

## **ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DA VARIABILIDADE DOS SOLOS E SUAS IMPLICAÇÕES EM SEU MANEJO**

Viitória Gleyce Sousa Ferreira<sup>1</sup>  
Marcelino Silva Farias Filho<sup>2</sup>  
Melina Fushimi<sup>3</sup>  
Lana Costa Ferreira<sup>4</sup>  
Daniele Cardoso Ferreira<sup>5</sup>

### **INTRODUÇÃO**

A variabilidade espacial dos atributos dos solos é um fenômeno complexo que exerce uma influência direta sobre o manejo agrícola e a conservação ambiental. Compreender essa variabilidade é essencial para a implementação de práticas agrícolas que maximizem a produtividade, ao mesmo tempo em que minimizam os impactos ambientais negativos. A relevância desse tema se torna ainda mais evidente em regiões como o Maranhão, onde a agricultura intensiva e a pecuária desempenham papéis centrais na economia local, mas também têm contribuído para a degradação dos recursos naturais, especialmente dos solos.

A agricultura e a pecuária são atividades milenares que, embora fundamentais para a subsistência humana e para a economia global, têm gerado problemas ambientais significativos, incluindo a degradação do solo. No Maranhão, uma região caracterizada pela presença de solos hidromórficos, como os Gleissolos, o manejo inadequado, especialmente relacionado ao cultivo de arroz irrigado e à pecuária, tem resultado em impactos adversos, como a compactação do solo e a erosão. Essas práticas comprometem a produtividade agrícola e ameaçam a conservação ambiental a longo prazo.

A variabilidade dos atributos dos solos está intimamente relacionada às condições ambientais e às práticas de manejo da terra. De acordo com Dalmolin e Caten (2012), os atributos dos solos são influenciados por processos pedogenéticos que são controlados por fatores como o clima, o material de origem, a topografia, o tempo e os organismos. Além disso, as atividades humanas, como a agricultura intensiva e o pisoteio do gado em pastagens, desempenham um papel crucial na modificação desses atributos, podendo tanto melhorar quanto degradar a qualidade do solo. Dias e Thomaz (2011) destacam que práticas agrícolas intensivas e o manejo inadequado das pastagens podem levar a variações significativas na compactação do solo, nos teores de nutrientes e na matéria orgânica. Cavalcante et al. (2007) acrescentam que a aplicação irregular de fertilizantes e corretivos na agricultura pode resultar em uma distribuição heterogênea de

<sup>1</sup> Doutoranda em geografia - Unesp Rio Claro - [Vitória.gleyce@unesp.br](mailto:Vitória.gleyce@unesp.br)

<sup>2</sup> Professor do departamento de geociências Universidade Federal – MA - [Marcelino.farias@ufma.br](mailto:Marcelino.farias@ufma.br)

<sup>3</sup> Professora do curso de geografia Unesp Rio Claro - [Melina.fushimi@unesp.br](mailto:Melina.fushimi@unesp.br)

<sup>4</sup> Mestranda em biodiversidade e conservação pela Universidade Federal – MA - [Lana.costa@discente.ufma.br](mailto:Lana.costa@discente.ufma.br)

<sup>5</sup> Graduanda em geografia bacharelado pela Universidade Estadual – MA - [Daniele.Forville@gmail.com](mailto:Daniele.Forville@gmail.com)

nutrientes, afetando a produtividade das culturas.

No contexto dos solos hidromórficos, como os Gleissolos, essas questões se tornam ainda mais críticas. Devido às suas características intrínsecas, esses solos são particularmente suscetíveis às mudanças induzidas pelo manejo agrícola. A compactação por exemplo, pode ser exacerbada em Gleissolos, devido à sua textura e estrutura, o que reduz a infiltração de água e o crescimento das raízes, impactando negativamente a produtividade agrícola. A erosão também é um risco significativo, especialmente em áreas onde o manejo do solo não leva em consideração a conservação dos recursos hídricos e do solo.

O conhecimento detalhado sobre a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos dos Gleissolos é limitado, o que dificulta a implementação de práticas de manejo adequadas. Isso resulta em uma degradação ambiental progressiva e na diminuição da produtividade agrícola, ameaçando a manutenção das atividades agropecuárias na região. Para abordar essa lacuna, este estudo tem como objetivo investigar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos de um Gleissolo Melânico Alítico típico em três áreas com diferentes usos no município de Arari, Maranhão. Compreender essa variabilidade é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manejo que preservem a qualidade do solo e promovam a conservação das práticas agrícolas na região.

