

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

João Vitor Dutra Riquiel

**IMPACTO DE SISTEMAS DE PREPARO NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE
VARIÁVEIS DO SOLO**

Jaboticabal - SP

2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

João Vitor Dutra Riquiel

**IMPACTO DE SISTEMAS DE PREPARO NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE
VARIÁVEIS DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV) como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

Co-orientador: Airton Andrade da Silva

Jaboticabal - SP

2026

R594i

Riquiel, João Vitor Dutra

Impacto de sistemas de preparo na variabilidade espacial de variáveis do solo / João Vitor Riquiel. -- Jaboticabal, 2026

53 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rouverson Pereira da Silva

Coorientador: Airton Andrade da Silva

1. Agricultura de precisão. 2. Solos Compactação. 3. Krigagem. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

João Vitor Dutra Riquiel

**IMPACTO DE SISTEMAS DE PREPARO NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE
VARIÁVEIS DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em **Engenharia Agrônômica**.

Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

Coorientador (se houver): Me. Airton Andrade da Silva

Área de Concentração: Máquinas, mecanização agrícola e agricultura digital

Trabalho aprovado em 15/06/2026

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
ROUVERSON PEREIRA DA SILVA
Data: 20/07/2026 16:21:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

 Documento assinado digitalmente
SAMIRA LUNS HATUM DE ALMEIDA
Data: 22/07/2026 10:29:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dra. Samira Luns Hatum de Almeida

UFMA - Universidade Federal do Maranhão - Campus Chapadinha

 Documento assinado digitalmente
ERIKA CRISTINA GOMES SALES
Data: 20/07/2026 16:29:32-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Me. Erika Cristina Gomes Sales

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

 Documento assinado digitalmente
LUIZ FABIANO PALARETTI
Data: 23/07/2026 10:40:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Jaime Riquiel e Giani Cristina Riquiel, ao meu irmão Luiz Otávio Riquiel e a Nossa Senhora Aparecida, por terem me apoiado ao longo dessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Nossa Senhora, por me concederem força, sabedoria, proteção e perseverança durante toda esta caminhada.

Ao professor Rouverson, pela orientação, confiança, disponibilidade e por todos os conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para minha formação acadêmica e profissional.

Ao meu coorientador, Airton, por todo o apoio, paciência e auxílio durante a execução deste trabalho, estando sempre disponível para esclarecer dúvidas e contribuir para a realização desta pesquisa.

A todos os integrantes do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola, pela colaboração nas atividades de campo, pelas experiências compartilhadas, pelo companheirismo e por todo o aprendizado adquirido durante o período em que estive no laboratório.

Aos meus pais e meu irmão, por todo o amor, esforço, incentivo e apoio incondicional. Agradeço por sempre acreditarem em mim, por não medirem esforços para que eu pudesse concluir minha graduação e por serem minha principal base em todos os momentos da minha vida.

À minha namorada, Gabriella, agradeço por permanecer ao meu lado nos momentos felizes e, principalmente, nos momentos mais difíceis, sempre me motivando e acreditando em mim.

À República Tôa-Tôa, que se tornou minha segunda família durante a graduação. Agradeço por todos os momentos compartilhados, pelas amizades construídas, pelo companheirismo, pelas histórias vividas e por tornarem essa trajetória inesquecível.

Por fim, agradeço a todos os amigos, professores, familiares e demais pessoas que estiveram comigo ao longo da graduação e que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e para a realização deste sonho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Geral	13
2.2 Específicos.....	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 Preparo de solo.....	14
3.2 Propriedades físicas do solo	16
3.3 Agricultura de Precisão	19
3.4 Geoestatística	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Caracterização do local de pesquisa	25
4.2 Condução do experimento	25
4.3 Obtenção dos dados.....	30
4.4 Processamento dos dados.....	34
5. RESULTADOS.....	35
5.1 Análise descritiva dos dados	35
5.2 Análise geoestatística.....	38
5.3 Impacto dos preparos de solo sobre as variáveis	42
6. DISCUSSÃO	47
6.1 Umidade	47
6.2 Elevação de superfície	48
6.3 Resistência a penetração.....	48
7. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistemas de preparo de solo	14
Figura 2: Solo compactado e descompactado.....	16
Figura 3: Empolamento e Perfilômetro	18
Figura 4: Gerenciamento da variabilidade espacial do solo	20
Figura 5: Componentes estruturais do Semivariograma	22
Figura 6: Área experimental	25
Figura 7: Croqui experimental da área	26
Figura 8: Grade niveladora	27
Figura 9: Preparo reduzido com escarificador.....	28
Figura 10: Preparo reduzido com enxada rotativa.....	28
Figura 11: Trator utilizado no trabalho	29
Figura 12: Malha amostral dos pontos de coleta de dados	30
Figura 13: Resistência do solo a penetração.....	30
Figura 14: Coleta de amostras para umidade	32
Figura 15: Pesagem das amostras.....	32
Figura 16: Perfilômetro	33
Figura 17: Receptor GNSS	34
Figura 18: Mapa de variabilidade (Antes Gradagem)	41
Figura 19: Mapa de variabilidade (Após Gradagem)	41
Figura 20: Mapa de variabilidade (Antes Esc)	41
Figura 21: Mapa de variabilidade (Após Esc)	41
Figura 22: Mapa de variabilidade (Antes Enx)	42
Figura 23: Mapa de variabilidade (Após Enx)	42
Figura 24: Correlação espacial global	45
Figura 25: Correlação gradagem	46
Figura 26: Correlação Esc	46
Figura 27: Correlação Enx.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise estatística descritiva dos dados antes do preparo	36
Tabela 2: Análise estatística descritiva dos dados após o preparo	37
Tabela 3: Análise geoestatística antes do preparo	38
Tabela 4: Análise geoestatística após o preparo	39
Tabela 5: Delta média espacial da álgebra de mapas	43

RESUMO

Variáveis do solo constituem fatores determinantes para o desenvolvimento das culturas agrícolas, sendo diretamente influenciadas pelos sistemas de preparo do solo. Nesse contexto, objetivou-se avaliar os efeitos dos sistemas de preparo por gradagem, preparo reduzido com escarificador e preparo reduzido com enxada rotativa sobre a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), da umidade do solo e da elevação da superfície. O experimento foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, em Jaboticabal-SP, em um Latossolo Vermelho Eutroférico. As avaliações foram realizadas em 30 pontos georreferenciados por tratamento, antes e após a execução dos preparos. A RMSP foi determinada com penetrômetro de impacto, a umidade pelo método gravimétrico e a elevação da superfície por perfilômetro. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e geoestatística, utilizando semivariogramas, interpolação espacial, validação cruzada, álgebra de mapas e correlação espacial. Os resultados demonstraram que a gradagem promoveu alterações pouco expressivas na resistência do solo à penetração, concentradas nas camadas superficiais. O escarificador foi o sistema que promoveu as maiores alterações na distribuição espacial da resistência à penetração e da umidade, reduzindo a resistência nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, enquanto a enxada rotativa apresentou efeito predominante na camada superficial, aumentando a elevação da superfície e promovendo modificações mais restritas à profundidade de atuação do implemento. A análise geoestatística evidenciou predominância de dependência espacial fraca a moderada, indicando que os sistemas de preparo modificaram principalmente a distribuição espacial dos atributos físicos do solo. Conclui-se que o escarificador foi o sistema mais eficiente para a descompactação das camadas superficiais e intermediárias (0–20 cm), enquanto a enxada rotativa mostrou-se mais indicada para o preparo superficial do solo. A integração da análise descritiva, da geoestatística, da álgebra de mapas e da correlação espacial mostrou-se eficiente para caracterizar os efeitos dos sistemas de preparo e subsidiar práticas de agricultura de precisão.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Geoestatística; Compactação do solo; Krigagem; Mecanização agrícola.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de preparo do solo, sejam convencionais ou conservacionistas, promovem alterações na estrutura física do solo por meio de operações mecânicas de mobilização, influenciando diretamente nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Essas práticas buscam criar condições mais adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas, favorecendo o estabelecimento das culturas e o funcionamento do sistema solo-água-planta. Segundo Busari et al. (2015), os sistemas de preparo do solo promovem modificações significativas nos atributos do solo, influenciando variáveis como densidade, porosidade, infiltração de água, armazenamento hídrico, empolamento e resistência mecânica à penetração. Essas alterações decorrem da intensidade de mobilização promovida pelos implementos agrícolas, que modificam a estrutura do solo. Dessa forma, diferentes práticas de preparo, como o convencional e o reduzido, podem gerar distintas condições de solo dentro da área agrícola, afetando a dinâmica da água, o desenvolvimento radicular das plantas e a distribuição espacial dos atributos do solo.

Benevenute et al. (2025), ao avaliarem diferentes métodos de preparo de solo em cultivo de café, observaram que operações com maior mobilização subsuperficial, ou seja, preparos mais intensivos, de modo geral, influenciam na estrutura do solo e beneficia o crescimento radicular das plantas. Além disso, Ngo-Cong et al. (2021) verificaram que alterações estruturais decorrentes da compactação influenciam diretamente a infiltração e retenção de água no perfil do solo, evidenciando a importância do manejo físico adequado para manutenção da qualidade do solo.

Entretanto, os atributos físicos do solo apresentam elevada variabilidade espacial, mesmo em áreas submetidas ao mesmo sistema de manejo, dificultando sua caracterização e interpretação no campo. Em estudos conduzidos em áreas agrícolas dos Estados Unidos, Awal et al. (2019) avaliaram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, densidade aparente, umidade volumétrica e condutividade hidráulica, verificando que todas as variáveis apresentaram comportamento espacial distinto e diferentes graus de dependência espacial. Os resultados demonstraram que atributos físicos do solo podem apresentar elevada heterogeneidade local, mesmo em áreas manejadas de forma uniforme, evidenciando a necessidade da aplicação de técnicas geoestatísticas para compreender sua distribuição espacial e subsidiar práticas de manejo mais precisas. Essa heterogeneidade ocorre em função da interação entre fatores naturais e antrópicos, como textura, teor de matéria orgânica, relevo, tráfego de máquinas e intensidade de mobilização do solo. Além disso, diferentes sistemas de preparo podem modificar

significativamente os padrões da distribuição espacial dessas variáveis, dentre elas a compactação, porosidade e umidade, refletindo diretamente na continuidade espacial dos dados e na representação da variabilidade em campo.

A análise da variabilidade espacial dos atributos do solo apresenta desafios relacionados à própria estrutura espacial dos dados. Lima et al. (2025), ao avaliarem atributos do solo em áreas de pastagem por meio de técnicas geoestatísticas, observaram diferentes graus de dependência espacial entre as variáveis estudadas, com comportamentos que variaram desde forte até fraca continuidade espacial. Segundo os autores, essas diferenças influenciam diretamente o ajuste dos semivariogramas e a confiabilidade dos mapas interpolados. Dessa forma, a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo torna-se ainda mais complexa em áreas submetidas a operações de preparo, uma vez que essas práticas podem alterar tanto os valores das variáveis quanto sua estrutura espacial.

Estudos têm demonstrado que os sistemas de preparo influenciam diretamente os atributos físicos do solo e sua variabilidade espacial. Moraes et al. (2020) verificaram que áreas com maiores níveis de compactação apresentaram elevação da resistência do solo à penetração e alterações no desenvolvimento radicular da soja. Coelho et al. (2012), ao avaliarem um pomar de manga, observaram elevada variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, identificando regiões com diferentes padrões de compactação em uma mesma área. Além disso, Borges et al. (2019) destacam que diferentes implementos de preparo promovem distintos níveis de mobilização e elevação da superfície do solo, alterando a estrutura física e a distribuição espacial dos atributos relacionados à porosidade e dinâmica da água. Esses resultados confirmam que os sistemas de preparo não apenas modificam atributos físicos do solo, mas também interferem diretamente na variabilidade espacial dessas variáveis.

Nesse contexto, os diferentes sistemas de preparo do solo distinguem-se principalmente pela intensidade e pela profundidade de mobilização promovida pelos implementos agrícolas. O preparo convencional, realizado por meio de gradagem, promove o revolvimento e a desagregação da camada superficial do solo, favorecendo a incorporação de resíduos e a formação do leito de semeadura. O escarificador atua em maiores profundidades por meio de hastes, promovendo a ruptura de camadas compactadas com menor revolvimento da superfície. Já a enxada rotativa realiza intensa fragmentação, mistura e destorroamento da camada superficial, proporcionando elevada mobilização do solo na zona de atuação do implemento

Portanto, torna-se importante compreender como diferentes sistemas de preparo modificam a distribuição espacial da resistência do solo à penetração, da umidade e da elevação

de superfície, uma vez que essas variáveis estão diretamente relacionadas à qualidade física do solo, à dinâmica da água no perfil e ao desenvolvimento pleno das culturas. A identificação dessas alterações pode contribuir para a seleção de práticas de manejo mais eficientes na mitigação da compactação e na melhoria das condições hídricas do solo. Assim, a utilização de ferramentas da agricultura de precisão e da geoestatística torna-se fundamental para compreensão da heterogeneidade espacial dos atributos físicos do solo em áreas agrícolas. A aplicação dessas técnicas possibilita gerar mapas temáticos, identificar padrões espaciais e auxiliar na tomada de decisão quanto às práticas de manejo mais adequadas, contribuindo para sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

1.1 JUSTIFICATIVA

A compactação do solo e a distribuição da água no perfil estão entre os principais fatores que condicionam o desenvolvimento das culturas agrícolas, influenciando diretamente o crescimento radicular, a infiltração de água e o aproveitamento dos recursos disponíveis no solo. Além disso, a análise de elevação da superfície do solo promovido pelos diferentes implementos, auxilia na interpretação das alterações observadas na compactação e na distribuição da água no solo, possibilitando entender qual método de preparo do solo impactou mais nessas variáveis.

