

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Reyllis Kiefer Unfer

**COMPORTAMENTO DA ENZIMA BETAGLICOSIDASE PÓS-
COLHEITA DE SOJA EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO NA
REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS

2024

Reyllis Kiefer Unfer

COMPORTAMENTO DA ENZIMA BETAGLICOSIDASE PÓS-COLHEITA DE SOJA EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós- Graduação em Agricultura de Precisão, Área de Concentração em Manejo de sítio específico de solo e planta, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luís Santi

Santa Maria, RS,

2024

Unfer, Reyllis
COMPORTAMENTO DA ENZIMA BETAGLICOSIDASE PÓS-COLHEITA
DE SOJA EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO NA REGIÃO CENTRAL
DO RIO GRANDE DO SUL / Reyllis Unfer.- 2024.
43 p.; 30 cm

Orientador: Antônio Luís Santi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em
Agricultura de Precisão, RS, 2024

1. Sustentabilidade 2. Zonas de Manejo 3. Enzimas do
Solo 4. Qualidade do Solo 5. Produtividade Agrícola I.
Luís Santi, Antônio II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2024

Todos os direitos autorais reservados a Reyllis Kiefer Unfer. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Odon Cavalcanti, 110, Marina. Cachoeira do Sul, RS, CEP 996505-630.

Fone: (0xx51) 997371786; Endereço eletrônico: reyllis9@gmail.com

Reyllis Kiefer Unfer

COMPORTAMENTO DA ENZIMA BETAGLICOSIDASE PÓS-COLHEITA DE SOJA EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Área de Concentração em Manejo de sítio específico de solo e planta, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Aprovado em 07 de maio de 2024:

Dr. Antônio Luis Santi (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Dr. Alexandro Cagliari (UERGS)

(Examinador)

Dr. André Luis Vian (UFRGS)

(Examinador)

Santa Maria, RS,

2024

AGRADECIMENTOS

A Deus...

EPÍGRAFE

*Alguém está sentado na sombra hoje porque
alguém plantou uma árvore há muito tempo.*

(Warren Buffett)

RESUMO

COMPORTAMENTO DA ENZIMA BETAGLICOSIDASE PÓS-COLHEITA DE SOJA EM DIFERENTES ZONAS DE MANEJO NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Autor: Reyllis Kiefer Unfer
Orientador: Antônio Luis Santi

O crescimento populacional global e a demanda crescente por alimentos, especialmente de cultivos de grande escala como soja, milho e trigo, requerem um aumento contínuo na produtividade agrícola. Isso vai além da simples expansão das áreas cultiváveis, exigindo também otimização do manejo nas áreas já em produção. As zonas de manejo tornam-se cruciais, pois requerem ajustes específicos de acordo com as características de cada região, visando maximizar a eficiência produtiva e preservar os recursos naturais. A enzima betaglicosidase emerge como um indicador crucial da qualidade do solo, estando diretamente ligada à decomposição da matéria orgânica e à disponibilidade de nutrientes para as plantas. O objetivo desse estudo foi investigar o comportamento da enzima correlacionado com diversos atributos do solo em diferentes zonas de manejo. Para isso, foram selecionadas 21 lavouras comerciais de soja na região central do Rio Grande do Sul. A delimitação das zonas de manejo foi realizada com base no histórico de mapas de colheita e leituras de índices vegetativos, dividindo as áreas em três zonas distintas de acordo com o potencial produtivo. Posteriormente, foram coletadas amostras de solo em cada zona, a uma profundidade de 0-15 cm, utilizando uma broca mecânica acoplada a um quadriciclo, garantindo representatividade em cada área de estudo. As análises de solo foram conduzidas no laboratório da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), incluindo testes de macro e micronutrientes, além de análises de granulometria. A análise enzimática da betaglicosidase foi realizada pela startup ConnectBio, incubada na UNISC, fornecendo dados essenciais para compreender a relação entre a atividade da enzima e os atributos do solo em diferentes zonas de manejo. Foi realizada uma análise da correlação entre a atividade da betaglicosidase e diferentes zonas de manejo agrícola, juntamente com os atributos do solo, como pH, nutrientes e textura. Os resultados indicam que áreas com alto potencial produtivo tendem a apresentar condições mais favoráveis para o desenvolvimento das plantas, refletindo em maior atividade da enzima. A relação entre a atividade da betaglicosidase e diversos atributos do solo destaca a influência desses elementos na ciclagem de nutrientes e na saúde geral do solo. Dessa forma, a betaglicosidase surge como um bioindicador essencial da qualidade do solo, cuja atividade reflete não apenas a fertilidade do solo, mas também sua capacidade de sustentar cultivos produtivos de forma sustentável, contribuindo para a segurança alimentar global.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Zonas de manejo. Enzimas do Solo. Qualidade do solo. Produtividade.

ABSTRACT

BEHAVIOR OF THE POST-HARVEST BETAGLYCOSIDASE ENZYME OF SOYBEAN IN DIFFERENT MANAGEMENT AREAS IN THE CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL

Author: Reyllis Kiefer Unfer

Advisor: Antônio Luis Santi

The global population growth and the increasing demand for food, especially from large-scale crops such as soybeans, corn, and wheat, require a continuous increase in agricultural productivity. This goes beyond simple expansion of cultivable areas, also demanding optimization of management in already productive areas. Management zones become crucial as they require specific adjustments according to each region's characteristics, aiming to maximize productive efficiency and preserve natural resources. The betaglucosidase enzyme emerges as a crucial indicator of soil quality, directly linked to the decomposition of organic matter and nutrient availability for plants. The aim of this study was to investigate the enzyme's behavior correlated with various soil attributes in different management zones. For this purpose, 21 commercial soybean fields in the central region of Rio Grande do Sul were selected. The delimitation of management zones was based on historical harvest maps and readings of vegetative indices, dividing the areas into three distinct zones according to productive potential. Subsequently, soil samples were collected in each zone, at a depth of 0-15 cm, using a mechanical auger attached to an all-terrain vehicle, ensuring representativeness in each study area. Soil analyses were conducted at the Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) laboratory, including tests for macro and micronutrients, as well as granulometry analyses. The enzymatic analysis of betaglucosidase was performed by the ConnectBio startup, incubated at UNISC, providing essential data to understand the relationship between enzyme activity and soil attributes in different management zones. A correlation analysis was conducted between betaglucosidase activity and different agricultural management zones, along with soil attributes such as pH, nutrients, and texture. The results indicate that areas with high productive potential tend to present more favorable conditions for plant development, reflecting in higher enzyme activity. The relationship between betaglucosidase activity and various soil attributes highlights the influence of these elements on nutrient cycling and overall soil health. Thus, betaglucosidase emerges as an essential bioindicator of soil quality, whose activity reflects not only soil fertility but also its capacity to sustain productive crops sustainably, contributing to global food security.

Keywords: Sustainability. Management zones. Soil Enzymes. Soil quality. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa demonstrativo da representatividade territorial do trabalho.....	22
Figura 2 – Mapas de índices de vegetação.....	23
Figura 3 – Demonstração da distribuição dos pontos amostrais nas áreas	24
Figura 4 – Demonstração do equipamento utilizado nas coletas.....	24
Figura 5 – Gráfico dos Atributos químicos do Solo nas diferentes zonas de manejo.....	27
Figura 6 – Gráfico da análise física por granulometria das diferentes zonas de manejo.	28
Figura 7 – Comportamento da Enzima Betaglicosidase (nMol de nitrofenol liberado em 1g de solo em 1 hora) nas diferentes zonas de manejo.....	29
Figura 8 – Gráfico Bloxplot com a amplitude de variação da enzima em cada zona de manejo e resultado do Teste de Tukey.....	30
Figura 9 – Gráfico de Correlação dos valores de Saturação de bases, Al%, CTC pH7, pH H2O e M.O.% com os valores de Betaglicosidase nas diferentes zonas de manejo.....	31
Figura 10 – Correlação dos valores de P, K%, Ca%, Mg%, Relação (Ca+mg)/K e S com os valores de betaglicosidase em todas as zonas de manejo.....	33
Figura 11 - Correlação dos valores de Mn, B, Cu e Zn com os valores de betaglicosidase em todas as zonas de manejo.....	34
Figura 12 – Correlação entre os teores de Argila, Silte e Areia com os valores de betaglicosidase em todas as zonas de manejo.....	35
Figura 13 – Dispersão dos valores de Betaglicosidase em função do teor de matéria orgânica do solo em todas as zonas de manejo.....	36
Figura 14 – Dispersão dos valores de Betaglicosidase em função do pH H2O do solo em todas as zonas de manejo.....	37
Figura 15 – Dispersão dos valores de Betaglicosidase em função da Saturação de Alumínio do solo em todas as zonas de manejo.....	37
Tabela 1 – Organização dos dados obtendo 275 medições da betaglicosidase em cada zona de manejo, soma, média e variância.	29
Tabela 2 – Apresentação da ANOVA, a qual apresenta 822 graus de liberdade, Soma de quadrados de 32 milhões dentro dos grupos e um F acima do F crítico.....	30

LISTA DE SIGLAS

Al= Alumínio

B= Boro

Ca= Cálcio

CTC= Capacidade de Troca de Cátions

Cu= Cobre

GPS=

K= Potássio

M.O.= Matéria Orgânica

Mg= Magnésio

Mn= Manganês

MSAVI2= Índice de Vegetação Ajustado pelo Solo Modificado

NDRE= Índice da Borda do Vermelho de Diferença Normalizada

NDVI= Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

ONU = Organização das Nações Unidas

P= Fósforo

S= Enxofre

SIG= Sistema de Informação Geográfica

UNISC= Universidade de Santa Cruz do Sul

Zn= Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Agricultura na Região Central do Rio Grande do Sul	15
2.2 Zonas de Manejo.....	15
2.3 Importância da qualidade biológica do solo	16
2.4 Bioindicadores de Qualidade do Solo.....	17
2.5 Enzimas do Solo	18
2.6 Enzimas do solo como Bioindicadores de qualidade.....	19
2.7 Enzima Betaglicosidase	20
2.8 Betaglicosidase e Matéria Orgânica	20
3. MATERIAS E MÉTODOS	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5. CONCLUSÕES.....	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1- INTRODUÇÃO

No contexto global contemporâneo, o crescimento demográfico manifesta-se de forma cada vez mais pronunciada, acarretando uma ampla gama de implicações de caráter mundial (United Nations, 2022). Dentre essas ramificações, uma das mais prementes, senão a mais alarmante, é a crescente demanda por alimentos, que se estende tanto à nutrição humana direta quanto à suplementação alimentar animal e aos diversos segmentos da cadeia produtiva, todos cruciais para o funcionamento e a sustentação da sociedade em todas as suas dimensões. Dentro dessa panorâmica, ressalta-se a crescente importância dos cultivos de grande envergadura, tais como soja, milho e trigo, cuja relevância no panorama global tem se acentuado progressivamente, dada a amplitude e a vastidão de aplicações proporcionadas pelos seus produtos finais (FAO, 2024).

Os atuais patamares produtivos elevados nos impõem um desafio contínuo e premente: a busca incessante por um aumento vertical na produção agrícola. Tal desiderato não se restringe simplesmente à ampliação das áreas cultiváveis, mas, sobretudo, à otimização do manejo aplicado às áreas já sob cultivo, visando a uma redução significativa na discrepância entre a produtividade potencial de uma cultura e os resultados efetivamente obtidos no campo (Lobell et al. 2024). Nesse intrincado contexto, as zonas de manejo emergem como elementos cruciais. Compreender e ajustar o manejo agrícola de acordo com as especificidades de cada zona, levando em consideração variáveis como a fertilidade do solo, a disponibilidade hídrica, a topografia e o histórico de cultivo, torna-se não apenas uma prerrogativa, mas uma necessidade premente para maximizar o rendimento das culturas (Grace et al. 2017).

