

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

Guilherme Rechden Lobato

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSFATASE ÁCIDA  
EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Santa Maria, RS  
2023

**Guilherme Rechden Lobato**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSFATASE ÁCIDA EM  
LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

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,

2023

Rechden Lobato, Guilherme  
VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSFATASE ÁCIDA  
EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO /  
Guilherme Rechden Lobato.- 2023.  
35 p.; 30 cm

Orientador: Antônio Luis Santi  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em  
Agricultura de Precisão, RS, 2023

1. Saúde do Solo 2. Atividade da fosfatase ácida, 3.  
Plantio direto 4. Análise de semivariograma 5. Práticas  
agrícolas sustentáveis I. , Antônio Luis Santi  
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.

Declaro, GUILHERME RECHDEN LOBATO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

---

© 2023

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

Endereço: 26 Church Lane, Scardale – New York - USA. Cep: 10583

Fone: (+1) 646 8304994; Endereço eletrônico: lobato.guilherme@gmail.com

---

**Guilherme Rechden Lobato**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSFATASE ÁCIDA EM  
LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

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**.

Aprovada em 28 de Setembro de 2023:

---

**Dr. Antônio Luis Santi (UFSM) – videoconferência  
(Presidente/Orientador)**

---

**Dr. Alexandro Cagliari (UERGS) – videoconferência**

---

**Dr. Rodrigo Ferreira da Silva (UFSM) – videoconferência**

Santa Maria, RS  
2023

## DEDICATÓRIA

*À minha esposa, Fernanda Lucchese, que é o meu porto seguro, o amor que enriquece todos os meus dias e a parceria que fortalece cada desafio. Aos meus amados filhos, Mateo e Laura, que trazem alegria, propósito e luz à minha existência. Em vocês, encontro a inspiração e motivação para seguir adiante. O nosso amor é a força que une e transforma cada obstáculo em oportunidade.*

Dedico este título a vocês!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha sincera gratidão à minha esposa, Fernanda Lucchese, cujo apoio incondicional foi fundamental desde o início desta trajetória. Fernanda, além de ser meu esteio emocional, representa também uma inspiração no âmbito profissional e acadêmico. Aos meus filhos, Mateo e Laura, agradeço pelo amor e carinho que me proporcionam diariamente.

Devo um agradecimento especial aos meus pais. Meu pai Jose Fernando Piva Lobato, cuja paixão pela agronomia, pelos solos e pela pecuária me influenciou profundamente. À minha mãe Doris Rechden Lobato, pela afeição, amor e constante apoio ao longo da minha carreira. Minha gratidão se estende a todos os demais membros da minha família.

Dirijo um agradecimento especial ao Professor Doutor Antônio Luís Santi. Sua orientação, expertise e visão foram cruciais desde o início desta caminhada. À Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e ao PPGAP - Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão, sou grato pela oportunidade e pelo privilégio de aprender com professores que constituem a base de um programa de referência na agricultura nacional.

Expresso minha gratidão a todos os colegas do LAPSUL pela dedicação e apoio à pesquisa que conduzimos. Um agradecimento especial é dirigido ao meu colega do PPGAP e estimado amigo, Luís Felipe Gerlach, por sua amizade e colaboração nos trabalhos.

Por fim, sou grato a todos os sócios e colaboradores da ConnectFARM e ConnectBIO. Em especial, destaco a ConnectBIO, cujos sócios possuem uma visão inspiradora sobre a integração da biotecnologia na agricultura.

## **EPIGRAFE**

*" You can't connect the dots looking forward; you can only connect them looking backwards. So you have to trust that the dots will somehow connect in your future. You have to trust in something—your gut, destiny, life, karma, whatever.. ”*

*Steve Jobs*

## RESUMO

### **VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSFATASE ÁCIDA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Autor: Guilherme Rechden Lobato

Orientador: Antônio Luis Santi

O solo é a base da produção agrícola, fornecendo os nutrientes essenciais para o crescimento das plantas e, conseqüentemente, alimentando seres humanos e animais. A integridade e vitalidade do solo são imperativas para manter a produção agrícola sustentável. Em um mundo com desafios crescentes como a demanda populacional e a diminuição de recursos, a importância de ecossistemas terrestres saudáveis torna-se ainda mais evidente. Indicadores biológicos, em particular a atividade da fosfatase ácida, enzima envolvido na ciclagem do fósforo, têm sido ferramentas valiosas para avaliar essa saúde. Neste estudo, realizado em Cruz Alta, RS, Brasil, foram obtidos dados sobre a atividade da fosfatase ácida em áreas de plantio direto no período de 27 de Maio de 2021 a 22 de Dezembro de 2022. Foi notável a flutuação da atividade enzimática ao longo das estações, com destaque para a dispersão dos dados em maio, tendo um desvio padrão de 176.6561  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil-1 h-1}$ , em comparação com 137.4682  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil-1 h-1}$  em dezembro. Os coeficientes de variação refletiram essa tendência, com 47.06% em maio e 35.49% em dezembro. Além disso, na análise de semivariograma, aplicou-se o modelo Gaussiano, com amplitudes que se situavam entre 28,3 e 16,6 m. A precisão da regressão, indicada pelo  $R^2$ , mostrou valores de 0,745 e 0,756 para as estações de inverno e verão, respectivamente. Estes resultados reforçam a necessidade de monitoramento constante e ajustes nas práticas agrícolas. Mais estudos são fundamentais para adaptar e melhorar estratégias sustentáveis, garantindo a eficiência na utilização dos solos e sua preservação a longo prazo.

**Palavras-chave:** Saúde do Solo, Atividade da fosfatase ácida, Plantio direto, Análise de semivariograma, Práticas agrícolas sustentáveis.



## ABSTRACT

### SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF ACID PHOSPHATASE IN RED LATOSOL UNDER NO-TILL SYSTEM

Author: Guilherme Rechden Loabto

Advisor: Antônio Luis Santi

Soil is the foundation of agricultural production, providing the essential nutrients for plant growth and, consequently, feeding humans and animals. The integrity and vitality of the soil are imperative to maintain sustainable agricultural production. In a world with increasing challenges such as population demand and diminishing resources, the importance of healthy terrestrial ecosystems becomes even more pronounced. Biological indicators, particularly the activity of acid phosphatase, have been valuable tools to assess this health. In this study conducted in Cruz Alta, RS, Brazil, data on the activity of acid phosphatase in no-till areas were obtained. The fluctuation of enzymatic activity throughout the seasons was noteworthy, with a particular emphasis on data dispersion in May, showing a standard deviation of 176.6561  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , compared to 137.4682  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil}^{-1} \text{ h}^{-1}$  in December. The variation coefficients reflected this trend, with 47.06% in May and 35.49% in December. Additionally, in the semivariogram analysis, the Gaussian model was applied, with amplitudes ranging between 28.3 meters and 16.6 meters. The regression accuracy, indicated by the  $R^2$ , showed values of 0.745 and 0.756 for the winter and summer seasons, respectively. These results underline the need for constant monitoring and adjustments in agricultural practices. Further studies are essential to adapt and improve sustainable strategies, ensuring the efficient use of soils and their long-term preservation.