Embora diversos estudos tenham avaliado os efeitos dos sistemas de preparo sobre atributos físicos do solo, ainda são limitadas as informações sobre como essas operações influenciam a variabilidade espacial da compactação, da umidade e da elevação da superfície, especialmente quando avaliadas antes e após os diferentes métodos de preparo do solo. Nesse sentido, a utilização de ferramentas da agricultura de precisão e da geoestatística possibilita representar espacialmente a heterogeneidade dos atributos do solo por meio de mapas temáticos, permitindo compreender os efeitos dos diferentes sistemas de preparo sobre a área estudada. Os resultados obtidos podem subsidiar a escolha de práticas de manejo mais eficientes, contribuindo para a redução de problemas relacionados à compactação, melhor aproveitamento da água no solo e uso mais racional das operações mecanizadas, favorecendo sistemas agrícolas mais produtivos e sustentáveis.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar os efeitos dos sistemas de preparo com gradagem, reduzido com escarificador e reduzido com enxada rotativa sobre a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, da umidade do solo e da elevação da superfície, visando compreender as alterações promovidas nos atributos físicos do solo após as operações de preparo.

2.2 Específicos

- a) Analisar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, da umidade do solo e elevação de superfície antes e após os sistemas de preparo;
- b) Analisar os efeitos dos sistemas de preparo sobre a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo;
- c) Identificar o sistema de preparo mais eficiente na redução da compactação.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Preparo de solo

A implantação de culturas agrícolas requer o preparo do solo, que se baseiam num conjunto de operações mecânicas as quais mobilizam o solo, podendo ser realizado por meio de preparo convencional, reduzido ou adoção do Sistema Plantio Direto (Figura 1). Portanto, os preparos e os métodos de cultivo buscam estruturar melhor o solo, proporcionando um ambiente físico, químico e biológico mais adequado para o pleno desenvolvimento das plantas em campo (Angon et al., 2023).

Figura 1: Sistemas de preparo de solo



Fonte: elaborado pelo Gemini

Durante décadas, o preparo convencional foi um dos métodos de preparo de solo mais utilizado pelos agricultores, o qual consiste em operações mais grosseiras ao solo, realizando uma aração, seguida de duas ou mais gradagens, para o nivelamento e destorroamento do solo, trabalhando em uma camada arável de até 20 cm (Machado et al., 2023). Desse modo, o preparo convencional, atende a finalidade de reduzir as plantas invasoras iniciais, a compactação superficial do solo, proporcionar uma melhor infiltração de água e a incorporação de resíduos vegetais e insumos, permitindo condições favoráveis para o estabelecimento dos cultivos (Embrapa, 2026).

Por outro lado, esse método de preparo de solo pode ser prejudicial sobre diversos atributos do solo, como a redução da atividade e diversidade microbiana, a formação de camadas adensadas subsuperficiais, conhecidas como “pé-de-grade” decorrentes da repetição das operações mecanizadas em uma mesma profundidade, além da perda de matéria orgânica, desagregação da estrutura do solo, intensificação dos processos de lixiviação de nutrientes e

aumento da suscetibilidade à erosão. Esse sistema também pode implicar em maior custo operacional em função do elevado número de operações realizadas (Busari et al., 2015). Melo et al. (2024) estudaram a perda de nutrientes em cultivos de arroz sob diferentes sistemas de manejo do solo e observaram que o tratamento com preparo convencional apresentou maiores perdas de fósforo e potássio na água da enxurrada proveniente de chuvas simuladas. Esse resultado foi atribuído à maior desagregação do solo causada pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície descoberta e do solo preparado. Comprovando a maior suscetibilidade a erosão em sistemas de cultivo convencional, Lemos et al. (2020), investigaram a perda de solo, sob condições de chuva simulada, em parcelas experimentais manejadas com plantio direto e preparo convencional, o qual revelou maior perda de solo por erosão hídrica no sistema de preparo convencional. Portanto, esse comportamento foi atribuído ao fato do maior revolvimento do solo e menor proteção superficial, o que facilitou a desagregação das partículas e o transporte de sedimentos pela enxurrada.

Já o preparo reduzido do solo, também conhecido como mínimo, é um sistema de manejo que visa a conservação do solo, reduzindo o número de operações realizadas no preparo do solo, garantindo o mínimo revolvimento da terra, maior conservação da cobertura vegetal sobre a superfície, de forma a preservar suas características químicas, físicas e biológicas, ou seja, um sistema mais sustentável e com um menor custo operacional, quando comparado ao convencional (Adam; Abdulai, 2023).

Segundo estudos realizados por Dadalto et al. (2015), o sistema de preparo do solo exerce influência direta sobre a atividade microbiológica, sendo que sistemas conservacionistas, como o plantio direto e o preparo mínimo, tendem a favorecer maior atividade microbiana quando relacionado ao preparo convencional, devido à menor mobilização do solo e à maior manutenção de resíduos vegetais na superfície, o que contribui para melhores condições de habitat e disponibilidade de substrato para os microrganismos do solo. Levando em conta as culturas perenes, um bom preparo de solo, com revolvimento das camadas subsuperficiais, torna-se fundamental para o estabelecimento e desenvolvimento dessas culturas. Benevenuto et al. (2025), avaliaram o impacto de diferentes métodos de preparo de solo no cultivo do café, comprovando que o preparo profundo do solo, envolvendo escarificador e subsolador proporcionaram um melhor desenvolvimento estrutural das plantas de café, de modo, a garantir uma maior longevidade e produtividade da lavoura.

Outro aspecto importante a ser considerado é que o preparo do solo normalmente é realizado de forma homogênea em todo o talhão, desconsiderando a variabilidade espacial dos

atributos do solo dentro de uma mesma área. Portanto, antes de qualquer tomada de decisão de manejo de solo, e para ter um manejo mais preciso e sustentável, é necessário avaliar e diagnosticar as características do solo (Molin et al., 2015).

3.2 Propriedades físicas do solo

Os diferentes sistemas de preparo do solo, responsáveis pelo revolvimento mecânico do solo, podem influenciar de diferentes formas nos atributos do solo, dentre eles a densidade do solo, a compactação e o empoamento, influenciando na dinâmica da aeração e retenção de água no solo, e consequentemente no desenvolvimento das culturas agrícolas (Chetan et al., 2026).

A compactação do solo (Figura 2) é um atributo importante para estudos, por influenciar diretamente na dinâmica do sistema solo-água-planta. De acordo com Peralta Ogorek et al. (2025), a compactação é uma das formas mais graves de degradação física do solo, podendo ser definida como uma alteração da estrutura do solo caracterizada pela redução do volume de poros, incremento da densidade aparente e aumento da resistência mecânica à penetração. Essas modificações resultam na limitação da infiltração e redistribuição de água no perfil do solo, na restrição das trocas gasosas e na redução do crescimento e da exploração do sistema radicular.

Figura 2: Solo compactado e descompactado



Fonte: gerado por IA

Ngo-Cong et al. (2021) observaram que a compactação do solo altera a geometria do espaço poroso, o que pode reduzir a infiltração de água em até 82% e diminuir consideravelmente a retenção hídrica, fatores determinantes para a queda de produtividade, uma vez que o solo perde sua eficiência em absorver e estocar água para o sistema radicular. Já as raízes, essenciais para o pleno desenvolvimento das plantas, constituem um dos principais componentes afetados pela compactação do solo, uma vez que essa condição limita o acesso

aos recursos edáficos, como água, oxigênio e nutrientes, uma vez que quanto maior for a resistência mecânica a penetração do solo, menor será o comprimento, volume e área superficial das raízes (Yu et al., 2024).

Desse modo, a compactação do solo pode influenciar de diversas formas no desenvolvimento das culturas. Partindo disso, Moraes et al. (2020), comprovaram como a compactação do solo pode interferir no desenvolvimento radicular da soja, que ao avaliarem uma área com diferentes níveis de compactação, os pontos que apresentaram uma maior resistência a penetração apresentou alteração significativa na anatomia, forma, tamanho e crescimento das raízes, e consequentemente uma queda na produtividade de soja. Coelho et al. (2012) avaliaram a resistência mecânica do solo à penetração em diferentes pontos de um pomar de manga e observaram variações significativas entre os locais amostrados, evidenciando a presença de variabilidade espacial da compactação em uma área tratada como uniforme. Os autores também verificaram que regiões com maiores valores de resistência à penetração apresentaram menor produtividade da cultura, indicando que a compactação do solo pode influenciar negativamente no desempenho produtivo do pomar.

Para avaliar a compactação do solo é utilizado o princípio da resistência do solo a penetração, podendo ser influenciada por atributos físicos e químicos do solo, como a textura, densidade e tipo de mineral no solo (Dexter et al., 2007). Desse modo, a resistência a penetração é avaliada através dos penetrômetros, denominados pelo princípio de penetração. Esse equipamento é pressionado contra o solo pelo impacto de um peso que cai em queda livre, de uma altura certificada. Os penetrômetros, podem ser de impacto, estático de anel dinamométrico e eletrônico, sendo o de impacto mais utilizado para definir a compactação provocada pelo uso e manejo do solo (Beutler et al., 2007). Segundo estudos realizados por Orzech, Wanic e Załuski (2021), o aumento da densidade do solo promove elevação significativa da resistência, especialmente em condições de menor umidade, permitindo a identificação de camadas compactadas. Além disso, valores de resistência superiores a 2 MPa foram associados à limitação do crescimento radicular, indicando condições físicas restritivas ao desenvolvimento das plantas.

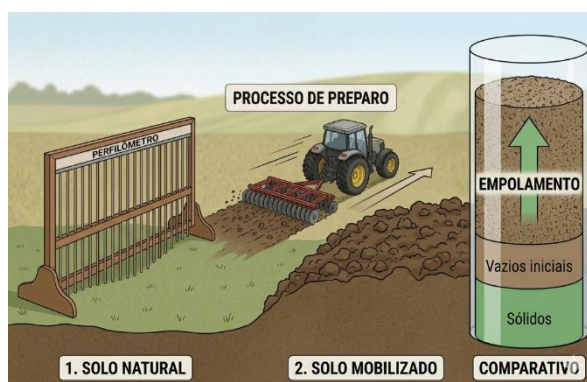
Outra forma de diagnosticar a compactação, é a partir da avaliação de atributos hídricos, uma vez que alterações na estrutura do solo afetam diretamente a dinâmica da água. Em estudo conduzido sob diferentes níveis de compactação, foram avaliadas a infiltração, a condutividade hidráulica e a retenção de água no solo, observando-se que o aumento da compactação reduziu significativamente a infiltração e o fluxo de água no perfil, além de promover maior retenção

em microporos. Esses resultados evidenciam que a redução da condutividade hidráulica e da infiltração, associada ao acúmulo de água superficial, constitui um indicativo eficiente da presença de camadas compactadas no solo (Liu et al., 2023).

Já o empolamento é um fenômeno físico do aumento do volume do solo após o revolvimento mecânico, sendo resultante da desagregação e rearranjo das partículas, o que promove a elevação da superfície do solo devido a expansão dos poros e a redução da densidade aparente. Esse fenômeno é característico de operações de preparo do solo, sendo temporário e diretamente relacionado à intensidade de mobilização, podendo influenciar a estrutura, a porosidade e a dinâmica da água no solo (Carvalho filho et al., 2007).

Para avaliação do empolamento e elevação de superfície normalmente são utilizados os perfilômetros (Figura 3), que avaliam quantitativamente o empolamento do solo a partir da caracterização do perfil mobilizado. O método consiste na coleta de pontos do relevo do solo antes da operação de preparo (perfil natural) e após o preparo, permitindo a obtenção dos perfis de elevação e de fundo da camada mobilizada. A partir desses perfis, são calculadas a área mobilizada e a área de elevação, sendo o empolamento determinado pela relação entre o volume de solo mobilizado e sua condição original, expressando o aumento volumétrico decorrente da mobilização mecânica (Borges et al., 2019)

Figura 3: Empolamento e Perfilômetro



Fonte: gerado por IA

Assim, os diferentes sistemas de preparo do solo impactam diretamente a compactação do solo, disponibilidade de água e empolamento do solo, variáveis importantes para o bom desenvolvimento das culturas que serão implantadas nas áreas manejadas. Esse impacto influencia na variabilidade espacial dessas variáveis, o que torna a área mais ou menos homogênea, sendo necessário realizar a avaliação a partir de ferramentas da Agricultura de Precisão (AP).

