



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB
INSTITUTO DE QUÍMICA- IQ
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA

ANA LOUISE MONTEIRO DE ARRUDA

**DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DA ENZIMA β -GLUCOSIDASE
EM SOLOS DA CHAPADA DOS VEADEIROS SOB DIFERENTES TIPOS DE
MANEJO**

BRASÍLIA-DF

2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA- UnB

INSTITUTO DE QUÍMICA- IQ

CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA

ANA LOUISE MONTEIRO DE ARRUDA

DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DA ENZIMA β -GLUCOSIDASE EM SOLOS DA CHAPADA DOS VEADEIROS SOB DIFERENTES TIPOS DE MANEJO

Trabalho de conclusão de curso submetido ao curso de graduação em química da Universidade de Brasília como exigência para obtenção do grau de bacharel em química.

Orientador(a): Prof(a) Dr(a) Fernanda
Vasconcelos de Almeida

Co-Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da
Cunha

BRASÍLIA- DF

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser minha fortaleza em todos os momentos, guiando meus passos e me dando forças para seguir em frente. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha família, minha base e meu porto seguro, por todo amor, incentivo e por nunca me deixarem desistir. Em especial, agradeço aos meus pais, Wesley Rodrigues e Adniria Teresa que sempre acreditaram no meu potencial e me apoiaram incondicionalmente nessa jornada.

À minha orientadora, professora Fernanda Vasconcelos de Almeida, pela paciência, ensinamentos e dedicação ao longo da realização deste trabalho. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste projeto, e sou profundamente grata por todo o conhecimento compartilhado.

Ao meu companheiro, Paulo César Melo, por estar ao meu lado em todos os momentos, compartilhando alegrias e desafios, e sendo meu apoio inabalável nessa caminhada.

Às minhas primas, Emily Monteiro e Geovanna Monteiro, por todo suporte emocional, incentivo e carinho durante esses anos. Vocês foram fundamentais para que eu tivesse forças para seguir em frente, e sou imensamente grata por tê-las ao meu lado.

Aos meus amigos, especialmente Israel Rodrigues, Yago Carvalho e Rafael Silva pela companhia, amizade e pelo ombro amigo nos momentos mais difíceis desde o momento em que começamos a compartilhar essa jornada juntos. A jornada acadêmica se tornou mais leve e especial graças a vocês.

À Universidade de Brasília (UnB) e ao Instituto de Química (IQ), por proporcionarem um ambiente de aprendizado e crescimento. Agradeço a todos os professores com quem tive contato ao longo da graduação, por compartilharem seus conhecimentos e por contribuírem para minha formação acadêmica e profissional.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória, meu sincero muito obrigada!

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais pelo amor incondicional, pelo apoio em cada passo da minha jornada e por nunca me deixarem desistir, mesmo nos momentos mais difíceis. Sem vocês, nada disso seria possível. Obrigada por acreditarem em mim quando eu mesma duvidei e por serem minha base em todos os desafios.

RESUMO

A degradação do solo é um problema ambiental significativo, especialmente em ecossistemas sensíveis como o Cerrado, onde o manejo inadequado pode comprometer sua fertilidade e biodiversidade. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a atividade enzimática da β -glucosidase em solos da Chapada dos Veadeiros, Goiás, sob diferentes tipos de manejo, incluindo áreas de cerrado preservado, pasto gradeado, agrofloresta de eucalipto, agrofloresta em processo de restauração, pasto abandonado e mata de galeria. A β -glucosidase é uma enzima chave no ciclo do carbono, atuando na decomposição da celulose e servindo como um bioindicador sensível da qualidade do solo. Foram coletadas amostras de solo em duas profundidades (30 cm e 60 cm), e a atividade enzimática foi determinada por espectrofotometria UV-Vis, utilizando o substrato sintético p-nitrofenil- β -D-glucopiranosídeo (PNG). Os resultados mostraram que a atividade enzimática variou significativamente entre os diferentes tipos de manejo, com os maiores valores observados em áreas de pasto gradeado e mata de galeria, e os menores em áreas de cerrado preservado e agrofloresta em restauração. A atividade enzimática foi consistentemente maior na camada superficial (30 cm), refletindo a maior concentração de matéria orgânica e atividade microbiana nessa profundidade. Os resultados sugerem que práticas de manejo intensivo, como o revolvimento do solo, podem inicialmente aumentar a atividade enzimática, mas a longo prazo podem levar à degradação do solo. Por outro lado, áreas em processo de restauração apresentaram baixa atividade enzimática, indicando que a recuperação da qualidade do solo é um processo lento. Este estudo reforça a importância da β -glucosidase como um bioindicador confiável da qualidade do solo e destaca a necessidade de práticas de manejo sustentáveis para a conservação dos solos da Chapada dos Veadeiros.

Palavras-chave: β -glucosidase, atividade enzimática, manejo do solo, Chapada dos Veadeiros, bioindicadores.

ABSTRACT

Soil degradation is a critical environmental concern, particularly in sensitive ecosystems like the Cerrado, where inadequate management can undermine soil fertility and biodiversity. In this context, the present study aimed to assess the enzymatic activity of β -glucosidase in the soils of Chapada dos Veadeiros, Goiás, under various management practices. These practices include preserved Cerrado, plowed pasture, eucalyptus agroforestry, agroforestry undergoing restoration, abandoned pasture, and gallery forest. β -Glucosidase is a crucial enzyme in the carbon cycle, playing a vital role in cellulose decomposition and serving as a sensitive bioindicator of soil quality. Soil samples were collected at two depths (30 cm and 60 cm), and enzymatic activity was measured using UV-Vis spectrophotometry with the synthetic substrate p-nitrophenyl- β -D-glucopyranoside (PNG). The results indicated significant variation in enzymatic activity among the different management types, with the highest values recorded in plowed pasture and gallery forest areas, and the lowest found in preserved Cerrado and agroforestry undergoing restoration. Enzymatic activity was consistently higher in the surface layer (30 cm), reflecting the greater concentration of organic matter and microbial activity at this depth. The results suggest that intensive management practices, such as soil tillage, may initially enhance enzymatic activity; however, in the long term, they can contribute to soil degradation. Conversely, areas undergoing restoration exhibited low enzymatic activity, indicating that the recovery of soil quality is a gradual process. This study underscores the significance of β -glucosidase as a reliable bioindicator of soil quality and emphasizes the necessity for sustainable management practices to preserve the soils of Chapada dos Veadeiros.

Keywords: β -glucosidase, enzymatic activity, soil management, Chapada dos Veadeiros, bioindicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Composição de um solo genérico	13
Figura 2 Complexo enzima substrato.....	18
Figura 3- Coleta dos solos na região de Alto Paraíso - GO em outubro de 2023.....	25
Figura 4- Amostra de solo separada e identificada	26
Figura 5- Curva analitica	28
Figura 6- Valores de referênciac da atividade β -glucosidase para latossolos argilosos do cerrado, profundidade 0-10 cm em ug g ⁻¹ h ⁻¹ , conceito FERTBIO.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores da média de concentração e atividade enzimática31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIOAS	Tecnologia de Bioanálise do Solo
BMS	Biomassa Microbiana do Solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MO	Matéria Orgânica
MUB	Modified Universal Buffer
pNF	p-nitrofenol
PNG	p-nitrofenil- β -D-glucopiranosídeo
QS	Qualidade do Solo
THAM	Tris(Hidroximetil)aminometano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Obejtivos específicos.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Definição de solo e sua composição	13
3.1.1	Biomassa microbiana e a matéria orgânica do solo	14
3.2	Região semiárida brasileira: Bioma cerrado.....	15
3.3	Bioindicadores para Avaliação da Qualidade do Solo.....	17
3.4	Atividade enzimática do solo	18
3.5	β -glucosidase e o ciclo do carbono	20
3.5.1	Fatores que afetam a atividade da β -glucosidase	21
3.6	BioAS Embrapa.....	22
4	MATERIAIS E METÓDOS	24
4.1	Amostragem e caracterização do solo	24
4.2	Caracterização dos Solos Amostrados	26
4.2.1	Neossolo Quartzarênico	26
4.2.2	Gleissolo.....	27
4.3	Curva de calibração	27
4.4	Procedimento de análise B-glucosidase	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1	Valores de referência β -glucosidase	35
6	CONCLUSÃO	36
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
8	APENDICE	41
8.1	Apendice A- Dados brutos amostras de solos.....	41

1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos recursos naturais mais importantes do planeta, desempenhando um papel fundamental na sustentação da vida terrestre. Ele não apenas serve como base para o crescimento das plantas, mas também atua como um ecossistema complexo, abrigando uma vasta diversidade de microrganismos que participam de processos essenciais, como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a regulação da qualidade do ar e da água (Moreira e Siqueira, 2006). A saúde do solo, portanto, está diretamente relacionada à sua capacidade de manter esses processos biológicos, químicos e físicos, que são cruciais para a produtividade agrícola e a conservação ambiental (Doran e Parkin, 1994).