**Keywords:** Soil Health, acid phosphatase activity, no-till farming, semivariogram analysis, sustainable agricultural practices.

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO I

Figura 1 – Área experimental, Cruz Alta, RS.....	23
Figura 2 – Informação Meteorológica, Cruz Alta, RS. Fonte INMET.....	23

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO I

Tabela 1 – Média Física-Química dos Atributos do solo ( profundidade 0,00 – 0,15m). .....	24
Tabela 2 – Análise descritiva da Enzima Fosfatase Ácida .....	28
Tabela 3 – Análise dos Parâmetros do Semivariograma da Enzima Fosfatase Ácida.....	29

## LISTA DE SIGLAS

C = Carbono

Ca = Cálcio

CTC= Capacidade de Troca de Cátions

CV = Coeficiente de variação

K = Potássio

Mg = Magnésio

MO = Matéria Orgânica

N = Nitrogênio

P = Fosforo

R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação da regressão

RS = Rio Grande do Sul

S = Enxofre

SPD = Sistema Plantio Direto

USDA = Departamento de Agricultura Americano

V(%) = Saturação de bases

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1	SISTEMA PLANTIO DIRETO .....	17
2.2	PLANTAS DE COBERTURA.....	17
2.3	ATIVIDADE ENZIMÁTICA E FOSFATASE ÁCIDA.....	18
2.4	A CULTURA DO TRIGO .....	19
2.5	GEOESTATISTICA E A DIVERSIDADE EM ÁREAS AGRÍCOLAS .....	20
<b>3</b>	<b>ARTIGO - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSTASE ACIDA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>21</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	22
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
3.4	CONCLUSÕES .....	29
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É estimado que quase a totalidade de alimentos consumidos no mundo, diretamente ou indiretamente, seja produzida a partir do solo (FAO, 2015). Dada sua importância para a produção agrícola, a preservação do solo emerge como um tema de extrema relevância para a humanidade (DICK et al., 1994).

Com o crescimento populacional, desafios como a escassez de recursos naturais e instabilidades sociais pressionam a agricultura a criar estratégias para conservar e cultivar solos saudáveis (DORAN, J. W., SARRANTONIO, M., & LIEBIG, M. A., 1996). A ideia central da saúde do solo se baseia em um ecossistema vivo, em que o bem-estar do solo é imprescindível. Recursos como ar e água de qualidade são essenciais para sustentar uma comunidade microbiana diversificada, garantindo altas produtividades em variadas culturas (LAL, R. 2009).

De acordo com DICK & TABATABAI (1992) visando quantificar as características biológicas do solo, diversos indicadores são empregados. Muitos deles relacionam-se à atividade dos microrganismos presentes no solo, sendo mensurados através do carbono orgânico total, biomassa microbiana, respiração basal e atividade de enzimas específicas. Existe um consenso crescente de que os parâmetros biológicos do solo podem ser utilizados como sensores precoces e sensíveis para avaliar sua qualidade. A atividade enzimática do solo, por exemplo, é vista como um indicador mais sensível da qualidade ecológica, porque reflete as principais reações microbianas envolvidas nos ciclos de nutrientes do solo em comparação a parâmetros físico-químicos.

A fosfatase ácida é crucial na catálise da hidrólise de ésteres de fosfato em contextos ácidos, sendo determinante para múltiplos processos metabólicos (NANNIPIERI et al., 2011). Presente em variados reinos biológicos, incluindo plantas, animais, fungos e bactérias, essa enzima é de particular importância em solos. Ela facilita a liberação de fósforo para as plantas, aprimorando assim a eficácia na absorção de nutrientes (EIVAZI, F., & TABATABAI, M. A. 1977; TARAFDAR & JUNGK, 1987).

A sensibilidade das enzimas às variações induzidas pelo manejo nas áreas agrícolas reforça seu potencial como indicadores de qualidade do solo (ACOSTA-MARTINEZ ET AL., 2018).

No contexto da agricultura de precisão, entender a atividade enzimática, sua variabilidade espacial e temporal pode auxiliar na tomada de decisões. Essa importância se amplifica em solos sob plantio direto, onde as práticas de manejo influenciam diretamente a

atividade enzimática. Diante das características heterogêneas do solo, técnicas assertivas de avaliação são indispensáveis. A geoestatística surge como uma ferramenta valiosa para avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo, com o mapeamento dessa variabilidade sendo fundamental para recomendações precisas de práticas de manejo (VIEIRA et al., 2002; CORREA et al. 2009).

A hipótese central deste estudo postula que existe variabilidade biológica nas áreas agrícolas, e os bioindicadores, como enzimas, estão relacionados ao manejo e aos períodos de avaliação. O objetivo principal é avaliar a variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática da fosfatase ácida em área sob sistema plantio direto em experimento realizado em Cruz Alta-RS.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática da fosfatase ácida em área de latossolo vermelho sob sistema plantio direto.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Avaliar o modelo de melhor ajuste geoestatístico para a fosfatase ácida na cultura do trigo.

Analisar a correlação da atividade enzimática de fosfatase ácida em duas épocas distintas.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SISTEMA PLANTIO DIRETO

Reconhecido por suas práticas inovadoras, o Sistema de Plantio Direto (SPD) se consolidou como uma das principais estratégias de conservação de solo no Brasil, visando atenuar os efeitos adversos da produção agrícola intensiva (EMBRAPA, 2013). Esse sistema busca preservar e revitalizar as características físicas, químicas e biológicas do solo, enfatizando ações como a mínima perturbação do solo, manutenção contínua de cobertura vegetal e, claro, rotação eficiente de culturas (SOARES et al., 2019).

As virtudes do SPD, particularmente no contexto agrícola brasileiro, se destacam pela limitação no revolvimento do solo e pela preservação constante da cobertura vegetal, resultando em agregados mais estáveis. Esta abordagem reduz os danos causados pelas chuvas intensas, típicas em muitas regiões do Brasil, e fomenta uma estrutura saudável de solo por meio da matéria orgânica e da diversificação trazida pela rotação de culturas (PASSOS Et al, 2018). A prática da rotação, utilizando plantas de cobertura, não só beneficia o solo, mas prepara o terreno para melhores rendimentos em culturas subsequentes, como soja e milho (ALVES et al., 2019).

No sul do Brasil, o sistema de plantio direto é uma prática comum, que proporciona diversos benefícios, como a conservação do solo e a manutenção da umidade. No entanto, um desafio persistente é a lacuna entre as safras de culturas principais, como soja, milho e trigo. Com os intervalos entre as estações de cultivo, que podem se estender por cerca de 90 dias, o solo pode ficar vulnerável, sem a proteção adequada (MAPA, 2022). Para contrapor esse desafio, a introdução e implementação de plantas de cobertura durante essas janelas são essenciais, garantindo que o solo continue protegido e enriquecido.