O referencial teórico que embasa esta pesquisa inclui a compreensão dos processos pedogenéticos e a influência das atividades humanas sobre os atributos dos solos. Estudos como os de Dalmolin e Caten (2012) e Dias e Thomaz (2011) fornecem uma base sólida para entender como o manejo da terra afeta a variabilidade espacial dos solos. Além disso, a literatura sobre técnicas de análise de variabilidade espacial, como a geoestatística, é fundamental para interpretar os dados obtidos e propor intervenções de manejo que considerem essa variabilidade, conforme discutido por Cavalcante et al. (2007). Este estudo busca contribuir para esse corpo de conhecimento, oferecendo insights específicos sobre a dinâmica dos solos em um contexto de uso intensivo da terra no Maranhão, e propondo práticas de manejo que possam mitigar os impactos negativos observados.

Em suma, a análise da variabilidade espacial dos atributos dos solos em diferentes usos da terra não só fornece uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas do solo, mas também é essencial para a formulação de políticas e práticas agrícolas que promovam a conservação dos solos a longo prazo. Este estudo é uma contribuição importante para esse esforço, ao focar em uma região de alta relevância agrícola e ambiental, onde a implementação de estratégias de manejo adequado é urgente e

necessária para garantir a viabilidade futura das atividades agrícolas e a preservação dos recursos naturais.

## **METODOLOGIA**

A pesquisa foi conduzida em três áreas de um hectare cada, localizadas no município de Arari, MA. As áreas foram selecionadas com base em seus diferentes usos: uma área utilizada para arroz irrigado e pecuária (área A), uma para pecuária extensiva em vegetação nativa (área B), e outra exclusivamente para arroz irrigado (área C). Essas áreas representam diferentes níveis de manejo e impacto sobre o solo, proporcionando um cenário ideal para estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo.

Em cada área, foram coletadas amostras de solo (deformadas e indeformadas) na camada de 0-20 cm de profundidade, utilizando uma malha regular de 10 x 10 metros, o que resultou em 121 amostras por área, totalizando 363 amostras. As amostras deformadas foram usadas para análises químicas, enquanto as amostras indeformadas foram utilizadas para medir propriedades físicas como a resistência à penetração e a porosidade.

As análises laboratoriais incluíram a determinação de vários atributos físicos (resistência à penetração, densidade, porosidade total, macro e microporosidade) e químicos (pH, carbono orgânico, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, P disponível, S, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>Al, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e por alumínio). Essas análises foram complementadas por técnicas de estatística descritiva e geoestatística para avaliar a dependência espacial e a variabilidade dos atributos em cada área.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O estudo revelou variações significativas nos atributos físicos do solo entre as três áreas investigadas. Um dos principais atributos analisados foi a resistência à penetração, que mede a compactação do solo. Esse atributo é crucial porque a compactação pode limitar o crescimento das raízes e reduzir a infiltração de água, afetando a produtividade das culturas.

Na área A (utilizada para arroz irrigado e pecuária), observou-se a maior resistência à penetração, com valores médios significativamente mais altos em comparação com as outras áreas. Isso indica que o solo nessa área está mais compactado, provavelmente devido ao manejo intensivo, que inclui tanto o cultivo do arroz quanto a pressão exercida pelo pisoteio do gado. A área C, que é exclusivamente usada para o

cultivo de arroz irrigado, apresentou resistência à penetração menor que a área A, mas ainda assim elevada, sugerindo que o cultivo contínuo de arroz contribui para a compactação do solo, mesmo na ausência de gado.

Em contrapartida, a área B, dedicada à pecuária extensiva em vegetação nativa, apresentou os menores valores de resistência à penetração. Isso pode ser atribuído ao fato de que a vegetação nativa, juntamente com a menor intensidade de uso, ajuda a manter a estrutura do solo mais solta e menos compactada. A menor compactação na área B facilita a infiltração de água e a aeração das raízes, o que é benéfico para a saúde do solo a longo prazo.

A densidade do solo foi outro atributo físico analisado. A densidade do solo está diretamente relacionada à compactação; solos mais densos têm menos espaço poroso, o que pode limitar o armazenamento de água e a disponibilidade de ar para as raízes. O estudo mostrou que a densidade do solo variou entre as áreas, sendo maior na área A e menor na área B. Esses resultados corroboram as observações feitas sobre a resistência à penetração

Em suma, este estudo demonstra que as práticas de manejo intensivo, como sugerindo que o manejo intensivo nas áreas A e C tem levado à compactação e aumento da densidade do solo.

A porosidade total do solo que inclui tanto macroporos (espaços maiores por onde a água e o ar podem se mover) quanto microporos (espaços menores que retêm água), também foi medida. Na área B, a porosidade total foi a mais alta, indicando um solo bem estruturado, com boa capacidade de retenção de água e adequada aeração. As áreas A e C, em contraste, mostraram menor porosidade total, o que indica que o manejo nessas áreas pode estar comprometendo a estrutura do solo, reduzindo sua capacidade de fornecer condições ótimas para o crescimento das plantas.