Além do aspecto quantitativo da produção, a otimização do manejo das áreas já em produção traz consigo benefícios de cunho ambiental e sustentável. Ao reduzir a pressão sobre novas áreas de cultivo, contribui-se significativamente para a preservação dos recursos naturais e a manutenção do equilíbrio ecológico. Desta forma, o investimento na análise e aprimoramento das práticas de manejo em diferentes zonas de produção não só se justifica, mas se revela como um imperativo moral e ambiental para alcançar um aumento sustentável da produtividade agrícola (Tilman et al. 2024).

Nesse contexto desafiador, o imperativo de produzir mais com menos área se associa ao desafio igualmente relevante de produzir mais com menos custos e impactos ambientais. Variáveis como a qualidade biológica do solo emergem, então, como fatores

preponderantes nesse contexto. Movimentos globais, como o Pacto Global da ONU, lançado em 2020, estabelecem metas ambiciosas para a agricultura moderna, incluindo a redução expressiva da quantidade de fertilizantes minerais utilizados. Isso ressalta a importância crescente de aperfeiçoar outros fatores que também influenciam a produtividade das culturas, como a qualidade biológica do solo (FAO, 2020).

Diante dessas premissas, estudos sobre indicadores de qualidade biológica do solo tornam-se cada vez mais pertinentes, ancorados na atividade de enzimas específicas que podem atuar como bioindicadores. Dentre estas, destaca-se a enzima betaglicosidase, responsável pela degradação da celulose e liberação de glicose no solo, potencializando, assim, a atividade microbiológica (Turner et al. 2002). A glicose liberada pela ação da betaglicosidase é uma fonte primária de energia para uma ampla variedade de microrganismos presentes no solo, incluindo bactérias, fungos e actinomicetos. Portanto, a atividade dessa enzima pode ser considerada como um indicador direto da disponibilidade de substratos orgânicos no solo e, por extensão, da atividade microbiana geral (Acosta-Martinez et al. 2011).

Além disso, a betaglicosidase desempenha um papel fundamental na ciclagem de nutrientes no solo. A liberação de glicose e outros açúcares fermentáveis pela atividade desta enzima não apenas fornece energia para os microrganismos do solo, mas também promove a mineralização da matéria orgânica, resultando na liberação de nutrientes como nitrogênio, fósforo e enxofre na forma disponível para as plantas (Bourennane, 2017).

É importante ressaltar que a atividade da betaglicosidase é influenciada por uma variedade de fatores ambientais e de manejo do solo, incluindo temperatura, umidade, pH, textura do solo, tipo e quantidade de matéria orgânica, entre outros (Balota et al. 2004).

Este estudo tem como propósito primordial compreender o comportamento da enzima betaglicosidase em diferentes zonas de manejo agrícola. As áreas de estudo consistem exclusivamente em lavouras comerciais de soja localizadas na região central do Rio Grande do Sul. A fim de controlar o fator temporal na análise, as coletas de solo para a subsequente caracterização da enzima foram realizadas ao longo de três anos distintos, sempre dentro de um prazo de até 30 dias após a colheita da soja na área.

A hipótese central deste estudo postula que zonas de manejo com alto potencial produtivo apresentarão níveis superiores da enzima, corroborando, assim, seu potencial

como bioindicador de qualidade do solo. Além disso, almeja-se compreender as relações entre os níveis da enzima e os atributos químicos do solo, vislumbrando a possibilidade de um ajuste futuro no manejo químico com vistas à melhoria global da qualidade do solo.

1.1- OBJETIVOS:

1.1-1. Objetivo Geral: Compreender o comportamento da enzima betaglicosidase em diferentes zonas de manejo agrícola em lavouras comerciais de soja localizadas na região central do Rio Grande do Sul.

1.1-2. Objetivos Específicos:

- Avaliar a correlação entre os níveis da enzima e os atributos químicos do solo, como pH, nutrientes e textura.
- Verificar se zonas de manejo com alto potencial produtivo apresentam níveis superiores da enzima, corroborando seu potencial como bioindicador de qualidade do solo.
- Avaliar a viabilidade da enzima betaglicosidase como um indicador confiável e sensível da qualidade do solo em ambientes de cultivo de soja, considerando sua correlação com parâmetros físico-químicos do solo.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1- Agricultura na Região Central do Rio Grande do Sul

A região desempenha um papel significativo no cenário agrícola brasileiro, sendo caracterizada por condições climáticas e de solo propícias para uma produção diversificada e eficiente. Dotada de um clima subtropical úmido, marcado por verões calorosos e invernos moderadamente frios, e solos predominantemente Argissolos e Nitossolos, reconhecidos por sua fertilidade, a região proporciona um ambiente propício para o cultivo de múltiplas culturas.

Destacam-se a soja e o arroz como os principais pilares agrícolas na área, usufruindo das condições climáticas ideais para seu desenvolvimento. O cultivo de milho também se destaca, servindo tanto para consumo humano quanto para a alimentação animal, enriquecendo a diversidade da produção agrícola. Ademais, o inverno moderadamente frio propicia condições favoráveis para o cultivo de trigo, constituindo uma cultura relevante para a rotação de culturas na região.

Os agricultores na região central do Rio Grande do Sul têm abraçado tecnologias modernas visando aprimorar a eficiência agrícola. A mecanização, mediante o emprego de tratores e colheitadeiras, é uma prática comum, otimizando as operações no campo. A agricultura de precisão, valendo-se de GPS e monitoramento remoto, possibilitando um manejo mais eficaz das culturas através da diferenciação das áreas e o manejo específico de áreas desuniformes através da delimitação de zonas de manejo.

2.2 - Zonas de Manejo do Solo

As áreas de cultivo agrícola possuem características de natureza química, física e biológica bastante variáveis, o que gera distintos potenciais produtivos e, conseqüentemente, estratégias de manejo diferentes. As zonas de manejo visam justamente caracterizar e delimitar estas diferenças, buscando agregar áreas de características similares em uma espécie de subárea que permita facilidade e praticidade para a adoção do produtor. As subáreas são gerenciadas de maneira diferenciada para otimizar a produção de culturas, levando em consideração as características particulares do solo e do ambiente. Esse tipo abordagem visa melhorar a eficiência no uso de insumos, como água e fertilizantes, e maximizar o rendimento das culturas.

Pesquisas realizadas por Cambardella e Moorman (2014) destacam a importância de considerar a variabilidade espacial do solo ao implementar zonas de manejo. Utilizando técnicas avançadas de sensoriamento remoto e análises geoespaciais, os autores demonstram como a heterogeneidade do solo pode ser identificada e usada para personalizar práticas de manejo em diferentes zonas do campo.

Além disso, estudos como o de Vallis et al. (2018) exploram a aplicação de tecnologias de agricultura de precisão para otimizar as zonas de manejo do solo. A utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) e monitoramento em tempo real permite uma abordagem mais dinâmica e adaptativa, ajustando as práticas de manejo de acordo com as condições específicas de cada zona.

A consideração das propriedades do solo, como textura, teor de matéria orgânica e capacidade de retenção de água, é fundamental para o sucesso das zonas de manejo. Estudos como o de Pieri et al. (2017) enfatizam a importância de caracterizar essas propriedades para uma gestão eficaz do solo, identificando estratégias específicas para cada zona.

Portanto, para que seja eficiente o manejo por meio das zonas de uma área específica é necessário a realização de um planejamento adequado de uso e ocupação do solo, o qual definirá primeiramente quais as áreas passíveis de receber as mesmas práticas agronômicas, visando reduzir os impactos do homem sobre o meio ambiente (Miqueloni et al., 2015), através da observação de fatores como a qualidade biológica do solo.

2.3 - Importância da qualidade biológica do solo

A qualidade biológica do solo desempenha um papel essencial nos ecossistemas terrestres, influenciando diretamente a fertilidade do solo, a produção agrícola sustentável e a saúde ambiental. A comunidade biológica do solo, composta por uma diversidade de microrganismos, fauna e flora, desempenha funções cruciais que impactam a ciclagem de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica e a formação de agregados do solo.

Diversos estudos enfatizam a importância dos microrganismos do solo na promoção da qualidade biológica. A pesquisa de Bardgett e van der Putten (2014) destaca o papel dos microrganismos na decomposição da matéria orgânica, mineralização de nutrientes e supressão de patógenos, contribuindo assim para a melhoria da qualidade do solo.

A diversidade microbiana do solo é frequentemente associada à resiliência e estabilidade do ecossistema. Trabalhos como o de Philippot et al. (2013) ressaltam que a diversidade funcional dos microrganismos do solo é crucial para o fornecimento de serviços ecossistêmicos, como a regulação do ciclo de nutrientes e a promoção da resistência a estresses ambientais.

Além disso, a atividade biológica do solo está intimamente ligada à formação de agregados, influenciando a estrutura física do solo e sua capacidade de retenção de água e nutrientes (Six et al., 2004). Essa interação entre a biologia e a estrutura do solo é fundamental para garantir uma base sólida para o desenvolvimento das plantas.

A qualidade biológica do solo também desempenha um papel crucial na agricultura sustentável. Práticas agrícolas que promovem a diversidade biológica do solo, como a rotação de culturas e o uso de adubação verde, são fundamentais para manter a fertilidade do solo e reduzir a dependência de insumos externos (Powlson et al., 2014). Com isso, busca-se constantemente formas de mensurar essa qualidade, visto que, dos três fatores que sustentam o tripé da qualidade do solo, o biológico segue sendo o mais intangível e imensurável até hoje. Entretanto, existem diversos estudos sobre formas para sua mensuração, tais como os bioindicadores de qualidade do solo.

2.4 - Bioindicadores de Qualidade do Solo

Os bioindicadores de qualidade do solo desempenham um papel crucial na avaliação da saúde e fertilidade do solo, fornecendo informações valiosas sobre as condições biológicas e ambientais desse ecossistema. Esses indicadores biológicos podem incluir diversos organismos, desde microrganismos do solo até macrofauna, que respondem de maneira sensível às alterações nas propriedades e práticas de manejo do solo.

Estudos realizados por Wall et al. (2010) destacam a utilidade dos bioindicadores microbianos na avaliação da qualidade do solo. A atividade e a diversidade microbiana são frequentemente consideradas indicadores sensíveis de mudanças no solo, refletindo a capacidade do ecossistema de realizar funções essenciais, como a decomposição de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes.

A presença e a diversidade de macrofauna do solo, como minhocas e besouros, também são amplamente reconhecidas como bioindicadores importantes. Estudos, como os conduzidos por de Vries et al. (2013), enfatizam como a abundância e a diversidade desses organismos podem refletir a estrutura e a estabilidade física do solo, influenciando a qualidade e a fertilidade.

Além disso, as plantas podem ser consideradas bioindicadores, especialmente aquelas que têm relações simbióticas com microrganismos benéficos, como as micorrizas. A presença e a saúde dessas associações podem indicar a disponibilidade de nutrientes e a capacidade do solo de sustentar o crescimento das plantas (Smith & Read, 2010).

A integração de diferentes bioindicadores é essencial para uma avaliação abrangente da qualidade do solo. Abordagens como a avaliação da biomassa microbiana, a contagem de organismos do solo, a análise da diversidade genética e o estudo do comportamento das enzimas do solo podem oferecer uma visão holística da saúde do solo (Witt et al., 2000).