### 2.2 PLANTAS DE COBERTURA

O uso de plantas de cobertura representa uma abordagem holística para melhorar a saúde do solo e maximizar a produtividade das culturas subsequentes. Diversos estudos destacam os múltiplos benefícios destas plantas, evidenciando melhorias nos atributos químicos e físicos do solo, bem como a influência positiva na produtividade de culturas e na promoção da sustentabilidade em sistemas agrícolas (CHERUBIN Et al, 2022).

De acordo com o trabalho de COSTA et al. (1996), leguminosas, graças à sua habilidade de fixar nitrogênio atmosférico e à sua relação carbono/nitrogênio favorável, se decompõem rapidamente, liberando nutrientes essenciais para a cultura subsequente. Assim, a precedência de leguminosas antes de gramíneas pode otimizar a produtividade de grãos (MARTINS et al., 2003). Por outro lado, segundo SÁ (1999), quando gramíneas são empregadas como plantas de cobertura, seguidas novamente por gramíneas, é fundamental suplementar com nitrogênio para preservar o potencial produtivo.

Associar plantas de cobertura com uma rotação estratégica de culturas anuais emerge como uma das principais táticas sustentáveis de manejo de solos (CALEGARI, Et al 2002). Esta prática fomenta a ciclagem biológica de nutrientes através da decomposição dos resíduos vegetais, promovendo uma melhor reciclagem e retenção desses elementos no ambiente agrícola (CARVALHO et al. 2006).

A decomposição de resíduos vegetais é orquestrada por uma diversidade de microrganismos, sendo que a alternância no tipo de plantas de cobertura ao longo do tempo pode fortalecer determinados grupos microbianos, aprimorando assim a saúde biológica do solo (ALVARENGA et al. 2001). A qualidade do solo deverá ser medida além de indicadores químicos e físicos, por indicadores capazes de avaliar o *status* biológico. Indicadores biológicos relacionados principalmente a ciclagem de nutrientes são ferramentas para indicar a qualidade e sustentabilidade dos solos agrícolas (DORAN, et al 1994).

### 2.3 ATIVIDADE ENZIMÁTICA E FOSFATASE ÁCIDA

Enzimas são biomoléculas essenciais que desempenham funções cruciais no solo, acelerando significativamente as reações bioquímicas. A produção destas enzimas é primariamente realizada por microrganismos no solo, e a presença de vegetação, em especial na rizosfera, amplifica a atividade enzimática (DICK, 1994). A relação direta entre as enzimas com a matéria orgânica e biomassa do solo é inegável, já que elas facilitam o catabolismo biológico de substratos orgânicos presentes no solo (ROSCOE et al 1994).

Muitas enzimas, conforme elucidado por MARTENS et al. (1992), contribuem consideravelmente para a estabilidade dos ecossistemas, particularmente na formação de moléculas recalcitrantes. Estas enzimas, interagindo com microrganismos têm papéis biológicos vitais que sustentam e equilibram o ecossistema do solo. A atividade enzimática surge, portanto, como um parâmetro valioso para avaliar a qualidade do solo.

Dentre as enzimas indicadoras da qualidade do solo, destaca-se a Fosfatase Ácida. Esta enzima é fundamental no ciclo do fósforo, desempenhando um papel importante na mineralização de fósforo orgânico no solo (LOPES et al., 2010). Como resultado de sua atividade, a Fosfatase Ácida libera fósforo inorgânico que fica disponível para as plantas, promovendo assim o crescimento saudável das mesmas (MENDES, 2012). Dada a crucial necessidade de fósforo para as plantas, a atividade da Fosfatase Ácida desempenha um papel chave, sinalizando a saúde e fertilidade do solo. Esta enzima é frequentemente vista como um indicador robusto da habilidade do solo de prover fósforo para as plantas (TABATABAI, 1994).

## 2.4 A CULTURA DO TRIGO

A cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.), um dos cereais mais cultivados e consumidos globalmente, é um pilar fundamental para a segurança alimentar. Originário do Crescente Fértil há milhares de anos, o trigo se adaptou a uma diversidade de climas e solos, desempenhando um papel central na dieta alimentar em todo o mundo (Fuller, 2007). Historicamente, o trigo tem sido um símbolo de prosperidade agrícola e é intrinsecamente ligado ao desenvolvimento de civilizações (JONES et al., 2008).

No contexto brasileiro, a cultura do trigo assume um papel estratégico na agricultura, especialmente no Sul do país, onde as condições climáticas são favoráveis à sua produção. O estado do Rio Grande do Sul destaca-se como um grande produtor, contribuindo significativamente para o volume nacional do grão (IBGE, 2021). O trigo é versátil, não apenas como alimento básico na forma de pães e massas, mas também como matéria-prima em várias indústrias, variando de alimentação animal a produtos farmacêuticos (Oliveira et al., 2015).

Os avanços na agronomia e nas tecnologias de produção contribuíram para a otimização da produtividade do trigo. Práticas agrícolas, como a rotação de culturas com plantas de cobertura, melhoram significativamente a qualidade do solo e promovem a sustentabilidade dos sistemas de cultivo (FERNANDES et al., 2019). A compreensão das interações entre as culturas de cobertura e o manejo do solo é crucial, uma vez que essas práticas influenciam diretamente os fatores que afetam a produtividade do trigo, como a estrutura do solo, a retenção de água e a supressão de ervas daninhas (SILVA et al., 2020).

## 2.5 GEOESTATÍSTICA E A DIVERSIDADE EM ÁREAS AGRÍCOLAS

Para um manejo agrícola eficiente, é crucial entender a diversidade intrínseca relacionada às propriedades físico-químicas e biológicas das áreas de cultivo. O solo, em sua essência, apresenta variabilidade natural, destacando a importância de métodos que possam mapear essas diferenças de forma precisa (SOUZA et al., 2022). O solo, em sua essência, apresenta variabilidade natural, destacando a importância de métodos que possam mapear essas diferenças de forma precisa. Nesse contexto, a geoestatística surge como uma técnica avançada para avaliar e mapear a diversidade espacial dos atributos do solo (OLIVEIRA et al., 2010).

Utilizando análises geoestatísticas, é possível identificar e mapear a variabilidade e a distribuição espacial de diversos atributos do solo. Essas análises auxiliam na criação de modelos teóricos que extrapolam e preveem características em áreas não diretamente amostradas, com base em locais amostrados (FERREIRA et al., 2011). A krigagem ordinária é um método comumente empregado para esta finalidade, oferecendo previsões acuradas e confiáveis (GONÇALVES et al., 2015).

A diversidade nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo pode ser influenciada por práticas de manejo adotadas (SANTOS et al., 2016). Esta variabilidade, por sua vez, pode sofrer alterações ao longo do tempo. Por exemplo, a atividade enzimática, sensível tanto às práticas de manejo quanto às condições ambientais, exibe variabilidade espacial e temporal. Investigar essa diversidade é fundamental para compreender as interações com diferentes sistemas produtivos e otimizar práticas agrícolas (MACHADO et al., 2017).

