

Tipo do Artigo (Pesquisa) - <https://doi.org/10.67951/2358-260X.2026v14i2.7793>

## VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREA SOB PLANTIO DIRETO DE SOJA E MILHO

Spatial variability of soil attributes in an area under no-till soybean and corn cultivation.

Felipe Augusto Ferreira Rocha<sup>1\*</sup>, Ariel Muncio Compagnon<sup>2</sup>, Saylla Julia Marques Naves<sup>1</sup>, Yasmim Martins Camapum<sup>1</sup>, Kássia Cristina de Caldas Rabelo<sup>3</sup>.

Afiliação 1: Engenheiros agrônomos pelo Instituto Federal Goiano Campus Ceres, GO-154, km 218 - Zona Rural, Ceres - GO, 76300-000.

Afiliação 2: Prof. Dr. Instituto Federal Goiano Campus Ceres.

Afiliação 3: Doutora em Biotecnologia e Biodiversidade. Instituto Federal Goiano Campus Ceres.

\* Autor correspondente: felipe.augustofragronomia@gmail.com.

### Resumo

O uso de ferramentas como o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo, possibilitam racionalizar o manejo e promover uma agricultura sustentável, além de ganhos na produção. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise detalhada das propriedades físicas e químicas do solo em uma área de estudo localizada no município de Itapaci - GO. Foi utilizada uma malha amostral com 50 pontos espaçados em 100 m, sendo 44 pontos na malha estabelecida e 6 pontos de forma aleatória. O índice de cone (IC) foi amostrado nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m, e as amostras de silte, argila, areia, matéria orgânica e pH foram amostradas de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m, sendo os pontos georreferenciados com receptor GNSS. Os dados foram submetidos à análise geoestatística no programa QGIS com o complemento Smart-Map. A adoção de uma malha amostral de 1 ha, com pontos aleatórios, foi eficaz para determinar a dependência espacial e mapear as variáveis estudadas. Os valores de IC foram elevados, ultrapassando 2 MPa, o que pode limitar o desenvolvimento das raízes. O teor de matéria orgânica do solo (entre 15 a 20 g kg<sup>-1</sup>) foi considerado adequado para o cultivo, promovendo um sistema produtivo saudável. O pH levemente ácido e a textura argilosa beneficiam a retenção de nutrientes e a capacidade de suporte para as culturas, sendo importante monitorar esses parâmetros regularmente para assegurar condições ótimas para a produção agrícola.

**Palavras-chave:** Geoestatística; Atributos físicos do solo; *Glycine max*; *Zea mays*.

Recebido:  
16/12/2024  
Aceito:  
11/02/2026  
Publicado:  
19/02/2026

## 1. INTRODUÇÃO

A modernização da agricultura no Brasil teve início na década de 1990, com a introdução de máquinas de alto desempenho e tecnologias avançadas, adotadas principalmente por agricultores em grandes áreas (Inamasu; Bernadi, 2014). No contexto da economia globalizada, a busca por maior eficiência em todos os setores é essencial para manter a competitividade, e a agricultura não é exceção a essa necessidade.

A evolução da informática e das tecnologias de geoprocessamento, como GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélites), transformou a agricultura, permitindo um manejo mais detalhado e específico das propriedades. Assim, cada parte da propriedade pode ser tratada de acordo com suas necessidades específicas, proporcionando um conhecimento detalhado de cada etapa da produção (Gama Pinto et al., 2020).

Segundo Faria; Silva (2023), o uso da agricultura de precisão (AP) é um conjunto de técnicas que possibilitam o gerenciamento localizado dos cultivos, considerando a particularidade de cada solo, otimizando os custos de produção. Gomes et al. (2021) afirmam que a variabilidade espacial do solo pode variar ao longo da paisagem em virtude da intensidade de seus fatores e processos de formação, assim como do manejo e das práticas agrícolas realizadas. Portanto, as características químicas e físicas do solo não variam ao acaso, mas de acordo com uma dependência espacial.

A variabilidade espacial na agricultura é avaliada com técnicas de análise preditiva para otimizar o manejo da área (Oliveira et al., 2020). Ferramentas como GNSS e SIG (Sistemas de Informações Geográficas) ajudam a tratar pontos específicos da propriedade. O manejo adequado dos atributos do solo é crucial para a eficiência do sistema agrícola (Torres et al., 2015), evitando problemas que afetam o desenvolvimento das culturas e a preservação dos recursos naturais (Lima et al., 2013).

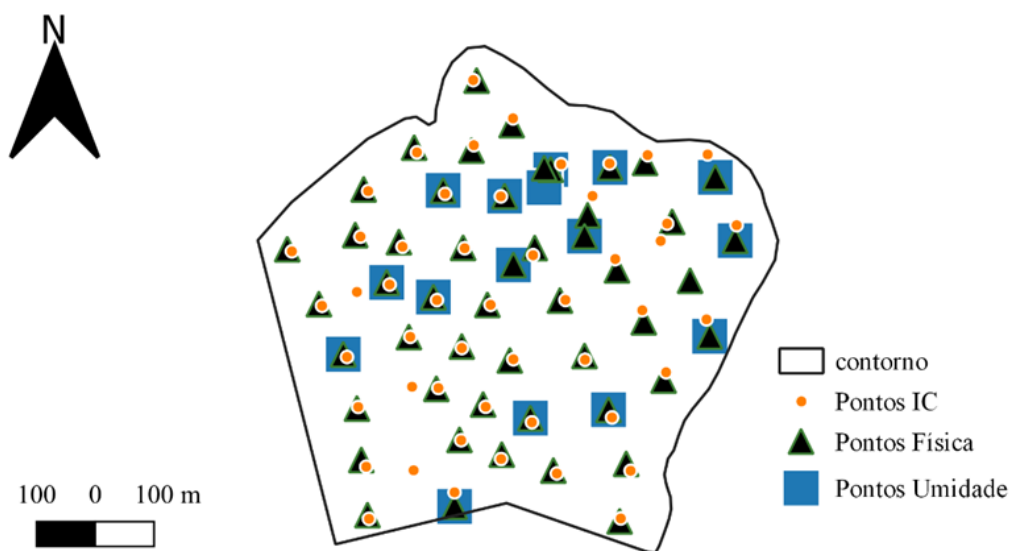
No Brasil, as áreas comerciais têm utilizado malhas amostrais de 100 x 100 m ou 175 x 175 m para análises de solo, que por razões econômicas, geram uma amostra a cada 1 ou 3 ha, respectivamente (Cherubin et al., 2014). Porém, existem outras recomendações que recomendam uma amostragem mais densa com dimensões das grades com no mínimo 100 pontos (Souza et al., 2014). De acordo com Cherubin et al. (2014), malhas amostrais de 100 x 100 m (1 ha), 142 x 142 m (2 ha) e 173 x 173 m (3 ha), possibilitam caracterizar a variabilidade espacial de atributos no solo. Por meio da geoestatísticas, é possível descrever a variabilidade espacial das variáveis medidas. Com interpoladores obtidos por krigagem, geram-se mapas dos atributos analisados, o que permite monitorar a conservação da estrutura do solo e otimizar os sistemas de produção (Sampietro et al., 2016).