2.5 - Enzimas do Solo

As enzimas do solo desempenham um papel fundamental nos ecossistemas terrestres, desencadeando uma série de reações bioquímicas que impactam diretamente a dinâmica da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes. Produzidas principalmente por microrganismos do solo, como bactérias, fungos e actinomicetos, essas proteínas catalíticas são essenciais para a degradação de compostos orgânicos complexos e a subsequente liberação de nutrientes que sustentam a vida vegetal.

A diversidade funcional das enzimas do solo é notável, abrangendo uma variedade de grupos, incluindo hidrolases, oxidoredutases e transferases (Dick et al., 2008). Cada grupo de enzimas desempenha um papel específico na decomposição de diferentes classes de compostos orgânicos. Por exemplo, as celulases atuam na quebra de ligações glicosídicas presentes em celulose, enquanto as proteases desempenham um papel crucial na degradação de proteínas presentes na matéria orgânica do solo.

Estudos, como os realizados por Waldrop e Firestone (2006), destacam a importância da atividade enzimática na mineralização da matéria orgânica. Essas enzimas atuam como catalisadores, acelerando reações químicas que liberam dióxido de carbono, água e outros produtos resultantes da decomposição. Esses produtos, por sua vez, tornam-

se disponíveis como nutrientes para as plantas, estabelecendo uma importante conexão entre a atividade microbiana e a fertilidade do solo.

A classificação das enzimas do solo é frequentemente associada a processos específicos, como a decomposição de celulose, hemicelulose, lignina, proteínas e outros componentes orgânicos complexos. A presença e a atividade dessas enzimas são influenciadas por uma série de fatores ambientais, incluindo temperatura, umidade e pH do solo, com base nisso podemos buscar a compreensão das respostas microbianas às condições do ambiente edáfico German et al. (2011).

A agricultura de precisão tem aproveitado essas informações para otimizar o manejo do solo, implementando práticas específicas em diferentes zonas do campo, considerando a variabilidade espacial das enzimas e propriedades do solo (Cambardella & Moorman, 2014). O uso de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica através da implementação de zonas de manejo com diferentes potenciais produtivos dentro da mesma área e, até a busca pela atenuação dessas diferenças através da utilização de ferramentas como aplicações em taxa variável pode permitir uma abordagem mais adaptativa e eficiente na gestão das enzimas do solo.

2.6 - Enzimas do solo como Bioindicadores de qualidade

Estudos realizados por Dick (1997) destacam que a atividade de enzimas relacionadas à ciclagem de nutrientes, como celulasas, amilases e fosfatases, pode fornecer informações valiosas sobre a disponibilidade de nutrientes no solo. A variação na atividade dessas enzimas está frequentemente associada a alterações na matéria orgânica e na fertilidade do solo.

Enzimas envolvidas na degradação da matéria orgânica, como as ligninases, também podem ser utilizadas como bioindicadores. A pesquisa de Sinsabaugh et al. (2008) destaca a relação entre a atividade dessas enzimas e a decomposição da matéria orgânica, indicando a eficiência dos processos de mineralização no solo.

Além disso, a diversidade de enzimas do solo pode ser explorada como um indicador da saúde microbiana e da capacidade do solo de realizar diferentes funções biológicas. Estudos como os conduzidos por Burns et al. (2013) demonstram como a análise da diversidade funcional de enzimas pode oferecer uma visão abrangente da atividade microbiana e da capacidade do solo de sustentar ecossistemas saudáveis.

A utilização de enzimas como bioindicadores é especialmente relevante em sistemas agrícolas, onde práticas de manejo intensivo podem impactar significativamente as propriedades do solo. O monitoramento da atividade enzimática pode orientar a implementação de práticas agrícolas mais sustentáveis e promover a conservação da qualidade do solo (Tabatabai & Dick, 2002). Dentre as possibilidades de utilização de enzimas na mensuração da qualidade do solo, destaca-se a enzima betaglicosidase por sua elevada relação com os índices de matéria orgânica do solo.

2.7 - Enzima Betaglicosidase

A betaglicosidase do solo, uma enzima essencial na degradação de compostos orgânicos complexos, desempenha um papel fundamental na ciclagem de carbono nos ecossistemas terrestres (Schellenberger et al., 2010). Pertencente à classe das glicosil hidrolases, essa enzima é produzida por diversos microrganismos do solo, incluindo bactérias, fungos e actinomicetos, contribuindo significativamente para a mineralização da matéria orgânica do solo (Baldrian & López-Mondéjar, 2014).

A diversidade genética e funcional da betaglicosidase em diferentes ambientes tem sido objeto de estudo para compreender a adaptação dos microrganismos a condições variáveis (Thompson et al., 1993). Estudos abordando a expressão gênica, estrutura, regulação e função dessa enzima proporcionam percepções valiosas sobre seu papel nos processos biogeoquímicos do solo (Schellenberger et al., 2010).

A influência da betaglicosidase na decomposição da matéria orgânica e no ciclo do carbono é destacada em pesquisas que investigam as respostas metabólicas dessas enzimas em diferentes condições ambientais (Baldrian & López-Mondéjar, 2014). A compreensão desses processos é crucial para avaliar o impacto da atividade microbiana no solo e sua relação com a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

2.8 - Betaglicosidase e matéria orgânica

A relação da betaglicosidase com a matéria orgânica do solo é um tema de grande importância para compreender os processos de decomposição e ciclagem de carbono nesse ambiente. A betaglicosidase desempenha um papel chave na degradação de

compostos orgânicos complexos presentes na matéria orgânica do solo, convertendo-os em formas mais simples e disponíveis para outros microrganismos e plantas.

Estudos têm demonstrado que a atividade da betaglicosidase está diretamente relacionada à quantidade e qualidade da matéria orgânica presente no solo (Schellenberger et al., 2010). A diversidade de substratos utilizados por essa enzima, como celulose e outros polissacarídeos, destaca seu papel na quebra de ligações glicosídicas em moléculas complexas (Baldrian & López-Mondéjar, 2014).

Além disso, a betaglicosidase está envolvida na liberação de glicose e outros açúcares simples durante a decomposição da matéria orgânica, fornecendo fontes de carbono prontamente utilizáveis para os microrganismos do solo (Thompson et al., 1993). Essa liberação de nutrientes contribui para a fertilidade do solo e influencia a disponibilidade de carbono para outros componentes do ecossistema.

A compreensão dessa relação é crucial para avaliar o papel da betaglicosidase na dinâmica do carbono e na formação de húmus no solo. Estudos mais aprofundados sobre a expressão gênica e a regulação da atividade dessa enzima em diferentes tipos de solo e condições ambientais são fundamentais para uma visão abrangente dessa interação (Baldrian & López-Mondéjar, 2014).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, foram selecionadas 21 lavouras comerciais de Soja na região central do Rio Grande do Sul. Sendo elas: 14 áreas em Cachoeira do Sul, 2 em Pantano Grande, 2 em Rio Pardo, 1 em São Sepé, 1 em Santa Maria e 1 em Restinga Seca conforme expresso na figura 1. Essas áreas representaram 203 talhões distintos e 14.228,10 hectares analisados nos anos de 2021, 2022 e 2023.

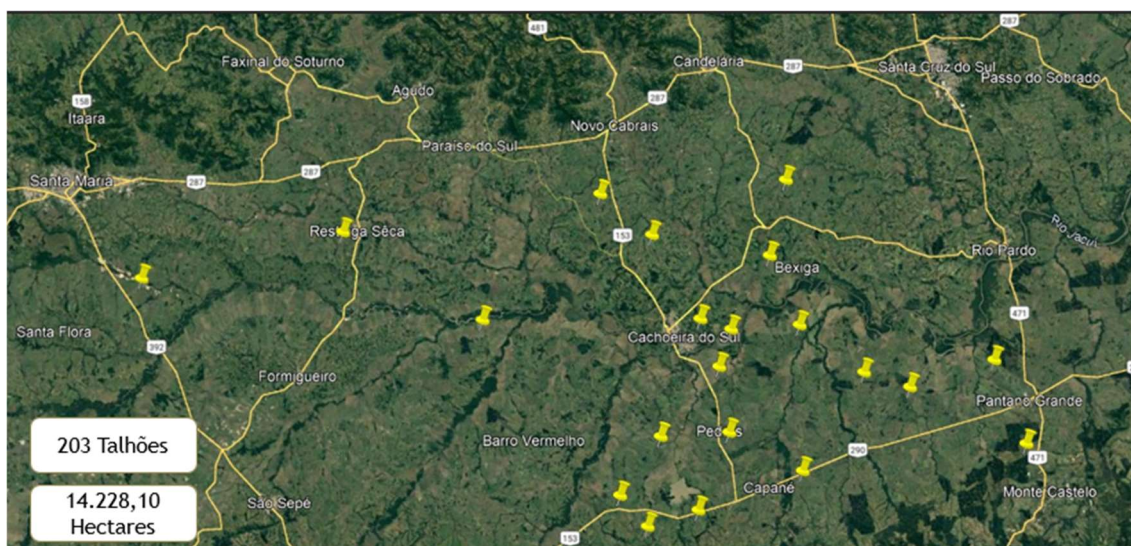


Figura 1: Mapa demonstrativo da representatividade territorial do trabalho.

As áreas estudadas são manejadas com pastagem de Aveia e/ou Azevém no inverno e tem monocultivo de Soja no verão.

O clima da região nas safras analisadas sofreu interferência do fenômeno climático “*La Nina*” que ocorre pela diminuição da temperatura da superfície das águas do Oceano Pacífico Tropical Central e Oriental e que, com isso, ocasiona redução das chuvas no sul do Brasil. Dessa forma, a produção de Soja foi afetada negativamente nas safras estudadas. As áreas possuem uma produção média histórica na casa de 50 sacas de soja por hectare, que, nos anos do estudo caiu cerca de 22% para a marca de 39 sacas/ha na média dos 3 anos.

Após a escolha das áreas foi realizada a delimitação das Zonas de Manejo através da sobreposição do histórico de mapas de colheita e leituras dos índices vegetativos NDVI, NDRE e MSAVI2, analisando as áreas de acordo com o desenvolvimento vegetativo histórico e do histórico produtivo dos mapas de colheita de soja nos últimos 5 anos de cultivo conforme exemplificado na figura 2. Através deste método e após a aplicação do índice de Gestão Agrícola (IGA) da ConnectFARM que delimita através de

um algoritmo e inteligência artificial a sequência de atributos que correspondem às melhores produções vegetais, todos os talhões obtiveram a divisão de sua extensão em zonas de alto, de médio e de baixo potencial produtivo.