### **3 ARTIGO - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA FOSTASE ACIDA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

#### **RESUMO**

O solo desempenha uma função essencial na produção de alimentos, servindo como principal fonte de nutrientes para seres humanos e animais. Sua saúde e conservação são vitais para garantir a sustentabilidade agrícola. Em um contexto de crescimento populacional e escassez de recursos, o solo saudável destaca-se como um ecossistema cheio de vida. A saúde do solo é frequentemente mensurada através de indicadores biológicos, entre os quais a atividade da fosfatase ácida é relevante, por sua capacidade de catalisar a hidrólise de ésteres de fosfato e sua sensibilidade às variações ambientais e de manejo. Neste estudo conduzido em Cruz Alta, RS, a atividade da fosfatase ácida em terras sob plantio direto foi analisada utilizando técnicas geoestatísticas avançadas. Foi observada uma variabilidade significativa na atividade desta enzima ao longo do ano de 2022. Em maio, registrou-se um desvio padrão de 176.6561  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , maior do que o de dezembro, que foi de 137.4682  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . A dispersão em maio foi influenciada por fatores adicionais, resultando em um coeficiente de variação (CV%) de 47.06, em comparação ao CV% de 35.49 em dezembro. Em relação à análise de semivariograma, o modelo Gaussiano foi aplicado para a atividade da fosfatase ácida nas duas coletas, com amplitudes variando entre 28,3m e 16,6 m. O coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ) apontou 0,745 no inverno e 0,756 no verão, indicando uma precisão satisfatória. Conclui-se que investigações contínuas são cruciais para entender a fosfatase ácida em diferentes sistemas agrícolas e guiar práticas sustentáveis.

Palavras-chave: Saúde do Solo, Enzimas, Bio indicadores, Fosfatase Ácida

### 3.1 INTRODUÇÃO

O solo representa o alicerce fundamental para a produção de quase todos os alimentos consumidos globalmente. Como principal fonte de nutrientes, ele desempenha um papel central na produção de alimentos, não apenas para seres humanos, mas também para animais (WEIL, RAYMOND & BRADY, NYLE, 2017). A continuidade e sustentabilidade da produção alimentar, portanto, dependem intrinsecamente da saúde e preservação do solo (JENNY, 1994).

O setor agrícola, atualmente, enfrenta pressões devido ao aumento populacional, limitações nos recursos naturais e desafios sociais. A promoção da saúde do solo se apresenta como uma solução potencial, pois um solo saudável é mais do que apenas um meio inerte; ele é um ecossistema vibrante, repleto de vida. A presença de ar e água de boa qualidade é indispensável para manter uma rica biodiversidade de microrganismos, os quais, por sua vez, sustentam a produtividade agrícola (TILMAN et al., 2002).

A avaliação da saúde do solo frequentemente se apoia em vários indicadores biológicos. Entre eles, destacam-se os relacionados à atividade microbiana, como o carbono orgânico total, a biomassa microbiana, a respiração basal e a atividade de enzimas específicas (JOHNSTON et al., 2009). A crescente concordância acadêmica sugere que tais indicadores biológicos possuem um poder preditivo robusto em relação à saúde e qualidade do solo, devido à sua sensibilidade às mudanças ambientais (SMITH & PAUL, 1990). A atividade enzimática, por exemplo, reflete diretamente os processos metabólicos microbianos cruciais para os ciclos de nutrientes do solo (NANNIPIERI ET AL. 2002).

Uma das enzimas frequentemente estudadas é a fosfatase ácida, responsável por catalisar a hidrólise de ésteres de fosfato em ambientes ácidos, fundamental para inúmeros processos metabólicos (ANDERSON, G 2015). Sua presença em uma vasta gama de organismos, desde plantas e animais até fungos e bactérias, sublinha sua importância universal, especialmente no que tange à disponibilidade de fósforo no solo para as plantas (TARAFDAR & JUNGK, 1987).

No âmbito agrônômico, a relação entre a atividade enzimática e a qualidade do solo tem sido sugeridas como potenciais da saúde do solo (VAN BRUGGEN, et al 2000; BORASE et al., 2020). Variações na atividade enzimática, decorrentes de diferentes práticas de manejo agrícola, reiteram o papel das enzimas como bioindicadores da qualidade do solo (MENDES, et al. 2015).

A variabilidade espacial da atividade enzimática no solo pode influenciar

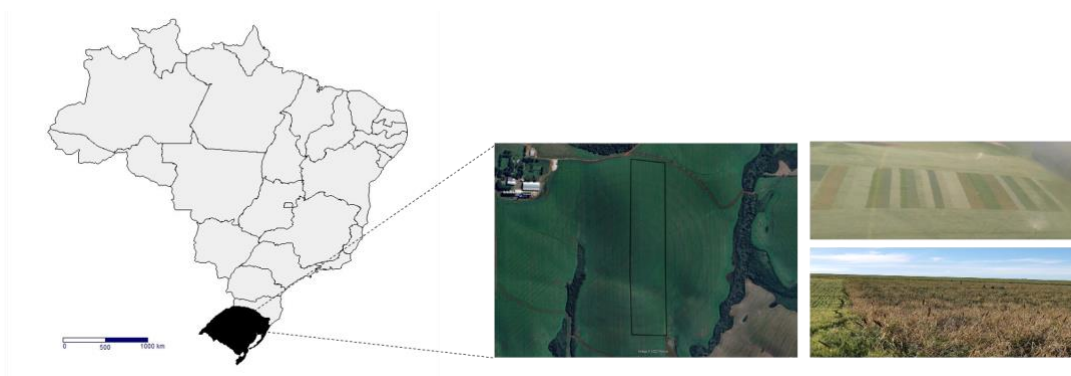
significativamente a eficácia da fertilização e o crescimento das culturas, tornando a agricultura de precisão uma ferramenta essencial para a gestão otimizada dos insumos agrícolas (SMITH & BROWN, 2018). Esse foco se torna ainda mais premente em solos sob sistema de plantio direto, onde o manejo afeta diretamente os indicadores biológicos. Devido à natureza intrinsecamente variável do solo, métodos avançados, como a geoestatística, são essenciais para decifrar e mapear essa heterogeneidade, auxiliando assim nas tomadas de decisões de manejo (WEBSTER & OLIVER, 2007).

Central para esta pesquisa é a hipótese de que o solo das áreas agrícolas exibe variabilidade biológica. Esta pesquisa pretende, assim, investigar como bioindicadores, como as enzimas, se relacionam com práticas de manejo e períodos específicos, focando especialmente na atividade da Fosfatase Ácida em áreas sob plantio direto.

### 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O local selecionado para esta pesquisa situa-se no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul, especificamente na área comercial da Sementes Aurora, a qual foi separada para realização do experimento, abrange cerca de 18,2 hectares. Suas coordenadas geográficas são: latitude  $28^{\circ}45'53.96''S$  e longitude  $53^{\circ}35'9.58''$ , e está situada a uma altitude de aproximadamente 410 metros.

Figura 1 – Área experimental, Cruz Alta, RS.