3.3 Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão (AP) pode ser definida como um sistema de gerenciamento agrícola que considera a variabilidade espacial e temporal existente nas áreas de produção, utilizando tecnologias como sistemas globais de navegação por satélite, sensores, sistemas de informações geográficas e ferramentas de análise de dados para subsidiar a tomada de decisão. Essa abordagem possibilita a aplicação localizada de insumos e práticas de manejo, buscando otimizar a produtividade, aumentar a eficiência no uso dos recursos e reduzir impactos ambientais nos sistemas agrícolas. Nesse sentido, a AP baseia-se no princípio de que as áreas agrícolas não são homogêneas no espaço e no tempo, sendo necessário identificar, quantificar e manejar essa variabilidade para melhorar a eficiência das operações agrícolas (Molin et al., 2015).

A variabilidade espacial e temporal constitui um dos principais fundamentos da agricultura de precisão, pois representa a heterogeneidade dos atributos do solo e da cultura dentro de um mesmo talhão e ao longo do tempo. A variabilidade espacial refere-se às diferenças observadas entre pontos de uma mesma área, como variações nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, enquanto a variabilidade temporal está relacionada às alterações que ocorrem entre safras, estações do ano ou diferentes momentos do ciclo da cultura. No caso dos atributos físicos do solo, variáveis como umidade, resistência à penetração, densidade, porosidade e compactação podem apresentar elevada variação espacial, influenciadas por fatores naturais, como textura e relevo, e por fatores antrópicos, como tráfego de máquinas e sistemas de preparo do solo. O reconhecimento dessas variações é essencial para a adoção de práticas de manejo localizado e para a melhoria da qualidade física do solo (Molin et al., 2015).

O gerenciamento da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo (Figura 4) pode ser realizado por meio da integração de diferentes fontes de dados georreferenciados. Entre as principais ferramentas utilizadas na agricultura de precisão destacam-se o Global Navigation Satellite System (GNSS), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o sensoriamento remoto, os sensores proximais e a amostragem de solo em malhas georreferenciadas. O sensoriamento remoto permite a obtenção de informações indiretas sobre a variabilidade do solo e da cultura por meio de imagens orbitais, aéreas ou obtidas por aeronaves remotamente pilotadas, possibilitando o uso de informações espectrais que podem indicar diferenças no vigor das plantas associadas a variações de fertilidade, umidade,

compactação ou relevo. Em áreas com solo exposto, bandas espectrais e índices específicos também podem auxiliar na identificação de variações relacionadas à textura, matéria orgânica e umidade superficial. Além disso, sensores proximais, como os sensores de condutividade elétrica aparente do solo, têm sido utilizados para caracterizar a variabilidade espacial de atributos como textura, teor de água, salinidade e capacidade de retenção hídrica. Complementarmente, a amostragem de solo em grade regular, por células ou por zonas de manejo permite quantificar diretamente os atributos físicos e químicos do solo, possibilitando a construção de mapas temáticos e o acompanhamento das alterações ao longo do tempo (Molin et al., 2015; Embrapa, 2025).

Figura 4: Gerenciamento da variabilidade espacial do solo



Fonte: Gerado por IA

A avaliação da variabilidade temporal também é fundamental, pois os atributos do solo não permanecem constantes ao longo do tempo. Variáveis como umidade, resistência à penetração, fertilidade, matéria orgânica e compactação podem se modificar em função das condições climáticas, do ciclo das culturas, do tráfego de máquinas, da intensidade das operações mecanizadas e das práticas de manejo adotadas (Karunathilake et al., 2023). Dessa forma, o acompanhamento temporal permite diferenciar padrões espaciais persistentes daqueles ocasionais, contribuindo para maior precisão na definição de zonas de manejo e na tomada de decisão. Em sistemas irrigados, por exemplo, o conhecimento da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo auxilia no manejo da irrigação e no uso mais eficiente da água. Na fertilidade do solo, atributos como textura, teor de argila, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica influenciam a recomendação de corretivos e fertilizantes, podendo ser utilizados para orientar aplicações em taxa variável.

No manejo de defensivos agrícolas, características do solo como teor de argila e matéria orgânica interferem nos processos de sorção, dessorção e persistência de moléculas no

ambiente, influenciando a eficiência e o risco de contaminação (Zhang, 2015). Da mesma forma, o conhecimento da variabilidade da compactação permite direcionar os métodos de preparo do solo: compactações superficiais podem ser manejadas com operações menos profundas, como gradagens, enquanto camadas compactadas subsuperficiais exigem práticas de maior profundidade, como escarificação ou subsolagem. Assim, o estudo da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo é essencial para a definição de práticas de manejo mais eficientes, econômicas e sustentáveis (Taylor, 2023).

Entretanto, a aplicação da agricultura de precisão exige critérios técnicos adequados para que os mapas gerados representem de forma confiável a variabilidade observada em campo. A ausência de uma análise criteriosa da estrutura espacial dos dados pode resultar em mapas pouco representativos, comprometendo a interpretação dos resultados e a tomada de decisão. Esse problema ocorre, principalmente, quando não são considerados os fundamentos da geoestatística, como a dependência espacial, o ajuste de semivariogramas e a escolha adequada dos métodos de interpolação. Assim, a qualidade dos mapas temáticos depende não apenas da coleta georreferenciada dos dados, mas também da aplicação correta dos métodos de análise espacial, especialmente quando se busca avaliar atributos físicos do solo submetidos a diferentes sistemas de preparo.

3.4 Geoestatística

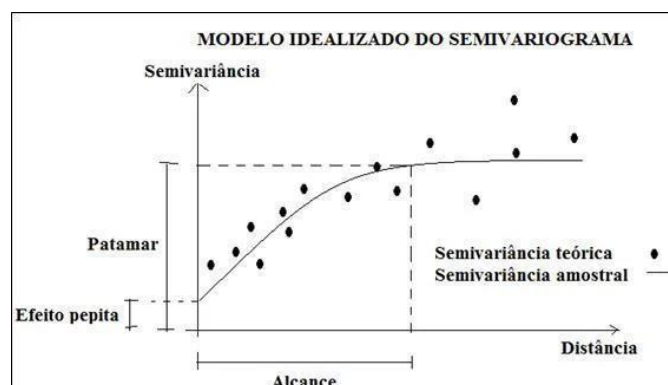
A geoestatística é uma ferramenta da AP voltada a analisar a variabilidade espacial das variáveis que se deseja gerenciar no campo, fundamentado no conceito de variáveis regionalizadas, que considera que os atributos apresentam dependência espacial ao longo da área de estudo. Dessa forma, além de descrever essa variabilidade, a geoestatística permite modelar a estrutura de dependência entre os dados e estimar valores em locais não amostrados (interpolação), constituindo-se como ferramenta essencial para a interpretação e organização espacial das informações na agricultura de precisão. Portanto, ela permite analisar a dependência espacial dos atributos do solo e auxilia na tomada de decisão no manejo localizado (Grego; Oliveira; Vieira, 2014).

Um dos pontos centrais para a adoção da geoestatística na agricultura de precisão é a obtenção de dados georreferenciados com adequada precisão, evitando erros de posicionamento. Lima et al. (2025), ao avaliarem a variabilidade espacial de atributos do solo a partir de amostras georreferenciadas, verificaram a existência de dependência espacial

significativa entre as variáveis analisadas, dentre elas NDVI obtido por imagens multiescalares e atributos do solo como a granulometria, estoque de carbono, densidade e umidade, permitindo a construção de semivariogramas ajustados e a interpolação por krigagem. Os mapas gerados evidenciaram a formação de zonas com diferentes padrões de fertilidade e vigor vegetativo, demonstrando que a identificação dessas variações no campo depende diretamente da associação dos dados às suas coordenadas geográficas, sendo esse um fator essencial para a aplicação da geoestatística na agricultura de precisão.

O semivariograma (Figura 5) é a principal ferramenta da geoestatística utilizada para descrever a estrutura de dependência espacial de uma variável, sendo definido como a função que relaciona a semivariância entre pares de pontos com a distância que os separa. Por meio dele, é possível identificar o grau de continuidade espacial dos atributos do solo, bem como parâmetros como o alcance, o patamar e o efeito pepita, fundamentais para a modelagem e interpolação espacial (Vieira et al., 1983).

Figura 5: Componentes estruturais do Semivariograma



Fonte: Adaptado de Lundgren et al., 2017

Existem diversos métodos de interpolação de dados, que são utilizados na previsão do valor de pontos não amostrados, sendo os mais utilizados a Krigagem e o Inverso do Quadrado da Distância (IDW). Quando o ajuste do semivariograma evidencia dependência espacial, o método de interpolação mais indicado é a krigagem, estimador que pondera os valores vizinhos com base na estrutura de variabilidade descrita pelo semivariograma, gerando estimativas com menor erro. Por outro lado, quando o semivariograma não evidencia dependência espacial, recomenda-se o uso do método IDW, que estima os valores dos pontos não amostrados por meio de média ponderada dos vizinhos, atribuindo maior peso àqueles espacialmente mais próximos, sem, contudo, considerar a estrutura de variabilidade espacial dos dados (Nunes et

al., 2018).

A criação de mapas interpolados tornou-se uma prática padrão na agricultura de precisão para representar a variabilidade espacial das variáveis analisadas e por isso torna-se necessário determinar a confiabilidade desse mapa antes de utilizá-lo para a tomada de decisões (Silva, 2022). Um método utilizado para verificar a qualidade das estimativas em geoestatística, é a validação cruzada (VC), que consiste em retirar individualmente cada ponto do conjunto de dados e estimar seu valor através da interpolação como se ele não existisse. Assim, esse processo é repetido para todos os pontos amostrais, permitindo a comparação entre os valores conhecidos e os valores estimados. São utilizados indicadores como o coeficiente de determinação (R^2) que indica o grau de ajuste entre os valores observados e os valores estimados, o RMSE (*Root Mean Square Error*) que mede a magnitude dos erros das estimativas e MAE (*Mean Absolute Error*) que representa a média absoluta das diferenças entre valores observados e estimados (Lundgren et al., 2017).

Kumar et al. (2022) avaliaram a variabilidade espacial do coeficiente de permeabilidade e de adensamento do solo, a partir de dados obtidos em oito furos de sondagem, aplicando semivariogramas para caracterizar a dependência espacial e a Krigagem ordinária para interpolar os dados e gerar mapas contínuos. Os resultados demonstraram que o método foi eficiente na estimativa de valores em locais não amostrados, apresentando baixos erros de predição, verificados pelo processo de validação cruzada, e boa correlação com os dados observados, evidenciando a importância da Krigagem como ferramenta essencial para representação da variabilidade espacial do solo, mesmo com baixa densidade amostral.

Silva et al. (2023), ao avaliarem a resistência do solo à penetração como indicador de compactação em área agrícola, realizaram a coleta de dados em uma malha amostral georreferenciada e aplicaram técnicas geoestatísticas para análise da variabilidade espacial. Os semivariogramas evidenciaram dependência espacial significativa da variável em diferentes profundidades. A partir disso, foi realizado a interpolação por krigagem, gerando mapas temáticos que permitiram identificar zonas com diferentes níveis de compactação, demonstrando que o uso do semivariograma é fundamental para caracterizar a estrutura espacial da resistência à penetração e subsidiar práticas de manejo localizado.

Segundo Abdulwadood, Al-Hassany e Mustafa (2021), a Curva de Retenção de Água do Solo pode ser analisada por meio de mapeamento de interpolação espacial utilizando o método IDW. No estudo, amostras de solo foram coletadas em três locais da Universidade de Bagdá, em profundidades de 0,5 a 1,0 m, e os dados obtidos foram interpolados espacialmente pelo

IDW com o auxílio de SIG, gerando mapas de distribuição das frações granulométricas (areia, silte e argila) que subsidiam a caracterização da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do solo, demonstrando onde retém mais ou menos água.

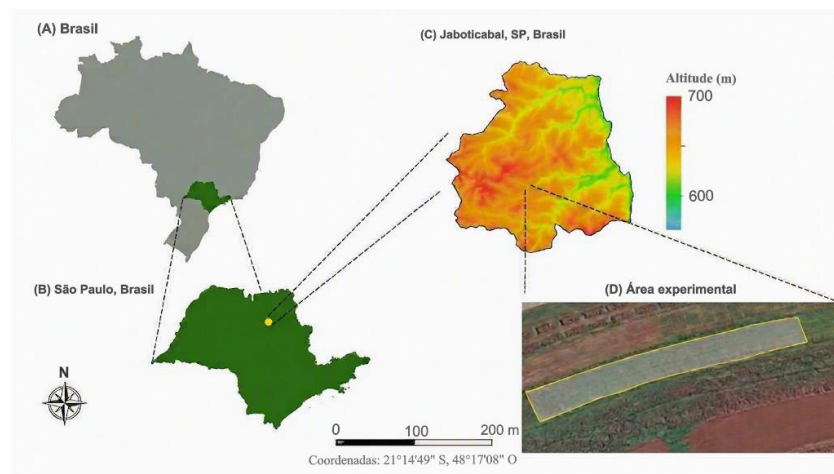
Assim, a partir da escolha certa do método de interpolação e confiabilidade dos mapas temáticos, o gerenciamento da variabilidade espacial de variáveis do solo torna-se mais fácil, podendo até mesmo adotar o manejo em taxa variável que é de suma importância para economia e sustentabilidade na agricultura, permitindo manejar apenas onde há a necessidade de intervenção, como no caso da compactação do solo. Sharma et al. (2025), afirmam que essa tecnologia possibilita ajustar o manejo e o local para a intervenção utilizando dados georreferenciados e sistemas automatizados, com o objetivo de aumentar a eficiência do uso de recursos, maximizar a produtividade e reduzir os impactos ambientais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do local de pesquisa

O experimento foi instalado em 28 de novembro de 2025 na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), da Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada no município de Jaboticabal, estado de São Paulo, sob as coordenadas geográficas 21°14'49" S e 48°17'08" O, com altitude média de 555 m. A área experimental possui 2.100 m² e sua localização está apresentada na Figura 6.