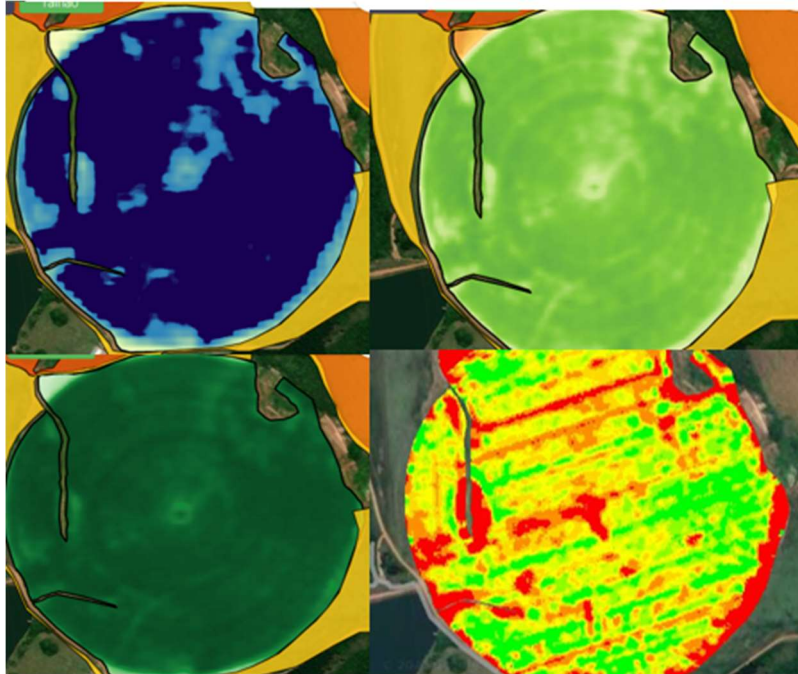


Figura 2: Mapa de NDWI acima e na esquerda, mapa de NDVI acima e na direita, mapa de MSAVI2 abaixo e na esquerda, mapa de colheita abaixo e na direita. A análise em conjunto de todos esses índices nos ajuda a corrigir alterações causadas pela presença do solo nas leituras nos estágios iniciais da cultura e a saturação do índice nos estágios finais da cultura.

A partir da definição das zonas de manejo foram alocados pontos de coleta de solo, os quais foram direcionados em igual quantidade em cada uma das zonas de cada talhão, conforme a figura 3. As coletas de solo, a uma profundidade de 0-15 cm, usando uma broca mecânica acoplada a um quadriciclo exemplificado na figura 4. A realização das coletas ocorreu em até 30 dias após a colheita da soja nos três anos de estudo.

No laboratório de análise de solo da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), as amostras foram submetidas a análises de macro e micronutrientes, bem como análises de granulometria. A análise enzimática da betaglicosidase foi realizada pela startup ConnectBio, incubada na UNISC. Os resultados foram expressos em base seca de nMol de nitrofenol liberado em 1g de solo em 1 hora.

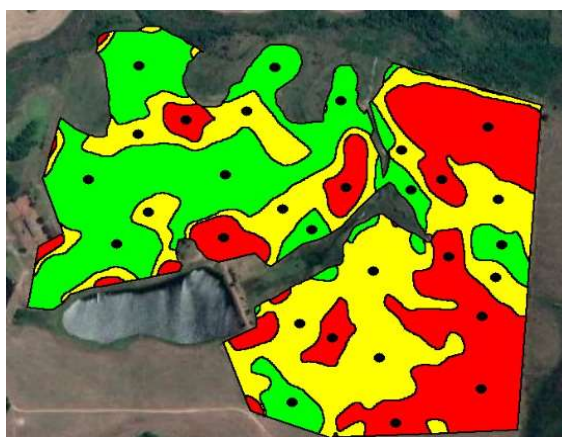


Figura 3: Exemplificação dos pontos de coletas (pontos em preto) alocados nas zonas de manejo, sendo a zona verde, amarela e vermelha de alto, médio e baixo potencial respectivamente.



Figura 4: Equipamento utilizado para as coletas de solo, coletor de solo com broca da marca Falker rebocado por quadriciclo.

Após o recebimento dos dados do laboratório, procedeu-se uma análise das características químicas e físicas de cada zona de manejo, um estudo sobre a correlação da atividade da betaglicosidase com as diferentes zonas de manejo, buscando compreender como a atividade dessa enzima varia em resposta às condições específicas de cada área e, uma avaliação das correlações entre a atividade da betaglicosidase e cada atributo do solo individualmente, buscando identificar padrões e relações significativas que possam ratificar o potencial da atividade enzimática da betaglicosidase como um bioindicador de qualidade do solo.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos através da análise das Zonas de manejo a fim de verificar o comportamento da enzima betaglicosidase. Os primeiros dados a serem apresentados referem-se à caracterização das Zonas de Manejo quanto aos seus atributos químicos, físicos e de teores de Betaglicosidase.

A análise química de fertilidade do solo demonstra que as áreas objetos de estudo tem, de forma muito clara, condições superiores para o desenvolvimento das plantas nas zonas de manejo de alto potencial. Atributos como o fósforo, pH H₂O e concentrações de potássio, cálcio, magnésio e na CTC e, até mesmo matéria orgânica se mostram em níveis superior nessas zonas, enquanto a concentração de alumínio, por exemplo, demonstra superioridade nas zonas de baixo potencial produtivo.

Observado o Gráfico abaixo pode-se ver que a quantidade de matéria orgânica, que é um indicador importante da fertilidade e tem uma relação interessante com a atividade enzimática do solo, comporta-se de forma superior nos solos com alta fertilidade apresentam os maiores teores, seguidos pelos de fertilidade média e baixa.

Além disso, os nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, como fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, exibem variações significativas entre os diferentes níveis de fertilidade. Os solos com alta fertilidade possuem os maiores teores desses nutrientes, enquanto os solos de baixa fertilidade têm os menores. Essa disparidade reflete diretamente na capacidade do solo de fornecer os nutrientes necessários para o desenvolvimento saudável das plantas.

A acidez do solo, medida pelo pH, também varia significativamente entre os diferentes níveis de fertilidade. Solos com alta fertilidade tendem a ser mais alcalinos, enquanto solos com baixa fertilidade tendem a ser mais ácidos. Isso tem implicações importantes na disponibilidade de nutrientes para as plantas, bem como na atividade microbiana do solo. Este comportamento é ratificado pela concentração de alumínio, que tende a ser mais elevada em solos de baixa fertilidade. O alumínio em excesso pode ser tóxico para as plantas e afetar negativamente seu crescimento e desenvolvimento.

A saturação de bases é um indicador da capacidade do solo de reter e fornecer nutrientes para as plantas. Solos com alta fertilidade geralmente apresentam uma maior saturação de bases, o que significa que possuem uma capacidade melhorada de troca de íons e uma disponibilidade maior de nutrientes para as plantas. As relações entre cálcio,

magnésio e potássio ((Ca+Mg)/K) também variam entre os diferentes níveis de fertilidade e refletem as interações complexas entre esses nutrientes no solo.

Nesta análise apenas o enxofre e os micronutrientes zinco, cobre, boro e manganês exibiram variações que não foram explicadas pelas zonas de manejo, sendo que, o Enxofre, em específico apresentou uma relação contrária, demonstrando teores menores nas áreas de potencial mais alto. Um dos possíveis motivos para esse comportamento poderia ser a maior exportação desse nutriente na produção agrícola nas zonas de alto potencial.

Atributos do Solo nas Diferentes Zonas de Manejo

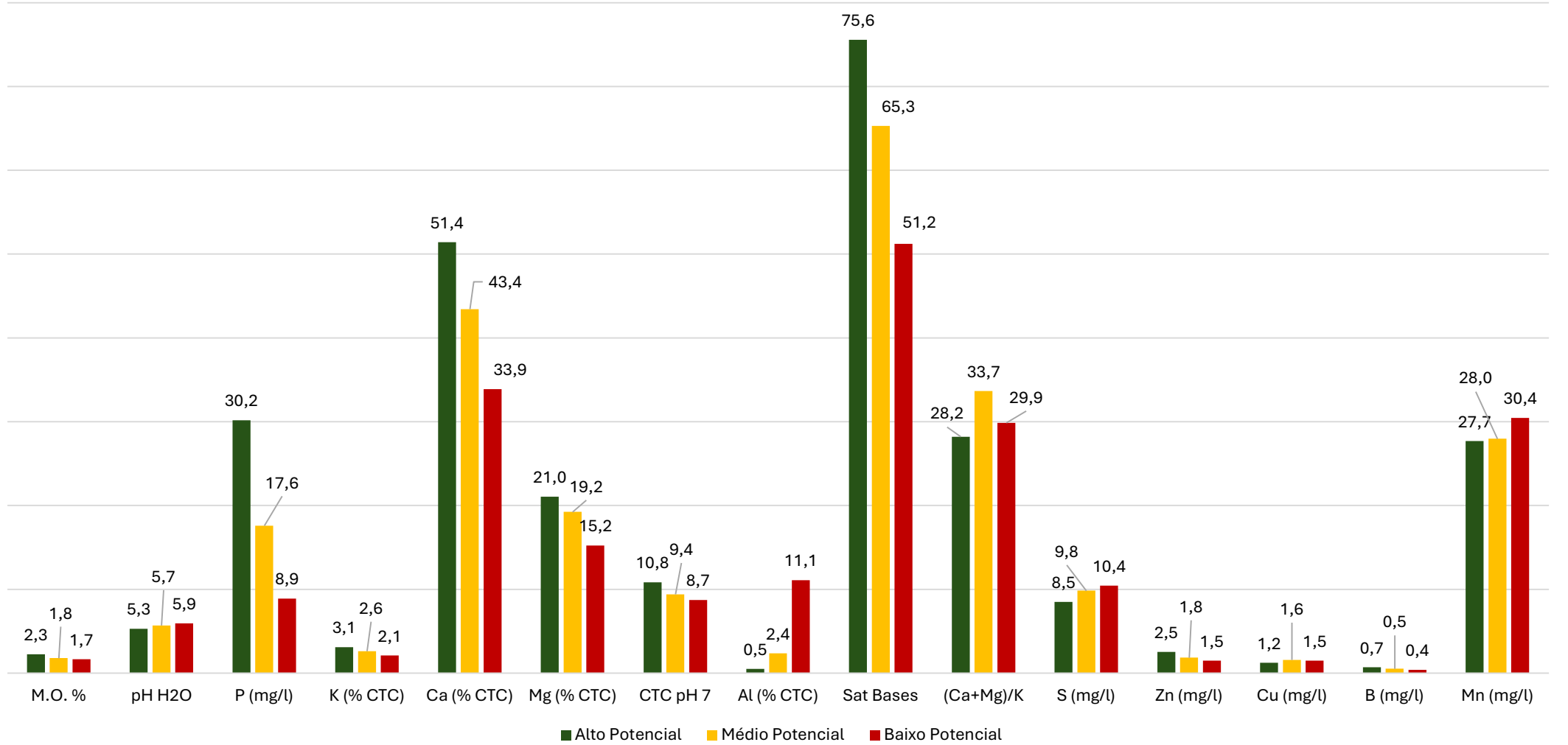


Figura 5: Gráfico dos Atributos químicos do Solo nas diferentes zonas de manejo.

Para todas as áreas também foram realizadas análises físicas, as quais são apresentadas na figura 2 que segue abaixo.

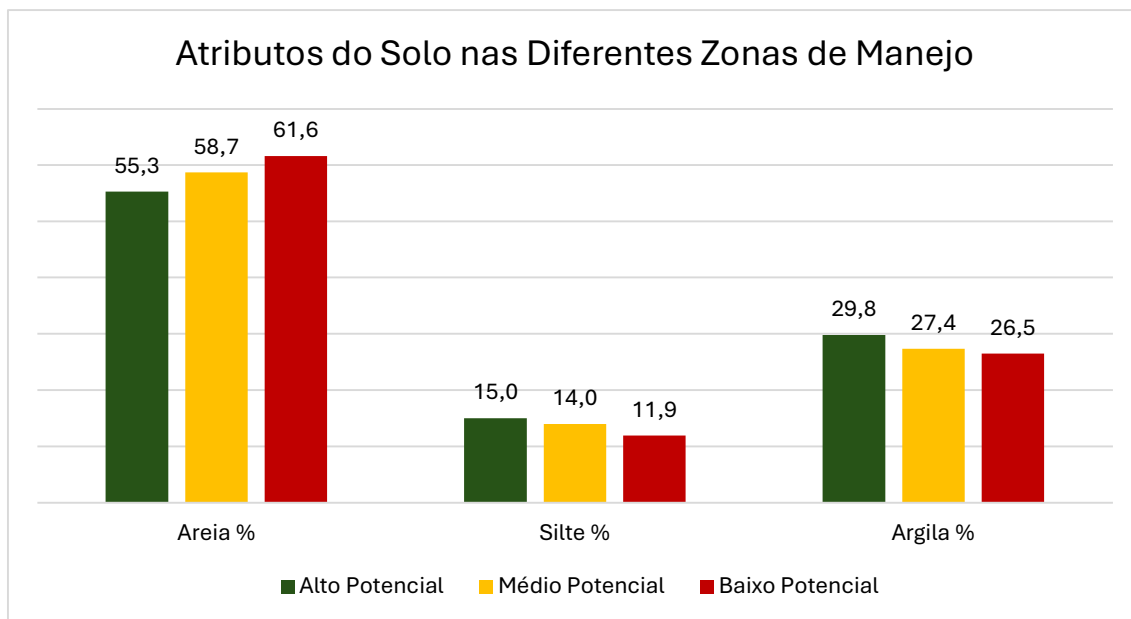


Figura 6: Gráfico da análise física por granulometria das diferentes zonas de manejo.