Diante do exposto, objetivo desse trabalho foi realizar uma análise detalhada das propriedades físicas e químicas do solo em diferentes profundidades (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m) em uma área de estudo localizada no município de Itapaci - GO.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental está localizada na zona rural, no município de Itapaci - GO, com coordenadas de latitude 14°54'11" S e longitude 49°25'31" O, e altitude média de 590 m. De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região é caracterizado como tropical, com inverno seco e verão chuvoso (Aw). A área avaliada possui um histórico de cultivo de milho e soja por mais de uma década, sendo que, no momento da execução deste trabalho, estava em fase de cultivo de soja.

Na área, foi estabelecida uma malha amostral com 44 pontos espaçados em 100 m x 100 m (1 ha) e mais 6 pontos de forma aleatória, totalizando 50 pontos amostrais (Figura 1), numa área de 40 ha. Os pontos foram alocados e georreferenciados com equipamento GNSS acoplado ao penetrógrafo, para as amostras de resistência mecânica do solo à penetração e para as amostras de silte, argila, areia, matéria orgânica e pH, foi utilizado o aparelho GNSS Garmin GPSMAP 64s.



**Figura 01.** Pontos de coleta das amostras nas coordenadas UTM Zona 22 Sul.

Para realização das análises, os procedimentos metodológicos foram embasados na metodologia adaptada de Silva et al. (1998). As amostras de solo foram coletadas em cada ponto nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, utilizando perfurador de solo. Em cada ponto foi coletado uma amostra central e em um raio de 2 m mais 4 amostras, sendo homogeneizadas para compor o ponto amostral. Foram identificadas e levadas ao Laboratório de Solos do Instituto Federal Goiano Campus Ceres, para realização das análises de silte, argila, areia, matéria orgânica e pH.

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) foi avaliada com um penetrógrafo eletrônico, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m, sendo 3 repetições por ponto, sendo coletados o ponto central e os outros dois em um raio de 2 m. A RMSP foi expressa pelo índice de cone (IC), que é a média da RMSP em cada camada amostrada de cada ponto.

A umidade do solo foi determinada conforme Donagemma (2011), para caracterização do solo no momento da coleta dos dados de IC, no qual foram realizadas amostragens em 16 pontos aleatórios, com trado tipo sonda, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, calculando-se as medidas de posição (média, mediana, mínimo, máximo), medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação), medidas de assimetria, medidas de curtose e teste de normalidade de Anderson Darling, pelo programa computacional Assistat.

Para caracterizar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos do solo, foi utilizada a geoestatística por meio de semivariogramas, mediante uso do programa QGIS com o complemento Smart-Map (Pereira et al., 2023), no qual descartou-se os pontos considerados outliers (discrepantes) (Tabela 1).

**Tabela 01.** Variáveis que apresentaram outliers e ponto retirado para as análises geoestatísticas.

Variável	Ponto retirado
Índice de cone 0,00-0,10 m	6
Índice de cone 0,10-0,20 m	2
Índice de cone 0,20-0,30 m	2
Índice de cone 0,30-0,40 m	5
Matéria orgânica 0,00-0,20 m	21
pH 0,00-0,20 m	25
Argila 0,00-0,20 m	1
Silte 0,20-0,40 m	44

Nos semivariogramas ajustados foram definidos os seguintes parâmetros: C; efeito pepita (C0); patamar (C0+C) e alcance da dependência espacial (a), coeficiente de determinação (R2); soma de quadrados do resíduo (SQR); análise de dependência espacial (ADE). O quociente entre o efeito pepita e o patamar:  $x = \frac{C_0}{C_0+C}$ , permitiu a classificação da dependência espacial dos resultados (classe). Para a análise do grau de dependência espacial, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), que considera como dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita igual a 25% do patamar; de dependência espacial moderada, quando o efeito pepita está entre 25 e 75%, e dependência espacial fraca, quando o efeito pepita é maior que 75%.

Com a estimativa dos semivariogramas experimentais e o ajuste dos modelos teóricos realizaram-se a interpolação dos dados pelo método da krigagem e posterior confecção dos mapas de variabilidade de cada uma das variáveis analisadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 resume os resultados dos atributos físicos e químicos do solo em duas profundidades distintas (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m). Foi observado que a maior média encontrada foi para a areia na profundidade de 0,00-0,20 m, com uma média de 58,72%. As medianas de todas as variáveis estavam próximas de suas respectivas médias, indicando uma boa distribuição dos dados apresentados. Resultados semelhantes foram encontrados por Cornélio et al. (2021), em um estudo sobre os atributos físicos do solo de um Latossolo Vermelho.

**Tabela 1.** Análise descritiva das variáveis areia, silte, argila, matéria orgânica e pH em diferentes profundidades (0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m) em uma área de estudo localizada no município de Itapaci - GO, no ano de 2024.