Nos últimos anos, a perda de solos tem aumentado cada vez mais, especialmente em grandes áreas, e se tornou uma das principais causas da degradação do meio ambiente. Esse problema traz um grande desafio para a sociedade: encontrar formas mais sustentáveis de usar e cuidar da terra para garantir um futuro melhor para as próximas gerações. Além disso, em muitos casos, a degradação já é tão grave que não pode ser revertida, deixando impactos ambientais acumulados ao longo dos anos, com poucas chances de recuperação (Nunes e Castro, 2021).

A região do Cerrado tem passado por mudanças significativas na cobertura e no uso do solo, adquirindo novos significados, principalmente no aspecto econômico. Com sua localização estratégica e um relevo amplamente favorável ao manejo agrícola mecanizado, o Cerrado se consolidou como uma região de grande importância para o agronegócio, impulsionando seu desenvolvimento e expansão. (Oliveira, 2014; Silva *et al.*, 2015).

Entre 2001 e 2019, o Cerrado perdeu mais de 283 mil km² de sua vegetação nativa devido ao desmatamento (Terra Brasilis/Prodes, 2020). Apenas em 2019, a destruição da cobertura vegetal alcançou 6,5 mil km². Grande parte dessa transformação ocorreu para atender à expansão agropecuária. Cerca de 42% do bioma foi substituído por pastagens, enquanto aproximadamente 18 milhões de hectares foram convertidos em áreas agrícolas, evidenciando o impacto da atividade humana sobre esse ecossistema.

Em julho de 2020 a EMBRAPA propôs a tecnologia BioAS (Tecnologia de Bioanálise de Solo). Esta tecnologia, centrada na atividade de 2 enzimas do solo (arillsulfatase e β -glucosidase), representa uma abordagem avançada para melhor caracterizar a qualidade dos solos, extrapolando os parâmetros físico-químicos. Ao enfocar a ação enzimática, o BioAs emerge como uma ferramenta estratégica para impulsionar a recuperação de solos, promovendo a sustentabilidade e a resiliência dos ecossistemas agrícolas (Embrapa, 2013).

Levando em conta todos esses precedentes, a atividade enzimática como análise de qualidade do solo, aparece como uma importante virada de chave para auxiliar no manejo correto do solo, desempenhando um papel fundamental no entendimento dos processos bioquímicos que sustentam a fertilidade e dinâmica do solo. Irá ser explorada neste trabalho a importância da análise de solos fundamentada na atividade enzimática

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a atividade enzimática da β -glucosidase em solos, sob diferentes tipos de manejo, de uma fazenda na Chapada dos Veadeiros, correlacionando os resultados com as características físico-químicas do solo e os impactos das práticas de uso da terra na qualidade do solo.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar a atividade da β -glucosidase em solos sob diferentes sistemas de manejo, incluindo áreas de vegetação nativa, pastagens e cultivos agrícolas.
2. Comparar a atividade enzimática entre diferentes profundidades do solo.
3. Avaliar o impacto do manejo do solo na dinâmica da matéria orgânica e na qualidade biológica do solo por meio da β -glucosidase como bioindicador.

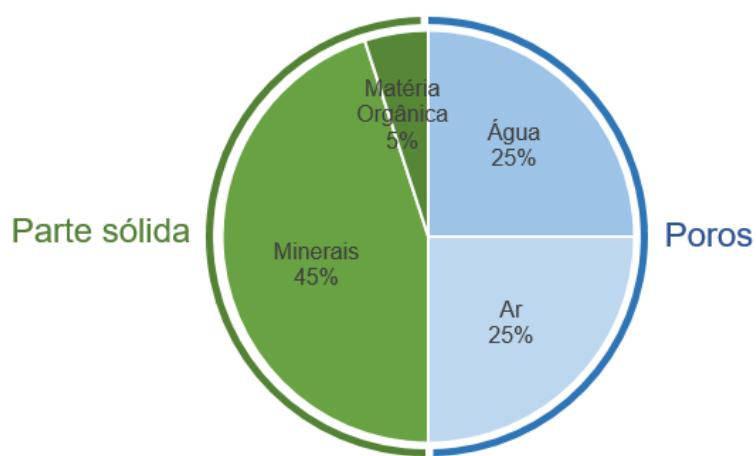
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição de solo e sua composição

O solo é uma camada fundamental da superfície terrestre e desempenha um papel crucial em sustentar a vida. Ele é um recurso natural essencial para o funcionamento do ecossistema terrestre e representa o balanço entre os elementos químicos, físicos e biológicos (Araújo e Monteiro, 2023). Sua importância vai além de uma base física, ele é um grande ecossistema complexo que abriga uma variedade de micro-organismos, que possuem uma alta sensibilidade e rápida resposta frente às situações de estresse (Sousa *et al.*, 2022).

O solo é composto por três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é constituída principalmente por minerais, representando normalmente cerca de 45% do seu volume. Além disso, compreende também a fase orgânica, composta pela matéria orgânica do solo, que dificilmente ultrapassa 5% do volume.

Figura 1 Composição de um solo genérico



Fonte: Geografia opinativa, 2016.

As fases líquida e gasosa ocupam o espaço poroso do solo, podendo corresponder até 50% do volume. A fase líquida conhecida como solução do solo, é composta pela água e os nutrientes nela dissolvidos. Já a fase gasosa, chamada de ar do solo, pode ter origem tanto do ar vindo da atmosfera quanto na atividade biológica do solo (Pes e Arenhardt, 2015).

Apesar de representar a menor fração do solo, a matéria orgânica é essencial para regular os processos físicos, químicos e biológicos. Ela fornece energia para os microrganismos, tornando o solo um ambiente vivo e não apenas um suporte para as plantas (Xavier et al. 2021).

3.1.1 *Biomassa microbiana e a matéria orgânica do solo*

A matéria orgânica do solo é constituída por resíduos de origem vegetal e animal, configurando-se como necromassa ou serrapilheira, sujeita a diferentes estágios de decomposição, sendo o carbono seu componente primordial. Além de conter grandes quantidades de carbono, nutrientes e energia, o conjunto “serrapilheira-solo” faz a comunicação entre o solo e a vegetação, constituindo um habitat onde existe abundante fauna e comunidade microbiana heterotrófica. O estoque de serrapilheira é regulado pela quantidade de material que cai e pela sua decomposição na superfície do solo (Moreira e Siqueira, 2006). Após o processo de decomposição, esse material contribui significativamente para a fertilidade e o condicionamento do solo, estabelecendo um ambiente propício para a sustentação da vida edáfica. Esse fenômeno, conhecido como ciclagem de nutrientes, tem seu início com a decomposição da matéria orgânica na superfície do solo, prosseguindo até que os nutrientes se tornem novamente disponíveis, possibilitando sua absorção pelas plantas. A ciclagem de nutrientes assume papel vital na preservação do equilíbrio do ecossistema, assegurando ótimas condições para o estabelecimento e desenvolvimento vegetal no local (Fauna de Solo, 2019).

A parte viva da matéria orgânica é definida como a biomassa microbiana do solo (BMS). A BMS é considerada o compartimento central do ciclo do carbono, atuando como um reservatório dinâmico de matéria orgânica e controlando a decomposição e a liberação de nutrientes (Pulrolnik, 2009). Este compartimento é a principal fonte de enzimas no solo, sendo assim responsável pela quase totalidade

da atividade biológica deste, catalisando as transformações bioquímicas, representando fonte e dreno de C e troca de nutrientes entre a atmosfera e o ecossistema solo-planta (Moreira e Siqueira, 2006).

A BMS contém em média, de 2 a 5% do carbono orgânico nos solos tropicais (Smith e Paul, 1990). O carbono presente na biomassa microbiana é o primeiro destino do carbono em transformação no solo, atuando como uma forma de energia armazenada para os processos microbianos. Além disso, por responder rapidamente a mudanças no solo, pode ser utilizada como um indicador precoce de alterações na matéria orgânica (Rice *et al.*, 1996).

A biomassa microbiana sofre influência do teor de argila dos solos (Smith e Paul, 1990). A atividade da argila influencia a retenção de água no solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Além disso, contribui para a coesão e adesão das partículas, afetando sua consistência, um fator essencial para o manejo agrícola, especialmente no uso de máquinas no preparo do solo (Embrapa Agitec, 2022).

