineralógico total, da fração argila, da fração argila glicolada e da fração argila aquecida dos pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

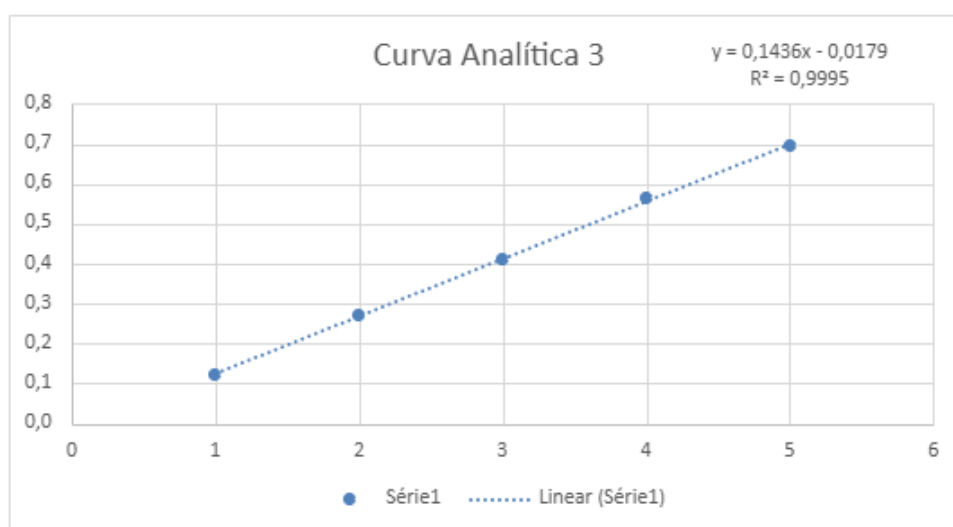
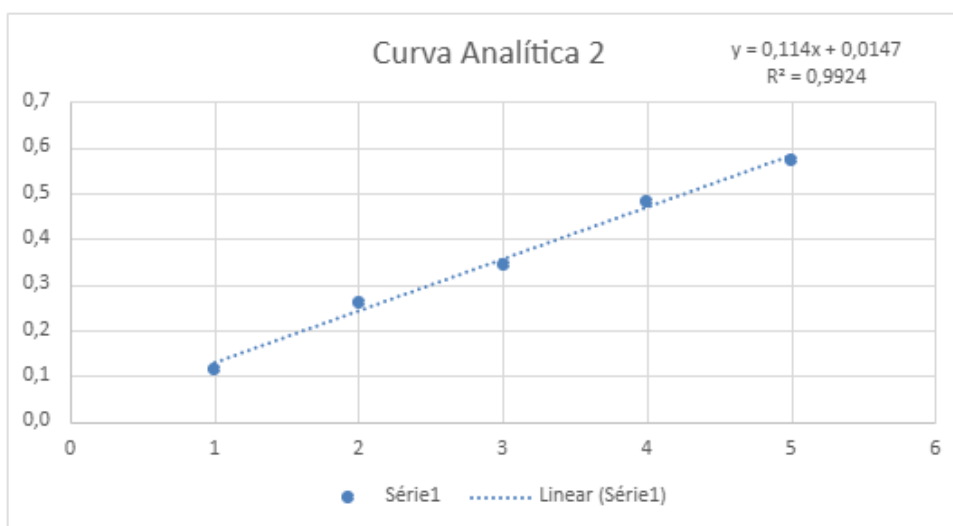
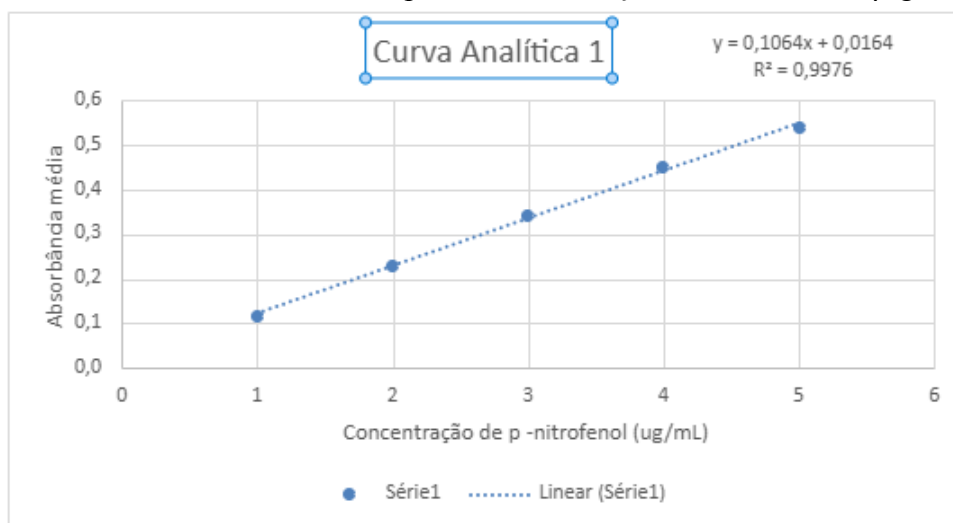








Gráficos das curvas analíticas utilizadas para a determinação da atividade de β -glicosidase.



Gráficos das curvas analíticas utilizadas para a determinação da atividade de Arilsulfatase.

