INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMOSTRAS NO MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO

Maria Vitória Loiola Carvalho[1], Rosa Jaqueline de Souza Cardoso[1], João Luiz Jacintho[1], Rodrigo Nogueira Martins[2]

[1]Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) – Campus Araçuaí, Estrada São José do Caraí, nº 385 - CEP 39.606-270 - Bairro Universitários, Araçuaí – MG, Brasil, mvlc@aluno.ifnmg.edu.br, rjdsc@aluno.ifnmg.edu.br, joao.jacintho@ifnmg.edu.br
[2]Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) – Campus Salinas, Fazenda Varginha, Km 02, Rod. Salinas/Taiobeiras, Zona Rural — CEP: 39560-000, Salinas – MG, Brasil, rodrigo.nogueira@ifnmg.edu.br.

Resumo
Este estudo avaliou a influência de diferentes densidades de amostragem na qualidade de mapas de variabilidade espacial do carbono orgânico do solo (SOC), argila, pH e altitude, em uma área de produção de grãos. Para tal, foram utilizadas três grades amostrais, com 150, 114 e 66 pontos, analisadas por estatística descritiva e geoestatística, com ajuste de semivariogramas e interpolação por krigagem ordinária. Os coeficientes de variação foram baixos para todas as variáveis (< 12%), sendo a altitude a mais homogênea. A redução do número de pontos aumentou o efeito pepita e reduziu o coeficiente de determinação da validação cruzada, sobretudo para argila e pH, enquanto a altitude manteve valor elevado ($R^2 > 0,96$) em todas as grades. Ainda assim, os mapas gerados com menor densidade amostral apresentaram forte correlação com os da grade de referência ($r \geq 0,85$), indicando que reduções moderadas no número de amostras preservam o padrão espacial geral, com potencial de redução de custos operacionais em agricultura de precisão.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Krigagem ordinária. Variabilidade espacial.

Área do Conhecimento: Ciências agrárias – Engenharia agrícola.

Introdução

A agricultura de precisão (AP) reúne um conjunto de tecnologias voltadas ao gerenciamento da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo e das plantas, com vistas à otimização da produção agrícola (Mazzi et al., 2023). A eficácia dessas estratégias depende diretamente da capacidade de mapear e compreender essa variabilidade, o que contribui para aumentar a eficiência produtiva, reduzir impactos ambientais e promover manejo mais racional dos insumos. Nesse contexto, o conhecimento detalhado da estrutura espacial dos atributos do solo é essencial para a geração de mapas confiáveis, que subsidiem a definição de zonas de manejo diferenciado.

A variabilidade dos atributos do solo está associada tanto às condições ambientais quanto às práticas de manejo adotadas na área, podendo variar ao longo da paisagem em função da intensidade dos processos de formação do solo e do histórico de uso agrícola (Gomes et al., 2022). Entre as ferramentas empregadas para descrever essa variabilidade, a geoestatística, fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, permite quantificar a dependência espacial por meio do ajuste de semivariogramas e realizar a interpolação de valores em locais não amostrados por meio da krigagem ordinária (Webster; Oliver, 2007).