Segundo estudos, modificações mensuráveis na biomassa microbiana do solo têm sido identificadas em resposta às práticas de preparo do solo, manejo de plantas e adubação. A derrubada da vegetação tropical, seguida da queima, resulta em uma redução inicial da BMS, tendo um aumento posterior, além de promover uma redistribuição ao longo do perfil do solo (Junior e Melo, 1998).

A biomassa microbiana do solo e a atividade enzimática estão intimamente relacionadas, pois os micro-organismos do solo são os principais produtores de enzimas extracelulares responsáveis pela degradação da matéria orgânica e pelo ciclo de nutrientes. Mudanças mensuráveis na biomassa microbiana podem indicar variações na atividade enzimática devido a fatores como disponibilidade de substratos, condições ambientais e impactos de manejo do solo.

3.2 Região semiárida brasileira: Bioma cerrado

O termo Cerrado é utilizado para caracterizar um conjunto vasto de savanas, matas, campos e outros ecossistemas que ocorrem no Brasil. Também é conhecido como a “caixa d’água” do Brasil, pois seu solo tem grande importância no transporte de água para os biomas brasileiros. A importância do solo do Cerrado brasileiro está na sua capacidade de conservar água e vegetação. Os solos de maior

predominância nesse ecossistema são os Latossolos (46%), os Argissolos (15%) e os Neossolos Quartzarênicos (15%). Esses solos são intemperizados, ou seja, solos mais profundos, e suas características marcantes são: baixo teor de nutrientes, elevada acidez e predominância de argilas de baixa atividade (Klink e Machado, 2005).

O Cerrado brasileiro ocorre principalmente no planalto e ocupa aproximadamente 24% do território brasileiro, sendo superado apenas pela Amazônia. Ainda assim é um bioma pouco conhecido e valorizado, o que contribui significativamente para sua acelerada degradação. Até a década de 1950 os cerrados permaneceram praticamente intactos, porém em 1960 com a mudança da capital para Brasília e a construção da malha ferroviária a vegetação nativa foi substituída por pecuária e agricultura (IBGE-Educa, 2024).

Mesmo possuindo a mais rica flora dentre as savanas mundiais, a conservação desse bioma é inferior à da Amazônia, tendo apenas 2,2% de sua área legalmente protegida. A área desmatada do cerrado já é cerca de três vezes maior que a área desmatada da Amazônia, em torno de 55% da área deste bioma já sofreu alterações devido a intervenção humana atividade (Klink e Machado, 2005). Sua degradação causa mudanças na vegetação, reduzindo a infiltração de água no solo e, consequentemente, diminuindo o fornecimento de água para diversos rios e bacias hidrográficas do país (Dias, 1992).

Embora os solos desse bioma sejam considerados de baixa aptidão agrícola, o crescimento populacional e a crise alimentar global impulsionaram a adoção de práticas agrícolas intensivas para maximizar a produção e atender à crescente demanda por alimentos. Entre essas práticas, destacam-se a monocultura, o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes sintéticos e o manejo intensivo do solo. Embora essas estratégias tenham contribuído para o aumento da produtividade no curto prazo, seus impactos ambientais e ecológicos são cada vez mais evidentes pois elas afetam negativamente a microbiota do solo, comprometendo processos bioquímicos essenciais para a ciclagem de nutrientes, a saúde das plantas e o equilíbrio dos ecossistemas agrícolas (Araújo e Monteiro, 2007).

3.3 Bioindicadores para Avaliação da Qualidade do Solo

De um modo geral, os conceitos de qualidade da água e do ar já estão bastante familiarizados por pesquisadores e pela sociedade como um todo. Eles compreendem como o uso inadequado desses recursos afeta a saúde humana e o meio ambiente. Entretanto, apesar da importância essencial do uso do solo para a humanidade, o conceito de qualidade do solo é relativamente recente, surgindo apenas no final dos anos 1980 e no começo dos anos 1990.

Doran e Parkin (1994) propuseram o seguinte conceito à qualidade do solo (QS): “Qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens”. Um solo saudável é um solo biologicamente ativo, capaz de armazenar água, sequestrar carbono, com a capacidade de promover a degradação de pesticidas e outros serviços ambientais (Lehman *et al.*, 2015).

Os micro-organismos desempenham um papel essencial no funcionamento do solo, o que reforça não só a sua importância, mas também a necessidade de incluir indicadores microbiológicos (bioindicadores) nas avaliações da qualidade do solo (Mendes *et al.*, 2015).

Esses indicadores estão diretamente relacionados à atividade microbiana e enzimática do solo, sendo capazes de detectar mudanças antes que elas se manifestem nas propriedades químicas e físicas, refletindo tanto a melhoria quanto a degradação do solo (Oliveira, 2022). Diversos estudos demonstram que os bioindicadores são mais sensíveis do que os indicadores químicos e físicos para identificar, com maior antecedência, alterações decorrentes do uso e manejo do solo (Balota *et al.*, 2003; Balota *et al.*, 2004; Doran, 1980; Mendes *et al.*, 2003).

Uma das grandes dificuldades relacionadas ao uso dos bioindicadores é a ausência de valores de referência, ao contrário dos parâmetros físicos e químicos que já possuem seus limites bem definidos de acordo com as características específicas de um solo (Mendes *et al.*, 2017).

Dessa maneira, um dos maiores desafios para o uso de bioindicadores de qualidade do solo está na interpretação dos resultados, ou seja, na dificuldade de saber quando os valores obtidos representam ou não um solo em boas condições.

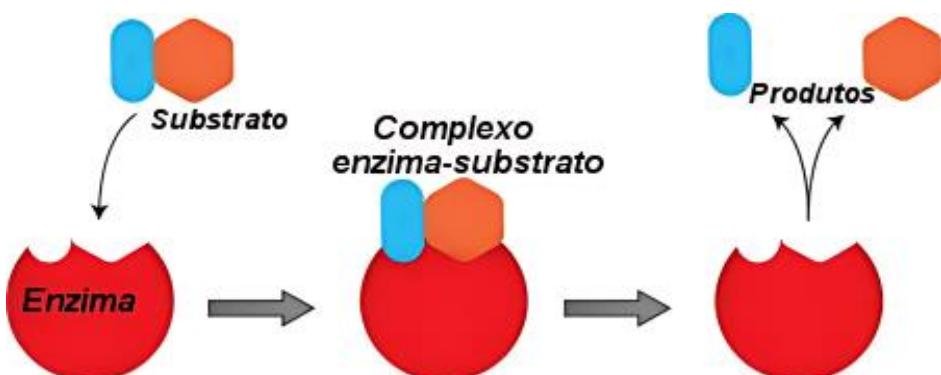
Outro ponto importante é que os valores considerados "ideais" para os bioindicadores podem mudar de acordo com o tipo de solo, as práticas de manejo utilizadas e as condições climáticas de cada região (Mendes *et al.*, 2009).

3.4 Atividade enzimática do solo

Uma enzima é uma proteína altamente especializada na catálise de reações bioquímicas em sistemas biológicos. As enzimas apresentam alto grau de especificidade por seus substratos e aceleram reações químicas (Nelson e Cox, 2005). As reações que as enzimas catalisam, dificilmente aconteceriam naturalmente sem a presença das mesmas. Em resumo, as enzimas aceleram as reações bioquímicas sem serem consumidas ou alteradas durante o processo. Dessa forma, após catalisar uma reação química, uma enzima permanece intacta e pronta para repetir o mesmo ciclo diversas vezes.

As enzimas atuam sobre substratos específicos para reações específicas, sendo assim, uma enzima livre em um meio aquoso, que pode ser o citosol celular ou a água presente no solo, liga-se a uma molécula específica, chamada de substrato. O local onde o substrato se conecta à enzima é conhecido como sítio ativo ou sítio de ligação. A união entre a enzima e o substrato forma um complexo transitório, que é sempre temporário. Após a reação, a enzima retorna à sua forma original e fica disponível para catalisar uma nova reação (Figura 2).

Figura 2 Complexo enzima substrato



Fonte: Mundo da educação, 2025

As enzimas do solo têm origem tanto de micro como de macroorganismos, incluindo plantas e animais, sendo a biomassa microbiana a fonte primária das enzimas. Elas podem se dividir, basicamente, em duas categorias: endocelulares e abiónticas (incluindo as extracelulares). O termo abiónticas não é usado em relação a sua origem, mas ao fato de estarem fora da célula viva (Moreira e Siqueira, 2006). Dentre as enzimas hidrolíticas extracelulares de maior relevância no solo, destacam-se as enzimas dos grupos das celulases, proteases, amilases e lipases (De Oliveira *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2018). O termo hidrolítica se refere às enzimas cujas quebras das moléculas maiores em unidades menores é realizada na presença de água.