De acordo com esta análise pode se perceber uma tendência de que as zonas de manejo de alto potencial apresentem mais silte e argila. O que faz sentido entendo que, estas partículas são menores do que a areia e, com isso apresentam maior área superficial específica, aumentando a capacidade do solo de armazenar água, sendo assim um fator determinante para que as plantas desempenhem de forma superior nessas zonas. Além disso, maiores teores de argila propiciam maior capacidade de troca de cátions no solo, e com isso, essas zonas tendem a apresentar uma maior fertilidade natural.

O segundo ponto analisado pelo trabalho foi o comportamento da beta glicosidase em cada zona de manejo, no qual, constatou-se uma maior resposta enzimática nas zonas de alto potencial produtivo, conforme a figura 3.

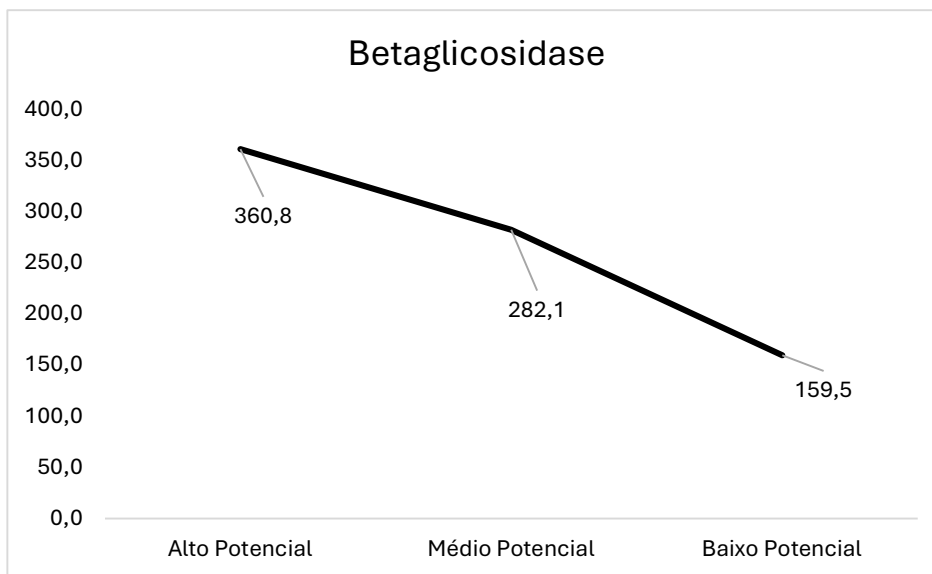


Figura 7: Comportamento da Enzima Betaglicosidase (nMol de nitrofenol liberado em 1g de solo em 1 hora) nas diferentes zonas de manejo.

A análise dos dados de betaglicosidase revela que as zonas de manejo com alto potencial produtivo demonstraram a maior atividade de betaglicosidase, registrando um valor de 360,8, enquanto a zona de potencial médio exibe uma atividade intermediária de 282,1 e a zona de potencial baixo apresenta a menor atividade de betaglicosidase, com um valor de 159,5.

Com base nesses valores médios tem-se a noção de que a enzima tem uma resposta mais alta em zonas de manejo de alto potencial, porém busca-se entender também se a diferença entre os comportamentos da enzima foi significativa. Com base nisso foi realizada uma sumarização com os dados das três zonas analisadas (Tabela 1).

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Alto Potencial	275	99227,4	360,827	60872,2
Médio Potencial	275	77587,2	282,135	48003,3
Baixo Potencial	275	43874	159,542	6586,59

Tabela 1: Organização dos dados obtendo 275 medições da betaglicosidase em cada zona de manejo, soma, média e variância.

A partir destes dados foi realizada uma análise de variância ANOVA que está apresentada na Tabela 2.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5659242	2	2829621	73,5208	4,2E-30	3,00668
Dentro dos grupos	3,2E+07	822	38487,3			
Total	3,7E+07	824				

Tabela 2: Apresentação da ANOVA, a qual apresenta 822 graus de liberdade, Soma de quadrados de 32 milhões dentro dos grupos e um F acima do F crítico, o que representa que há variação significativa entre os teores da enzima nas diferentes zonas.

Com os dados obtidos a partir da ANOVA entende-se que há variação significativa entre as zonas, podendo evoluir a análise para um teste de comparação de médias. Além disso, dado a elevada variação apresentada dentro dos grupos, foi realizada conjuntamente uma análise de Bloxplot, assim possibilitando a visualização da faixa de valores analisados em cada zona de manejo.

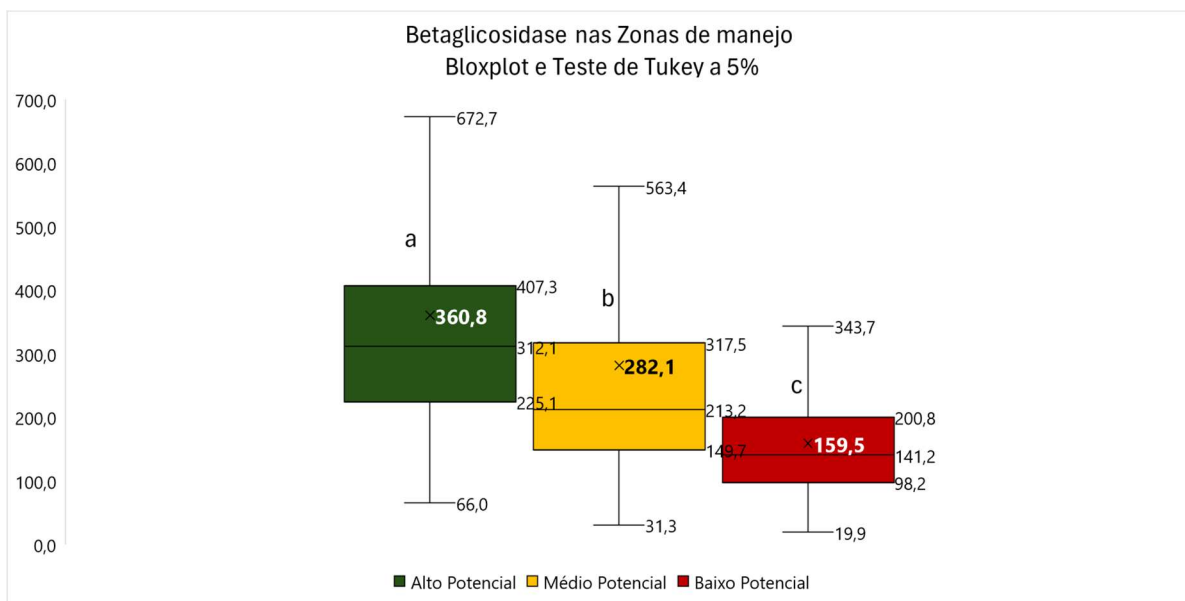


Figura 8: Gráfico Bloxplot com a amplitude de variação da enzima em cada zona de manejo e resultado do Teste de Tukey a 5% que demonstra que os valores de betaglicosidase possuem diferença estatística entre as zonas de manejo.

Ao analisarmos o gráfico podemos perceber que, além da média, os teores de beta são crescentes da zona de baixa para a zona de alta também no seu valor inferior e posterior da caixa e que esse comportamento se repete para a mediana, que é a linha no meio das caixas.

Essa variação na atividade da enzima pode ser atribuída ao fato de que a betaglicosidase desempenha um papel crucial na ciclagem de carbono, catalisando a

hidrólise de compostos orgânicos. Com isso, níveis mais altos de atividade de betaglicosidase podem indicar uma maior capacidade do solo em decompor matéria orgânica e liberar nutrientes para as plantas, o que iria em linha com o maior potencial produtivo nessas áreas (Alef & Nanninpiéri 1995). Por outro lado, solos com baixa fertilidade podem apresentar uma atividade reduzida dessa enzima, limitando a disponibilidade de nutrientes para as plantas e afetando sua produtividade.

Outro ponto do trabalho foi analisar o comportamento da enzima betaglicosidase correlacionado com os atributos do solo mencionados acima nas diferentes zonas de manejo, conforme os gráficos abaixo.

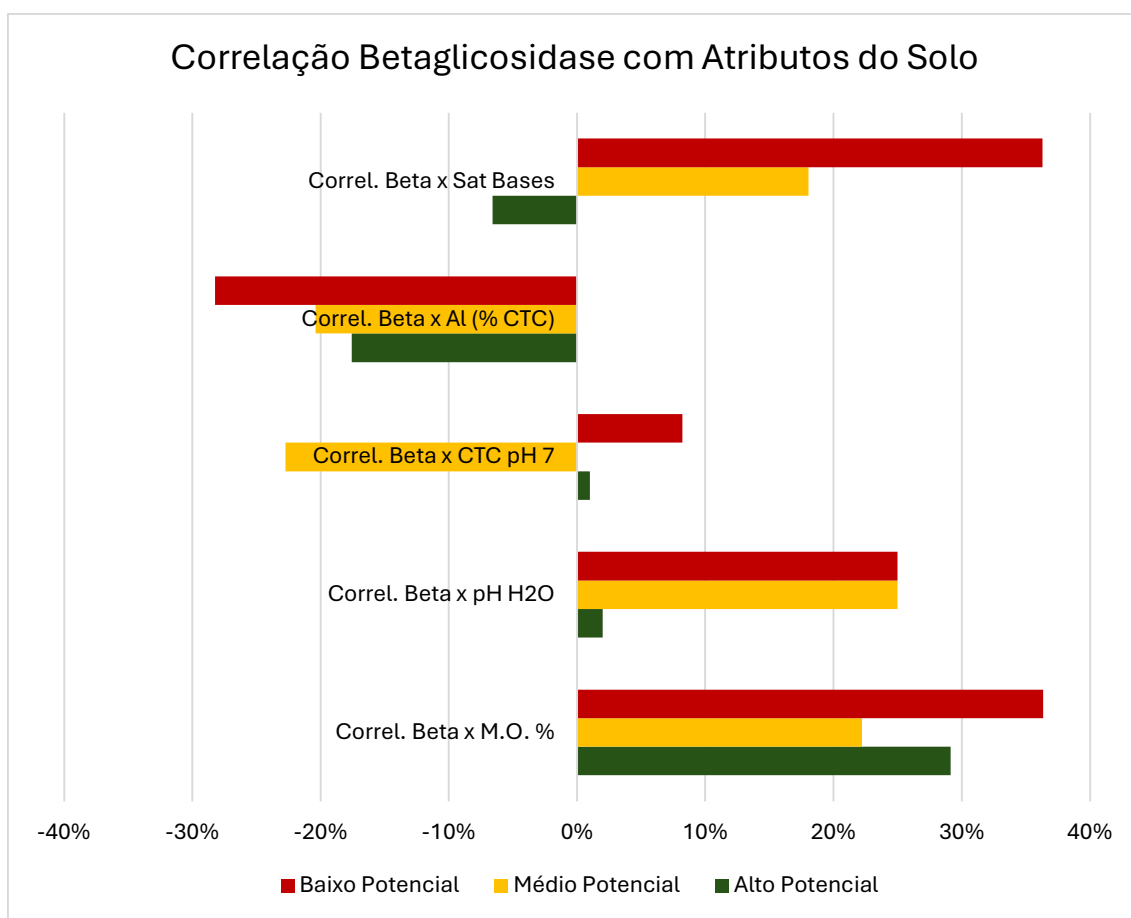


Figura 9: Correlação dos valores de Saturação de bases, Al%, CTC pH7, pH H2O e M.O.% com os valores de Betaglicosidase nas diferentes zonas de manejo.