Figura 6: Área experimental



Fonte: Autores (2026)

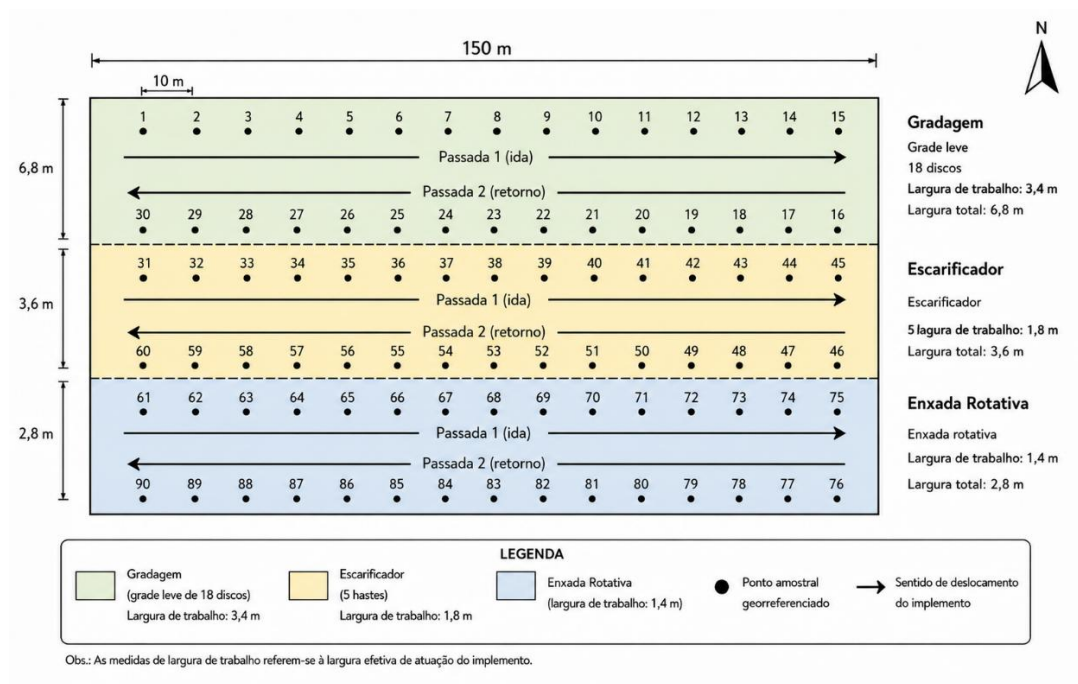
O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999). A região apresenta clima classificado segundo Köppen como Aw, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco. Anteriormente à instalação do experimento, a área permaneceu em pousio por dois anos consecutivos. Antes desse período, a área era conduzida sob sistema de manejo convencional, com histórico de operações mecanizadas de preparo do solo e cultivo de culturas anuais, rotacionando soja e milho.

4.2 Condução do experimento

O experimento foi conduzido em faixas, sendo a área experimental dividida em três faixas contínuas e paralelas, destinadas à implantação dos diferentes sistemas de preparo do solo. Inicialmente, foi realizada a roçagem da vegetação espontânea presente na área experimental, com o objetivo de uniformizar as condições superficiais do terreno e facilitar a execução das operações mecanizadas de preparo do solo. Após essa etapa, a área foi dividida

em três faixas, com 150 m de comprimento cada, destinadas à realização dos diferentes sistemas de preparo do solo: preparo por gradagem, preparo reduzido com escarificador e preparo reduzido com enxada rotativa.. A distribuição dos tratamentos na área experimental é apresentada na Figura 7.

Figura 7: Croqui experimental da área



Fonte: Autores (2026)

O preparo com gradagem foi realizado em uma faixa com largura total de 6,8 m e 150 m de comprimento, utilizando uma grade leve de ação dupla, em “V” da Tatu Marchesan (Figura 8) composta por 36 discos de 18 polegadas, espaçados em 20 cm, com massa estimada de 700 kg e profundidade média de trabalho de 7 cm. O implemento apresenta largura de trabalho de 3,40 m, sendo o preparo executado com uma passada de ida e uma de retorno ao longo da área experimental, sem sobreposição entre as passadas, totalizando a largura correspondente ao tratamento. Segundo Salvador et al. (2008), a grade leve é utilizada nas operações de acabamento do preparo do solo, promovendo o nivelamento e o destorroamento da superfície.

Figura 8: Grade niveladora



Fonte: Autores (2026)

O preparo reduzido com escarificador (figura 9), foi realizada uma escarificação leve, com profundidade média de trabalho de 15 cm, em uma faixa experimental com largura total de 3,6 m e comprimento de 150 m. O escarificador possuía largura de trabalho de 1,8 m, equipado com cinco hastes, duas hastes na parte da frente do implemento e três na parte traseira, espaçadas em 90 cm entre si, com ponteiros sem asas. O implemento contava com rolo destorroador traseiro, responsável por promover a desagregação superficial dos torrões formados durante a mobilização do solo. A operação foi realizada com uma passada de ida e uma de retorno, sem sobreposição entre as passadas, totalizando a largura correspondente ao tratamento.

Segundo Girardello et al. (2014), a escarificação consiste em uma operação de preparo reduzido realizada por meio de hastes, destinada ao rompimento de camadas compactadas do solo, promovendo menor revolvimento da superfície em comparação ao preparo convencional. Essa operação favorece a melhoria das condições físicas do solo, aumentando a porosidade, a infiltração de água e o crescimento do sistema radicular, além de preservar parte dos resíduos vegetais na superfície.

Figura 9: Preparo reduzido com escarificador



Fonte: Autores (2026)

Já o preparo reduzido com enxada rotativa (Figura 10) foi realizado utilizando uma enxada rotativa da marca FNI-HOWARD, com largura de trabalho de 1,4 m, equipada com lâminas do tipo "L" e acionada pela tomada de potência (TDP) do trator a 540 rpm. A operação foi conduzida em uma faixa experimental de 150 m de comprimento e 2,8 m de largura, sendo realizadas uma passada de ida e outra de retorno, sem sobreposição entre as passadas, totalizando a largura correspondente à faixa experimental. A profundidade média de trabalho foi de aproximadamente 8 cm.

Segundo Balastreire (1987), a enxada rotativa é um implemento de preparo reduzido acionado pela tomada de potência do trator, destinado ao corte, destorroamento, fragmentação e mistura da camada superficial do solo, proporcionando elevado revolvimento e formação de um leito de semeadura uniforme.

Figura 10: Preparo reduzido com enxada rotativa



Fonte: Autores (2026)

As operações de preparo do solo foram realizadas em 5 de dezembro de 2025 utilizando um trator agrícola Valtra A73F (Figura 11), com potência nominal de 79 cv e tração dianteira auxiliar (TDA), característica que proporciona melhor capacidade de tração e eficiência operacional durante operações de preparo do solo. Para minimizar possíveis interferências decorrentes de diferentes condições operacionais, todos os tratamentos foram executados sob as mesmas condições de trabalho, utilizando segunda marcha reduzida e rotação constante de 2.000 rpm, resultando em uma velocidade de aproximadamente 3 km/h em todos os preparos.

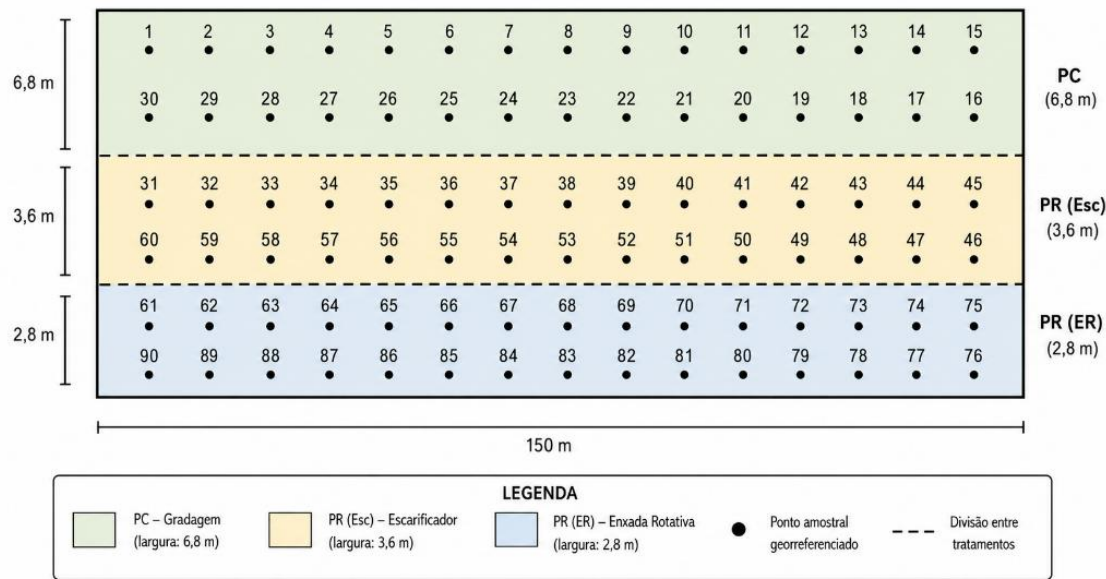
Figura 11: Trator utilizado no trabalho



Fonte: Google imagens

Para a realização das avaliações, foi estabelecida uma malha amostral georreferenciada composta por 90 pontos distribuídos sistematicamente na área experimental, sendo 30 pontos em cada sistema de preparo do solo. A malha foi organizada em duas linhas longitudinais ao longo de cada faixa experimental, com espaçamento aproximado de 10 m entre pontos consecutivos, totalizando uma extensão amostral de aproximadamente 150 m em cada tratamento. Os pontos de 1 a 30 corresponderam ao preparo por gradagem, os pontos de 31 a 60 ao preparo reduzido com escarificador e os pontos de 61 a 90 ao preparo reduzido com enxada rotativa, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12: Malha amostral dos pontos de coleta de dados



Fonte: Autores (2026)

4.3 Obtenção dos dados

Foram realizadas avaliações da resistência do solo à penetração, umidade do solo e elevação da superfície em todos os pontos antes e após de cada preparo. A resistência do solo à penetração foi utilizada como indicador do estado de compactação do solo, sendo avaliada nos mesmos pontos antes da execução dos sistemas de preparo e após 30 dias a realização dos preparos de solo. Para isso, as determinações foram realizadas utilizando um penetrômetro de impacto manual (Figura 13) do tipo IAA/Planalsucar, com profundidade máxima de avaliação de 50 cm.

Figura 13: Resistência do solo a penetração



Fonte: Autores (2026)

Optou-se pela utilização do penetrômetro de impacto manual devido à sua facilidade de

operação em campo, rapidez na obtenção dos dados e baixo custo operacional. Segundo Soriani et al. (2018), embora os penetrômetros de impacto e eletrônico possuam princípios distintos de funcionamento, ambos demonstraram eficiência na avaliação da resistência mecânica à penetração e na detecção de camadas compactadas do solo, evidenciando a confiabilidade do método para estudos de compactação e manejo do solo.

Para a coleta dos dados, a haste do penetrômetro foi graduada em intervalos de 5 cm, sendo registrado o número de impactos necessários para a penetração da haste em cada segmento avaliado. Esse procedimento permitiu a obtenção de informações detalhadas ao longo do perfil do solo, possibilitando a identificação de camadas com diferentes níveis de resistência mecânica. Os valores obtidos em número de impactos foram posteriormente convertidos para resistência do solo à penetração (MPa) utilizando a equação proposta por Stolf (1991), em que RP corresponde à resistência do solo à penetração (MPa) e N representa o número de impactos necessários para a penetração da haste no intervalo avaliado (Equação 1).

$$RP = \frac{(5,6 + 6,89N)}{10,2}$$

Equação 1: equação de Stolf (1991)

Após a conversão dos dados, os valores de resistência correspondentes a cada intervalo de 5 cm foram agrupados em camadas de 10 cm de espessura, obtendo-se os valores médios para as profundidades de 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm e 40–50 cm. A adoção dessas camadas teve como objetivo caracterizar o comportamento da resistência mecânica do solo ao longo do perfil, permitindo representar de forma mais consistente as condições físicas de cada profundidade e caracterizar a área de trabalho. Os valores médios obtidos em cada camada foram utilizados nas análises estatísticas e espaciais, possibilitando avaliar o comportamento da compactação do solo ao longo do perfil e os efeitos dos diferentes sistemas de preparo sobre a resistência mecânica do solo.

A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico, que consiste na obtenção da massa da amostra úmida, com secagem em estufa a $\pm 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ até peso constante e posterior determinação de massa seca (Teixeira et al., 2017). Assim, as avaliações de umidade foram realizadas antes da execução dos sistemas de preparo e outra 30 dias após a mobilização. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0–40 cm de profundidade, devido a limitação do equipamento a profundidade máxima de 40 cm, utilizando um quadriciclo equipado com sistema de amostragem SoloDrill Falker (Figura 14).