A decomposição da matéria orgânica no solo ocorre graças à atividade hidrolítica das enzimas, que quebram esses polímeros. Esse processo é essencial, pois, sem a atuação das enzimas, a matéria orgânica não seria decomposta, impedindo a ciclagem de nutrientes. Por meio da ação das enzimas extracelulares, as moléculas orgânicas são transformadas em unidades poliméricas cada vez menores, liberando no solo substâncias como aminoácidos, peptídeos, carboidratos de cadeia curta, vitaminas, ácidos graxos, entre outras.

Essas moléculas são então absorvidas pelas células microbianas, que as utilizam em seu metabolismo, resultando no aumento da população microbiana no solo. Dessa forma, a comunidade microbiana pode desempenhar diversas funções importantes no ambiente do solo, como a supressão de patógenos, a fixação de nitrogênio atmosférico e a produção de substâncias que promovem o crescimento das plantas. Além disso, por meio desse processo de decomposição, os microrganismos podem liberar nutrientes no solo via mineralização, como fósforo (P), nitrogênio (N), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca), entre outros, na forma de íons, que podem ser diretamente absorvidos pelas raízes das plantas (Moreira e Siqueira, 2006).

Como as enzimas estão presentes em baixa concentração no solo, a sua quantificação é feita de maneira indireta, através da medida de sua atividade, e não da quantidade. Geralmente, a atividade é medida através da quebra de um substrato específico para cada enzima, em condições padronizadas de pH e temperatura (Tabatabai, 1994).

As avaliações da atividade enzimática do solo, bem como de outros parâmetros biológicos e bioquímicos, têm identificado mudanças nos solos

decorrentes de seu uso, manejo ou outras interferências humanas com maior antecedência em comparação com indicadores químicos e físicos (Passos *et al.*, 2008). Há ainda a vantagem de que os métodos empregados para medir a atividade de enzimas no solo são geralmente simples, rápidos, acurados e reproduzíveis (Tabatabai, 1982).

3.5 β -glucosidase e o ciclo do carbono

A vida na Terra depende de dois processos fundamentais do ciclo do carbono (C). O primeiro é a fotossíntese, na qual o CO₂ atmosférico é convertido em compostos orgânicos, formando moléculas de glicose e liberando oxigênio (O₂). Como responsável pela síntese de matéria orgânica, a fotossíntese é o principal processo de fixação do carbono. Parte desse carbono fica armazenado na matéria orgânica do solo (MOS), que atua como um reservatório temporário de CO₂.

O segundo processo é a decomposição da matéria orgânica, na qual moléculas de carbono orgânico são oxidadas, resultando na liberação de CO₂ de volta para a atmosfera. Enquanto a fotossíntese retira CO₂ do ar para formar glicose, a decomposição faz o caminho inverso, convertendo glicose novamente em CO₂. Dessa forma, a MOS pode funcionar tanto como um dreno, ao armazenar carbono, quanto como uma fonte de CO₂ atmosférico, dependendo do equilíbrio entre esses processos.

Após a morte das plantas, a macrofauna do solo tritura os resíduos vegetais, facilitando a ação dos microrganismos sobre a celulose nas frações particuladas. A celulose é um polissacarídeo composto por longas cadeias de moléculas de glicose unidas por ligações glicosídicas. Devido ao seu tamanho, essa molécula não pode ser diretamente absorvida por fungos e bactérias. Para degradá-la, esses microrganismos produzem enzimas extracelulares chamadas celulases, que quebram a celulose em fragmentos menores até liberarem glicose como unidade básica (Lynd *et al.*, 2002).

A β -glucosidase é uma enzima extracelular que atua na fase final da decomposição da celulose, por meio da hidrólise dos resíduos de celobiose (Tabatabai, 1994). Dessa forma, a avaliação da sua atividade é um parâmetro confiável para inferir sobre a qualidade do solo. Quanto maior a atividade dessa enzima, maior a atividade dos microrganismos na transformação e formação da

matéria orgânica. Devido a isso, a β -glucosidase é comumente utilizada como indicador de qualidade do solo (Adetunji *et al.*, 2017). A capacidade dessa enzima de se estabilizar e decompor a matéria orgânica é comumente aplicada a estudos sobre a qualidade do solo.

3.5.1 Fatores que afetam a atividade da β -glucosidase

A atividade da enzima β -glucosidase é afetada pelo pH do solo. De acordo com estudos realizados por Eivazi e Tabatabai (1990) a atividade desta enzima diminuiu conforme o pH do solo aumentou de 4,5 para 8,5. Já em um solo de arroz, ocorreu o mesmo com a mudança de pH de 4,3 para 7,4 em estudos realizados por Xiao-Chang e Qin (2006). Com isso podemos utilizar a atividade da enzima como um indicador bioquímico confiável para avaliar mudanças causadas pela acidificação do solo, visto a sensibilidade da β -glucosidase frente as mudanças de pH.

O aumento da salinidade no solo também tem impacto sobre a atividade da enzima, causando uma diminuição no seu valor (Rietz e Haynes, 2003). Essa informação também pode complementar o uso da enzima como um indicador de qualidade.

Quanto à umidade e temperatura do solo, estudos realizados por Zang e colaboradores (2011), ambos os parâmetros afetam a atividade da enzima. A atividade enzimática decai entre 10-80% e 35-83% conforme a umidade do solo reduz em 10% e 21% respectivamente (Sardans e Penuelas, 2005). Sendo assim, podemos considerar uma menor ciclagem de C em solos com baixa umidade.

A distribuição da β -glucosidase no perfil do solo está diretamente relacionada à presença de substratos e à atividade microbiana. Como os micro-organismos responsáveis pela produção desses substratos estão mais concentrados na superfície do solo, a atividade enzimática tende a diminuir com o aumento da profundidade (Xiao-Chang e Qin, 2006).

Curiosamente, teores mais elevados de β -glucosidase podem ser encontrados em solos cultivados (Mendes *et al.*, 2019). Isso pode estar relacionado à diferença na composição da matéria orgânica entre solos de vegetação nativa e solos agrícolas. Em vegetações nativas, a grande diversidade de plantas resulta em resíduos orgânicos mais complexos e resistentes à degradação, exigindo uma comunidade microbiana diversa e um conjunto maior de enzimas para a

decomposição da matéria orgânica. Em contraste, nos solos cultivados, a vegetação tende a ser mais homogênea, produzindo resíduos mais simples e facilmente degradáveis.

Estudos em diferentes sistemas de manejo reforçam essa relação. Em um Latossolo Vermelho Eutroférico, sob plantio convencional e direto, observou-se que o revolvimento do solo no sistema convencional favoreceu a atividade enzimática na camada superficial, pois incorporou resíduos vegetais e aumentou a aeração e a disponibilidade de substratos, estimulando temporariamente a atividade microbiana. No entanto, Cervantes e colaboradores (2011) compararam a atividade enzimática em áreas agrícolas sob sistema de plantio direto (SPD) com diferentes tempos de adoção e uma área de mata nativa, demonstrando que, embora o revolvimento inicial possa aumentar temporariamente a atividade enzimática, ao longo do tempo o SPD restabelece condições microbiológicas mais próximas às da vegetação nativa, promovendo um equilíbrio enzimático mais sustentável.

Um estudo realizado em Primavera do Leste (MT), em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob vegetação nativa (cerradão) e em áreas agrícolas, revelou que a vegetação nativa apresentou menor atividade enzimática em comparação com os solos cultivados (Matsuoka *et al.*, 2003). Isso se deve à estabilidade dos processos microbianos e à eficiência da ciclagem de nutrientes na vegetação nativa, enquanto os solos agrícolas, por sofrerem maior intervenção, apresentam maior renovação da matéria orgânica e, consequentemente, maior atividade enzimática.

Dessa forma, a atividade da β -glucosidase se mostra um excelente indicador da qualidade do solo, permitindo avaliar os impactos do manejo agrícola, da composição da matéria orgânica e das condições ambientais sobre a funcionalidade microbiana e a ciclagem de nutrientes.

3.6 BioAS Embrapa

Os estudos com os biondicadores tiveram início em 1999, com o projeto de Caracterização da biomassa e atividade microbiana em solos de cerrado sob vegetação nativa e sob diferentes sistemas de manejo. Os resultados promissores deram início ao projeto Bioindicadores para avaliação da qualidade de solos em diferentes agroecossistemas brasileiros, que está na sua quarta fase (2021-2023).