Em termos de atributos químicos, o estudo focou em uma série de indicadores-chave, como \*\*pH do solo, teor de carbono orgânico, concentração de nutrientes essenciais (como potássio, cálcio e magnésio), e a saturação por bases\*\*. Estes indicadores são cruciais para determinar a fertilidade do solo e sua adequação para suportar a produção agrícola.

O pH do solo é um indicador importante da acidez ou alcalinidade do solo, que por sua vez influencia a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Os resultados mostraram que o pH variou entre as três áreas, com a área A apresentando um pH mais baixo, indicando uma tendência à acidez. Isso pode ser o resultado da aplicação de

fertilizantes químicos e o uso contínuo do solo para o cultivo de arroz, que pode acidificar o solo ao longo do tempo. Na área C, o pH foi ligeiramente mais alto do que na área A, mas ainda assim na faixa ácida, enquanto a área B apresentou o pH mais próximo do neutro, o que é típico de solos menos manejados e mais naturalmente equilibrados.

O teor de carbono orgânico é outro atributo essencial que foi analisado. O carbono orgânico no solo é uma medida da matéria orgânica, que é vital para a saúde do solo, pois melhora a estrutura do solo, aumenta a retenção de água e fornece nutrientes para as plantas. A área B, com vegetação nativa, apresentou o maior teor de carbono orgânico, o que era esperado devido à menor intervenção antrópica e à presença contínua de material vegetal que contribui para a matéria orgânica do solo. Em contraste, as áreas A e C, devido ao manejo intensivo, apresentaram teores de carbono orgânico mais baixos, o que pode comprometer a fertilidade do solo a longo prazo.

A concentração de nutrientes essenciais como potássio ( $K^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ), e sódio ( $Na^+$ ) também foi avaliada. A área A apresentou os níveis mais altos de potássio e sódio, o que pode ser atribuído ao uso de fertilizantes em sistemas de cultivo intensivo. Contudo, esses níveis elevados, especialmente de sódio, podem indicar um risco de salinização, o que pode prejudicar a estrutura do solo e reduzir a sua produtividade. Na área C, onde o arroz é cultivado exclusivamente, os níveis de cálcio e magnésio foram relativamente altos, o que sugere que a fertilização tem sido direcionada para manter esses nutrientes em níveis adequados. A área B, novamente, apresentou uma distribuição mais equilibrada de nutrientes, refletindo um ambiente mais natural e menos impactado pelas atividades agrícolas.

A capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases foram utilizadas como indicadores da capacidade do solo de reter e fornecer nutrientes às plantas. A CTC foi mais alta na área B, indicando um solo mais fértil e capaz de sustentar a vegetação nativa sem a necessidade de insumos externos. Nas áreas A e C, a CTC foi menor, o que sugere que a fertilidade do solo nessas áreas depende mais de adubações regulares para manter a produtividade agrícola.

Os resultados deste estudo destacam a influência significativa das práticas de manejo sobre os atributos físicos e químicos do solo. A área A, que combina arroz irrigado e pecuária, sofreu os impactos mais severos, com alta compactação, densidade do solo elevada e redução na porosidade, além de uma maior acidez e possíveis sinais de salinização. Esses fatores indicam que as práticas atuais de manejo estão degradando a

qualidade do solo, o que pode ter consequências a longo prazo para a manutenção da produção agrícola nessa área.

A área C, embora dedicada exclusivamente ao cultivo de arroz, também apresentou sinais de degradação, como compactação e redução da matéria orgânica, mas os impactos foram menos severos do que na área A. Isso sugere que, embora o cultivo contínuo de arroz cause impactos negativos, eles podem ser menos intensos na ausência de pecuária.

Em contraste, a área B, que é utilizada para pecuária extensiva em vegetação nativa, mostrou-se a mais resiliente, com melhores indicadores de saúde do solo, incluindo menor compactação, maior porosidade, maior teor de carbono orgânico e uma distribuição mais equilibrada de nutrientes. Esses resultados reforçam a importância de práticas de manejo que preservem a vegetação nativa e minimizem a intervenção humana, para manter a qualidade do solo e promover a conservação a longo prazo.

Aquelas aplicadas nas áreas A e C, têm impactos negativos significativos sobre os atributos físicos e químicos do solo, comprometendo sua qualidade e, conseqüentemente, da produção agrícola. Em contrapartida, a área B, com manejo menos intensivo, mantém uma melhor saúde do solo, destacando a importância de práticas mais adequadas que respeitem a variabilidade natural dos solos. Esses achados são cruciais para informar futuras estratégias de manejo que busquem equilibrar a produção agrícola com a preservação dos recursos naturais.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os resultados desta pesquisa fornecem uma compreensão aprofundada dos impactos das práticas de manejo agrícola sobre os atributos físicos e químicos de Gleissolos Melânicos em diferentes áreas de uso no município de Arari, MA. A análise das três áreas estudadas – uma combinando arroz irrigado e pecuária, outra dedicada exclusivamente ao cultivo de arroz, e uma terceira sob pecuária extensiva em vegetação nativa – revelou variações significativas na qualidade do solo, intimamente ligadas ao tipo e intensidade do manejo praticado.