Variável	Camada	Mé	Med	Mín	Máx	A	σ	CV	Cs	Ck	AD
Areia	0,00-0,20 m	58,72	59,36	43,17	74,37	31,19	7,17	12,22	0,06	0,29	Sim
	0,20-0,40 m	56,72	56,30	40,26	74,34	34,07	8,33	14,68	0,09	-0,66	Sim
Argila	0,00-0,20 m	37,40	37,95	21,58	47,8	26,21	6,08	16,27	-0,37	0,42	Sim
	0,20-0,40 m	38,36	39,16	20,87	53,62	32,74	8,23	21,46	-0,19	-0,72	Sim
Silte	0,00-0,20 m	3,86	3,37	0,22	10,10	9,87	2,78	71,40	0,62	0,54	Não
	0,20-0,40 m	4,91	4,83	1,90	12,41	10,50	2,05	41,80	0,86	2,10	Sim
M.O.	0,00-0,20 m	19,93	20,2	10,3	31,2	20,9	4,22	21,17	-0,03	0,01	Sim
	0,20-0,40 m	15,73	15,55	9,2	23,4	14,2	3,40	21,62	0,21	-0,32	Sim
pH	0,00-0,20 m	6,11	6,06	5,12	7,55	2,43	0,56	9,15	0,27	-0,38	Sim
	0,20-0,40 m	5,54	5,45	4,39	6,89	2,50	0,55	9,96	0,59	0,42	Sim
IC	0,00-0,10 m	2,39	2,35	1,3	3,7	2,4	0,49	20,88	0,31	-0,27	Sim
	0,10-0,20 m	3,03	3,0	2,1	5,6	3,5	0,61	20,35	1,42	4,46	Sim
	0,20-0,30 m	2,95	2,8	1,1	5,6	4,5	0,79	27,10	0,69	1,79	Não
	0,30-0,40 m	2,64	2,5	1,1	6,1	5,0	0,84	32,15	1,50	4,85	Não

Mé: média; Med: mediana; Mín: mínimo; Máx: máximo; A: amplitude; σ: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; AD: teste de normalidade de Anderson Darling.

O solo foi classificado como argiloso, com o maior teor médio de argila na camada de 0,20-0,40 m, apresentando uma média de 38,36%. Castione et al. (2015) encontraram valores médios maiores na camada de 0,20-0,30 m, sendo 42,43%, também classificando o solo como argiloso. O teor de argila no solo é crucial para o manejo da fertilidade e estrutura do solo, pois solos argilosos têm maior capacidade de retenção de água e nutrientes, influenciando diretamente a disponibilidade de recursos essenciais para o desenvolvimento das plantas. Conforme Valente et al. (2019), a presença de argila no solo pode contribuir significativamente para a manutenção da umidade e a disponibilização gradual de nutrientes para as culturas.

Observou-se no presente estudo que o menor valor médio foi o de silte na profundidade de 0,00-0,20 m, com 0,22%, o que pode estar relacionado ao tipo de solo e às práticas agrícolas adotadas. Em contraste, o maior valor médio observado foi o de areia na profundidade de 0,00-0,20 m, com uma média de 74,8%, também relacionado ao tipo de solo, práticas agrícolas e taxa de intemperismo.

A amplitude, que se refere à variação dos dados dentro da faixa observável, foi maior para a areia na profundidade de 0,20-0,40 m, com 34,07%. Isso pode indicar a presença de variações nas características físicas do solo, como textura, teor de nutrientes e estrutura. O maior valor de desvio padrão, também observado para a areia na profundidade de 0,20-0,40 m, foi de 8,33, refletindo a grande dispersão dos dados em relação à média devido à alta amplitude.

O coeficiente de variação (CV) está correlacionado a normalidade e parametria dos dados. Assim, a maioria das variáveis avaliadas se mostraram paramétricas ( $CV < 30\%$ ) com exceção de índice de cone 0,30-0,40 m, silte 0,00-0,20 m e silte 0,20-0,40 m, que demonstraram um comportamento não paramétrico (Tabela 3). Valores baixos de CV ( $< 30\%$ ) indicam uma distribuição mais estável e previsível das variáveis, o que é fundamental para fazer inferências e decisões embasadas no manejo agrícola. Em resultados encontrados por Aquino et al. (2014), verificaram que todos os atributos granulométricos apresentaram valores de CV moderado em ambos os solos estudados, ficando com média de 21,69%.

As variáveis areia 0,00-0,20 m, argila 0,20-0,40 m e matéria orgânica 0,00-0,20 m apresentaram assimetria negativa, enquanto IC 0,10-0,20 m, IC 0,30-0,40 m e silte 0,20-0,40 m apresentaram assimetria positiva. Soares et al. (2015), em estudo para as variáveis de física do solo, encontraram indicativo de normalidade, onde os valores do coeficiente de assimetria foram próximos a zero. Já para a curtose, as variáveis de IC 0,00-0,10 m, areia 0,20-0,40 m, argila 0,20-0,40 m, matéria orgânica 0,20-0,40 m e pH 0,00-0,20 m estão próximos a média (leptocúrtica), logo as demais variáveis estão afastadas, classificadas como platicúrtica. Aquino et al. (2014) obtiveram coeficiente de curtose com valores distantes de zero na sua maioria tendendo neste caso a valores anormais.

O teste de normalidade é mais uma forma de determinar a parametria dos dados. Foram classificados como dados não paramétricos as variáveis IC 0,00-0,10 m, areia 0,20-0,40 m, argila 0,20-0,40 m, matéria orgânica 0,20-0,40 m e pH 0,00-0,20 m. Estudar a normalidade dos dados é essencial porque permite a utilização de métodos estatísticos apropriados para análise, garantindo resultados mais precisos e confiáveis. Quando os dados não seguem uma distribuição normal, métodos não paramétricos podem ser necessários para evitar interpretações incorretas dos resultados. Isso é fundamental para o manejo agrícola, onde decisões baseadas em dados precisos podem otimizar a produção e a eficiência das práticas agrícolas (Aquino et al., 2014).

Os semivariogramas ajustados aos modelos teóricos que melhor descrevem o comportamento da variabilidade espacial dos atributos estudados se encontram na Tabela 3.

**Tabela 03.** Semivariogramas ajustados para as variáveis IC, areia, silte, argila, matéria orgânica e pH em diferentes profundidades (0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m) em uma área de estudo localizada no município de Itapaci - GO, no ano de 2024.