Figura 14: Coleta de amostras para umidade



Fonte: Autores (2026)

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas e encaminhadas ao laboratório, onde foi determinada a massa úmida de cada amostra (Figura 15). Em seguida, foram submetidas à secagem em estufa até atingirem massa constante. Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas para obtenção da massa seca. Assim, a umidade gravimétrica do solo foi calculada a partir da relação entre a massa de água presente na amostra e a massa de solo seco, sendo os resultados expressos em porcentagem (%).

Figura 15: Pesagem das amostras



Fonte: Autores (2026)

A determinação da umidade do solo foi realizada para subsidiar a interpretação dos

resultados de resistência do solo à penetração, considerando que a umidade influencia diretamente o comportamento mecânico do solo e, conseqüentemente, os valores de compactação obtidos em campo.

A elevação da superfície do solo foi avaliada utilizando um perfilômetro de hastes (Figura 16), constituído por 40 hastes metálicas dispostas paralelamente em uma estrutura rígida, com fundo graduado em intervalos de 1 cm. Antes da execução dos sistemas de preparo foi determinado o perfil natural da superfície do solo, obtido por meio do posicionamento do perfilômetro sobre a área de avaliação e registro da posição vertical das hastes em contato com a superfície do terreno. Após a realização dos preparos, foram novamente realizadas avaliações para obtenção do perfil da superfície mobilizada.

Figura 16: Perfilômetro



Fonte: Autores (2026)

A avaliação com o perfilômetro, após-preparo, foi realizada imediatamente após a execução das operações mecanizadas, visando minimizar possíveis alterações decorrentes da acomodação natural do solo ou da ação de agentes climáticos. Para cada ponto amostral, foi registrado o deslocamento vertical de cada uma das 40 hastes do perfilômetro, expresso em centímetros. Em seguida, calculou-se a média desses valores, obtendo-se a elevação média da superfície do solo antes e após os sistemas de preparo. Essa variável foi empregada nas análises estatísticas e espaciais do estudo, possibilitando a avaliação das modificações promovidas pelos diferentes manejos sobre a superfície do solo

Por fim, todos os pontos amostrais foram georreferenciados utilizando um receptor GNSS Rover EMLID RS3+ (Figura 17), de dupla frequência (L1/L2) com correção via banda L, proporcionando acurácia posicional aproximada de ± 3 cm. As coordenadas geográficas obtidas em campo foram associadas aos respectivos dados de resistência do solo à penetração,

umidade e elevação da superfície, possibilitando a construção de um banco de dados espacial georreferenciado.

Figura 17: Receptor GNSS



Fonte: Autores (2026)

4.4 Processamento dos dados

Os dados obtidos em campo referentes à resistência do solo à penetração, umidade do solo e elevação da superfície foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas e posteriormente processados utilizando a linguagem de programação R, por meio da interface RStudio. As análises foram conduzidas com o auxílio dos pacotes *readxl*, *openxlsx* e *dplyr* para importação, organização e manipulação dos dados; *sf*, *sp* e *terra* para o processamento das informações espaciais; *gstat* para as análises geoestatísticas e interpolação espacial; *spdep* para a avaliação da dependência espacial; e *moments* para obtenção dos parâmetros estatísticos complementares.

Inicialmente, as coordenadas geográficas obtidas em campo foram convertidas do sistema de coordenadas geográficas para o sistema de projeção UTM, fuso 22 Sul (EPSG 32722), permitindo que todas as análises espaciais fossem realizadas em unidades métricas. Em seguida, os pontos amostrais foram organizados de acordo com os três sistemas de preparo avaliados, correspondentes ao preparo por gradagem, preparo reduzido com escarificador e preparo reduzido com enxada rotativa.

Para cada variável foram realizadas análises estatísticas descritivas, obtendo-se média,

mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose. Posteriormente, a dependência espacial foi avaliada por meio da modelagem dos semivariogramas experimentais, sendo testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano. A partir dos modelos ajustados foram obtidos os parâmetros geoestatísticos de efeito pepita, patamar, alcance e Grau de Dependência Espacial (GDE).

A interpolação dos dados foi realizada por krigagem ordinária quando observada dependência espacial significativa. Nos casos em que não foi identificada dependência espacial, foi utilizado o método do *Inverse Distance Weighting* (IDW). Os mapas temáticos foram gerados com resolução espacial de 1 m e exportados no formato GeoTIFF.

A qualidade das superfícies interpoladas foi avaliada por validação cruzada, utilizando o coeficiente de determinação (R^2) e a erro absoluto médio (Mean Absolute Error – MAE). Por fim, foram realizadas análises de álgebra de mapas (Δ = Antes – Pós) e correlação de Pearson “stats::cor(x[ok], y[ok], method = "pearson")” entre as superfícies obtidas antes e após os preparos do solo, permitindo avaliar as alterações promovidas pelos diferentes sistemas de preparo sobre os atributos estudados.

5. RESULTADOS

5.1 Análise descritiva dos dados

A análise descritiva antes dos preparos (Tabela 1) apresentou valores de média e mediana com comportamento semelhante para a maioria das variáveis avaliadas, indicando distribuição relativamente equilibrada dos dados e reduzida influência de valores extremos. Em relação à variabilidade, observou-se que os dados apresentaram baixa a moderada variabilidade, conforme indicado pelos coeficientes de variação observados para as variáveis avaliadas. A umidade do solo e a elevação da superfície apresentaram os menores coeficientes de variação, evidenciando maior homogeneidade dos dados na área experimental. Por outro lado, a resistência do solo à penetração apresentou os maiores coeficientes de variação, especialmente em algumas camadas avaliadas, indicando maior dispersão dos dados e maior heterogeneidade das condições físicas do solo. Os valores de assimetria permaneceram, em sua maioria, próximos de zero, sugerindo distribuições relativamente simétricas, enquanto os valores de curtose indicaram comportamento próximo ao da distribuição normal para grande parte das variáveis.

Tabela 1: Análise estatística descritiva dos dados antes do preparo

Preparo	Variável	Média	Mediana	D.P*	C.V**	Assimetria	Curtose
Gradagem	Elevação	3,648	3,638	0,579	15,875	-0,025	3,807
	Umidade	17,541	17,598	0,750	4,275	-0,617	3,432
	RP (0-10)	1,450	1,562	0,311	21,487	0,437	2,969
	RP (10-20)	1,686	1,562	0,226	13,394	-0,556	2,311
	RP (20-30)	1,877	1,900	0,216	11,507	0,051	2,511
	RP (30-40)	1,934	1,900	0,410	21,193	0,514	3,652
	RP (40-50)	2,249	2,238	0,430	19,112	0,958	4,450
Escarificador	Elevação	3,628	3,781	0,514	14,169	-0,477	2,184
	Umidade	17,319	17,480	0,954	5,510	-0,631	2,709
	RP (0-10)	1,562	1,562	0,320	20,470	0,496	3,284
	RP (10-20)	1,675	1,562	0,271	16,179	0,151	2,602
	RP (20-30)	1,787	1,900	0,240	13,438	-0,022	2,727
	RP (30-40)	1,934	1,900	0,271	14,025	-0,585	2,859
	RP (40-50)	2,058	1,900	0,441	21,438	1,444	6,458
Enxada Rotativa	Elevação	3,760	3,625	0,644	17,121	1,053	3,963
	Umidade	17,884	18,080	1,145	6,402	-0,778	2,658
	RP (0-10)	1,619	1,562	0,621	38,393	0,832	3,163
	RP (10-20)	1,709	1,562	0,383	22,438	1,103	4,472
	RP (20-30)	1,765	1,562	0,372	21,083	0,529	2,656
	RP (30-40)	1,934	1,900	0,472	24,422	0,282	3,778
	RP (40-50)	2,114	1,900	0,513	24,279	0,161	2,034

Nota: Unidade de RP (resistência a penetração) em MPa, Umidade em % e Elevação em cm. *D.P = desvio padrão. *C.V= coeficiente de variação Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Já a análise descritiva depois dos preparos (Tabela 2) apresentou valores de média e mediana permaneceram próximos para a maioria das variáveis avaliadas, indicando distribuições relativamente equilibradas e reduzida influência de valores extremos. Em relação à resistência do solo à penetração, observou-se uma tendência de redução das médias nas camadas superficiais, especialmente nas áreas submetidas aos preparos reduzidos, evidenciando o efeito da mobilização mecânica na diminuição da resistência a penetração. O coeficiente de variação (CV) indicou diferentes níveis de variabilidade entre os atributos avaliados. A umidade do solo apresentou os menores valores de CV em todos os tratamentos,

caracterizando baixa variabilidade dos dados e maior uniformidade da distribuição da água após os preparos. A elevação da superfície apresentou variabilidade moderada, refletindo as alterações promovidas pelos implementos durante as operações de preparo. A resistência do solo à penetração apresentou os maiores coeficientes de variação, principalmente nas áreas submetidas ao escarificador e à enxada rotativa, demonstrando aumento da dispersão dos dados e maior heterogeneidade das condições físicas do solo. Em relação aos valores de assimetria e curtose, apresentaram maior amplitude em comparação à condição anterior.

Tabela 2: Análise estatística descritiva dos dados após o preparo

Preparo	Variável	Média	Mediana	D.P*	C.V**	Assimetria	Curtose
Gradagem	Elevação	3,819	3,725	0,610	15,981	0,795	2,906
	Umidade	19,411	19,405	1,477	7,609	2,661	12,304
	RP (0-10)	1,528	1,562	0,678	44,327	1,234	4,563
	RP (10-20)	1,776	1,900	0,301	16,922	-0,411	2,492
	RP (20-30)	1,900	1,900	0,387	20,348	0,000	2,285
	RP (30-40)	2,013	1,900	0,480	23,869	0,856	3,146
	RP (40-50)	2,080	1,900	0,423	20,330	0,298	2,414
Escarificador	Elevação	4,954	4,800	0,968	19,536	1,286	4,397
	Umidade	19,746	20,001	1,162	5,883	-1,316	5,230
	RP (0-10)	0,583	0,549	0,103	17,683	2,667	8,111
	RP (10-20)	0,785	0,549	0,356	45,381	1,518	4,669
	RP (20-30)	1,326	1,225	0,518	39,094	0,531	2,728
	RP (30-40)	2,058	1,900	0,459	22,288	0,870	3,073
	RP (40-50)	2,474	2,575	0,533	21,554	0,133	2,167
Enxada rotativa	Elevação	4,099	3,950	0,679	16,572	1,642	5,954
	Umidade	18,732	18,813	1,370	7,313	0,124	2,575
	RP (0-10)	0,628	0,549	0,170	27,114	2,044	6,379
	RP (10-20)	1,438	1,225	0,326	22,642	0,318	1,842
	RP (20-30)	1,877	1,900	0,477	25,411	0,791	3,990
	RP (30-40)	2,136	1,900	0,589	27,586	1,698	7,125
	RP (40-50)	2,305	2,238	0,604	26,208	2,084	8,457

Nota: Unidade de RP (resistência a penetração) em MPa, Umidade em % e Elevação em cm. *D.P = desvio padrão. *C.V= coeficiente de variação Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

5.2 Análise geoestatística

Na análise geoestatística antes dos preparos de solo (Tabela 3) mostrou que as variáveis estudadas apresentaram fraca a moderada dependencia espacial em todos os tratamentos, com excessão da umidade no preparo reduzido com escarificador e enxada rotativa. A interpolação por idw, quando a variável apresentava fraca dependência espacial, e a interpolação por krigagem, quando a variável apresentava moderada e forte dependência, resultou em baixos coeficientes de determinação, mas também apresentou baixos valores do MAE.

Tabela 3: Análise geoestatística antes do preparo

Preparo	Variável	Modelo	Nugget	Sill	Range	GDE	R ²	MAE
Gradagem	Elevação	Sph	0,3650	0,3650	46,64	Fraca	0,0024	0,5475
	Umidade	Gau	0,2971	1,0059	62,41	Moderada	0,4569	0,4109
	RP (0-10)	Sph	0,1126	0,1126	46,64	Fraca	0,0189	0,2737
	RP (10-20)	Sph	0,0389	0,0537	14,60	Moderada	0,0179	0,2245
	RP (20-30)	Exp	0,0496	0,0531	318,66	Fraca	0,0365	0,2031
	RP (30-40)	Sph	0,1454	0,1715	15,91	Fraca	0,1799	0,4119
	RP (40-50)	Sph	0,1321	0,3422	370,12	Moderada	0,0647	0,3221
Escarificador	Elevação	Sph	0,2958	0,2958	46,60	Fraca	0,0299	0,5912
	Umidade	Gau	0,4477	1700,3738	3261,44	Forte	0,4815	0,5323
	RP (0-10)	Sph	0,0933	0,1100	53,38	Fraca	0,0244	0,2981
	RP (10-20)	Sph	0,0717	0,0767	349,80	Fraca	0,0278	0,3002
	RP (20-30)	Gau	0,0575	0,0617	26,13	Fraca	0,0029	0,2187
	RP (30-40)	Sph	0,0553	0,1195	347,57	Moderada	0,0007	0,3200
	RP (40-50)	Gau	0,1387	0,2079	63,06	Moderada	0,0145	0,3026
Enxada Rotativa	Elevação	Sph	0,2205	0,4253	49,21	Moderada	0,0725	0,5183
	Umidade	Sph	0,6174	9,2024	1024,11	Forte	0,2993	0,7428

RP (0-10)	Gau	0,3317	0,4550	36,50	Moderada	0,0060	0,7427
RP (10-20)	Sph	0,1307	0,1706	49,39	Fraca	0,0079	0,4060
RP (20-30)	Gau	0,1590	0,1590	46,61	Fraca	0,0668	0,3911
RP (30-40)	Sph	0,1452	0,2170	39,45	Moderada	0,0998	0,3460
RP (40-50)	Gau	0,2662	0,2662	46,61	Fraca	0,0011	0,5282

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Já a análise geoestatística após os preparos de solo (Tabela 4) demonstrou moderada e forte dependência espacial para as variáveis elevação, umidade e as camadas superficiais do solo (0-20 cm). As camadas subsuperficiais (20-50cm) apresentaram fraca a moderada dependência espacial, demonstrando que os diferentes preparos do solo não influenciaram nessas camadas.