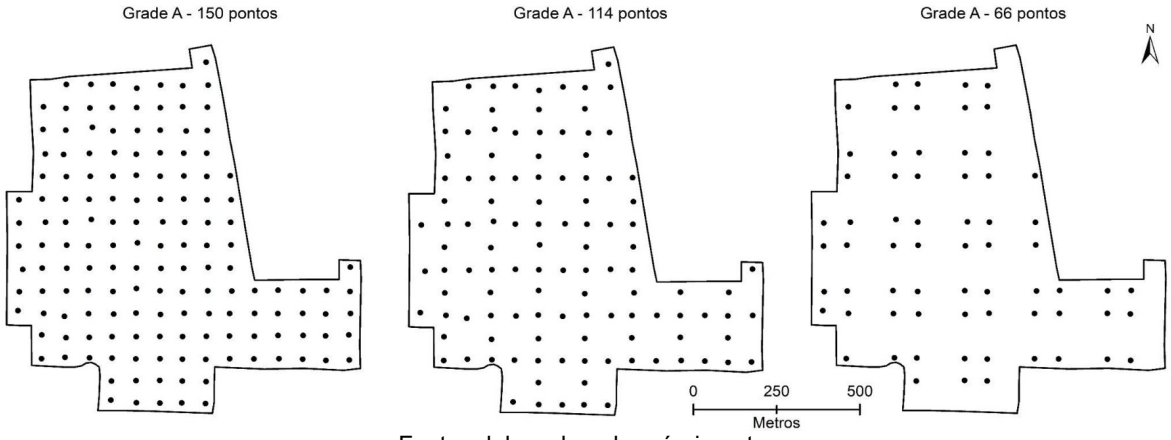
Um dos parâmetros centrais do semivariograma é o efeito pepita (C0), que representa a variabilidade não explicada em distâncias inferiores ao menor espaçamento amostral, decorrente de erros de medição e de microvariações espaciais (McBratney; Webster, 1986). O efeito pepita tende a ser diretamente influenciado pela densidade e pela distribuição espacial dos pontos amostrais: à medida que o número de amostras diminui, reduz-se a capacidade de capturar a variabilidade em pequenas distâncias, o que geralmente eleva o efeito pepita e compromete a eficiência da estimativa espacial. Por outro lado, estudos conduzidos em áreas de cana-de-açúcar demonstraram que, a partir de determinado número de pontos, incrementos na densidade amostral não produzem melhorias significativas na precisão da krigagem, o que sugere a existência de um patamar de custo-benefício

entre a intensidade de amostragem e a qualidade dos mapas gerados (Souza et al., 2014). Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de três densidades de amostragem (150, 114 e 66 pontos) sobre a caracterização e o mapeamento da variabilidade espacial de SOC, argila, pH e altitude em uma área agrícola, verificando simultaneamente a qualidade do ajuste geoestatístico e a concordância entre os mapas produzidos.

Metodologia

O estudo foi conduzido em uma área comercial de produção de grãos, com 79 hectares, localizada no município de Goianápolis, Goiás, Brasil (16°27'49,86" S; 48°59'41,53" W). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 2013). Os dados utilizados foram obtidos do banco de dados disponibilizado por Schmidinger et al. (2025), composto por 150 amostras de atributos físico-químicos do solo, coletadas na profundidade de 0–20 cm, além de atributos topográficos referentes ao momento da coleta. Foram consideradas as seguintes variáveis: carbono orgânico do solo (SOC), teor de argila, pH e altitude. O SOC foi determinado por titulação após oxidação do carbono orgânico, conforme detalhado por Walkley e Black (1934), a argila conforme Gee e Bauder (1986) e o pH foi determinado em suspensão aquosa, segundo a metodologia da Embrapa (2017). Os dados de altitude foram derivados de um Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido a partir da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Para avaliar a influência da densidade amostral na geração dos mapas de variabilidade espacial, foram construídas duas grades adicionais a partir da grade A, composta por 150 pontos (Figura 1). A Grade B (114 pontos) foi obtida pela remoção sistemática de uma linha de pontos nas direções vertical e horizontal em relação à Grade A. A Grade C (66 pontos) foi gerada pela remoção de duas linhas nas mesmas direções.

Figura 1 – Grades de amostragem utilizadas na geração dos mapas de variabilidade espacial



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na sequência, os dados de SOC, argila, pH e altitude foram submetidos à estatística descritiva, com cálculo dos valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e CV. A dispersão dos dados foi classificada conforme Warrick e Nielsen (1980): baixa variabilidade quando CV < 12%, moderada quando 12% ≤ CV < 60% e alta quando CV ≥ 60%. Em seguida, procedeu-se à análise geoestatística, na qual a estrutura espacial das variáveis foi caracterizada pelo ajuste de semivariogramas teóricos (modelos esférico, exponencial e gaussiano), selecionados com base no R^2 e na raiz do erro quadrático médio (RMSE) obtidos por validação cruzada.

Para cada modelo, foram estimados os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (A). O grau de dependência espacial das variáveis foi avaliado por meio do Índice de Moran univariado. A krigagem ordinária foi empregada para a geração dos mapas de variabilidade espacial, com uso do *plugin Smart Map* no *software* QGIS (Pereira et al., 2022). Para avaliar a concordância entre os mapas obtidos a partir das três grades amostrais, os valores dos atributos do solo foram extraídos com base na Grade A, por meio da ferramenta "estatística por zonas" do QGIS, e submetidos à análise de correlação de *Pearson*, ao nível de significância de 1% ($p < 0,01$).