Variável	Camada	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0+C^{(2)}$	$C^{(3)}$	$A^{(4)}$	$R^{2(5)}$	$SQR^{(6)}$	$ADE^{(7)}$	Classe
IC	0,00-0,10 m	Esférico	0,049	0,221	0,172	177,51	0,772	0,000	0,778	Forte
	0,10-0,20 m	Linear com patamar	0,108	0,255	0,147	208,67	0,911	0,000	0,576	Moderado
	0,20-0,30 m	Linear com patamar	0,404	0,524	0,120	181,66	0,500	0,002	0,229	Moderado
	0,30-0,40 m	Linear com patamar	0,000	0,518	0,518	0,002	0,097	0,004	1,000	Forte
Areia	0,00-0,20 m	Linear com patamar	2,581	19,119	16,538	399,90	0,968	3,693	0,865	Forte
	0,20-0,40 m	Linear com patamar	0,060	0,330	0,270	179,36	0,780	0,004	0,818	Moderado
Argi-la	0,00-0,20 m	Linear	0,141	0,246	0,105	281,28	0,849	0,002	0,426	Moderado
	0,00-0,20 m	Linear com patamar	2,927	10,116	7,189	449,46	0,981	0,402	0,710	Moderado
Silte	0,00-0,20 m	Linear com patamar	5,512	14,117	8,605	449,46	0,990	0,300	0,609	Moderado
	0,20-0,40 m	Linear com patamar	6,560	40,250	33,690	352,83	0,997	1,374	0,837	Forte
M.O.	0,00-0,20 m	Linear com patamar	1,968	65,565	63,597	403,19	1,000	0,400	0,969	Forte
	0,20-0,40 m	Linear com patamar	13,794	82,870	69,076	375,71	0,997	6,591	0,833	Forte
pH	0,00-0,20 m	Linear com patamar	1,743	3,356	1,613	276,30	0,869	0,139	0,480	Moderado
	0,20-0,40 m	Linear com patamar	10,036	88,277	78,241	416,39	0,993	17,247	0,886	Forte

<sup>(1)</sup>: Efeito pepita; <sup>(2)</sup>: Patamar; <sup>(3)</sup>: Variância; <sup>(4)</sup>: Alcance; <sup>(5)</sup>: coeficiente de determinação; <sup>(6)</sup>: soma dos quadrados do erro; <sup>(7)</sup>: Análise de dependência espacial; M.O.: Matéria orgânica.

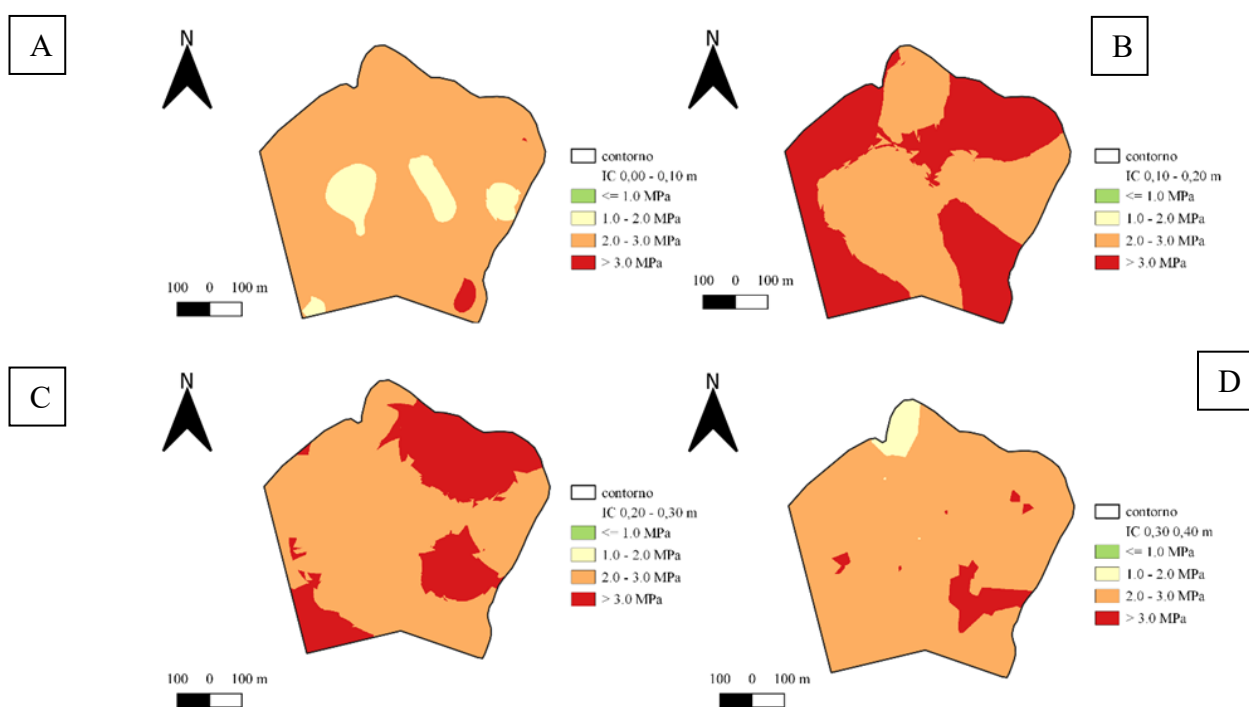
Para o  $C_0$ , os melhores valores são os que mais se aproximam de 0, nas quais se encaixam as variáveis de IC 0,00-0,10 m (0,049), IC 0,30-0,40 m (0,000) e pH 0,20-0,40 m (0,060). Para as demais variáveis, mesmo não possuindo valores tão próximos de zero, todos estes para variância foram distantes dos valores do efeito pepita e patamar, considerando-se bons para a dependência espacial.

O alcance da dependência espacial é um parâmetro importante do semivariograma, uma vez que define a distância máxima até onde o valor de uma variável possui relação de dependência espacial com seus vizinhos. O alcance variou entre 0,002 a 208,67 m para IC, de 399,90 a 449,46 m para matéria orgânica, 179,36 a 281,28 m para pH e para textura do solo de 276,30 a 449,46 m. Aquino et al. (2014) afirmam que o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando o limite de distância onde posterior a esta as amostras não são correlacionadas, ou seja, são aleatórias (ao acaso). Da mesma forma, o alcance da dependência espacial é essencial porque permite ao produtor identificar a extensão até a qual os valores de uma variável estão correlacionados espacialmente. Este conhecimento ajuda no planejamento do manejo agrícola, otimização do uso de insumos, melhoria da precisão nas previsões e identificação de padrões espaciais, promovendo uma gestão mais eficaz e sustentável das práticas agrícolas (Aquino et al., 2014).