A interpolação das variáveis após os preparos de solo (Tabela 4) demonstrou melhoria na qualidade dos mapas para a variável de elevação nos diferentes preparos. Já a variável RP, nas diferentes camadas, não apresentou melhoria na qualidade dos mapas, mas manteve baixos valores de MAE. A umidade, mesmo mantendo forte dependência espacial, apresentou elevados valores de MAE, variando de 1,01 a 1,5%, demonstrando o impacto dos diferentes preparos na variabilidade espacial dessa variável.

Tabela 4: Análise geoestatística após o preparo

Preparo	Variável	Modelo	Nugget	Sill	Range	GDE	R²	MAE
Gradagem	Elevação	Gau	0,3218	352,9310	3988,72	Forte	0,00159	0,6310
	Umidade	Gau	1,5994	6546,4640	5912,48	Forte	0,0187	1,1988
	RP (0-10)	Sph	0,2958	0,9001	362,01	Moderada	0,0500	0,6475
	RP (10-20)	Exp	0,0000	0,0933	1,89	Forte	0,0819	0,3288
	RP (20-30)	Gau	0,1656	0,1656	46,64	Fraca	0,2442	0,4526
	RP (30-40)	Sph	0,2102	0,2501	28,17	Fraca	0,0623	0,4759

	RP (40-50)	Sph	0,1756	0,1829	187,04	Fraca	0,0635	0,4929
Escarificador	Elevação	Exp	0,4364	1,2339	55,57	Moderada	0,3050	0,5993
	Umidade	Exp	0,0000	1,4086	4,60	Forte	0,0120	1,0197
	RP (0-10)	Sph	0,0087	0,0123	245,71	Moderada	0,0120	0,0669
	RP (10-20)	Exp	0,0000	0,1191	4,88	Forte	0,0274	0,2902
	RP (20-30)	Gau	0,2986	0,2986	46,60	Fraca	0,0244	0,4870
	RP (30-40)	Exp	0,1423	0,2367	10,91	Moderada	0,0617	0,4327
	RP (40-50)	Gau	0,2470	0,3114	28,52	Fraca	0,0172	0,6540
Enxada Rotativa	Elevação	Sph	0,0721	0,5238	17,83	Forte	0,2066	0,4594
	Umidade	Gau	1,6825	7655,8095	7423,35	Forte	0,0016	1,5267
	RP (0-10)	Exp	0,0000	0,0317	3,00	Forte	0,0507	0,1535
	RP (10-20)	Exp	0,0858	0,1145	8,53	Moderada	0,0000	0,3268
	RP (20-30)	Exp	0,0000	0,2501	0,55	Forte	0,0996	0,4697
	RP (30-40)	Sph	0,3044	0,3641	30,02	Fraca	0,0052	0,4603
	RP (40-50)	Exp	0,2538	0,4768	51,44	Moderada	0,1110	0,3743

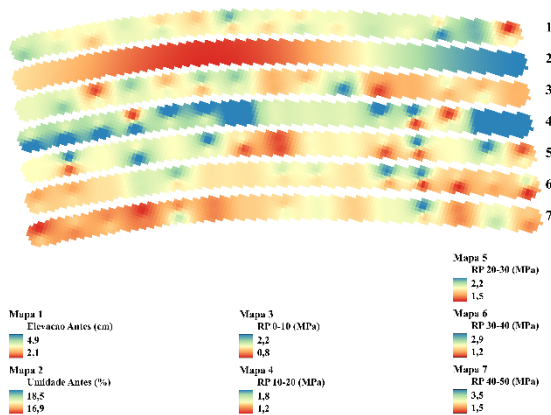
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os mapas interpolados do sistema de preparo com gradagem antes (Figura 18) e após o preparo (Figura 19), preparo reduzido com escarificador (Esc) antes (Figura 20) e após o preparo (Figura 21), e do preparo reduzido com enxada rotativa (Enx) antes (Figura 22) e após o preparo (Figura 23) permitem visualizar a distribuição espacial das variáveis, possibilitando identificar alterações nos padrões de variabilidade e continuidade espacial decorrentes da mobilização do solo pelos diferentes implementos agrícolas.

No preparo por gradagem observa-se impacto principalmente nas variáveis elevação, umidade e RP nas camadas superficiais (0-20cm), devido a gradagem trabalhar apenas nessa camada arável do solo. A RP para camadas subsuperficiais (20-50 cm), não observa-se variação antes e depois dos preparos, com exceção da camada 40-50 cm que apresentou uma elevação nos valores de RP, possivelmente pelo efeito “pé de grade”.

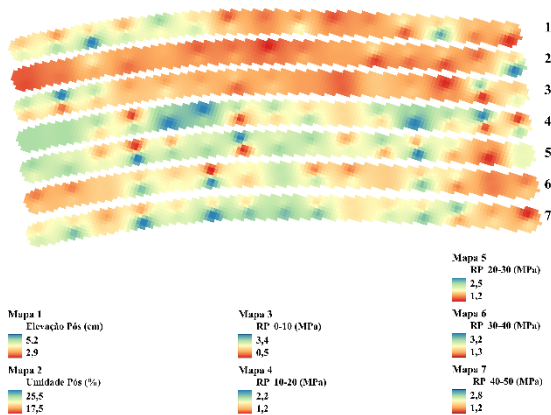
Já no preparo Esc observou-se diminuição da RP nas camadas de 0-15 cm. Nesse preparo, observou aumento na homogeneidade da elevação, visto a alta variabilidade da elevação natural da área antes do preparo. A umidade apresentou maior uniformidade na área após esse tratamento. O preparo se solo Enx apresentou redução nas camadas de 0-10 cm, possivelmente por revolver minimamente o solo e auxiliar na homogeneização da área.

Figura 18: Mapa de variabilidade (Antes Gradagem)



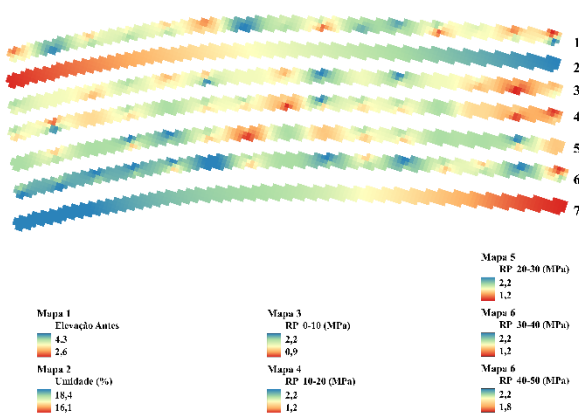
Fonte: Autores (2026)

Figura 19: Mapa de variabilidade (Após Gradagem)



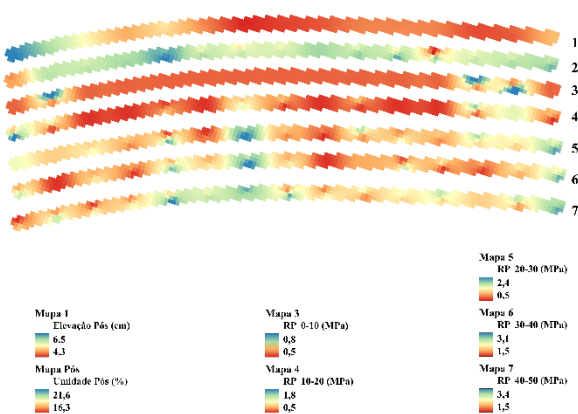
Fonte: Autores (2026)

Figura 20: Mapa de variabilidade (Antes Esc)



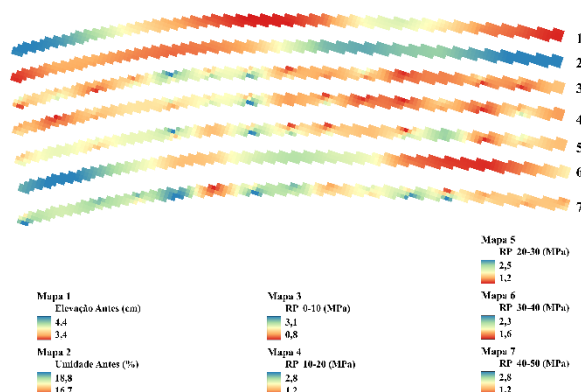
Fonte: Autores (2026)

Figura 21: Mapa de variabilidade (Após Esc)



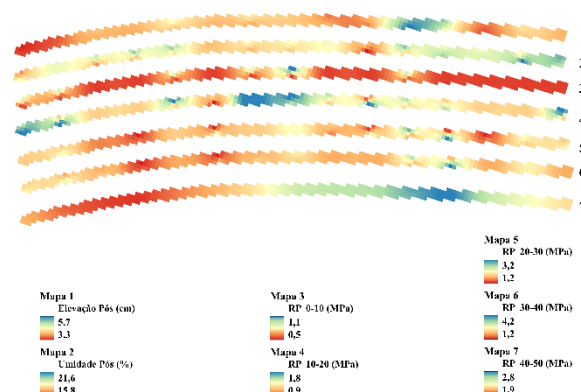
Fonte: Autores (2026)

Figura 22: Mapa de variabilidade (Antes Enx)



Fonte: Autores (2026)

Figura 23: Mapa de variabilidade (Após Enx)



Fonte: Autores (2026)

5.3 Impacto dos preparos de solo sobre as variáveis

A álgebra de mapas, considerando a operação Antes – Pós, evidenciou diferenças entre os sistemas de preparo quanto à alteração média dos atributos avaliados (Tabela 5). No preparo por gradagem, a elevação apresentou Δ médio de -0,063, indicando baixa alteração média da superfície após a operação. A umidade também apresentou valor próximo de zero, com Δ médio de -0,093, demonstrando que esse tratamento praticamente não impactou na umidade. Para a resistência do solo à penetração, os valores médios foram próximos a zero, indicando que o preparo não influenciou efetivamente na resistência a penetração no geral. Dessa forma, o preparo apresentou baixa alteração nas camadas superficiais, mas, uma maior diferença média na camada de 30 - 40 cm, com Δ - 1,852, indicando uma elevação da RP nessa camada, sendo um indício de “Pé de grade”. O pouco impacto, pode ser justificado pelos dados de perfil de fundo, apresentados pela análise do perfilômetro, de profundidade média de trabalho de 7 cm.

No tratamento com escarificador (Esc), a elevação apresentou Δ médio de 0,978, indicando maior alteração média da superfície. A umidade apresentou Δ médio de 0,905, evidenciando um impacto negativo. Para a resistência do solo à penetração, o escarificador apresentou Δ médio de 0,481 na camada de 0 - 10 cm, indicando redução da resistência nessa profundidade. Nas demais camadas, os valores foram de -0,106 em 10 - 20 cm, -0,417 em 20 - 30 cm, -2,455 em 30 - 40 cm e -1,272 em 40 - 50 cm. Assim, embora o escarificador tenha reduzido a resistência média na camada superficial, os maiores valores negativos ocorreram nas camadas de 30 - 40 e 40 - 50 cm, indicando maior alteração média da estrutura espacial da resistência em profundidade, possivelmente agravação da compactação nas camadas

subsuperficiais. O impacto positivo restrito as camadas de 0 – 10 cm, pode ser justificado pelos dados de perfil de fundo, apresentados pela análise do perfilômetro, de profundidade média de trabalho de 15 cm

Na enxada rotativa (Enx), a elevação apresentou Δ médio de 0,993, valor semelhante ao observado no escarificador, indicando alteração média expressiva da superfície após o preparo. A umidade apresentou Δ médio de 0,280, demonstrando certo impacto negativo, porém em menor magnitude que no escarificador. Para a resistência do solo à penetração, os valores médios foram de -0,107 na camada de 0 - 10 cm, -0,212 em 10 - 20 cm, -0,195 em 20 - 30 cm, -0,833 em 30 - 40 cm e -0,367 em 40 - 50 cm. Esses resultados indicam que a enxada rotativa apresentou alterações significativas. O pouco impacto, pode ser justificado pelos dados de perfil de fundo, apresentados pela análise do perfilômetro, de profundidade média de trabalho de 8 cm e pela forma de trabalho da enxada rotativa

Tabela 5: Delta média espacial da álgebra de mapas

Variável	Gradagem	ESC	ENX
Elevação	-0,06271027	0,97761098	0,99284298
Umidade	-0,0934835	0,9054495	0,28049665
RP (0-10)	-0,01955553	0,48088554	-0,10662449
RP (10-20)	-0,07948093	-0,1061324	-0,21196736
RP (20-30)	0,16743351	-0,41735115	-0,19529348
RP (30-40)	-1,85153997	-2,45466965	-0,83303419
RP (40-50)	-0,17274824	-1,2724112	-0,36662207

Nota: Δ = Antes – Pós. Para resistência à penetração, valores positivos indicam redução da compactação após o preparo. Para umidade, valores positivos indicam redução do conteúdo de água após o preparo. Para elevação, valores negativos indicam aumento da superfície após a mobilização do solo. Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A correlação espacial global entre os mapas antes e após o preparo apresentou valores variando de -0,47 a 0,46 (Figura 27). Essa análise teve como objetivo avaliar o grau de persistência dos padrões espaciais dos atributos físicos do solo após a realização dos diferentes sistemas de preparo. Valores positivos indicam maior manutenção da distribuição espacial observada antes do preparo, enquanto valores negativos indicam maior reorganização espacial das variáveis, evidenciando alterações promovidas pela mobilização do solo. Dessa forma, a correlação espacial não representa melhor ou pior desempenho do sistema de preparo, mas sim

a intensidade com que cada implemento modificou o padrão espacial inicial dos atributos avaliados.