Para analisar essas correlações podemos utilizar o parâmetro de 22% de correlação positiva ou negativa para determinar se a relação é significativa. Este valor foi obtido através do módulo da mediana dos valores encontrados em todas as análises.

Há uma correlação positiva moderada entre o potencial de betaglicosidase e a matéria orgânica (%) em todas as zonas de manejo. Isso sugere que solos com maiores

teores de matéria orgânica tendem a ter uma atividade mais elevada da enzima, independentemente do potencial produtivo da zona.

As correlações com o pH do solo variam entre as zonas de manejo. Enquanto nas zonas de médio e baixo potencial produtivo a correlação é positiva, indicando uma associação entre pH mais ácido e maior atividade enzimática, na zona de alto potencial produtivo essa correlação é praticamente neutra.

Observa-se uma correlação negativa entre o potencial de betaglicosidase e o alumínio (% CTC) em todas as zonas de manejo. Isso sugere que maiores teores de alumínio estão associados a uma redução na atividade da enzima betaglicosidase, o que pode indicar condições menos favoráveis para a decomposição da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Ratificando o comportamento da enzima no caso do cálcio e do magnésio, a enzima se comporta no caso da saturação de bases, apresentando um índice de correlação maior nas zonas de manejo de baixo potencial, o que demonstra que em um solo com uma alta saturação de bases como é o caso das zonas de manejo de alto potencial o comportamento da enzima betaglicosidase é maior por outros fatores.

Quanto ao comportamento da enzima em relação aos teores de macronutrientes podemos verificar correlações significativas acima de 18% de variação. Com Fósforo e Potássio essa variação foi significativa e positiva conforme figura 6. A correlação entre o potencial de betaglicosidase e o fósforo é positiva em todas as zonas de manejo. Isso sugere que maiores teores de fósforo podem estar associados a uma atividade mais elevada da enzima betaglicosidase, o que pode promover a decomposição da matéria orgânica e a liberação de nutrientes para as plantas.

No caso do potássio observa-se uma correlação positiva entre o potencial de betaglicosidase e o nutriente na zona de manejo de alto e médio potencial produtivo, enquanto na zona de baixa essa correlação ficou abaixo do ponto de corte indicado como significativo. Isso sugere que o potássio pode influenciar de forma mais direta a atividade da enzima em solos com potencial produtivo intermediário.

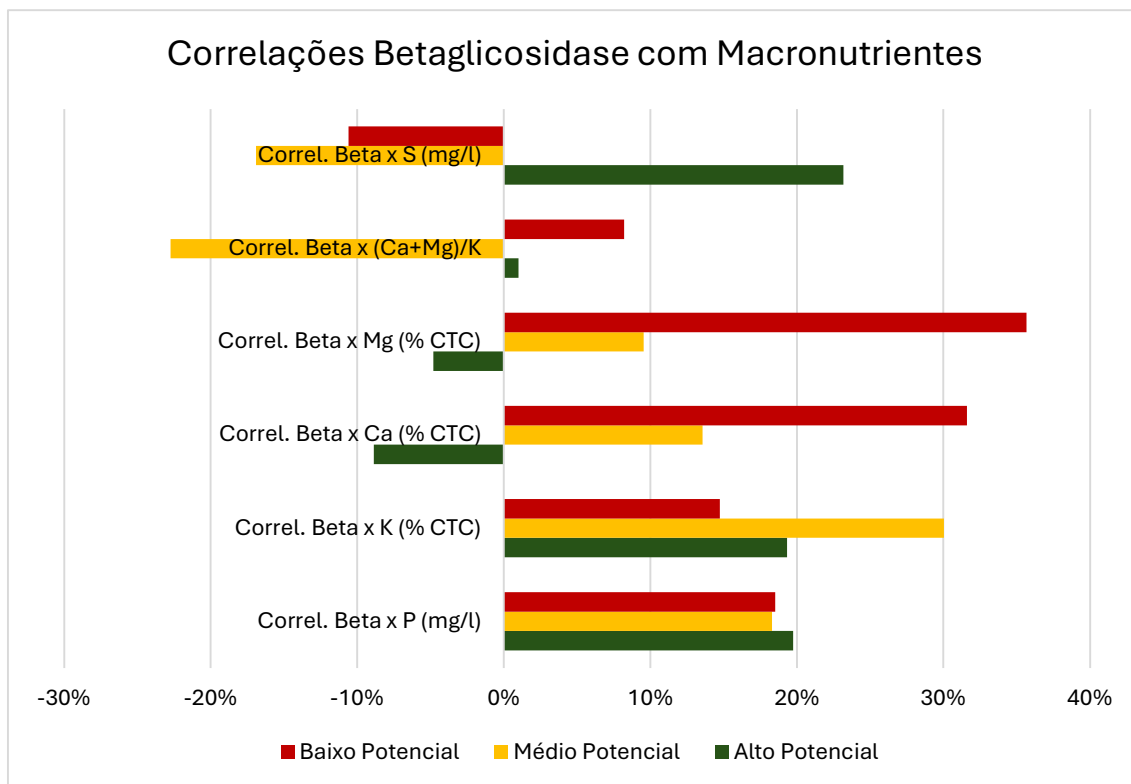


Figura 10: Correlação dos valores de P, K%, Ca%, Mg%, Relação (Ca+mg)/K e S com os valores de betaglicosidase em todas as zonas de manejo.

No caso do cálcio na zona de baixo e médio potencial produtivo a correlação é positiva, enquanto na zona de alto potencial essa é negativa. Isso vai contra a tendência apresentada anteriormente no potássio.

Assim como o cálcio, a correlação entre o potencial de betaglicosidase e o magnésio varia entre as zonas de manejo. Enquanto na zona de baixo potencial produtivo essa correlação é positiva, nas outras zonas ela é neutra ou negativa. Isso sugere que o magnésio pode ter um impacto diferente na atividade da enzima, dependendo das condições do solo e do potencial produtivo da área.

Os resultados da correlação da atividade enzimática com a relação (Ca+Mg)/K não apresentaram padrões, o que sinaliza que esse atributo de solo não é parâmetro fundamental para a expressão da enzima no solo.

A correlação com o enxofre apresenta variações entre as zonas de manejo, com uma correlação positiva para a zona de alto potencial produtivo e correlações negativas para as zonas de médio e baixo potencial produtivo.

Quanto à correlação com os micronutrientes, expostos na figura 7. Temos uma correlação significativa acima do parâmetro de 17%, demonstrando uma correlação significativa e positiva para Zinco e negativa para Manganês.

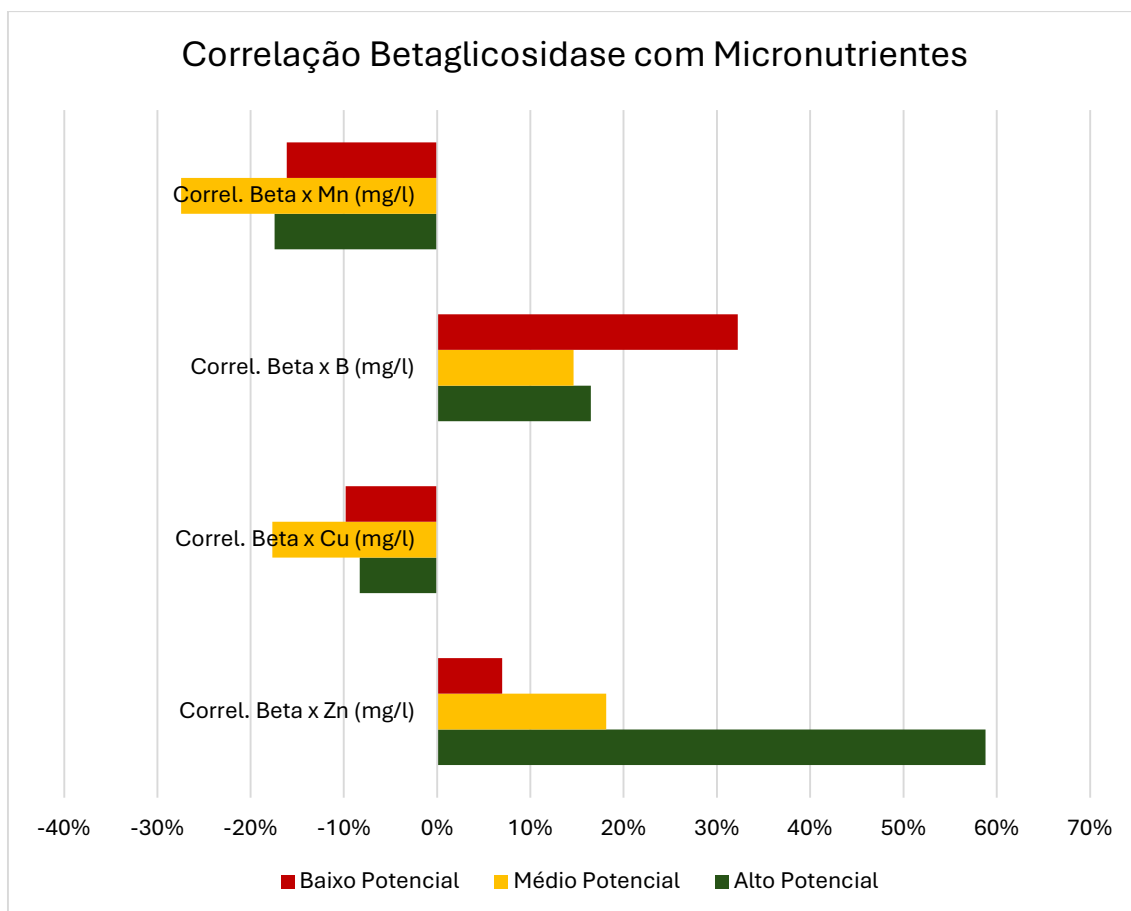


Figura 11: Correlação dos valores de Mn, B, Cu e Zn com os valores de betaglicosidase em todas as zonas de manejo.

A correlação foi positiva e bastante significativa entre o potencial de betaglicosidase e o teor de zinco em todas as zonas de manejo. Isso pode sinalizar que solos com maiores concentrações de zinco tendem a apresentar uma atividade enzimática mais elevada.

Os dados indicam uma correlação negativa entre o potencial de betaglicosidase e o teor de cobre (Cu) em todas as zonas de manejo, embora as correlações sejam relativamente baixas. Isso sugere que altas concentrações de cobre podem estar associadas a uma redução na atividade da enzima betaglicosidase.