Quanto ao avaliador de dependência espacial (ADE), foi observado que a variação foi baixa (0,229 a 1,000) com dependência espacial classificada como moderada a forte. Segundo Cambardella et al. (1994), as variáveis classificadas como forte dependência espacial podem ser mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo, enquanto a dependência espacial moderada possivelmente pode estar relacionada com a homogeneização do solo. Além disso, quanto ao avaliador de dependência espacial (ADE), Cornélio et al. (2021) observaram que a variação entre os atributos físicos do solo foi baixa (0,865 a 1,0), e que todos apresentaram dependência muito alta.

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), expressa pelo índice de cone (IC), é um fator crucial para a produtividade das atividades agrícolas, pois influencia diretamente o crescimento das raízes das plantas e a capacidade de absorção de água e nutrientes. A camada de IC de 0,10-0,20 m apresentou a maior média de resistência de 3 MPa e a camada de IC de 0,00-0,10 m teve a menor média com 2,35 MPa (Figura 2). Segundo Costa et al. (2021), em áreas com menores teores de água no solo, ao medir a resistência mecânica à penetração (IC), observam-se valores

mais elevados desse atributo. Isso se justifica pelo fato de que, mesmo após a primeira colheita, ainda não ocorreu um grande pisoteio das máquinas, resultando em níveis mais elevados de IC.



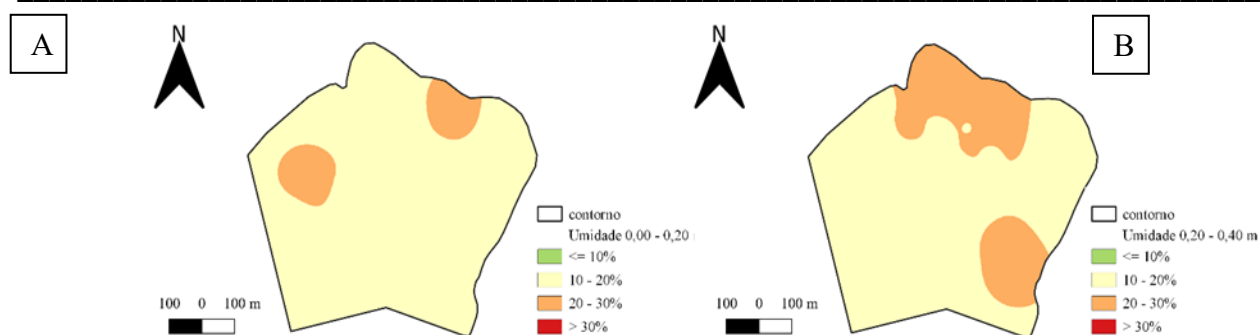
**Figura 01.** Mapas de variabilidade do índice de cone (IC) em diferentes profundidades (A: 0,0-0,10 m; B: 0,10-0,20 m; C: 0,20-0,30 m e D: 0,30-0,40 m) em uma área de estudo localizada no município de Itapaci - GO, no ano de 2024.

Para mitigar a alta resistência mecânica do solo, recomenda-se a adoção de práticas de manejo que reduzam a compactação. De acordo com Costa et al. (2021), uma das medidas é limitar o uso de máquinas pesadas no campo, especialmente quando o solo está úmido, para prevenir a compactação. Além disso, a implementação de sistemas de plantio direto pode diminuir a compactação ao longo do tempo, pois reduz o número de vezes que o solo é perturbado. Técnicas de aeração, como aração leve ou uso de ferramentas de aeração, podem ajudar a melhorar a estrutura do solo e reduzir a resistência mecânica do solo. Outra prática recomendada é manter o solo adequadamente irrigado, evitando tanto o excesso de umidade quanto a secura extrema, para manter uma resistência mecânica adequada ao crescimento das raízes. Essas práticas podem contribuir para um solo mais fértil e produtivo, favorecendo o crescimento saudável das plantas (Costa et al., 2021).

Martins et al. (2021) sugerem que valores de IC acima de 1 MPa podem reduzir o comprimento das raízes em até 50%, comprometendo a absorção de água e nutrientes pela soja. De acordo com Cintra et al. (2019), valores acima de 1,1 MPa já começaram a limitar o crescimento das raízes da soja, resultando em uma redução significativa na produtividade.

Bertollo et al. (2016) realizaram uma pesquisa para avaliar o crescimento radicular e a produtividade da soja subsequente a plantas de cobertura em áreas com níveis de compactação. Os autores confirmaram que os graus de compactação exercem influência sobre o crescimento da raiz da soja, em profundidade, fazendo com que o desempenho radicular concentre na camada aparente.

A umidade do solo desempenha um papel fundamental no IC, influenciando diretamente o crescimento das raízes das plantas. Em condições de baixa umidade, o IC tende a ser mais elevado, dificultando a capacidade das raízes de expandirem e absorverem água e nutrientes essenciais. Verificou-se que a umidade variou de 10% a 30%, apresentando a maioria da área com 20% de umidade em ambas as camadas (Figura 3). Resultados semelhantes foram encontrados por Araújo et al. (2014) e Campos (2013), que observaram valores de umidade próximos a 21,8% e 21,94%, respectivamente, para sistemas de cultivo de plantio direto.

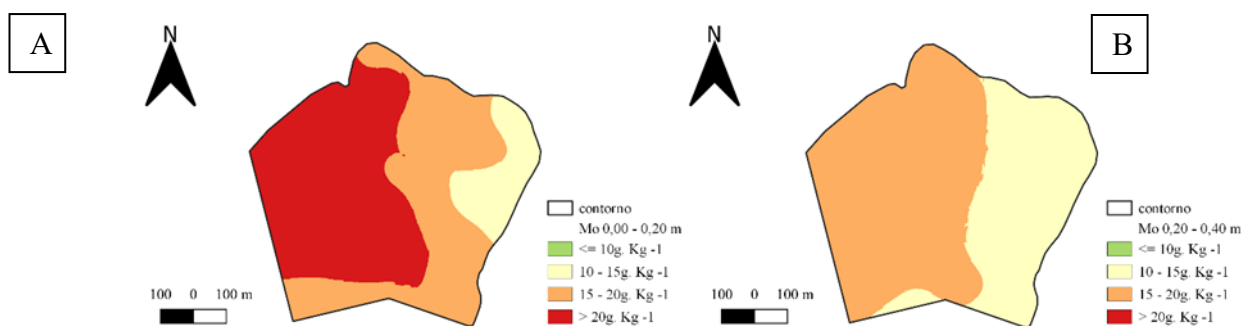


**Figura 02.** Mapas de variabilidade da umidade do solo em diferentes profundidades (A: 0,0-0,20 m e B: 0,20-0,40 m) em área estudada no município de Itapaci - GO. 2024.