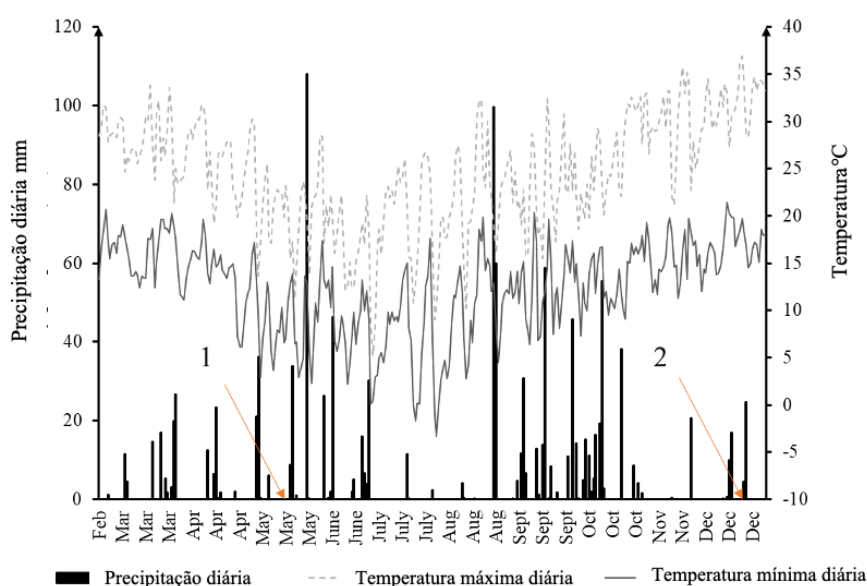


O município de Cruz Alta, conforme descrito por KUINCHTNER & BURIOL (2001), apresenta estações bem definidas de verão e inverno, com chuvas distribuídas ao longo do ano, sem uma estação seca destacada. Segundo a classificação climática de Köppen, a cidade

enquadra-se no clima tipo Cfa. As temperaturas médias variam de  $-3^{\circ}\text{C}$  a  $18^{\circ}\text{C}$  no período mais frio e ultrapassam  $22^{\circ}\text{C}$  no mês mais quente (SANTOS et al., 2015). Em relação ao solo, RODRIGUES & VITAL (2016) destacam que a região é dominada por Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa e topografia suavemente ondulada. Além disso, é relevante mencionar que o local estudado conta com um sistema de irrigação por pivô central.

Conforme registros do INMET, os dados meteorológicos da estação A853 em Cruz Alta, de fevereiro a dezembro de 2021.

Figura 2 – Informação Meteorológica, Cruz Alta, RS. Fonte INMET.



Fonte: Autor adaptado INMET.

Legenda: 1: Data da coleta realizada em Maio de 2021 (Inverno); 2: Data de coleta realizada em Dezembro de 2021 (verão).

As coletas de amostras do solo ocorreram em duas fases: a primeira no pico da estação úmida, em 27 de maio de 2021, e a segunda, após 45 dias da colheita do trigo, em 22 de dezembro de 2021, coincidindo com a estação seca (LOPES & SILVA, 2019). As amostras foram retiradas na profundidade de 0 a 0,15m e, para cada ponto de coleta, oito subamostras foram combinadas, em um total de 105 pontos amostrais. Os locais de coleta foram determinados com base em uma grade irregular e georreferenciados.

Tabela 1 – Média Física-Química dos Atributos do solo (profundidade 0,00 – 0,15m).



	Argila (%)	pH (água)	MO (%)	P	K	Ca	Mg	S	V(%)	CTC
<b>Média</b>	44.3	6.1	2.9	19.2	160.2	5.7	2.4	20.5	75	11.1

Fonte: Autor (\*) pH (Potencial Hidrogeniônico); P (fósforo (mg dm<sup>-3</sup>)); K (potássio (mg dm<sup>-3</sup>)); Ca (cálcio (cmolc dm<sup>-3</sup>)); Mg (magnésio (cmolc dm<sup>-3</sup>)); MO (matéria orgânica); V (saturação por bases); S (enxofre (mg dm<sup>-3</sup>)); CTC (capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (cmolc dm<sup>-3</sup>)).

De acordo com os resultados obtidos referentes aos atributos físico-químicos do solo, é possível inferir características determinantes sobre sua composição e qualidade. O teor de argila encontrado, equivalente a 44,3%, classifica este solo dentro do espectro argiloso. O valor do pH, avaliado em água, foi de 6,1, posicionando esse solo no espectro de levemente ácido. A quantidade de matéria orgânica (MO) foi determinada em 2,9%. Paralelamente, os teores de fósforo (P) e potássio (K) registraram-se em 19,2 e 160,2 respectivamente. Os cátions, elementos essenciais na dinâmica do solo, apresentaram os seguintes valores: cálcio (Ca) em 5,7, magnésio (Mg) em 2,4 e enxofre (S) em 20,5. O valor de saturação por bases (V%), um indicador fundamental da qualidade química do solo, alcançou 75%, enquanto a capacidade de troca catiônica (CTC) foi registrada em 11,1.

As amostras foram encaminhadas ao laboratório Central Analítica em Santa Cruz do Sul, RS, para análise física e química (MARTINS et al., 2008). Os testes enzimáticos, focando na fosfatase ácida, foram realizados no laboratório ConnectBio, também localizado em Santa Cruz do Sul. A metodologia empregada por este laboratório baseia-se na adaptação do método descrito por Tabatabai (1994).

A avaliação dos dados deste estudo foi conduzida por meio de uma análise exploratória e estatística descritiva, visando identificar a centralidade e dispersão dos dados. A normalidade dos dados foi examinada usando o teste Shapiro-Wilk (W) a  $p < 0,05$ , conforme proposto por SHAPIRO e WILK (1965). Para a análise dos dados, foi utilizado o software Stata/SE 17.0. Foi realizada a correlação de Pearson como método estatístico na qual é uma medida estatística que indica a intensidade e direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas contínuas. Na agricultura, essa correlação é frequentemente utilizada para investigar as relações entre diferentes variáveis do solo e a produtividade das plantas, incluindo a atividade de enzimas como a fosfatase ácida, que desempenha um papel fundamental na mobilização do fósforo no solo (NANNIPIERI et al., 2011).

A análise geoestatística foi realizada utilizando semivariogramas experimentais descritos por Vieira (2000), seguindo os modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e

linear) que melhor se ajustaram à variável, utilizando o programa de computador Gamma Design Software - GS+ (ROBERTSON, 1998). Os modelos foram ajustados com base no melhor coeficiente de determinação ( $r^2$ ), bem como na análise de validação cruzada (valores observados versus estimados). A partir do ajuste de um modelo matemático dos dados, os seguintes parâmetros foram definidos: efeito pepita ( $C_0$ ), limiar ( $C_0+C$ ) e alcance ( $A$ ). Após a análise e ajuste dos semivariogramas, a interpolação foi realizada por krigagem ordinária, levando em conta os parâmetros do semivariograma (modelo ajustado, efeito pepita, alcance e limiar) determinados pela análise geoestatística, utilizando o programa de computador Gamma Design Software - GS+ (Robertson, 1998). A distribuição espacial das variáveis estudadas é apresentada em mapas de isolinhas. Os mapas foram elaborados em cinco camadas, subdivididas em intervalos de 0 a 200, 200 a 300, 300 a 400, 400 a 500, 500 a 850 e valores até 850  $\mu\text{g p-nitrofenol g solo-1 h-1}$ .