Até julho de 2020, as análises laboratoriais de solo disponíveis para os agricultores abrangiam principalmente aspectos químicos, como acidez, macro e

micronutrientes, e físicos, incluindo os teores de argila, silte e areia. No entanto, essas avaliações apresentavam uma lacuna significativa: a ausência do componente biológico, fundamental para a saúde do solo. Como a biologia é a base da fertilidade e sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas, a falta desse parâmetro limitava a compreensão completa da qualidade do solo.

Em 23 de julho de 2020, após 21 anos de estudos, a Embrapa lançou a tecnologia de bioanálise do solo, visando agregar o componente biológico nas análises de rotina do solo.

A tecnologia BioAS é uma ferramenta que permite ao agricultor alcançar avanços significativos na saúde do solo das lavouras, uma vez que facilita a identificação das melhores práticas de manejo e também daquelas que podem vir a degradar o solo e comprometer a produtividade futuramente.

Essa tecnologia envolve a análise de duas enzimas, β -glucosidase e arilsulfatase, que desempenham um papel essencial na avaliação do potencial produtivo e da sustentabilidade do solo. Essas enzimas estão ligadas, respectivamente, aos ciclos do carbono e do enxofre, atuando como bioindicadores da qualidade do solo. Altos níveis dessas enzimas indicam práticas de manejo adequadas e sustentáveis, favorecendo a manutenção da fertilidade e da saúde do solo. Em contrapartida, valores reduzidos sinalizam a necessidade de ajustes no sistema de produção, servindo como um alerta para a adoção de estratégias que promovam a recuperação e conservação do solo. A escolha das enzimas se deve ao fato de que, em todos os experimentos analisados, esses bioindicadores demonstram alta sensibilidade na detecção de mudanças no solo resultante dos diferentes tipos de manejo (Mendes *et al.*, 2019)

Algumas características também tornaram vantajosa a escolha dessas enzimas, sendo elas: precisão, coerência, sensibilidade, determinação analítica simples e reproduzibilidade (Mendes *et al.*, 2019)

Um exemplo de como os biondicadores podem ser mais eficientes quando comparados aos indicadores químicos e físicos foi o experimento de rotação de culturas na soja (RCS), conduzido desde 2008 pela Fundação MT em Itiquira (MT), onde oito sistemas de cultivo, incluindo monocultivo, sucessão e rotação de culturas foram avaliados (Mendes *et al.*, 2017 e 2020)

O estudo comparou os impactos do monocultivo de soja e da sucessão soja/braquiária no solo e na produtividade agrícola ao longo de várias safras. Até

2013/2014, a produtividade dos diferentes tratamentos era semelhante, mas, em 2014/2015, um veranico evidenciou o declínio do monocultivo, que apresentou menor produtividade (29 sacas/ha) em comparação à sucessão soja/braquiária (59 sacas/ha).

Apesar de características químicas semelhantes entre os solos, a sucessão com braquiária aumentou significativamente a atividade enzimática, com elevação de 4 e 8 vezes nos níveis de β -glucosidase e arilsulfatase, respectivamente. Isso demonstrou que o componente biológico do solo era mais ativo no sistema de sucessão, favorecendo maior retenção de água, estruturação e resiliência ao estresse hídrico.

4 MATERIAIS E METÓDOS

4.1 Amostragem e caracterização do solo

Para o presente estudo a coleta das amostras foi realizada na região de Alto Paraíso de Goiás, na Chapada dos Veadeiros, em outubro de 2023 durante uma excursão realizada pelo professor da Geologia da UnB, Luciano Soares da Cunha (Figura 3).

Os solos foram coletados em diferentes áreas de uso e tipos de solo. O estudo focou na análise da atividade enzimática da β -glucosidase em amostras de Neossolo Quartzênico e Gleissolo, que representam condições distintas de desenvolvimento pedogenético e uso do solo na região.

Figura 3- Coleta dos solos na região de Alto Paraíso (GO) em outubro de 2023



Fonte: Prof. Luciano Soares da Cunha

Foram selecionados 18 pontos de amostragem, abrangendo diferentes condições de manejo:

- Cerrado preservado (HY130, HY230, HY330)
- Pasto gradeado (HY430, HY530, HY630)
- Agrofloresta (Eucalipto) (HY730, HY830, HY930)
- Agrofloresta em processo de restauração (HY1030, HY1130, HY1230)
- Pasto abandonado (HY1330, HY1430, HY1430)
- Mata de galeria (HY1630, HY1730, HY1830)

Em cada ponto, foram coletadas duas amostras de solo em profundidades distintas de 30 cm e 60 cm, totalizando 36 amostras.

O material foi colocado em sacos plásticos devidamente identificados (Figura 4), garantindo que não houvesse contaminação ou mistura entre as amostras.

Figura 4- Amostra de solo separada e identificada



Fonte: A autora

Após a coleta, as amostras foram levadas ao Laboratório de Quimiometria e Química ambiental (AQQUA), localizado no Instituto de Química (IQ) da Universidade de Brasília (UnB) onde foram peneiradas utilizando uma peneira 2 mm. Em seguida, com o auxílio de uma pinça, foram retirados resíduos mais grossos, como galhos, raízes, pedras e outros materiais orgânicos não decompostos. As amostras foram secas à temperatura ambiente para posterior análise. A quantificação da β -glucosidase foi realizada por espectrofotometria UV-Vis, utilizando o substrato sintético PNG.

4.2 Caracterização dos Solos Amostrados

4.2.1 Neossolo Quartzarênico

- Solo com baixa fertilidade natural, caracterizado pelo predomínio de areia fina e baixa retenção de água.
- Apresenta pequeno desenvolvimento pedogenético e reduzida diversidade mineralógica.
- Encontrado em diferentes usos do solo no estudo, incluindo Cerrado Preservado, Pasto Gradeado, Agrofloresta, Pasto Abandonado e Agrofloresta em Restauração.
- As amostras deste tipo de solo são: HY130, HY230, HY330, HY430, HY530, HY630, HY730, HY830, HY930, HY1030, HY1130, HY1230, HY1330, HY1430, HY1530.

4.2.2 Gleissolo

- Solo com elevado teor de matéria orgânica, comum em áreas com alta saturação hídrica.
- Apresenta coloração acinzentada, devido à redução e remoção do ferro, fenômeno típico de solos hidromórficos.
- No estudo, foi encontrado em áreas de mata galeria, podendo indicar um histórico de solos anteriormente classificados como Organossolos.
- As amostras deste tipo de solo são: HY1630, HY1730, HY1830

A caracterização dos tipos de solo, e a nomenclatura das amostras foram realizadas pelo professor da geologia da UnB, Luciano Soares da Cunha.

4.3 Curva de calibração

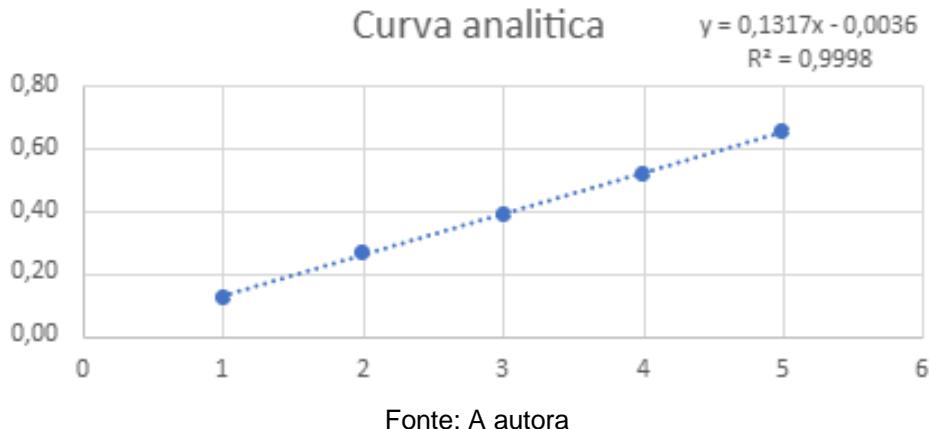
Para iniciar o procedimento de preparo da curva analítica, 6 béqueres foram numerados como C (controle), 1, 2, 3, 4 e 5. Com a micropipeta foram transferidas as soluções conforme descritas na tabela 1:

Tabela 1. Curva padrão para β -glucosidase

	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

Após o preparo das soluções, estas foram homogeneizadas e levadas para leitura no equipamento. A primeira leitura realizada foi a do branco, apenas uma vez. Logo em seguida foi realizada a leitura em triplicata para as amostras de 1 a 5.