Segundo Valente et al. (2019), o teor de água e a textura do solo são os fatores que mais influenciam na magnitude das medidas de IC, uma vez que a textura determina a distribuição dos poros e, conseqüentemente, a capacidade de retenção de água, que afeta diretamente a coesão entre as partículas do solo. A avaliação deve ser feita quando o solo está na capacidade de campo, que é quando o solo retém o máximo de água naturalmente. Quando não consegue fazer a mensuração da capacidade de campo do solo, deve-se adotar padrões de umidade do solo para realizar a medição da compactação. Solos arenosos de 1 a 2 dias após chuvas de mais de 30 mm e solos argilosos de 2 a 4 dias após chuvas de mais de 30 mm.

A matéria orgânica do solo é essencial para a fertilidade e saúde do ecossistema, desempenhando um papel fundamental na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Ela aumenta a estabilidade dos agregados, melhora a porosidade e a capacidade de retenção de água, o que é crucial para o desenvolvimento das raízes das plantas.

Os teores de matéria orgânica (M.O.) nas profundidades de 0,00-0,20 m apresentaram variação de  $15 \text{ g kg}^{-1}$  a  $20 \text{ g kg}^{-1}$ . Verificou-se que na região oeste da área ficaram concentrados valores maiores que  $20 \text{ g kg}^{-1}$  e na região central valores com 15 a  $20 \text{ g kg}^{-1}$ . Contudo, apenas uma fração leste da área apresentou teores de 10 a  $15 \text{ g kg}^{-1}$  (Figura 4). Em resultados encontrados por Silva (2021) na cultura da soja, teores de M.O. ficaram entre 1,7 a  $2,8 \text{ g kg}^{-1}$ , apresentando média geral da área de  $2,34 \text{ g kg}^{-1}$ .

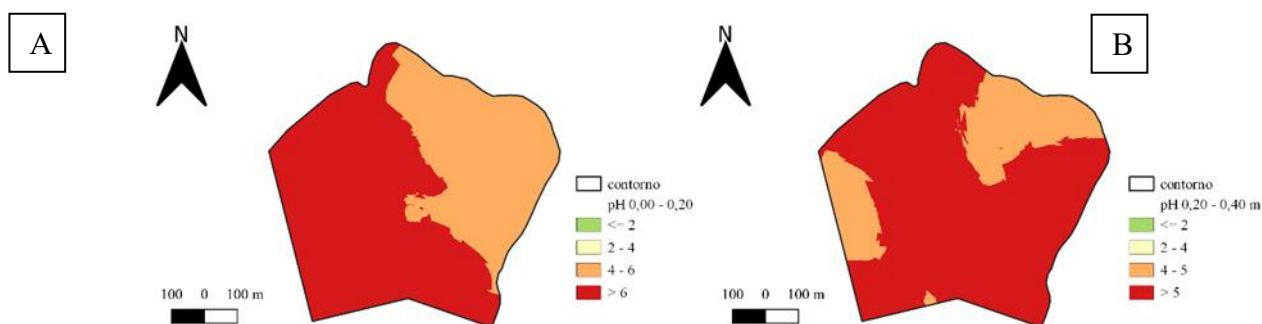


**Figura 03.** Mapas de variabilidade representando o teor matéria orgânica em diferentes profundidades (A: 0,00-0,20 m e B: 0,20-0,40 m) em área estudada no município de Itapaci - GO. 2024.

A M.O. do solo é originária de resíduos vegetais e animais que passam por uma dinâmica de processos físico-químicos. Essa dinâmica resulta em nutrientes que podem ser absorvidos pelas plantas além de atuar de forma benéfica na estruturação do solo. A utilização de práticas sustentáveis como o sistema de integração lavoura pecuária, plantio direto, a utilização de culturas de cobertura e pousio, sistemas agroflorestais, a longo prazo, podem aumentar e/ou manter a quantidade e a qualidade da M.O., promovendo a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Costa et al., 2020).

O manejo convencional da fertilidade do solo baseia-se na utilização de teores médios de referência dos nutrientes para a recomendação de fertilizantes e corretivos a serem aplicados, considerando as glebas como homogêneas entre si, o que pode superestimar ou subestimar a necessidade de insumos a serem utilizados na área (Souza et al., 2021).

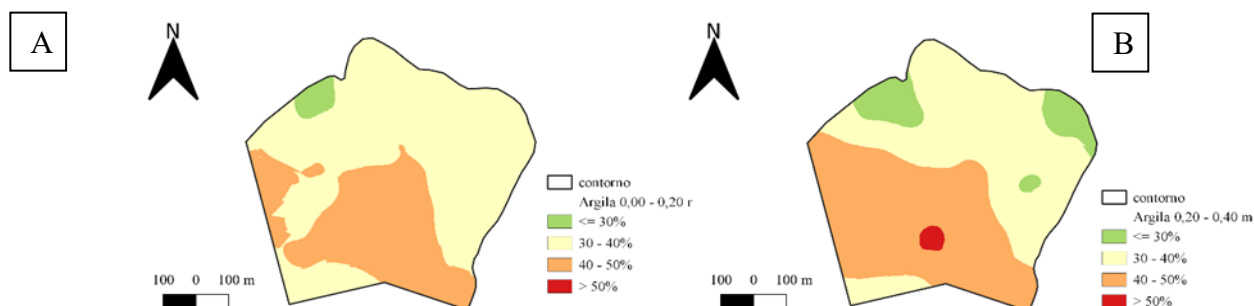
O pH do solo é um fator determinante para a saúde e a produtividade das culturas agrícolas, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Os valores observados de pH na camada de 0,00-0,20 m foram superiores a 4 (Figura 5), sendo que a faixa de pH 6 está presente na área leste, e pH maior que 6 na área oeste. Para a camada de 0,20-0,40 m, resultados foram superiores a 4. Sobral (2015) cita que pH menores que 5 são considerados baixos, pH de 5 a 6 são considerados médios e pH acima de 6 são considerados altos. Valores de pH abaixo de 5 são considerados baixos e podem afetar negativamente a disponibilidade de nutrientes e a saúde das plantas. Para solos com pH inferior a 5, recomenda-se a aplicação de calcário para elevar o pH e neutralizar a acidez do solo, promovendo assim um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das culturas (Sobral, 2015).