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise exploratória da atividade da enzima fosfatase ácida evidenciam flutuações entre os meses analisados de acordo com a Tabela 2, possivelmente refletindo a característica sazonal intrínseca do ecossistema do solo (SMITH et al., 2015). A influência da temperatura no comportamento dos micro-organismos do solo é um fator a ser considerado nestas análises (FERREIRA E SOARES 2019). Na coleta de inverno, as temperaturas máximas, que variaram de 21,4°C a 33,8°C nos 15 dias anteriores à coleta, podem ter levado aos valores mais baixos observados para a atividade da fosfatase ácida, corroborando as observações de Almeida et al. (2017). Em contrapartida, dezembro, já caracterizado pelas condições de verão, registrou uma faixa de temperatura entre 27,3°C e 36,9°C, podendo justificar a elevação na atividade enzimática mínima de fosfatase ácida conforme indicado por Santos e Oliveira (2020).

No que se refere à variabilidade dos dados, maio apresentou um desvio padrão de 176.6561  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil-1 h-1}$ , o que indica maior dispersão dos dados em relação à média se comparado ao desvio padrão de dezembro, 137.4682  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil-1 h-1}$ . Esse padrão sugere que em maio, fatores adicionais, como práticas agrícolas ou fenômenos meteorológicos, podem ter influenciado o comportamento da enzima (Johnson & Hoverstad, 2017).

Na coleta de dezembro, notamos um coeficiente de variação (CV%) de 35.49, enquanto

em maio o CV% foi de 47.06. Esta diferença na dispersão em relação à média, pode indicar alterações na estabilidade do sistema, conforme discutido por Garcia et al. (2020).

Considerando os coeficientes de variação apresentados, de acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), podemos categorizar a variabilidade do CV% para ambas as coletas como moderada. Nesta classificação, os dados são divididos em baixa variabilidade (CV <12%), variabilidade moderada (12% < CV <60%) e alta variabilidade (CV >60%). Ambos os valores de CV% observados neste estudo se enquadram na faixa de variabilidade moderada.

Os indicativos de assimetria, curtose e o valor W de Shapiro-Wilk demonstram que os dados não aderem perfeitamente a uma distribuição normal (LIMA et al., 2019). O mês de maio, com seu teste W de 0.90769, não atinge o limite tradicional de aceitação de normalidade (0.95), sinalizando a necessidade de um exame mais detalhado, que pode incluir transformações nos dados ou até o emprego de análises não paramétricas, principalmente para testes de comparação de média (MARTINEZ & MARTINEZ, 2014). Apesar da desejabilidade de uma distribuição normal dos dados, não é essencial para técnicas como a krigagem na espacialização, conforme destacado por Cressie (1992) e Oliveira et al. (2015).

Tabela 2 – Análise descritiva da Enzima Fosfatase Ácida

<b>Estatística Descritiva</b>	<b>Fosfatase Ácida</b>	
	<b>Maio</b>	<b>Dezembro</b>
Média	375.3634	387.3354
Desvio Padrão (SD)	176.6561	137.4682
Erro Padrão da Média (se)	17.15836	13.35209
Mínimo (Min)	116.1569	164.9552
Mediana (p50)	332.1251	374.2928
Máximo (Max)	1103.838	786.8548
CV%	47.06	35.49
Amplitude	987.681	621.8996
Assimetria	1.292852	0.7700704
Curtose	5.1585	3.2784
W	0.90769	0.95207
N	105	105

Fonte: Autor. Stata V17

Legenda: n: número de observações; CV: coeficiente de variação; SW: Shapiro-Wilk. Valores expressos em µg p-nitrofenol g solo-1 h-1. \* Valores significativos a nulidade da normalidade.

Analisando os resultados obtidos neste estudo em relação à atividade da fosfatase ácida, é evidente a influência das condições ambientais e sazonais sobre a dinâmica dessa enzima no

solo. A comparação com o estudo conduzido por J.Z. BARBOSA et al. (2023) revela que a fosfatase ácida tem comportamentos distintos em diferentes biomas do Brasil. No Bioma Pampa, os valores encontrados por J.Z BARBOSA et al. (2023) mostraram médias menores em comparação às médias registradas em nosso estudo.

Um trabalho de E.Conte et al (2002) também analisou a atividade da fosfatase ácida em áreas de plantio direto e identificou uma grande variabilidade nos resultados, atribuindo-a principalmente às práticas de manejo do solo e à variação climática, onde encontraram valores que oscilavam entre 125  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil-1 h-1}$  e 460  $\mu\text{g p-nitrophenol g soil-1 h-1}$ , ressaltando que a adoção de práticas agrícolas sustentáveis pode influenciar positivamente a atividade enzimática. Dessa forma, torna-se evidente que a atividade da fosfatase ácida é sensível às condições ambientais e de manejo, o que reforça a importância de estudos contínuos que avaliem essa enzima como indicador da qualidade do solo em diferentes sistemas agrícolas.

Analisando a correlação observa-se que ocorre uma correlação baixa nos diferentes períodos de amostragem, com um coeficiente de correlação de 0.0763 entre a fosfatase ácida no inverno e no verão. Este padrão de correlação entre enzimas em diferentes épocas de coleta foi também evidenciado por Silva et al. (2018) e corroborado por Ferreira e Soares (2020), indicando a complexidade das interações enzimáticas em relação às variações sazonais.

Para os parâmetros da análise de semivariograma (Tabela 4), o modelo ajustado para Fosfatase ácida em ambas as coletas foi gaussiano. A amplitude dos modelos ajustados para cada atividade enzimática variou em um raio de 28,3 metros a 16,6 metros de cada ponto. Em relação ao coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ), encontrou-se um valor médio de 0,745 para a atividade enzimática da fosfatase ácida na estação do inverno e valor mais elevado, 0,756, para a atividade enzimática da fosfatase ácida na estação do verão, ambos considerados satisfatórios para uma análise geoestatística de estimativa de dados em locais não amostrados.