De modo geral, os maiores valores positivos foram observados para a umidade na gradagem ($r = 0,46$) e na enxada rotativa ($r = 0,39$), indicando que, nessas condições, o padrão espacial da umidade foi parcialmente mantido após as operações. Em contrapartida, os menores valores foram observados no escarificador, principalmente para a resistência do solo à penetração nas camadas de 0 - 10 cm ($r = -0,47$), 10 - 20 cm ($r = -0,39$), 30 - 40 cm ($r = -0,29$), 20 - 30 cm ($r = -0,25$) e 40 - 50 cm ($r = -0,23$), evidenciando maior alteração da estrutura espacial da compactação nesse tratamento.

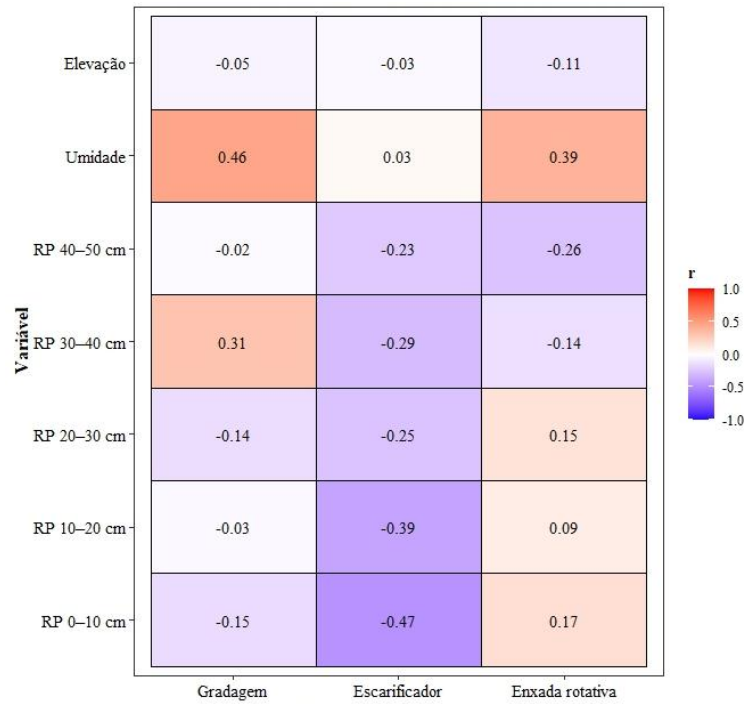
Na gradagem, a maior persistência do padrão espacial foi observada para a umidade do solo ($r = 0,46$) e para a resistência à penetração na camada de 30–40 cm ($r = 0,31$), indicando que a distribuição espacial dessas variáveis foi pouco modificada após a operação. Para a elevação da superfície ($r = -0,05$), RP 40–50 cm ($r = -0,02$), RP 10–20 cm ($r = -0,03$), RP 20–30 cm ($r = -0,14$) e RP 0–10 cm ($r = -0,15$), os coeficientes próximos de zero ou negativos indicaram maior reorganização espacial desses atributos. Esses resultados demonstram que a gradagem promoveu alterações localizadas na distribuição espacial das variáveis, porém sem modificar de forma uniforme o padrão espacial da área, evidenciando que seu efeito foi heterogêneo ao longo do perfil do solo.

O escarificador apresentou o comportamento mais evidente de alteração espacial da resistência do solo à penetração. Os valores negativos em todas as camadas de RP indicam que o preparo não apenas reduziu ou modificou os valores da variável, mas também alterou a disposição espacial das zonas de maior e menor resistência. Esse resultado é coerente com a ação mecânica do escarificador, que atua em maior profundidade e tende a romper camadas compactadas de forma mais intensa e descontínua ao longo da faixa trabalhada. A umidade ($r = 0,03$) e a elevação ($r = -0,03$) apresentaram correlações próximas de zero, indicando baixa persistência espacial entre os mapas antes e após o preparo.

Na enxada rotativa, a umidade também apresentou correlação positiva moderada ($r = 0,39$), indicando manutenção parcial do padrão espacial após o preparo. Para a resistência à penetração, os maiores valores positivos ocorreram nas camadas de 0–10 cm ($r = 0,17$), 20–30 cm ($r = 0,15$) e 10–20 cm ($r = 0,09$), sugerindo menor alteração relativa do padrão espacial nessas profundidades quando comparada ao escarificador. Entretanto, as correlações negativas observadas para RP 30–40 cm ($r = -0,14$), RP 40–50 cm ($r = -0,26$) e elevação ($r = -0,11$) indicam maior reorganização espacial nessas variáveis. Esse comportamento demonstra que a

enxada rotativa manteve parcialmente o padrão espacial da umidade e de algumas camadas superficiais de RP, mas promoveu alterações mais evidentes em profundidade e na elevação superficial.

Figura 24: Correlação espacial global



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Nos mapas de correlação espacial local, as áreas em azul e verde representam regiões com correlação espacial positiva entre os mapas obtidos antes e após o preparo, enquanto as áreas em vermelho representam regiões com correlação espacial negativa ou de menor intensidade. Dessa forma, os mapas permitem identificar a distribuição espacial das regiões em que o padrão espacial foi mais preservado ou mais modificado após a realização dos diferentes sistemas de preparo.

Para a gradagem (Figura 25), observou-se uma distribuição espacial em mosaico, com regiões de alta correlação intercaladas com áreas de baixa correlação. Esse padrão indica que o efeito da gradagem não ocorreu de forma uniforme, havendo trechos em que a distribuição espacial das variáveis foi preservada e outros em que houve maior alteração, principalmente nas regiões representadas por manchas avermelhadas.

No tratamento com escarificador, os mapas locais (Figura 26) evidenciaram maior fragmentação espacial das correlações, com presença expressiva de áreas de baixa correlação ao longo das faixas avaliadas. Esse resultado reforça o padrão observado no mapa de calor, no

qual o escarificador apresentou os menores coeficientes globais para a resistência à penetração. Assim, esse tratamento foi o que mais alterou a configuração espacial das zonas de compactação, principalmente nas camadas de 0–10, 10–20 e 30–40 cm. A presença de pequenas áreas com maior correlação indica que alguns trechos mantiveram parcialmente o padrão inicial, porém de forma descontínua. Para a enxada rotativa, os mapas de correlação local (Figura 27) também apresentaram padrão heterogêneo, com alternância entre áreas de maior e menor correlação. As regiões de maior correlação indicam locais onde o padrão espacial das variáveis foi parcialmente mantido após o preparo, enquanto as regiões avermelhadas indicam maior alteração local. Esse comportamento foi mais compatível com os resultados globais da umidade e das camadas superficiais de RP, que apresentaram correlações positivas, embora de baixa magnitude. Portanto, a enxada rotativa promoveu alterações espaciais localizadas, porém com maior persistência do padrão espacial em relação ao escarificador para algumas variáveis.

Figura 25: Correlação gradagem

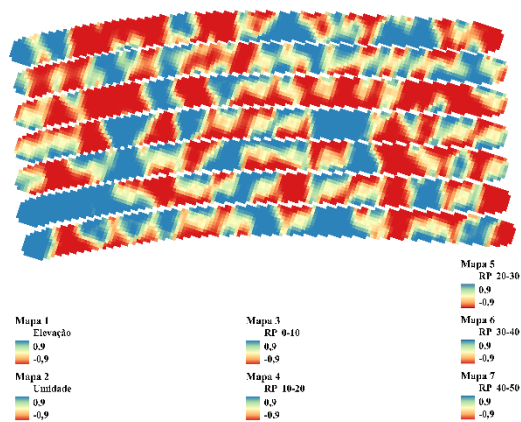


Figura 26: Correlação Esc

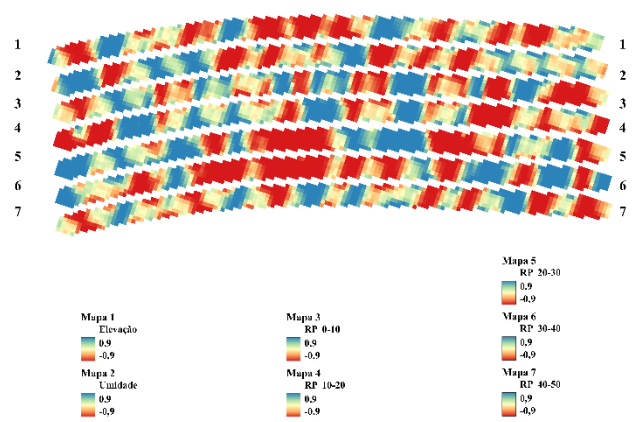
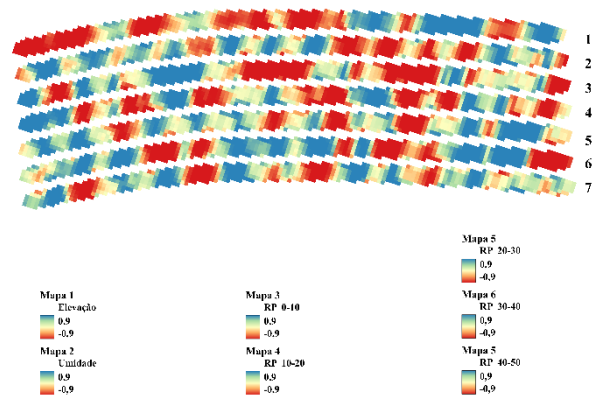


Figura 27: Correlação Enx



6. DISCUSSÃO

6.1 Umidade

A análise da umidade do solo evidenciou comportamentos distintos entre a análise descritiva e a análise espacial. Na análise descritiva, observou-se aumento dos valores médios de umidade após a realização dos sistemas de preparo. Entretanto, essa análise representa apenas o comportamento pontual das amostras coletadas, sem considerar a continuidade espacial da variável ao longo da área experimental. Dessa forma, embora tenha sido constatado incremento da umidade média em alguns tratamentos, esse resultado não permite afirmar, isoladamente, que houve melhoria das condições hídricas do solo.

A interpretação conjunta da álgebra de mapas e da correlação espacial demonstrou que os diferentes sistemas de preparo promoveram alterações pouco expressivas nos valores de umidade do solo, uma vez que os mapas de diferença (Δ) apresentaram variações reduzidas entre as avaliações antes e após os preparos. Por outro lado, a correlação espacial indicou maior uniformidade na distribuição da umidade ao longo da área, sugerindo que a mobilização superficial proporcionada pelos implementos favoreceu uma redistribuição espacial da água no solo, sem alterar significativamente sua quantidade.

Esse comportamento pode estar relacionado à ruptura da estrutura superficial promovida pelos sistemas de preparo, que reduz a continuidade de agregados superficiais e favorece a infiltração inicial e a redistribuição da água na camada mobilizada. Contudo, não é possível afirmar que essa redistribuição represente melhoria da condição hídrica do solo, uma

vez que atributos diretamente relacionados ao armazenamento e ao movimento da água, como macroporosidade, microporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica e infiltração, não foram avaliados neste estudo. Assim, os resultados indicam apenas que os sistemas de preparo modificaram a organização espacial da umidade, sem evidências suficientes para concluir sobre alterações na qualidade física do solo relacionadas ao comportamento hídrico.

6.2 Elevação de superfície

A elevação da superfície do solo foi influenciada de forma distinta pelos sistemas de preparo avaliados, sendo as maiores alterações observadas nos tratamentos com escarificador e enxada rotativa, enquanto a gradagem promoveu modificações menos expressivas. Esse comportamento está diretamente relacionado ao mecanismo de ação de cada implemento sobre o solo. No escarificador, as hastes promovem a ruptura localizada das camadas compactadas e deslocam o solo para cima e para as laterais, resultando em maior empolamento e elevação da superfície. Na enxada rotativa, o rotor equipado com lâminas fragmenta, corta e mistura intensamente a camada superficial, promovendo a desagregação do solo e aumentando o volume da camada mobilizada. Em contrapartida, a grade atua por meio da ação dos discos, que promovem principalmente o corte, a fragmentação e o destorroamento da camada superficial, com menor capacidade de levantamento do solo, o que explica as menores alterações observadas na elevação da superfície.