**Figura 04.** Mapas de variabilidade representando o pH em diferentes profundidades (A: 0,00-0,20 m e B: 0,20-0,40 m) em área estudada no município de Itapaci - GO. 2024.

Conhecer a textura do solo é fundamental para o manejo agrícola, pois determina as propriedades físicas do solo, como a capacidade de retenção de água, a drenagem e a aeração. A textura, que se refere à proporção de areia, silte e argila, influencia diretamente a fertilidade do solo e o desenvolvimento das raízes das plantas. A área foi classificada de textura argilosa, variando o teor de argila de 30% até 50% de argila (Figura 6). A profundidade de 0,00-0,20 m mostra um solo heterogêneo, com diferentes níveis de argila, de nordeste a noroeste ficando com 30 a 40% de argila e para o centro-sul de 40 a 50%. Para a camada de 0,20-0,40 m, 30 a 40% localizado em nordeste e noroeste da área, uma pequena camada de 40% de argila de noroeste até sudeste.

Segundo Santos e Petter (2018), solos argilosos apresentam desafios significativos de manejo devido à sua alta densidade e compactação. Estes solos exigem estratégias específicas, como aeração e adição de matéria orgânica, para melhorar a estrutura e permitir um melhor desenvolvimento das raízes das plantas. Além disso, esses solos são mais suscetíveis à compactação, o que pode dificultar os trabalhos mecanizados e a penetração das raízes.

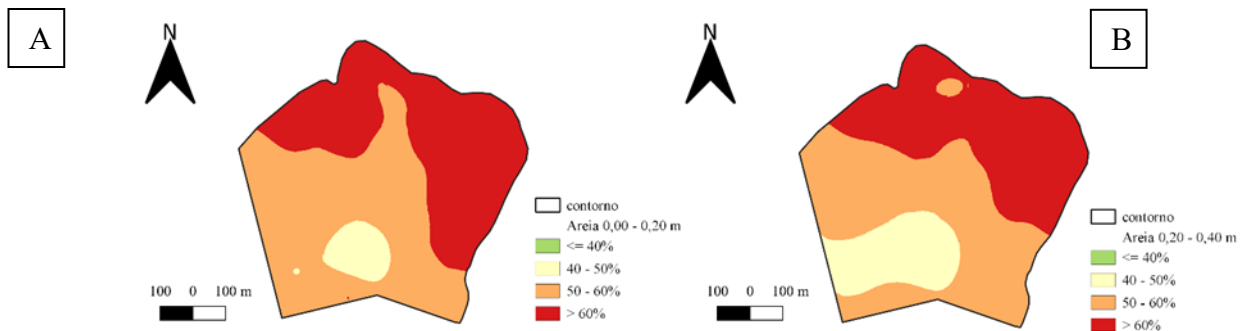


**Figura 05.** Mapas de variabilidade representando o teor de argila em diferentes profundidades (A: 0,00-0,20 m e B: 0,20-0,40 m) em área estudada no município de Itapaci - GO. 2024.

Santos (2018) caracterizou solos de textura argilosa, material com conteúdo de argila entre 35% e 60% de argila, solos de textura arenosa material que compreende as classes texturais areia e areia franca, ou seja, teor de areia

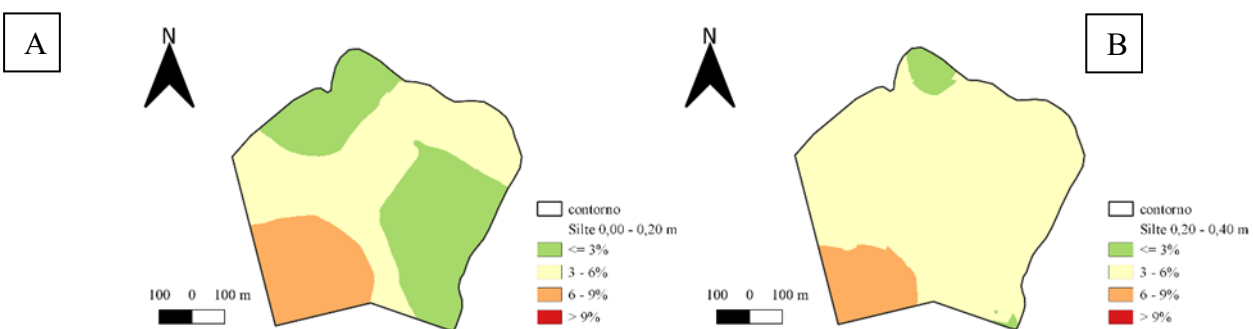
menos teor de argila > 70%, e textura média, material com menos de 35% de argila e mais de 15% de areia, excluídas as classes texturais areia e areia franca, e solos de textura siltosa são materiais com menos de 35% de argila e menos de 15% de areia.

Observou-se valores superiores a 60% de areia para as camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figura 7). A camada de 0,00-0,20 m apresentou de noroeste a leste valores superiores a 60%, de oeste a sudeste de 50 a 60% e apenas uma faixa em sudoeste com entre 40 a 50% de areia.



**Figura 06.** Mapas de variabilidade representando o teor de areia em diferentes profundidades (A: 0,00-0,20 m e B: 0,20-0,40 m) em área estudada no município de Itapaci - GO. 2024.

A quantidade de silte na área variou de 3% até 9% nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figura 8). A camada de 0,00-0,20 m na região noroeste e uma faixa de leste a sul está com valores de 3% de silte, e sudoeste superiores a 9%. Para camada de 0,20-0,40 m, houve predomínio de 3 a 6% de silte na área, apenas uma faixa em sudoeste com 6 a 9%, e uma em norte com valores menor que 3%. Os solos siltosos são constituídos de siltes, fragmentos de rochas. São solos que erodem facilmente e são considerados instáveis (Ferreira Júnior, 2021).



**Figura 07.** Mapas de variabilidade representando o teor de silte em diferentes profundidades (A: 0,00-0,20 m e B: 0,20-0,40 m) em área estudada no município de Itapaci - GO. 2024.