Tabela 3 – Análise dos Parâmetros do Semivariograma da Enzima Fosfatase Ácida

Enzima	Model	C0	C0+C1	A (m)	r <sup>2</sup>
Fosfatase Ácida Inverno	Gaussiano	3740	20960	28.3	0,745
Fosfatase Ácida Verão	Gaussiano	10000	18900	16,60	0,756

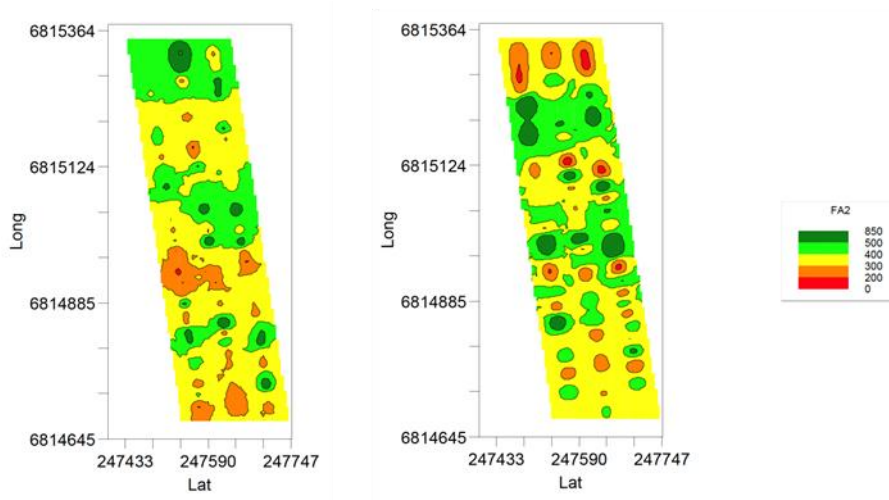
Fonte: Autor

Legenda: C0: efeito pepita; C0+C1: patamar; A: alcance (metros); r<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

Ao observar os mapas temáticos (Figura 3), é possível perceber a variabilidade da

atividade enzimática na área, tanto espacial quanto temporalmente. Para a fosfatase ácida na estação de inverno, grande parte da área apresenta valores na faixa de 300 a 400  $\mu\text{g}$  p-nitrofenol  $\text{g}$  solo-1  $\text{h}^{-1}$ . Já na coleta de verão, a fosfatase ácida mostra uma intensidade maior com menor dispersão dos dados, destacando-se valores elevados de até 850  $\mu\text{g}$  p-nitrofenol  $\text{g}$  solo-1  $\text{h}^{-1}$ .

Figura 3 – Mapas de isolinhas representado a variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática de fosfatase ácida no solo sob Sistema Plantio Direto em diferentes épocas do ano. Análise realizada



Legenda: 1: Data da coleta realizada em Maio de 2021 (Inverno); 2: Data de coleta realizada em Dezembro de 2021 (verão).

Analisando os mapas nas duas diferentes épocas nota-se uma inversão na atividade enzimáticas entre os dois períodos. No período de Outono pontos com maior atividade enzimática, inverteram a sua atividade no período de verão. O mesmo ocorre com os pontos de menor atividade e que no verão se apresentam com maior atividade.

### 3.4 CONCLUSÕES

Há variabilidade espacial e temporal na atividade enzimática da fosfatase ácida.

A atividade enzimática da fosfatase ácida apresentou uma baixa correlação entre as épocas de avaliação o que sugere a necessidade de mais estudos para definir o melhor momento de coleta de solo para as análises.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. A.; SILVA, J. F.; SOUZA, E. R. Efeito da aplicação de resíduos de biomassa na atividade enzimática do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 2, p. 423-432, 2017.
- ANDERSON, G. Soil enzymes: their role in soil health and sustainability. In: Soil biology and biochemistry in a changing world: advances in soil biology. **Springer**, 2015. p. 123-154.
- BARBOSA, J. Z.; OLIVEIRA, A. P.; VIEIRA, L. M.; SILVA, J. A. S. Variabilidade espacial da atividade da fosfatase ácida em um Latossolo Vermelho distrófico no Bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, 2023.
- BORASE, S. P.; Sharma, S. K.; Kumar, S. Soil enzymes as indicators of soil health and sustainability: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 351-372, 2020.
- CONTE, E.; COSTA, F. F.; COSTA, D. P. Variabilidade espacial da atividade da fosfatase ácida em um Latossolo Vermelho distrófico submetido ao plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 5, p. 641-646, 2002.
- CRESSIE, N. A. C. Statistics for spatial data. New York: **Wiley**, 1992.
- FERREIRA, M. A.; SOARES, P. R. Variabilidade espacial e temporal da atividade enzimática do solo em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, n. 4, p. 1067-1076, 2020.
- GARCIA, F. F.; SOUZA, P. C.; COSTA, F. F.; MENDES, F. M. Variabilidade espacial da atividade da enzima fosfatase ácida em solos de diferentes classes texturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, n. 4, p. 1057-1066, 2020.
- JENNY, H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. 7th ed. **Dover Publications**, 1994.
- JOHNSON, D. L.; HOVERSTAD, T. S. Soil enzyme activity and soil health. In: P. Nannipieri, A. M. Tabatabai, & E. L. Ferrera (Eds.), **Soil enzymology: applications in agricultural and environmental sciences**. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2017. p. 29-50.
- JOHNSTON, A. E.; Meisinger, J. J.; Thomas, G. W. Methods for assessing soil health. **CRC Press**, 2009.
- KUINCHTNER, A. C.; BURIOL, G. L. Características climáticas do município de Cruz Alta, RS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2001.
- LIMA, A. F.; SANTOS, G. A.; COSTA, F. F. Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores químicos e enzimáticos em áreas de cultivo de soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 43, n. 4, p. 1135-1144, 2019.
- LOPES, L. C.; SILVA, G. S. Avaliação da atividade da fosfatase ácida em solo cultivado com

trigo em duas épocas do ano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, n. 2, p. 570-579, 2019.

MARTINEZ, M. L.; MARTINEZ, M. E. **Estatística básica para as ciências agrárias**. Porto Alegre: Artmed, 2014.

MARTINS, L. A.; SILVA, G. S.; SOUZA, J. C.; GARCIA, R. C. Caracterização química e física de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 1357-1366, 2008.

MENDES, I. de C.; Soares, J. C.; Silva, P. M. Variabilidade espacial da atividade enzimática do solo em sistemas de produção agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1319-1328, 2015. doi: 10.1590/1806-9657rbc20140272.

NANNIPIERI, P.; Ceccanti, B.; Landi, L.; Renella, G. Soil enzymes: properties and applications. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 12, p. 1505-1523, 2002.

NANNIPIERI, P.; PLASSARD, C.; GIANFREDA, L. Soil enzymology: applications in agricultural and environmental sciences. **Chichester: Wiley-Blackwell**, 2011.

OLIVEIRA, R. L.; LOPES, L. C.; SILVA, G. S.; SCHERER, C. R. Variabilidade espacial da atividade da enzima fosfatase ácida em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 459-467, 2015.

ROBERTSON, G. P. **Geostatistics**. New York: Springer-Verlag, 1998.

RODRIGUES, A. P.; VITAL, B. A. Caracterização do solo de um Latossolo Vermelho distrófico no município de Cruz Alta, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 2, p. 373-383, 2016.

SANTOS, G. M.; et al. Climatologia do Rio Grande do Sul: uma análise espacial. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, n. 2, p. 203-224, 2015.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA, T. A.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, R. L. Variabilidade espacial da atividade enzimática do solo em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 2, p. 307-316.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A adoção de plantas de cobertura em práticas agrícolas é reconhecida como uma estratégia promissora na elevação das produtividades de cultivos. Estas não só otimizam as características físicas do terreno, mas também desempenham um papel crucial no controle de ervas daninhas e na promoção de um ambiente biológico saudável para o solo.