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 (Figura 5) a = 0,1317 e b = -0,0036.

Figura 5- Curva analítica

Resolvendo a equação para x (concentração de p-nitrofenol):

$$X = \frac{y-b}{a} \quad (1)$$

Para calcular atividade da β -glucosidase, utilizando a equação (1):

$$\text{p-nitrofenol } \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} = \frac{y - (-0,0036)}{0,1317}$$

O valor de absorbância (y) utilizado na equação (1) é a média das leituras de absorbância em triplicata da amostra do solo já subtraídas da prova em branco:

Leitura da amostra HY230 1.1: 0,58015

Leitura da amostra HY230 1.2: 0,58029

Leitura da amostra HY230 1.3: 0,57932

$$Y(\text{amostra}) = \frac{0,58015 + 0,58029 + 0,57932}{3} = 0,57992 \quad (2)$$

Substituindo na equação (1):

$$\text{p-nitrofenol } \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} = \frac{0,57992 - (-0,0036)}{0,1317} = 4,43 \mu\text{g de p-nitrofenol} \quad (3)$$

4.4 Procedimento de análise β-glucosidase

A atividade da β-glucosidase foi determinada utilizando como substrato p-nitrofenil-β-D-glucopiranosídeo PNG 0,025 M. Amostras de solo (1,0 g) foram colocadas em erlenmeyers de 50 mL, sendo utilizado um controle. Em seguida, foram adicionados 4,0 mL da solução MUB pH 6 (Tabatabai, 1994) a todas as amostras e 1,0 mL de PNG (0,025 M), com exceção dos controles. Os erlenmeyers foram fechados com rolhas de borracha e incubados a 37 °C por uma hora. Após a incubação, foram adicionados 1,0 mL de CaCl₂ (0,5 M), 4,0 mL de Tris-Hidroximetil-Aminometano (THAM pH 12) e 1,0 mL de PNG (0,025 M), somente aos controles. Em seguida, o meio reacional foi filtrado em papel de filtro. A intensidade da coloração amarela do filtrado foi determinada em espectrofotômetro a 400 nm. A quantidade de p-nitrofenol (pNP) formada em cada amostra foi calculada com base em uma curva padrão preparada com concentrações conhecidas de pNP (0, 10, 20, 30, 40 e 50 µg de p-nitrofenol por mL⁻¹). A atividade enzimática foi expressa em µg de p-nitrofenol liberado por hora por grama de solo seco (µg de p-nitrofenol h⁻¹ g⁻¹ solo seco).

O método de determinação utilizado pela EMBRAPA é baseado no método descrito por Tabatabai (1994), porém sem adição de tolueno.

Para calcular a atividade da enzima em massa de solo, a partir da curva padrão:

$$\text{Atividade enzimática no solo: } p - \text{nitrofenol } (\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}) = \frac{C \times V}{g \times t} \quad (4)$$

Onde,

C = concentração de p-nitrofenol na suspensão de solo, em µg/mL (equação 3)

g= peso do solo seco ao ar (g)

t= tempo de incubação (h)

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

Com os valores utilizados nos ensaios (1 g de solo seco ao ar, 1 h de incubação na estufa e 10 mL de volume de suspensão = soma do volume de todos os reagentes adicionados ao solo), podemos substituir na equação (4):

$$p - nitrofenol (\mu g \ g^{-1} h^{-1}) = \frac{4,43 \mu x 10 mL}{1g x 1h} = 44,31 \mu g \ g^{-1} h^{-1}$$

Esse foi o valor de atividade enzimática encontrado para a amostra HY230 1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a análise da atividade enzimática da β -glucosidase nos solos estudados, foi observado que as medidas de absorbância para a profundidade de 60 cm ficaram fora da curva esperada. Esses valores indicaram uma atividade enzimática extremamente baixa, dificultando sua quantificação precisa e confiável.

A determinação da atividade enzimática por espectrofotometria depende diretamente da linearidade dos dados obtidos. Quando os valores medidos se aproximam do limite de detecção do método, a incerteza aumenta significativamente, comprometendo a interpretação dos resultados. No caso das amostras na profundidade de 60 cm, as baixas absorbâncias obtidas impossibilitaram a aplicação do cálculo da atividade enzimática com precisão.

Além disso, é esperado que a atividade da β -glucosidase diminua com a profundidade do solo, uma vez que essa enzima está associada à matéria orgânica e à atividade microbiana, geralmente mais concentrada nas camadas superficiais. Dessa forma, os resultados para 60 cm não seriam representativos para a avaliação da dinâmica enzimática no solo, tornando-se menos relevantes para a discussão do estudo.

Diante disso, foi optado por prosseguir apenas com os dados referentes à profundidade de 30 cm, onde a atividade enzimática pôde ser determinada de forma confiável. Essa abordagem permite uma análise mais precisa e fundamentada, garantindo que as conclusões do estudo sejam baseadas em dados robustos e representativos.

A atividade enzimática da β -glucosidase, como demonstrado neste estudo, é um indicador sensível das condições biológicas e bioquímicas do solo, refletindo não apenas as práticas de manejo, mas também as características intrínsecas dos solos analisados. A Chapada dos Veadeiros, localizada no bioma Cerrado, apresenta uma diversidade de solos, com destaque para o Neossolo Quartzarênico e o Gleissolo,

que foram os tipos de solo estudados. Esses solos possuem propriedades físicas, químicas e biológicas distintas, que influenciam diretamente a atividade enzimática e a qualidade do solo. A seguir, discutimos os resultados em relação aos tipos de solo e às práticas de manejo, com base nas características específicas de cada área amostrada.

Tabela 1- Valores de média de concentração e atividade enzimática

Amostra	Conc (ug mL ⁻¹) \bar{x}	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹) \bar{x}
HY130 1		
HY130 2	1,95	19,53
HY130 3		
HY230 1		
HY230 2	4,52	45,23
HY230 3		
HY330 1		
HY330 2	3,13	28,94
HY330 3		
HY430 1		
HY430 2	0,92	9,17
HY430 3		
HY530 1		
HY530 2	0,41	4,12
HY530 3		
HY630 1		
HY630 2	0,98	9,77
HY630 3		
HY730 1		
HY730 2	1,20	11,98
HY730 3		
HY830 1		
HY830 2	0,33	3,26
HY830 3		
HY930 1		
HY930 2	0,90	8,95
HY930 3		

HY1030 1		
HY1030 2	0,92	9,17
HY1030 3		
HY1130 1		
HY1130 2	0,52	5,20
HY1130 3		
HY1230 1		
HY1230 2	0,89	8,87
HY1230 3		
HY1330 1		
HY1330 2	3,13	13,37
HY1330 3		
HY1430 1		
HY1430 2	0,62	6,22
HY1430 3		
HY1530 1		
HY1530 2	0,56	5,59
HY1530 3		
HY1630 1		
HY1630 2	1,42	14,22
HY1630 3		
HY1730 1		
HY1730 2	0,69	6,86
HY1730 3		
HY1830 1		
HY1830 2	1,58	15,84
HY1830 3		

O solo sob pasto gradeado apresentou os maiores valores de atividade enzimática, indicando um solo biologicamente ativo. Esse aumento pode ser atribuído ao manejo recente da terra, que promove o revolvimento do solo e a deposição de matéria orgânica na superfície. A incorporação de resíduos vegetais e a renovação da pastagem aumentam a disponibilidade de substratos para a microbiota, estimulando a atividade enzimática.

Porém, esse cenário pode ser transitório. Embora a gradagem possa inicialmente favorecer a decomposição de matéria orgânica e estimular a atividade enzimática, ela também pode acelerar a mineralização do carbono, levando a perda gradual de matéria orgânica e a compactação do solo.

Já o solo sob cerrado preservado apresentou uma das menores atividade enzimática entre os sistemas estudados. Esse resultado pode ser explicado pela natureza do ecossistema em equilíbrio, onde os processos de deposição e decomposição de matéria orgânica ocorrem de maneira estável e gradual. No cerrado, a matéria orgânica tende a ser mais recalcitrante, com maior quantidade de substâncias húmicas, o que pode dificultar sua degradação imediata pelos micro-organismos do solo.

Além disso, a vegetação nativa apresenta uma diversidade de resíduos orgânicos mais complexos, que exigem um conjunto enzimático diversificado para sua decomposição. Como o ecossistema já atingiu um equilíbrio natural não há grandes variações na disponibilidade de substratos para a microbiota do solo, resultando em uma atividade enzimática relativamente baixa.