Resultados

A redução do número de pontos não alterou substancialmente as médias, os valores extremos ou a dispersão dos atributos (Tabela 1). Os valores do CV foram baixos em todas as situações, variando de 0,71% a 10,97%, indicando baixa variabilidade relativa, segundo a classificação de Warrick e Nielsen (1980). A altitude apresentou a menor variabilidade (0,71–0,77%), enquanto o SOC apresentou os maiores CVs entre as três grades (de 8,69 a 10,97%).

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos do solo usando as três grades de amostragem.

Variável	n	Média	Valor mínimo	Valor máximo	DP	CV (%)
SOC	150	1,03	0,87	1,45	0,10	9,71
	114	1,03	0,87	1,28	0,09	8,69
	66	1,04	0.87	1,45	0,11	10,97
Argila	150	33,11	26,00	44,00	3,37	10,17
	114	33,11	26,00	44,00	3,37	10,17
	66	33,36	28,00	43,00	3,18	9,53
pH	150	6,76	5,80	7,60	0,30	4,43
	114	6,73	5,80	7,60	0,29	4,27
	66	6,73	5,80	7,30	0,32	4,80
Altitude	150	1020,36	995,16	1035,01	7,81	0,77
	114	1020,42	995,16	1035,01	7,80	0,76
	66	1020,90	1000,84	1035,01	7,30	0,71

SOC. Carbono orgânico do solo; n, número de amostras; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Os resultados mostram que a retirada de pontos preservou as estatísticas centrais, principalmente para argila e pH. Isso sugere que a redução amostral não introduziu, por si só, uma alteração importante na distribuição global dos valores. Entretanto, a estatística descritiva não informa como os valores estão espacialmente organizados. Portanto, médias semelhantes entre grades de amostragem não significam necessariamente que os mapas produzidos pela krigagem apresentam o mesmo desempenho.

A Tabela 2 demonstra que os atributos apresentaram estruturas de variabilidade espacial distintas, refletidas principalmente pelos modelos de semivariograma, efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (A). O efeito pepita foi baixo para a maioria dos atributos, indicando que parcela relevante da variabilidade ocorre de forma espacialmente estruturada. O alcance também variou entre os atributos, sendo maior para pH e altitude (aproximadamente 660–708 m), enquanto a argila apresentou os menores alcances (207–293 m), indicando menor continuidade espacial. O SOC apresentou comportamento intermediário, com alcances entre 357 e 405 m. A altitude, além do maior alcance e menor efeito pepita, apresentou os maiores valores de Moran, evidenciando uma estrutura espacial mais contínua e estável.

A redução da densidade amostral provocou alterações nos parâmetros dos semivariogramas, sobretudo nos modelos ajustados e nos alcances, mas não eliminou a estrutura espacial dos atributos. O SOC manteve alcances semelhantes nas Grades A e B, aumentando na Grade C; a argila apresentou maior variação entre as grades, enquanto pH e altitude foram relativamente mais estáveis. Na validação cruzada, a altitude apresentou os melhores resultados (R^2 = 0,960–0,993), enquanto a argila apresentou os menores (R^2 = 0,242–0,289). Assim, os resultados indicam que a influência da densidade amostral sobre a representação da variabilidade espacial depende do atributo, sendo necessário considerar conjuntamente os parâmetros do semivariograma e o desempenho da interpolação.

Tabela 2 - Parâmetros do semivariograma e resultados da validação cruzada dos atributos do solo obtidos usando as três grades de amostragem.