Os indicadores biológicos, como a atividade enzimática, são ressaltados por sua capacidade de sinalizar a qualidade do solo. Sua presença está intrinsecamente ligada às características químicas do solo, às práticas de manejo adotadas e, de maneira significativa, ao período em que a análise é realizada. Este estudo corroborou a ideia de que a atividade da Fosfatase ácida apresenta variabilidade tanto espacial quanto temporal. Assim, emerge a necessidade de aprofundar a compreensão das interações entre as práticas de manejo agrícola e a atividade enzimática do solo, garantindo também uma atenção especial às variações sazonais.

Esta pesquisa exploratória buscar reforçar a importância de harmonizar as práticas agrícolas com o entendimento das dinâmicas biológicas do solo. Ressaltando que a agricultura sustentável não só se beneficia, mas depende do equilíbrio entre estes elementos.

#### **5 CONCLUSÃO GERAL**

A atividade da fosfatase ácida neste estudo exploratório apresentou variabilidade especial, afetada por fatores como o momento da amostragem, condições ambientais e práticas de manejo adotadas. Este estudo destaca a relevância de estabelecer critérios uniformes para o período de coleta, frequência e condicionantes ambientais, buscando refinamento na determinação da atividade enzimática em diversos cenários e contextos. Esta padronização torna-se vital para obter um diagnóstico mais preciso e aplicável nas decisões de manejo agrícola.

Desta forma, sugere-se a elaboração de protocolos padronizados para amostragem, incluindo detalhes específicos como profundidade do solo, equipamentos e técnicas de preservação da amostra. Adicionalmente, seria benéfico buscar tecnologias de monitoramento em tempo real, permitindo avaliações mais frequentes e, conseqüentemente, uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas enzimáticas. Além disso, o desenvolvimento de estudos colaborativos inter-regionais poderia oferecer uma visão mais holística, combinando dados de diferentes áreas geográficas e climáticas, enriquecendo o entendimento global da atividade enzimática em solos sob variados manejos.



## REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTINEZ, Veronica; CANO, Amanda; JOHNSON, Jane. Simultaneous determination of multiple soil enzyme activities for soil health-biogeochemical indices. **Applied soil ecology**, v. 126, p. 121-128, 2018.
- ALVARENGA, Ramon Costa et al. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe agropecuário**, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.
- ALVES, Lucas Aquino et al. The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 203, p. 104678, 2020.
- BALOTA, Elcio L. et al. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 221-78, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2021). **Projeções do Agronegócio: BRASIL 2021-2022 a 2031-2032**. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-deve-crescer-36-8-nos-proximos-dez-anos/PROJEESDOAGRONEGCIO20212022a203132.pdf>
- CALEGARI, Ademir. Plantas de cobertura e rotação de culturas no sistema plantio direto. **Informações Agronômicas**, v. 122, p. 18-21, 2008.
- CARVALHO, Arminda Moreira de et al. Decomposition of plant residues in Latosol under corn crop and cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2831-2838, 2008.
- CHERUBIN, Maurício Roberto. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo [Apresentação]. **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**, p. 126: il, 2022.
- CORRÊA, Ademir Natal; TAVARES, Maria Hermínia Ferreira; URIBE-OPAZO, Miguel Angel. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e seus efeitos sobre a produtividade do trigo. **Semina: ciências agrárias**, v. 30, n. 1, p. 81-94, 2009.
- COSTA, N. de L. **Adubação fosfatada na recuperação de pastagens degradadas da região amazônica**. Embrapa Amapá, 1999.
- DICK, Richard P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 107-124, 1994.
- DICK, W. A. et al. Significance and potential uses of soil enzymes. **Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management.**, p. 95-127, 1992.
- DORAN, John W. Soil health and sustainability. **Advances in Agron.**, v. 56, p. 1-54, 1996.
- DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1-21, 1994.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Phosphatases in soils. **Soil biology and biochemistry**, v. 9, n. 3, p. 167-172, 1977.

EMBRAPA Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, v. 3, 2013.

FERNANDES, M.C. et al. Crop Rotation and Soil Quality: Effects on Wheat Production. **Agronomy Science**, 44(3), 78-85. 2019

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS – FAO. Disponível em: <https://www.fao.org/news/story/pt/item/284328/icode/> Acesso em: 26 ago. 2023.

FULLER, D.Q. The Spread of Wheat Farming. **Journal of Agricultural History**, 55(2), 246-274. 2007.

GONÇALVES, J. L. et al. Geoestatística aplicada à avaliação da fertilidade do solo em áreas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, 1319-1328. 2015

IBGE. Produção Agrícola Municipal: Cultura do Trigo. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021

LAL, Rattan. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 2, p. 158-169, 2009.

LOPES, F. C. F. et al. Enzimas indicadoras da qualidade do solo: uma revisão. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v. 62, n. 4, 883-888. 2010.

MACHADO, R. C. et al. Variabilidade espacial da atividade enzimática do solo em sistemas de produção agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 3, 1077-1086. 2017.

MARTINS, L. M. V. et al. Contribution of biological nitrogen fixation to cowpea: a strategy for improving grain yield in the semi-arid region of Brazil. **Biology and fertility of soils**, v. 38, p. 333-339, 2003.

**métodos auxiliares**. 2006.

NANNIPIERI, Paolo et al. Role of phosphatase enzymes in soil. **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling**, p. 215-243, 2011.

OLIVEIRA, A.S. et al. Agronomic and Industrial Uses of Wheat: Challenges and Perspectives. **Brazilian Journal of Development**, 31(12), 1022-1033. 2015.

OLIVEIRA, M. B. et al. Geoestatística aplicada à avaliação da fertilidade do solo em áreas de pastagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, 432-439. 2010.

ÖZDOĞAN, M. The Origins of Agriculture: New Data, New Ideas. **Current Anthropology**, v. 52, p. 4, 2011.

PASSOS, A. M. A.; ALVARENGA, R. C.; DOS SANTOS, F. C. Sistema de plantio direto. Brasília, DF: **Embrapa**. 2018

ROSCOE, Renato; MERCANTE, Fábio Martins; SALTON, Júlio Cesar. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e**

SÁ, J. C. M. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. In: Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S., Lopes, A.S., Guilherme, L.R.G., Faquin, V., Furtini Neto, A.E., Carvalho, J.G. (Eds.). pp.267- 320. Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships. Soc. Bras. Ci. Solo. UFLA, Lavras, MG, Brazil. 1999.

SCHAEFER, G. R. Tópicos em ciência do solo. **Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo**, v. 1, 2000.

SMITH, J. A.; BROWN, P. H. Impact of Soil Enzyme Dynamics on Precision Agriculture Practices. **Journal of Sustainable Agriculture**, 34(5), 555-576. 2018

SOUZA, M. J. de, ALMEIDA, C. R. de, & FERREIRA, L. P. Avaliação da Variabilidade Físico-Química e Biológica do Solo em Diferentes Sistemas de Manejo Agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 46(3), 789-806. 2022

TARAFDAR, J. C.; JUNGK, A1. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. **Biology and Fertility of Soils**, v. 3, p. 199-204, 1987.

VIEIRA, SIDNEY R. et al. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. **Tópicos em ciência do solo**, v. 2, p. 1-45, 2002.