Há uma correlação positiva entre o potencial de betaglicosidase e o teor de boro em todas as zonas de manejo. Isso sugere que solos com maiores concentrações de boro podem apresentar uma atividade enzimática mais elevada.

Observa-se uma correlação negativa entre o potencial de betaglicosidase e o teor de manganês (Mn) em todas as zonas de manejo. Isso sugere que maiores concentrações de manganês podem estar associadas a uma redução na atividade da enzima betaglicosidase.

Cabem estudos mais aprofundados quanto à relação dos micronutrientes com a betaglicosidase, visto que, muitos deles podem ser utilizados como cofatores enzimáticos.

No que tange os aspectos físicos do solo, foi realizada a análise de correlação entre a betaglicosidase e os teores de Argila, Silte e Areia do solo advindos da análise granulométrica conforme a figura 8. O valor de referência que indica uma correlação significativa para os parâmetros físicos do solo foi de 12%.

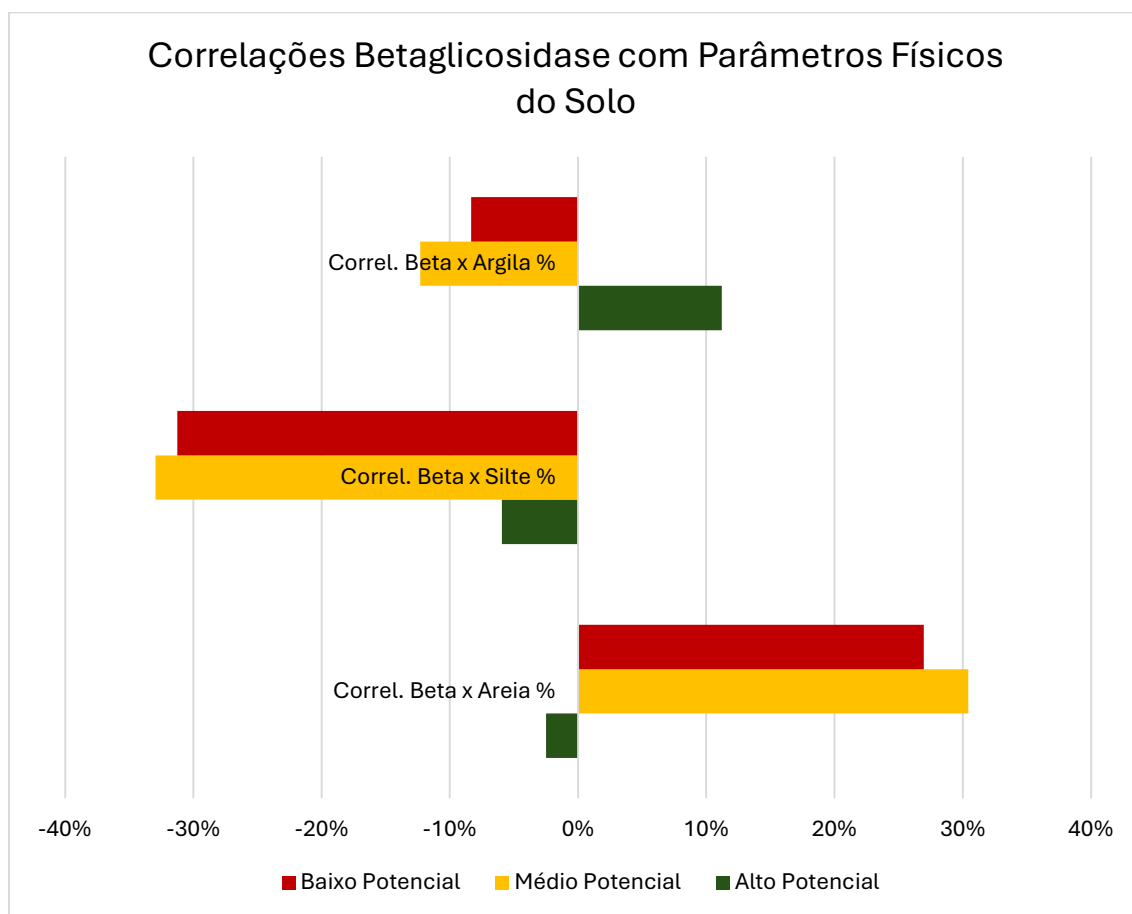


Figura 12: Correlação entre os teores de Argila, Silte e Areia com os valores de betaglicosidase em todas as zonas de manejo.

As zonas de médio e baixo potencial produtivo apresentaram uma maior correlação entre a atividade enzimática e o teor de areia no solo. Isso pode ser advindo do fato de que o teor de areia é maior nessas áreas.

No caso do Silte a correlação foi negativa em todos os cenários, o que indica que o teor de silte isoladamente não explica o comportamento da enzima.

Para a argila a correlação foi positiva nas zonas de alto potencial produtivo e negativa para as demais zonas. Estudos mostram que solos com maior teor de argila tendem a ter uma atividade enzimática mais elevada, o que pode ser atribuído à proteção das enzimas contra fatores adversos, como mudanças bruscas de pH ou ação de radicais livres.

Sobre os atributos que apresentaram correlações significativas foi realizada uma análise de dispersão para buscar entender o comportamento e a variação da betaglicosidase de acordo com o incremento ou decréscimo de cada atributo conforme visualizado nos gráficos apresentados abaixo.

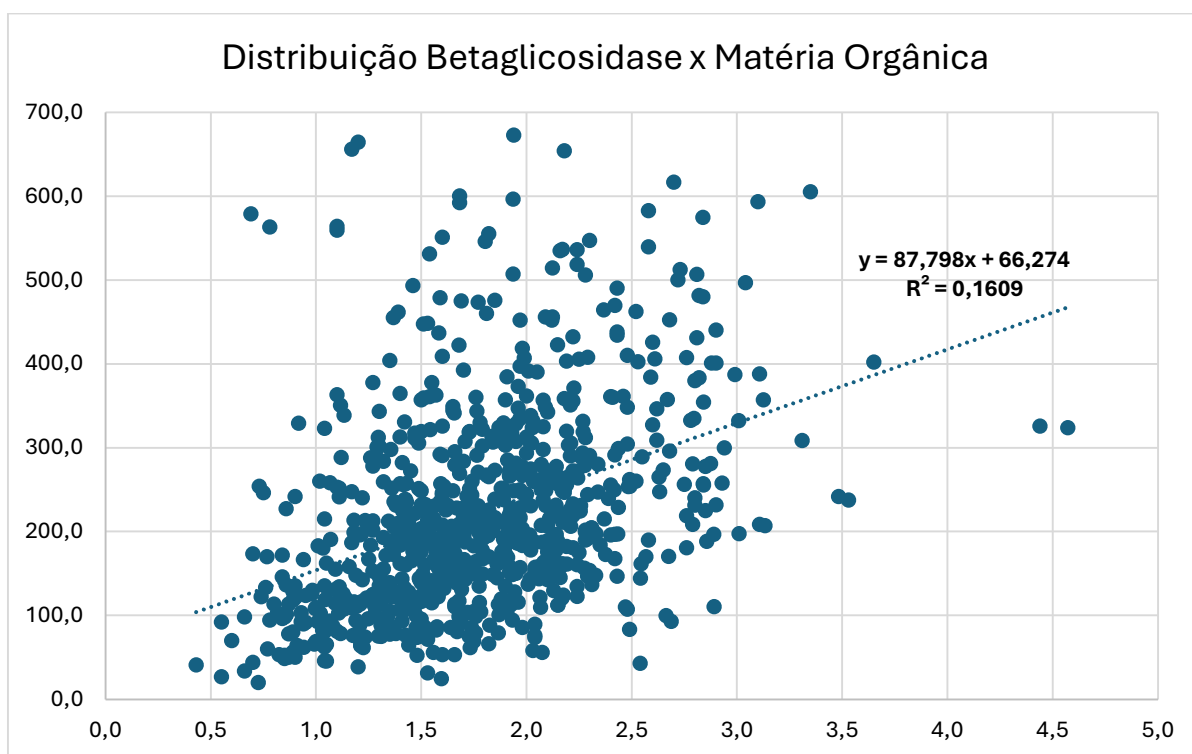


Figura 13: Dispersão dos valores de Betaglicosidase em função do teor de matéria orgânica do solo em todas as zonas de manejo.

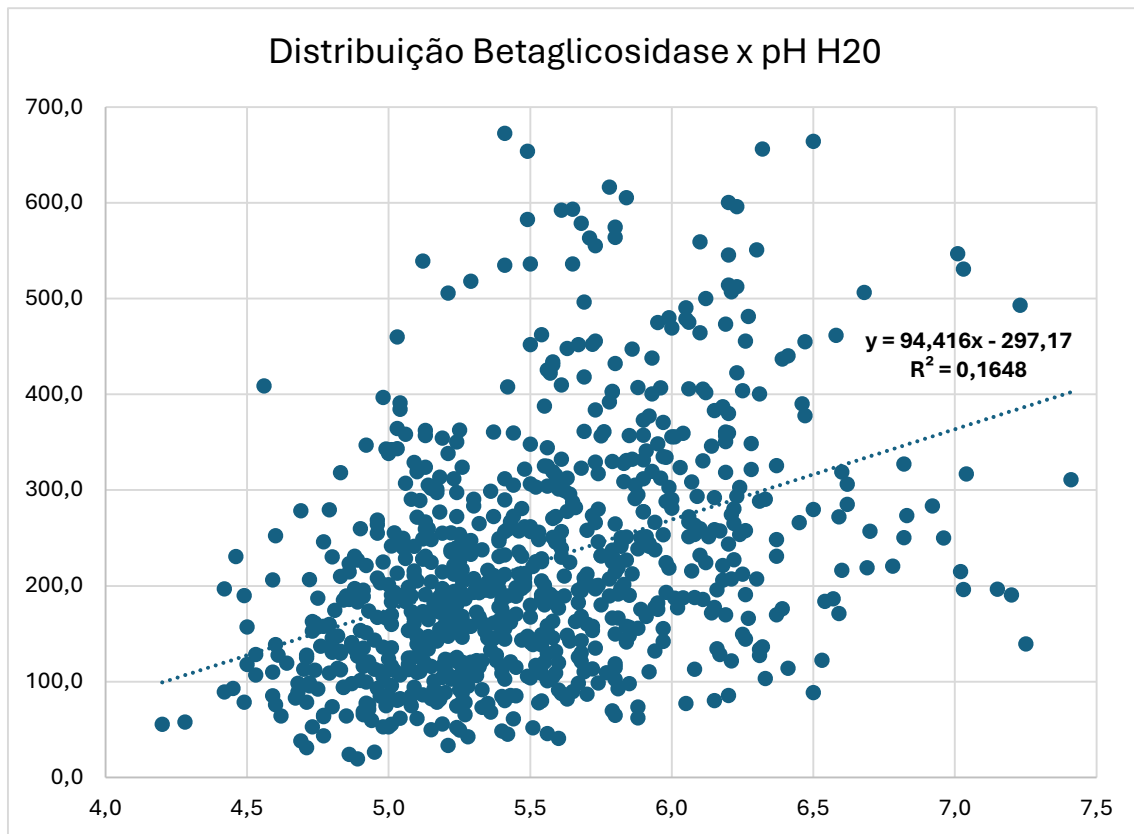


Figura 14: Dispersão dos valores de Betaglicosidase em função do pH H2O do solo em todas as zonas de manejo.