Primeiramente, a área que combina arroz irrigado com pecuária mostrou-se a mais degradada, com níveis elevados de compactação, menor porosidade e uma tendência preocupante à acidificação do solo. Esses resultados sugerem que a intensificação do uso

da terra, sem uma devida consideração pela conservação do solo, leva a uma rápida deterioração dos seus atributos físicos e químicos.

A compactação elevada, evidenciada pela resistência à penetração e pela densidade do solo, é um indicativo claro de que o solo está perdendo sua capacidade de infiltração de água e aeração adequada, o que pode resultar em problemas sérios como erosão e redução da produtividade agrícola ao longo do tempo. Além disso, a tendência à acidificação observada pode reduzir a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas, exacerbando ainda mais os desafios agrícolas na região.

Em contraste, a área sob pecuária extensiva em vegetação nativa apresentou as melhores condições de solo, com maior teor de carbono orgânico, melhor estrutura física (maior porosidade e menor compactação) e uma distribuição mais equilibrada de nutrientes. Esses atributos são fundamentais para conservação a longo prazo, sugerindo que práticas menos intensivas e que preservam a vegetação nativa podem ser eficazes na manutenção da saúde do solo. Este cenário ressalta a importância da vegetação nativa na estabilização do solo e na ciclagem de nutrientes, proporcionando um ambiente mais equilibrado e resiliente, mesmo sob a presença de atividades pecuárias.

Os achados desta pesquisa têm implicações importantes para o manejo adequado dos solos na região e em outros contextos semelhantes. Eles evidenciam a necessidade urgente de revisar as práticas de manejo intensivo que estão sendo aplicadas, especialmente em áreas utilizadas para cultivo de arroz irrigado e pecuária, a fim de mitigar os efeitos negativos sobre a estrutura e a fertilidade do solo. A adoção de práticas de manejo mais adequadas, como a rotação de culturas, a integração de sistemas agroflorestais, e o uso de técnicas de manejo conservacionistas, pode ajudar a restaurar e manter a qualidade do solo, garantindo a viabilidade agrícola a longo prazo.

Além disso, a aplicação de técnicas de geoestatística mostrou-se crucial para entender a variabilidade espacial dos atributos do solo e para identificar áreas específicas que requerem intervenções diferenciadas. A utilização dessa ferramenta permite que as estratégias de manejo sejam mais precisas e direcionadas, reduzindo a aplicação excessiva de insumos e minimizando o impacto ambiental. Este estudo destaca a importância da agricultura de precisão como uma abordagem promissora para promover a conservação, otimizando o uso dos recursos naturais e minimizando a degradação do solo.

Por fim, recomenda-se que políticas públicas e programas de extensão rural incorporem esses achados e incentivem a adoção de práticas agrícolas mais adequadas e adaptadas às condições específicas de cada tipo de solo. Além disso, futuras pesquisas

deveriam explorar o impacto de práticas de manejo sobre a recuperação dos solos degradados e expandir a análise para outras regiões e tipos de solos, contribuindo para a criação de um arcabouço mais robusto de conhecimento que suporte a tomada de decisões em prol da conservação agrícola e ambiental.

Em suma, o equilíbrio entre a produtividade agrícola e a conservação do solo é essencial para garantir a segurança alimentar e a preservação dos ecossistemas no Maranhão e em outras regiões que enfrentam desafios semelhantes. Este estudo oferece uma base sólida para a formulação de estratégias de manejo que promovam um uso mais racional dos recursos do solo, assegurando que as gerações futuras possam continuar a se beneficiar das riquezas naturais da região.

**Palavras – chave:** geoestatística, manejo adequado, atributos do solo

## **REFERÊNCIAS**

CAVALCANTE, A. et al. (2007). Impacto da aplicação de fertilizantes e corretivos na variabilidade dos nutrientes do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.42, n.3, p.323-329.

DALMOLIN, R. S. D.; CATEN, A. T. (2012). Influência de fatores pedogenéticos na variabilidade dos atributos dos solos. **Ciência Rural**, v.42, n.5, p.846-853.

DIAS, A. C.; THOMAZ, E. L. (2011). Efeitos do pisoteio do gado na compactação do solo em áreas de pastagem. **Acta Scientiarum. Agronom**, v.33, n.1, p.97-103.