Variável	Variograma	C_o	$C_o + C$	A	I. Moran	R^2	RMSE
Grade A – 150 pontos							
SOC	Gaussiano	0,003	0,011	356,535	0,755	0,597	0,064
Argila	Esférico	0,484	12,137	269,531	0,639	0,269	2,875
pH	Gaussiano	0,044	0,113	676,855	0,744	0,455	0,220
Altitude	Gaussiano	0,000	74,882	707,627	0,974	0,993	0,659
Grade B – 114 pontos							
SOC	Esférico	0,002	0,008	361,935	0,651	0,464	0,065
Argila	Exponencial	0,000	12,300	207,176	0,544	0,242	2,950
pH	Exponencial	0,023	0097	693,562	0,576	0,271	0,247
Altitude	Gaussiano	0,000	69,496	684,653	0,952	0,960	1,617
Grade C – 66 pontos							
SOC	Gaussiano	0,004	0,012	404,754	0,773	0,526	0072
Argila	Exponencial	0,857	11,234	292,904	0,687	0,289	2,670
pH	Gaussiano	0,040	0,143	660,776	0,759	0,595	0,206
Altitude	Gaussiano	0,000	62,232	694,686	0,974	0,988	0,811

SOC. Carbono orgânico do solo; C_o, Efeito pepita; $C_o + C$, Patamar; A, Alcance; R^2, Coeficiente de determinação obtido na validação cruzada; RMSE, Raiz do erro quadrático médio; *, **, ***, significativo à 5, 1 e 0,1% no teste de pseudo-significância com 999 permutações. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A Figura 1 evidencia que os padrões de distribuição espacial dos atributos foram, em geral, preservados entre as três grades de amostragem, embora com diferenças no nível de detalhamento. O carbono orgânico do solo (A, B e C) apresenta maiores valores predominantemente no setor oeste da área, enquanto a argila (D, E e F) apresenta distribuição mais heterogênea, com maiores valores concentrados principalmente na região central e oeste. O pH (G, H e I) apresenta maiores valores predominantemente na região central da área, formando uma faixa de maior concentração que se estende aproximadamente no sentido norte-sul. A altitude (J, K e L) apresenta distribuição espacial mais uniforme, com maiores valores concentrados principalmente na região norte e redução gradual em direção às demais porções da área. De modo geral, os mapas das diferentes grades mantêm os padrões espaciais dos atributos, indicando que a redução da densidade amostral não alterou substancialmente a distribuição espacial geral, embora tenha provocado diferenças no detalhamento das áreas de maior e menor ocorrência.

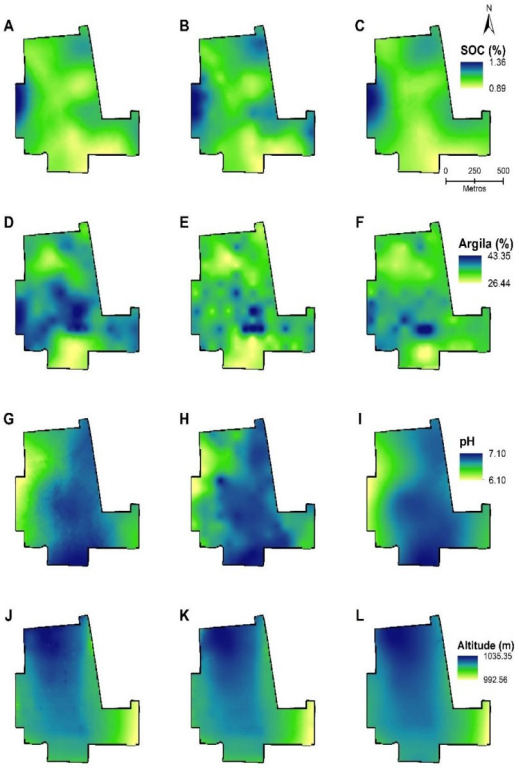
A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de correlação de *Pearson* e demonstra elevada concordância entre os mapas gerados pelas diferentes densidades amostrais, com todas as correlações de *Pearson* significativas a 1% ($p < 0,01$). Os maiores valores foram observados para a altitude ($r = 0,99$) e pH ($r = 0,94–0,98$), indicando que a redução de 150 para 114 e 66 pontos preservou de forma consistente a distribuição espacial desses atributos. O SOC também apresentou elevada correlação entre as grades ($r = 0,96–0,97$), enquanto a argila apresentou os menores coeficientes ($r = 0,85–0,88$), embora ainda evidenciando forte concordância espacial. Em conjunto com os resultados dos semivariogramas e dos mapas de variabilidade espacial, esses resultados indicam que a redução da densidade amostral não alterou substancialmente o padrão espacial dos atributos, sugerindo que grades menos densas podem reproduzir adequadamente a distribuição espacial observada na grade de 150 pontos, especialmente para altitude, pH e SOC.