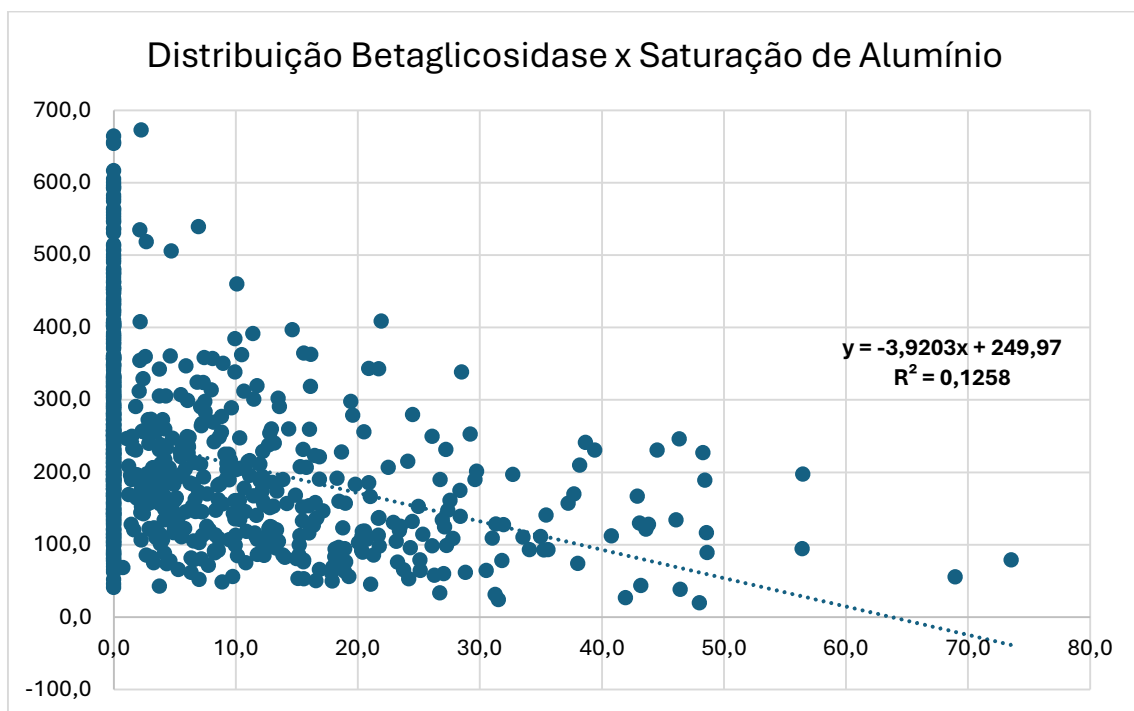


Figura 15: Dispersão dos valores de Betaglicosidase em função da Saturação de Alumínio do solo em todas as zonas de manejo.

Observa-se uma explicação positiva em cerca de 16% da matéria orgânica e do pH H₂O do solo sobre os valores de betaglicosidase, o que representa que estes são fatores importantes, porém, não agem de forma isolada.

Quanto à saturação de alumínio, observa-se que a grande parte dos valores mais altos de betaglicosidase encontram-se em análises com al%=0 e que conforme aumenta-se a concentração do elemento tóxico, reduzem-se as médias de betaglicosidase no solo com uma resposta de 12,6%, esse comportamento ratifica o fato de que o Alumínio é tóxico não só para a raiz dos vegetais mas também para os microrganismos (Huang et. Al 2001).

5- CONCLUSÕES

Os resultados desta análise revelam importantes padrões na relação entre os atributos do solo, a atividade enzimática da betaglicosidase e os diferentes níveis de potencial produtivo nas zonas de manejo. Inicialmente, observa-se que as áreas com alto potencial produtivo apresentam condições químicas e físicas superiores para o desenvolvimento das plantas, caracterizadas por teores mais elevados de nutrientes essenciais, pH mais alcalino e maior saturação de bases. Esses atributos favorecem a disponibilidade de nutrientes para as plantas e influenciam diretamente na atividade biológica do solo.

A análise da betaglicosidase revela que esta enzima exibe uma maior atividade nas zonas de manejo com alto potencial produtivo, indicando uma relação positiva entre a atividade enzimática e a fertilidade do solo. Essa relação pode ser explicada pela importância da betaglicosidase na decomposição da matéria orgânica e na liberação de nutrientes para as plantas, processos que são favorecidos em solos com maior fertilidade. Observou-se também que os teores da enzima são crescentes da zona de baixa para a zona de alta também no seu valor inferior e posterior da análise de Bloxplot, além de sua mediana também apresentar o mesmo comportamento.

Ao correlacionar a atividade da betaglicosidase com os diferentes atributos do solo, observa-se que a matéria orgânica, o pH, o fósforo, o potássio e a saturação de bases apresentam correlações significativas com a atividade enzimática em todas as zonas de manejo. Isso sugere que esses atributos desempenham um papel importante na regulação da atividade da betaglicosidase e, conseqüentemente, na ciclagem de nutrientes no solo.

Além disso, a correlação entre a atividade da betaglicosidase e os micronutrientes zinco, cobre, boro e manganês revela alguns padrões, destacando a influência desses elementos na atividade enzimática e na disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Outro aspecto relevante é a relação entre a atividade da betaglicosidase e a textura do solo. Os resultados mostram que solos com maior teor de argila tendem a apresentar uma atividade enzimática mais elevada, o que está em linha com estudos anteriores que destacam o papel da argila na proteção das enzimas do solo e na estabilização da matéria orgânica.

Por fim essa análise destaca a importância da betaglicosidase como um bioindicador de qualidade do solo. A atividade dessa enzima, que está diretamente

relacionada à decomposição da matéria orgânica e à disponibilidade de nutrientes para as plantas, revela padrões significativos em relação aos atributos do solo e aos diferentes níveis de potencial produtivo nas zonas de manejo.

Entende-se que é preciso estudar todo o ciclo para tomar as melhores decisões de manejo, começando com a compreensão das zonas de manejo, levando ao aumento da fertilidade e equilíbrio nutricional do solo, o que promove maior desenvolvimento vegetativo. Esse desenvolvimento resulta em maior fixação de carbono da atmosfera e, conseqüentemente, um maior aporte de matéria orgânica no solo. A presença de mais matéria orgânica melhora a abundância e a riqueza da biologia do solo. Esse ambiente biológico enriquecido aumenta os níveis de betaglicosidase, uma enzima crucial na decomposição de matéria orgânica, promovendo uma maior liberação de nutrientes. A liberação de nutrientes, por sua vez, alimenta de volta o ciclo, melhorando ainda mais a fertilidade e a saúde do solo.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Martínez, V.; Kaluarachchi, J.; Kotur, S.; Cox, S. B. Enzyme Activities as Affected by Soil Properties and Land Use in a Semiarid Region. *Soil Science Society of America Journal*, v. 75, n. 4, p. 1449-1460, 2011.
- Baldrian, P.; López-Mondéjar, R. Microbial genomics, transcriptomics and proteomics: new discoveries in decomposition research using complementary methods. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 98, n. 4, p. 1531-1537, 2014.
- Balota, E. L.; Ccousens, M. J.; Evelyn, S. A.; Merritt, W. S. Enzyme Activities in Agricultural Soils: Influence of Environmental and Management Factors. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, n. 2, p. 857-867, 2004.
- Bardgett, R. D.; Van Der Putten, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, v. 515, n. 7528, p. 505-511, 2014.
- Bourennane, H.; Gautheyrou, J.; Houot, S.; Rouilly, F. Soil β -Glucosidase Activity as a Function of Organic Matter Properties. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 107, p. 69-76, 2017.
- 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.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B. Enhancing the role of soil management in ecosystem services. *Soil Science Society of America Journal*, v. 78, n. 2, p. 363-369, 2014.
- De Vries, F. T. et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 35, p. 14296-14301, 2013.
- Dick, R. P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: DICK, R. P. (Ed.). *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford: CAB International, 1997. p. 121-156.
- Dick, R. P.; Myrold, D. D.; Kerle, E. A. Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the Colca Valley, Peru. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008.
- Food And Agriculture Organization Of The United Nations (FAO). *Food Security and Nutrition: Building a Global Narrative Towards 2030*. Rome: FAO, 2020.
- Food And Agriculture Organization Of The United Nations (FAO). *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming Water Challenges in Agriculture*. Rome: FAO, 2020.
- German, D. P., Weintraub, M. N., Grandy, A. S., Lauber, C. L., Rinkes, Z. L., & Allison, S. D. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011.

Grace, P. R.; Oades, J. M.; Keating, B. A.; Henry, R. J. *Optimizing Soil Management Practices for Sustainable Production*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Agriculture, 2017.

Huang, P. M.; Wang, M. K.; Chiu, C. Y. (Eds.). *Soil Environmental Science: Perspectives on Impact of Aluminum Toxicity*. New York: CRC Press, 2001.

Lobell, D. B.; Cassman, K. G.; Field, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 34, p. 179-204, 2009.

Miqueloni, D. P.; Gianello, D. M.; Bueno, C. R. P.; Silva, P. C. M.; Mesquita, F. O.; Costa, T. K. G. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 1, p. 18-28, 2015.

Philippot, L. et al. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *The ISME Journal*, v. 7, n. 8, p. 1609-1619, 2013.

Pieri, C. J.; Helling, C. S.; Lopes, W. L. Soil management zones based on soil attributes related to crop yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, e0160445, 2017.

Powlson, D. S. et al. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, v. 36, p. S72-S87, 2014.

Schellenberger, S.; Kolb, S.; Drake, H. L. Metabolic responses of novel cellulolytic and saccharolytic agricultural soil bacteria to oxygen. *Environmental Microbiology*, v. 12, n. 4, p. 845-861, 2010.

Sinsabaugh, R. L.; Manzoni, S.; Moorhead, D. L.; Richter, A. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling. *Ecology Letters*, v. 16, n. 7, p. 930-939, 2013.

Six, J.; Frey, S. D.; Thiet, R. K.; Batten, K. M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 2, p. 555-569, 2006.

Smith, S. E.; Read, D. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3. ed. London: Academic Press, 2010.

Tabatabai, M. A.; Dick, W. A. Soil enzymes in sustainable agriculture. In: Burns, R. G.; Dick, R. P. (orgs.). *Enzymes in the Environment: Activity, Ecology, and Applications*. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 401-430.

Thompson, I. P. et al. Quantitative and qualitative seasonal changes in the microbial community from the phyllosphere of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Plant and Soil*, v. 150, n. 1, p. 177-191, 1993.

Tilman, D.; Cassman, K. G.; Matson, P. A.; Naylor, R.; Polasky, S. Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices. *Nature*, v. 418, n. 6898, p. 671-677, 2002.

Turner, B. L.; Hopkins, D. W.; Haygarth, P. M.; Jones, D. L. β -Glucosidase Activity in Pasture Soils. *Applied Soil Ecology*, v. 20, n. 2, p. 157-162, 2002.

United Nations. *World Population Prospects 2022*. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022.

Vallis, I.; Cook, S. E.; Loveys, B. R. Precision agriculture for sustainability. *Precision Agriculture*, v. 19, n. 3, p. 443-446, 2018.

Waldrop, M. P.; Firestone, M. K. Microbial community utilization of recalcitrant and simple carbon compounds: impact of oak-woodland plant communities. *Oecologia*, v. 148, n. 1, p. 109-120, 2006.

Wall, D. H.; Nielsen, U. N.; Six, J. Soil biodiversity and human health. *Nature*, v. 528, n. 7580, p. 69-76, 2015.

Witt, C.; Gaunt, J. L.; Galleguillos, M. Below-ground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, v. 405, n. 6784, p. 56-60, 2000.