Os solos sob agrofloresta de eucalipto apresentaram baixa atividade enzimática, o que pode ser explicado pelo efeito alelopático dessa espécie. O eucalipto é conhecido por liberar compostos químicos, como fenóis e terpenóides, que podem inibir a atividade microbiana e reduzir a decomposição da matéria orgânica no solo (Souza *et al.*, 2013). Esses compostos dificultam a proliferação de microrganismos decompositores, impactando diretamente a produção de enzimas como a β -glucosidase. Entre os indicadores avaliados no trabalho de Chaer e Tótola (2007), a atividade da enzima β -glucosidase ficou entre os mais sensíveis ao efeito do uso ou manejo do solo, em áreas com eucalipto.

Além disso, a monocultura do eucalipto limita a diversidade de resíduos vegetais disponíveis para os microrganismos do solo, dificultando a ciclagem de nutrientes. Esse fator pode explicar os valores reduzidos de atividade enzimática observados, uma vez, que a microbiota do solo pode estar menos ativa devido à menor oferta de substratos biodegradáveis.

As áreas de agrofloresta em restauração também apresentaram baixa atividade enzimática, indicando que a recuperação da microbiota do solo ainda está em andamento. O restabelecimento da qualidade biológica do solo é um processo

lento, que depende da deposição progressiva de matéria orgânica, da melhoria da estrutura do solo e do aumento da diversidade microbiana (Mendes *et al.*, 2020).

A baixa atividade pode estar associada à escassez de matéria orgânica ativa e à falta de um equilíbrio estável na microbiota do solo. Como o sistema ainda está em fase de transição, a biodiversidade microbiana pode não ter se restabelecido completamente, resultando em uma menor produção de enzimas hidrolíticas. Isso reforça a importância do tempo na recuperação da fertilidade do solo e na reativação de sua microbiota.

Os solos sob pasto abandonado apresentaram atividade enzimática variável, mas geralmente reduzida, indicando que a microbiota do solo ainda sofre os impactos do manejo passado. Quando uma pastagem é abandonada, a degradação acumulada pode resultar em baixos teores de matéria orgânica e na compactação do solo, dificultando a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes.

A ausência de um manejo ativo pode retardar a recuperação do solo, pois a entrada de matéria orgânica e a reestruturação da comunidade microbiana ocorrem lentamente. A regeneração natural pode levar décadas para restaurar completamente a funcionalidade biológica do solo, especialmente em áreas onde houve intensa degradação.

Os solos sob mata de galeria apresentaram valores elevados de atividade enzimática, o que pode ser explicado por dois fatores principais:

Alta deposição de matéria orgânica: A vegetação densa das matas de galeria favorece um grande acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo, fornecendo uma fonte constante de carbono para a microbiota do solo.

Elevada umidade do solo: O solo das matas de galeria é frequentemente hidromórfico, apresentando alta saturação de água, o que cria condições favoráveis para a atividade microbiana. A umidade constante mantém a microbiota ativa e favorece a decomposição da matéria orgânica, resultando em níveis elevados de atividade enzimática (Eivazi e Tabatabai, 1990).

Essa combinação de fatores torna a mata de galeria um ambiente altamente produtivo do ponto de vista biológico, garantindo um suprimento contínuo de substratos para os microrganismos e uma ciclagem eficiente dos nutrientes no solo.

5.1 Valores de referência β -glucosidase

Os resultados obtidos neste estudo indicam que as amostras analisadas apresentaram valores de atividade da β -glucosidase consideravelmente mais baixos quando comparados aos valores de referência disponíveis para Latossolos na profundidade de 0-10 cm (Figura 5). No entanto, é fundamental considerar que os solos investigados neste trabalho são Neossolos Quartzênicos e Gleissolos, coletados a 30 cm de profundidade, o que pode influenciar diretamente na atividade enzimática observada.

Os Neossolos Quartzênicos são solos pouco desenvolvidos, com baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, predominância de fração arenosa e reduzido teor de matéria orgânica, fatores que limitam a atividade microbiana e, consequentemente, a produção de enzimas hidrolíticas como a β -glucosidase. Já os Gleissolos, por sua característica hidromórfica, estão frequentemente sujeitos a condições de alagamento, o que favorece processos anaeróbicos e pode reduzir a atividade de microrganismos aeróbicos responsáveis pela degradação da matéria orgânica e pela produção dessa enzima.

Figura 6- Valores de referência da atividade β -glucosidase para latossolos argilosos do cerrado, profundidade 0-10 cm em ug g⁻¹ h⁻¹, conceito FERTBIO.

Bioindicador*	Classe de interpretação		
	Baixo	Moderado	Adequado
β -glucosidase	<66	67-115	>116

Fonte: Embrapa, 2021.

Além das características desses solos, a profundidade de coleta também desempenha um papel importante na interpretação dos resultados. A atividade microbiana e a concentração de matéria orgânica tendem a ser mais elevadas nas camadas mais superficiais (0-10 cm), onde há maior aporte de resíduos vegetais e melhor oxigenação do solo. Em profundidades maiores, como os 30 cm analisados neste estudo, a disponibilidade de substratos orgânicos para os microrganismos é reduzida, o que pode justificar os baixos valores de atividade enzimática encontrados.

Outro ponto relevante é a ausência de valores de referência específicos para Neossolos Quartzênicos e Gleissolos. A Embrapa ainda não possui faixas estabelecidas para esses solos em particular, o que se deve, em grande parte, à ampla diversidade de classes de solo no Brasil, associada às variações climáticas e de uso da terra. A complexidade desses fatores torna desafiadora a definição de padrões que possam ser aplicados de forma generalizada.

Os resultados deste estudo indicam que a atividade da β -glucosidase foi relativamente mais alta nos solos sob pasto gradeado e mata de galeria, quando comparados às demais áreas analisadas. No entanto, essa elevação na atividade enzimática não deve ser interpretada de forma isolada como um indicativo de solo saudável ou de boas práticas de manejo, pois diversos fatores podem influenciar a produção e a atividade de enzimas do solo.

A interpretação dos valores de atividade enzimática deve considerar outros parâmetros físicos, químicos e biológicos do solo, permitindo uma análise mais abrangente da sua qualidade. Estudos complementares, incluindo a avaliação da biomassa microbiana, do teor de matéria orgânica, da estrutura do solo e da disponibilidade de nutrientes, são essenciais para uma compreensão mais aprofundada dos processos que regem a dinâmica do solo sob diferentes condições de uso e manejo.

Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de estudos adicionais para a definição de valores de referência para diferentes tipos de solo e profundidades, considerando suas particularidades pedogenéticas e ambientais. Pesquisas futuras poderão contribuir para uma compreensão mais aprofundada da dinâmica da β -glucosidase em solos menos estudados, auxiliando na interpretação da qualidade biológica do solo e no desenvolvimento de estratégias de manejo mais sustentáveis.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar a atividade enzimática da β -glucosidase em solos da Chapada dos Veadeiros sob diferentes sistemas de manejo, buscando compreender a influência dessas práticas na qualidade biológica do solo. A β -glucosidase, sendo um bioindicador sensível da ciclagem do carbono,

revelou variações significativas de atividade enzimática entre os diferentes usos da terra, fornecendo informações valiosas sobre o impacto das práticas de manejo na dinâmica microbiana e na matéria orgânica do solo.

Os resultados demonstraram que a atividade enzimática foi mais elevada no pasto gradeado, possivelmente devido ao revolvimento do solo, que pode aumentar temporariamente a disponibilidade de substratos para os microrganismos. No entanto, esse efeito pode ser transitório, uma vez que o revolvimento excessivo do solo pode levar à degradação da matéria orgânica e à perda da qualidade estrutural do solo em longo prazo. A mata de galeria também apresentou valores elevados, o que pode estar relacionado ao elevado teor de matéria orgânica e à umidade constante nesses ambientes.

Por outro lado, os menores valores de atividade enzimática foram observados em áreas de cerrado preservado e agrofloresta em restauração. No caso do cerrado preservado, a matéria orgânica pode estar mais estabilizada e menos disponível para degradação microbiana imediata. Já na agrofloresta em restauração, os baixos valores podem indicar que o processo de recuperação da microbiota do solo ainda está em andamento, reforçando que a regeneração da qualidade biológica do solo é um processo lento e gradual.

Além disso, verificou-se que a atividade enzimática foi consistentemente maior na profundidade de 30 cm em comparação a 60 cm, refletindo a maior concentração de matéria orgânica e atividade microbiana na camada superficial. Esse achado está de acordo com estudos que indicam que a biomassa microbiana e a atividade enzimática tendem a decair com o aumento da profundidade do solo, devido à menor disponibilidade de substratos e condições menos favoráveis à atividade biológica.