### 3. CONCLUSÕES

A adoção de uma malha amostral de 1 ha, com pontos aleatórios, foi eficaz para determinar a dependência espacial e mapear as variáveis estudadas. Os valores de resistência mecânica do solo à penetração por meio do índice de cone foram elevados, ultrapassando 2 MPa, o que pode limitar o desenvolvimento das raízes. O teor de matéria orgânica do solo (entre 15 g kg<sup>-1</sup> a 20 g kg<sup>-1</sup>) foi considerado adequado para o cultivo, promovendo um sistema produtivo saudável. O pH levemente ácido e a textura argilosa beneficiam a retenção de nutrientes e a capacidade de suporte para as culturas, sendo importante monitorar esses parâmetros regularmente para assegurar condições ótimas para a produção agrícola.

**Agradecimentos:** Ao Instituto Federal Goiano Campus Ceres, pela concessão de bolsa de iniciação científica, e realização das análises de solo.

## REFERÊNCIAS

- Aquino, R. E.; Campos, M. C. C.; Oliveira, I. A.; Marques Junior, J.; Silva, D. M. P.; Silva, D. A. P. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. *Bioscience Journal*, p. 988-997, 2014.
- Araújo, D. R.; Mion, R. L.; Sombra, W. A.; Andrade, R. R.; Amorim, M. Q. Variabilidade espacial de atributos físicos em solo submetido a diferentes tipos de uso e manejo. *Revista Caatinga*, v. 27, n. 2, p. 101-115, 2014.
- Bertollo, A. M.; Moraes, M. T.; Debiasi, H.; Franchini, J. C.; Mazurana, M.; Levien, R. Desenvolvimento radicular da soja subsequente a plantas de cobertura em Latossolo com níveis de compactação. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. XXXV, 2015. Natal: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, p. 1-4, 2016.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Oliveira, I. A.; Bergamim, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 8, n. 2, p. 305-310, 2013.
- Castione, G. A. F.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Campos, M. C. C.; Cunha, J. M. Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. *Revista Agroambiente On-line*, v. 9, n. 3, p. 219-226, 2015.
- Cherubin, M. R.; Santi, A. L.; Eitelwein, M. T.; Menegol, D. R.; Da Ros, C. O.; Pias, O. H. C.; Berghetti, J. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. *Ciência Rural*, v. 44, p. 425-432, 2014.
- Cintra, J. et al. Avaliação da resistência mecânica do solo em diferentes sistemas de manejo e suas implicações na cultura da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, p. 1-12, 2019.
- Cornélio, V. L.; Compagnon, A. M.; Pereira Filho, W. J.; Silveira, M. G.; Cintra, P. H. M. Métodos de posicionamento para a determinação da variabilidade espacial de atributos do solo. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, v. 24, n. 3, p. 87-99, 2021.
- Costa, J. M.; Silva, H. R.; Oliveira, L. M. Impacto da compactação do solo na produtividade agrícola. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, n. 3, p. 213-221, 2021.
- Donagemma, G. K.; Campos, D. V. B. de; Calderano, S. B.; Teixeira, W. G.; Viana, J. H. M. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 230 p., 2011.
- Faria, A. M.; Silva, J. R. Agricultura de precisão no setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo: vantagens e desafios. *Acadêmico de Semântica*, 2023.
- Ferreira Júnior, A. V. Fundamentos de geologia e petrografia. Coleção Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, 2021.
- Gama Pinto, F. J., Meneses de Brito, A. P., Barbosa da Silva, F. D., & da Silva Nogueira, R. Influência do fogo na variabilidade espacial dos atributos químicos do solo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 14, n. 5, 2020.
- Gomes, A.; Santos, P. H. L. S.; Nascimento, J. M.; Arcoverde, S. N. S.; Secretti, M. L.; Costa, E. G. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade da soja. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica*, v. 18, n. 2, 2021.
- Inamasu, R. Y.; Bernardi, A. C. C. Agricultura de precisão. In: Bernardi, A. C. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014, p. 21-33.
- Klein, V. A. Física do solo. 3. ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2014.
- Lima, I. M. A.; Araújo, M. C.; Barbosa, R. S. Avaliação das propriedades físicas do solo em sistemas silvipastoris. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 9, n. 1, p. 117-124, 2013.
- Martins, A. et al. Influência da resistência mecânica do solo na produtividade da soja em diferentes condições de umidade. *Engenharia Agrícola*, v. 3, p. 1-12, 2021.
- Oliveira, A. J.; Silva, G. F.; Silva, G. R.; Santos, A. A. C.; Caldeira, D. S. A.; Vilarinho, M. K. C.; Barelli, M. A. A.; Oliveira, T. C. Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 9, p. 64140-64149, 2020.
- Pereira, G. W.; Valente, D. S. M.; Queiroz, D. M.; Coelho, A. L. F. SMART-MAP: Plugin QGIS para interpolação utilizando krigagem ordinária e machine learning. In: Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO), 14., 2023. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023. p. 127-134.

- Sampietro, J. A.; Lopes, E. S. Compactação de um Cambissolo causada por máquinas de colheita florestal especializada com geoestatística. *Floresta*, v. 46, n. 3, p. 307-314, 2016.
- Santos, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Solos, DF, 353 p. 2018.
- Silva, G. C. Variabilidade espacial das frações da matéria orgânica do solo e sua importância na produtividade da soja. 2021.
- Silva, P., Chaves, L. H. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, p. 431-436, 2021.
- Silva, R.; Gomes, C.; Almeida, L. Influência da argila na retenção de água e nutrientes no solo. 2019.
- Soares, M. D. R.; Campos, M. C. C.; Souza, Z. M.; Brito, W. B. M.; Francisco, U. F.; Castioni, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 58, n. 4, p. 434-441, 2015.
- Sobral, L. F.; Barretto, M. C. V.; Silva, A. J.; Anjos, J. L. Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. Embrapa, 2015.
- Souza, E. B.; Patrocínio Filho, A. P.; Pimenta, W. A.; Nagahama, H. J.; Cortez, J. W. Nota técnica: resistência mecânica do solo à penetração em função da sua umidade e do tipo de penetrômetro. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 22, n. 1, p. 67-76, 2014.
- Torres, J. L. R.; Costa, D.; Silva Neto, O. F. Avaliação da resistência à penetração e densidade do solo num Latossolo sob semeadura direta há doze anos. *Global Science and Technology*, v. 8, n. 1, p. 131-140, 2015.
- Valente, G. F.; Silva, V. F. A.; Silva, J. N.; Pinto, D. R. S.; Galvão, J. R. Resistência mecânica à penetração em sistemas de manejo do solo. *Revista Verde*, p. 140-145, 2019.