Tabela 3 - Correlação de *Pearson* entre os dados extraídos dos mapas de variabilidade espacial obtidos usando as grades de amostragem A (150 pontos), B (114 pontos) e C (66 pontos).

SOC – A		Argila – A		pH – A		Altitude – A	
SOC – A	-	Argila – A	-	pH – A	-	Altitude – A	-
SOC – B	0,97**	Argila – B	0,85**	pH – B	0,94**	Altitude – B	0,99**
SOC – C	0,96**	Argila – C	0,88**	pH – C	0,98**	Altitude – C	0,99**

A, B e C, referem-se as variáveis obtidas usando a grade de amostragem A (150 pontos), B (114 pontos) e C (66 pontos); SOC, Carbono orgânico do solo; **, Correlações significativas pelo teste *t* ao nível de 1% ($p < 0,01$). Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Figura 1 - Mapa de variabilidade espacial do carbono orgânico do solo (A, B, C), argila (D, E, F), pH (G, H, I) e altitude do terreno (J, K, L).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Discussão

A redução da densidade amostral de 150 para 114 e 66 pontos não alterou substancialmente a representação espacial dos atributos, embora tenha provocado mudanças na estrutura dos semivariogramas. Esse comportamento reforça que a resposta à redução amostral é dependente do atributo, conforme observado por Yu et al. (2011) para o carbono orgânico e por Silvero et al. (2018) para atributos físicos do solo. A baixa variabilidade observada para SOC, argila e pH também é compatível com estudos em Latossolos, como o de Sanchez et al. (2005), que encontrou CV próximo de 10% para argila. A altitude apresentou maior estabilidade espacial, mantendo padrão semelhante entre as grades e elevada capacidade de predição, característica associada à continuidade da superfície topográfica. Em contraste, a argila apresentou menor desempenho na validação e maior sensibilidade à redução amostral, evidenciando que atributos distintos podem exigir diferentes densidades de amostragem. Além disso, as elevadas correlações entre os mapas (r = 0,85–0,99) indicam que, mesmo com menor número de pontos, o padrão espacial geral foi preservado. Esse resultado corrobora Souza et al. (2014), que demonstraram que a redução da intensidade amostral pode ser viável sem comprometer significativamente a representação espacial, desde que a densidade seja compatível com o atributo e a finalidade do mapeamento. Assim, a Grade B (114 pontos) apresenta-se como uma alternativa potencialmente eficiente entre custo amostral e preservação da informação espacial.

Conclusão

A redução da densidade amostral de 150 para 114 e 66 pontos preservou, de modo geral, a representação da variabilidade espacial dos atributos avaliados. A Grade B (114 pontos) apresentou-se como alternativa potencial para reduzir o esforço amostral sem comprometer significativamente a distribuição espacial dos mapas. Entretanto, a resposta à redução da amostragem foi distinta entre os atributos, sendo a argila mais sensível e a altitude mais estável. Assim, a densidade amostral deve ser definida considerando o atributo e a qualidade de representação espacial requerida.

Referências

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 574 p.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, Arnold (ed.). **Methods of soil analysis: Part 1: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. p. 383–411.

GOMES, A. D. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade da soja. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 18, n. 2, 2022.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v. 37, n. 4, p. 617–639, 1986.

MAZZI, J. V. C. et al. Agricultura de precisão no setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo: vantagens, desvantagens e desafios. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 7, p. 11943–11959, 2023.

PEREIRA, G. W. et al. Smart-Map: an open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1350, 2022.

SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 489–495, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400008.

SCHMIDINGER, J. et al. LimeSoDa: A dataset collection for benchmarking of machine learning regressors in digital soil mapping. **Geoderma**, v. 459, p. 117337, 2025.

SILVERO, N. E. Q. et al. Sampling density for characterizing the physical quality of a soil under coffee cultivation in southwestern Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 5, p. 718–727, 2018.

SOUZA, Z. M. et al. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 2, p. 261–268, 2014.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D. (ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. p. 319–344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 332 p.

YU, Dong-Sheng et al. Effect of soil sampling density on detected spatial variability of soil organic carbon in a red soil region of China. **Pedosphere**, v. 21, n. 2, p. 207–213, 2011.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) – Campi Araçuaí e Salinas pelo apoio à pesquisa.