Dessa forma, os resultados deste estudo reforçam a relevância da β -glucosidase como um bioindicador confiável da qualidade do solo, demonstrando sua sensibilidade às diferentes práticas de manejo.

Para estudos futuros, recomenda-se que a coleta de solo seja realizada preferencialmente nas camadas mais superficiais, especialmente na profundidade de 0-10 cm, uma vez que essa região tende a apresentar maior atividade biológica e influência das condições ambientais, além de poder obter um melhor estudo comparativo com os dados da literatura, que são somente para menores profundidades.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADETUNJI, A. T. et al. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 17, n. 3, p. 794–807, 2017.
- BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biology and Fertility of Soils*, v. 38, n. 1, p. 15-20, jun. 2003.
- BALOTA, E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 35, n. 4, p. 300-306, out./dez. 2004.
- BIOANÁLISE DE SOLO: COMO ACESSAR E INTERPRETAR A SAÚDE DO SOLO. Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1110832/bioanalise-de-solo-como-acessar-e-interpretar-a-saude-do-solo>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- BIOLOGIA DO SOLO. Revista Brasileira de Ciências do Solo, 1999. p. 258-263.
- DE OLIVEIRA, C. T.; PEREIRA, J. Q.; BRANDELLI, A.; DAROIT, D. J. Prospecting soil bacteria from subtropical Brazil for hydrolases production. *Biologia*, v. 72, p.130-139, 2017.
- DIAS, B. F. Alternativas de desenvolvimento dos cerrados. Brasília: Ibama, 1992.
- DORAN, J. W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 4, p. 765-771, 1980.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 22, n. 7, p. 891-897, 1990.
- FAUNA DE SOLO – IMPORTÂNCIA NA NUTRIÇÃO VEGETAL. Paraná: Campo & Negócios, 9 jun. 2019. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br>. Acesso em: 07 dez. 2024.
- FRANCISCO, A. S. Solo – definição e importância. In: BORGES, A. L.; AINFO. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

GEOGRAFIA OPINATIVA. Estudo dos solos I: definição e características. 2016. Disponível em: <https://www.geografiaopinativa.com.br/2016/01/estudo-dos-solos-i-definicao-e.html>. Acesso em: 03 de dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Biomas brasileiros. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomas-brasileiros.html>. Acesso em: 27 dez. 2024.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. Megadiversidade, v. 1, n. 1, jul. 2005.

LYND, L. R.; WEIMER, P. J.; ZYL, W. H.; PRETORIUS, I. S. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v. 66, n. 3, p. 506–577, 2002.

MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Carbono, carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática em um solo sob mata natural, pastagem e cultura do algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1998, São Paulo.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Cuiabá, p. 425-433, mar. 2003.

MENDES, I. C. et al. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para campo. *Cadernos de Ciência e Tecnologia*, v. 32, p. 185-203, 2015.

MENDES, I. C.; ONO, F. B.; OLIVEIRA, M. I.; et al. Rotação de culturas, bioindicadores e saúde do solo. In: SILVA, P. A.; OLIVEIRA, L. C. (org.). *Rotação de culturas, bioindicadores e saúde do solo*. 19. ed. Rondonópolis: Fundação MT, 2020. v. 19, p. 102-110.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

MUNDO DA EDUCAÇÃO. Teoria do encaixe induzido. Disponível em: <https://mundodaeducacao.bol.uol.com.br/biologia/teoria-encaixe-induzido.htm>. Acesso em: 03 jan. 2025.

NELSON, D. L.; COX, M. M. Lehninger: *Principles of Biochemistry*. 4. ed. New York, 2005. p. 1119.

NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. Degradação de fitofisionomias do Cerrado e impactos erosivos hídricos lineares no sudoeste de Goiás – Brasil. Sociedade & Natureza, v. 33, 2021.

PASSOS, S. R. et al. Atividade enzimática e perfil da comunidade bacteriana em solo submetido à solarização e biofumigação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 43, n. 7, p. 879-885, jul. 2008.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. Solos. Santa Maria: UFSM, Colégio Politécnico: Rede e-Tec Brasil, 2015. 90 p. ISBN 978-85-63573-78-0.

RICE, C. W.; MOORMAN, T. B.; BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds.). Methods for assessing soil quality. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 203-215. (SSSA Special Publication, 49).

RIETZ, D.; HAYNES, R. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*. v.35, p.845-854. 2003.

SARDANS, J.; PENUELAS, J. Drought decreases soil enzyme activity in a mediterranean quercus ilex l. Forest. *Soil Biology and Biochemistry*. v. 37, p. 455-461, 2005.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J. M.; STOTSKY, G. (eds.). *Soil biochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1990. p. 357-398.

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, 1994. p. 775-883.

XIAO-CHANG, W.; QIN, L. Beta-glucosidase activity in paddy soils of the taihu lake region, china. *Pedosphere*. v.16, p.118-124. 2006.

ZHANG, Y.; CHEN, L.; WU, Z.; SUN, C. Kinetic parameters of soil β -glucosidase response to environmental temperature and moisture regimes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.35, p.1285-1291. 2011.

8 APENDICE

8.1 Apendice A- Dados brutos amostras de solos

Amostra	Conc (ug/mL)	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹)
130 1	1,98	19,77
130 2	1,97	19,69
130 3	1,91	19,14
Média	1,95	19,53
Desv.pad	0,03	0,34
230 1	4,43	44,31
230 2	4,59	45,88
230 3	4,55	45,49
Média	4,52	45,23
Desv.pad	0,08	0,82
330 1	3,13	31,32
330 2	3,17	31,74
330 3	2,38	23,76
Média	3,13	28,94
Desv.pad	0,09	4,49

Amostra	Conc (ug mL ⁻¹)	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹)
430 1	0,88	8,78
430 2	0,97	9,66
430 3	0,91	9,07
Media	0,92	9,17
Desv.pad	0,05	0,45
530 1	0,40	4,03
530 2	0,43	4,32
530 3	0,40	4,02

Média	0,41	4,12
Desv.pad	0,02	0,17
630 1	0,92	9,23
630 2	1,03	10,31
630 3	0,98	9,77
Media	0,98	9,77
Desv.pad	0,05	0,54

Amostra	Conc (ug mL ⁻¹)	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹)
730 1	1,19	11,86
730 2	1,14	11,38
730 3	1,27	12,69
Media	1,20	11,98
Desv.pad	0,07	0,66
830 1	0,31	3,13
830 2	0,26	2,59
830 3	0,41	4,07
Média	0,33	3,26
Desv.pad	0,08	0,75
930 1	0,91	1,28
930 2	0,92	1,30
930 3	0,85	1,20
Media	0,90	1,26
Desv.pad	0,04	0,05

Amostra	Conc (ug mL ⁻¹)	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹)
1030 1	0,55	5,52
1030 2	0,80	7,96
1030 3	1,40	14,02
Média	0,92	9,17
Desv.pad	0,44	4,38

1130 1	0,51	5,06
1130 2	0,50	5,01
1130 3	0,56	5,55
Média	0,52	5,20
Desv.pad	0,03	0,30
1230 1	1,13	11,31
1230 2	1,14	11,41
1230 3	0,39	3,90
Média	0,89	8,87
Desv.pad	0,43	4,31

Amostra	Conc (ug mL ⁻¹)	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹)
1330 1	1,34	13,43
1330 2	1,33	13,33
1330 3	1,33	13,33
Média	3,13	13,37
Desv.pad	1,34	13,43
1430 1	0,48	4,77
1430 2	0,66	6,57
1430 3	0,73	7,32
Média	0,62	6,22
Desv.pad	0,13	1,31
1530 1	0,54	5,40
1530 2	0,56	5,60
1530 3	0,58	5,78
Média	0,56	5,59
Desv.pad	0,02	0,19

Amostra	Conc (ug mL ⁻¹)	Atv. Enzima (ug g ⁻¹ h ⁻¹)
1630 1	1,35	13,54
1630 2	1,32	13,23
1630 3	1,59	15,90
Média	1,42	14,22
Desv.pad	0,15	1,46

1730 1	0,63	6,32
1730 2	0,75	7,46
1730 3	0,68	6,80
Média	0,69	6,86
Desv.pad	0,06	0,57
1830 1	1,79	17,86
1830 2	1,70	16,98
1830 3	1,27	12,68
Média	1,58	15,84
Desv.pad	0,28	2,77