Os resultados obtidos pela álgebra de mapas corroboram esse comportamento, evidenciando que as maiores diferenças de elevação ocorreram justamente nas áreas submetidas aos preparos reduzidos. Entretanto, essas alterações representam o efeito imediato da mobilização mecânica e não necessariamente indicam melhoria da estrutura física do solo. A elevação da superfície está associada ao empolamento decorrente da ruptura dos agregados e da expansão temporária da camada mobilizada, fenômeno que tende a ser reduzido com o tempo em função do reconsolidamento natural do solo promovido pela ação da chuva, do tráfego de máquinas e da própria acomodação das partículas.

6.3 Resistência a penetração

A resistência do solo à penetração apresentou comportamento distinto entre a magnitude dos valores e sua distribuição espacial. Nas camadas superficiais (0–30 cm), os sistemas de preparo não promoveram alterações significativas nos valores médios de resistência, porém modificaram de forma mais evidente sua distribuição espacial. Esse comportamento foi confirmado pela análise de correlação espacial, principalmente no tratamento com escarificador, que apresentou elevada correlação inversamente proporcional entre as superfícies obtidas antes e após o preparo. Esse resultado indica que o implemento promoveu reorganização da distribuição espacial da resistência à penetração, redistribuindo regiões de maior e menor resistência ao longo da área, sem provocar alterações expressivas nos valores médios do atributo.

Esse comportamento pode ser explicado pelas características iniciais da área experimental. Os resultados da análise descritiva indicaram que a área não apresentava níveis elevados de compactação antes da realização dos preparos, mas sim elevada variabilidade espacial da resistência à penetração. Dessa forma, a atuação das hastas do escarificador promoveu principalmente a ruptura localizada de regiões com maior resistência, tornando a distribuição do atributo mais homogênea ao longo da camada mobilizada, em vez de promover reduções expressivas da resistência média do solo.

Nas camadas subsuperficiais (30–50 cm), observou-se aumento dos valores médios de resistência à penetração após os preparos em todos os tratamentos. Entretanto, esse comportamento deve ser interpretado com cautela, uma vez que essas profundidades estão abaixo da faixa de atuação efetiva dos implementos utilizados, cuja profundidade máxima de trabalho foi de aproximadamente 30 cm no escarificador e ainda menor para a gradagem e a enxada rotativa. Assim, não há evidências de que os sistemas de preparo tenham provocado aumento efetivo da compactação nessas camadas.

Da mesma forma, embora a análise espacial tenha indicado alterações na distribuição da resistência à penetração nas camadas mais profundas, essas diferenças podem estar associadas à variabilidade natural do solo e às limitações inerentes ao método de avaliação empregado. A resistência foi determinada com penetrômetro de impacto manual, equipamento amplamente utilizado em estudos agronômicos, porém sujeito à influência do operador, das condições locais de umidade e da heterogeneidade estrutural do solo. Dessa forma, as alterações observadas nas camadas de 30–50 cm devem ser interpretadas com cautela, uma vez que provavelmente refletem a variabilidade do processo de amostragem e não o efeito direto dos sistemas de preparo.

7. CONCLUSÃO

A variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, da umidade do solo e da elevação da superfície foi modificada pelos diferentes sistemas de preparo, evidenciando que a mobilização mecânica altera não apenas os valores dos atributos físicos do solo, mas também sua distribuição espacial.

A dependência espacial das variáveis variou entre fraca, moderada e forte, demonstrando que a continuidade espacial dos atributos foi influenciada tanto pelas condições iniciais da área quanto pelos diferentes sistemas de preparo. Esses resultados confirmam a aplicabilidade da geoestatística para caracterizar a distribuição espacial dos atributos físicos do solo e representar sua variabilidade na área experimental.

Entre os sistemas avaliados, o escarificador foi o implemento que promoveu as alterações espaciais mais expressivas na resistência do solo à penetração e na umidade do solo nas camadas superficiais, favorecendo uma redistribuição espacial mais homogênea desses atributos. Entretanto, as alterações observadas ocorreram predominantemente até a profundidade de atuação do implemento, não sendo verificadas mudanças consistentes nas camadas subsuperficiais.

De maneira geral, a integração da análise descritiva, da geoestatística, da álgebra de mapas e da correlação espacial mostrou-se eficiente para avaliar os impactos dos diferentes sistemas de preparo sobre os atributos físicos do solo, permitindo identificar alterações na sua

distribuição espacial e fornecendo informações que podem subsidiar estratégias de manejo e aplicações da agricultura de precisão.

REFERÊNCIAS

ABDULWADOOD, H.W.; AL-HASSANY, G.S.H.; MUSTAFA, R.I. IDW Interpolation of Soil Moisture Retention Curve Utilizing GIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 856, n. 1, p. 012040, 2021.

ADAM, B.; ABDULAI, A. Minimum tillage as climate-smart agriculture practice and its impact on food and nutrition security. *PLOS ONE*, San Francisco, v. 18, n. 12, e0287441, 2023.

ANGON, P.B.; ANJUM, N.; AKTER, M.M.; KC, S.; SUMA, R.P.; JANNAT, S. An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in Agriculture*, v. 2023, p. 1-14, 2023.

AWAL, R.; CHATTERJEE, A.; FRANZEN, D.; AGARWAL, S.; SHARMA, L.K. Spatial variability of soil physical properties and hydraulic conductivity in agricultural fields under different moisture conditions. *Agronomy*, Basel, v. 9, n. 11, p. 750, 2019.

BALASTREIRE, L.A. *Máquinas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1987. 307 p.

BENEVENUTE, P.A.N.; PEREIRA, F.A.C.; BARBOSA, S.M.; SILVA, R.F.; DOMINGUES, M.I.S.; MARQUES FILHO, A.C.; OLIVEIRA, G.C.; SILVA, B.M. Deep soil tillage in the coffee planting furrow has long-lasting benefits for improving soil physical quality and enhancing plant vigor in dense soils. *Soil and Tillage Research*, v. 248, 106448, 2025.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 146-151, 2007.

BORGES, D.F.; GONÇALVES, F.A.R.; GODINHO JUNIOR, J. de D.; SOUZA, C.F.E.; CARVALHO FILHO, A. Perfilômetro de barra corrediça: avaliação de metodologia para análise da rugosidade do solo. *Energia na Agricultura*, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 471-478, 2019.

BUSARI, M.A.; KUKAL, S.S.; KAUR, A.; BHATT, R.; DULAZON, S. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 3, n. 2, p. 119-129, 2015.

CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J.F.; SILVA, R.P. da; FURLANI, C.E.A.; CARVALHO, L.C.C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 229-237, 2007.

CHEȚAN, F.; CHEȚAN, C.; MOLDOVAN, C.; RUSU, T.; POP, A.I.; MORARU, P.I. The impact of soil tillage systems and fertilization strategies on winter wheat yield and quality. *Nitrogen*, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2026.

COELHO, D.S.; CORTEZ, J.W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 755-763, 2012.

DADALTO, J.P.; FERNANDES, H.C.; TEIXEIRA, M.M.; CECON, P.R.; MATOS, A.T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 506-513, 2015.

DEXTER, A.R.; CZYŻ, E.A.; VIZITIU, O. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, v. 93, n. 2, p. 412-419, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Agricultura de precisão. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/avanco-tecnologico/agricultura-de-precisao>. Acesso em: 27 mar. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Plantio convencional. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/manejo-do-solo-e-adubacao/sistema-de-manejo-do-solo/plantio-convencional>. Acesso em: 12 mar. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T.J.C.; SANTI, A.L.; CHERUBIN, M.R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T.G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1234-1244, 2014.

GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R.P.; VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.;

INAMASSU, R.Y. (org.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. cap. 1, p. 74-83. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1002010/1/4221.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2026.

KARUNATHILAKE, E.M.B.M. et al. The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*, v. 13, n. 8, p. 1593, 2023.

KUMAR, P.; RAO, B.; BURMAN, A.; KUMAR, S.; SAMUI, P. Spatial variation of permeability and consolidation behaviors of soil using ordinary kriging method. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 19, 100856, 2022.

LEMOS, A.M.; CASSOL, E.A.; BARROS, C.A.P. Losses of water, soil, and nutrients during high-intensity simulated rainfall in two soil management systems with different sources of fertilization. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 50, n. 10, e20190306, 2020.

LIMA, L.S. de F.R. de; CARDOSO, M.M.; SILVA, C.D.T. da; SOUZA, J.M. de; OLIVEIRA, M.V. de; BARCELOS, E.M.; MIRA, A.B. de; FREITAS, L. de; AQUINO, R.E. de; OLIVEIRA, I.A. de. Correlação espacial entre NDVI multiescalar e atributos do solo em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia. *Revista Delos*, v. 18, n. 71, e6845, 2025.

LIU, B.; JING, Z.; WANG, J.; FENG, Y. Effect of soil compaction on hydraulic properties and macropore structure: Evidence from opencast mines in the Loess Plateau of China. *Ecological Engineering*, v. 192, 106988, 2023.

LUNDGREN, W.J.C.; SILVA, J.A.A. da; FERREIRA, R.L.C. A precisão da estimativa do erro da krigagem pela validação cruzada. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 24, e00124114, 2017a.

LUNDGREN, W.J.C.; SOUZA, I.F. de; LUNDGREN, G.A. Krigagem na construção de mapa pluviométrico do estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 10, n. 1, p. 13-22, 2017b.

MACHADO, T.M.; SOUZA, C.M.A.; ARCOVERDE, S.N.S.; CHAGAS, A.; OLSZEWSKI, N.; CORTEZ, J.W. Níveis de compactação e sistemas de preparo sobre atributos físicos do solo e componentes de produção da soja. *Agrarian*, Dourados, v. 16, n. 56, e17037, 2023.

MELO, T.V.; NUNES, M.C.M.; MARTINS FILHO, E.M.S.; CADONÁ, E.A.; CARLOS, F.S.; MIGUEL, P. Loss of nitrogen, phosphorus, and potassium through surface runoff under simulated rainfall in different soil management systems. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 29, e20230071, 2024.

MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A.F. *Agricultura de precisão*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 200, 104611, 2020.

NGO-CONG, D.; ANTILLE, D.L.; VAN GENUCHTEN, M.T.; NGUYEN, H.Q.; TEKESTE, M.Z.; BAILLIE, C.P.; GODWIN, R.J. A modeling framework to quantify the effects of

compaction on soil water retention and infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, v. 85, n. 6, p. 1931-1945, 2021.

NUNES, J.G.S.; BONFIM-SILVA, E.M.; SILVA, T.J.A.; MOREIRA, J.C.F.; GUIMARÃES, S.L.; CAMPOS, D.T.S. Métodos de interpolações de dados obtidos por sensores de agricultura de precisão. *Nativa*, Sinop, v. 6, n. 6, p. 681-688, 2018.

ORZECZ, K.; WANIC, M.; ZAŁUSKI, D. The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, v. 11, n. 7, 666, 2021.

PERALTA OGOREK, L.L.; GAO, Y.; FARRAR, E.; PANDEY, B.K. Soil compaction sensing mechanisms and root responses. *Trends in Plant Science*, v. 30, n. 5, p. 565-575, 2025.

SALVADOR, N.; BENEZ, S.H.; MION, R.L.; VILIOTTI, C.A. Demanda energética em diferentes sistemas de preparo periódico do solo antes e depois da subsolagem. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 39, n. 3, p. 378-383, 2008.

SHARMA, V.; VADDEVOLU, U.B.P.; BHAMBOTA, S.; AMPATZIDIS, Y.; BAYABIL, H.; SINGH, A. Variable rate technology and its application in precision agriculture. *EDIS*, v. 2025, n. 1, 2025.

SILVA, A.L.; MARIANO, C.; EBLING, Â.A.; OLIVEIRA NETO, C.F. de; VIÉGAS, I. de J.M.; OKUMURA, R.S. Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo na Amazônia brasileira. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá, v. 16, n. 1, 2023.

SILVA, F.P. Estimativas espaciais: qualidade e correlação dos interpoladores espaciais inverso do quadrado da distância e krigagem. *Espaço Aberto*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 101-120, 2022.

SORIANI, R.; SANTOS, E.D.; LEITE, C.A.M.; BARBOSA, C.A.C.; SILVA, M.C.M.; COLOMBO, M.C.; CHAGAS, T.L.K.; AMARAL, H.F. Eficiência dos penetrômetros de impacto e eletrônico na detecção de compactação do solo. *Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa*, Londrina, v. 34, n. especial Ciências Agrárias, p. 202-211, 2018.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 15, n. 2, p. 229-235, 1991.

TAYLOR, James. Precision agriculture. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, v. 4, p. 710-725, 2023.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

YU, C.; MAWODZA, T.; ATKINSON, B.S.; ATKINSON, J.A.; STURROCK, C.J.; WHALLEY, R.; HAWKESFORD, M.J.; COOPER, H.; ZHANG, X.; ZHOU, H.; MOONEY, S.J. The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, v. 29, 100838, 2024.

ZHANG, Q. (ed.). *Precision agriculture technology for crop farming*. Boca Raton: CRC Press, 2015.