



I CONGRESSO PERNAMBUCANO DE RECURSOS HÍDRICOS

Água para o Desenvolvimento
Recife, 24, 25 e 26 de Março de 2026

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E ÍNDICES MULTIESPECTRAIS EM ÁREA IRRIGADA COM ÁGUA DE REÚSO

Eric Gabriel Fernandez A. da Silva¹; Thayná Alice Brito Almeida¹ & Abelardo Antônio de Assunção Montenegro¹

Palavras-chave: drone; geoestatística; índices espectrais; cokrigagem;

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto é amplamente utilizado na agricultura de precisão, especialmente com o uso de VANTs equipados com câmeras RGB e multiespectrais, que oferecem alta resolução espacial e maior frequência de aquisição de dados e têm demonstrado elevado potencial no monitoramento ambiental, na identificação de solos expostos, contribuindo para o manejo agrícola sustentável (Lourenço et al., 2023).

Entre os principais índices de vegetação destacam-se o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e o Enhanced Vegetation Index (EVI), sendo índices que utilizam bandas fora do espectro visível para captura de informações ambientais. Estes índices permitem a estimativa indireta de atributos do solo e sua espacialização por meio de técnicas geoestatísticas, com destaque para a cokrigagem, que incorpora variáveis secundárias correlacionadas e reduz a incerteza das estimativas em relação a métodos convencionais (Almeida et al., 2025).

No semiárido brasileiro, o uso de água de reúso para irrigação surge como alternativa sustentável frente à escassez hídrica, embora ainda existam riscos associados à salinização do solo. Nesse contexto, este estudo avaliou a eficiência de índices biofísicos derivados de imagens multiespectrais na redução das incertezas do mapeamento geoestatístico da matéria orgânica e da condutividade elétrica do solo em área cultivada com palma forrageira irrigada com água de reúso, no semiárido de Pernambuco.

METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em uma unidade experimental no Assentamento Nossa Senhora do Rosário, localizada no município de Pesqueira – PE, inserida na bacia representativa do Mimoso. A área é classificada como semiárida, com precipitação média anual de 630 mm, evapotranspiração potencial de 2.000 mm e temperatura média anual de 23 °C (Almeida et al., 2024). Na unidade experimental foi implantada palma forrageira (*Opuntia cochenillifera*) Orelha de Elefante em maio de 2022, espaçada de 1.0 m por 0.2 m, irrigada por sistema de gotejamento com vazão de 1.2 l/h utilizando esgoto doméstico tratado por meio de um sistema SARA (Saneamento Ambiental e Reúso de Água), descrito por Mayer et al. (2021).

¹) Universidade Federal Rural de Pernambuco; R. Dom Manuel de Medeiros, S/N; eric.fernandez@ufrpe.br; thayna.britoalmeida@ufrpe.br; montenegroufrpe@gmail.com

A condutividade elétrica foi estimada a partir da extração da pasta de saturação seguindo a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) e o Carbono Orgânico determinado conforme a metodologia de Yeomans e Bremmer (1988), por oxidação com Dicromato de Potássio, seguindo uma malha regular de 2x1 m², totalizando 96 pontos, em profundidade 0-0.1 m.

Foram capturadas imagens com diferentes bandas e determinados índices espectrais utilizando um drone multiespectral DJI Phantom 4, composto de 6 câmeras (Vermelho (R), Verde (G), Azul (B), Borda do Vermelho (RE), Infravermelho próximo (NIR) e imagem composta) com resolução espacial de 1.6 cm por pixel, com voos realizados a uma altura de 40 metros e 2 MP de resolução (Lourenço et al., 2023). Os índices utilizados na análise foram o NDVI, e EVI, índices que utilizam bandas dentro e fora do espectro visível, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Índices espectrais utilizados para correlação com dados observados

Índice	Nome	Equação	Referência
NDVI	Normalized Difference	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse et al. (1974)
	Vegetation Index		
EVI	Enhanced Vegetation Index	$\frac{2.5 * (NIR - R)}{NIR + 6.0 * R - 7.5 * B}$	Huete et al. (1997)

Em que, B: azul; R: vermelho; NIR: infravermelho próximo.

A extração dos índices foi realizada a partir de uma malha regular de pontos com espaçamento de 0,5 × 0,5 m. Procedeu-se à análise estatística descritiva, incluindo média, valores mínimo e máximo, quartis, desvio padrão e coeficiente de variação, este último classificado segundo o critério de Warrick e Nielsen (1980). A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov–Smirnov a 5% de probabilidade, a presença de tendência verificada conforme a metodologia proposta por Andrade et al. (2012) e os valores extremos identificados e removidos com base no método de Hoaglin et al. (1992).

A análise geoestatística foi conduzida por meio da modelagem de semivariogramas teóricos, validados pelo método de validação cruzada *leave-one-out*. Após a validação dos modelos, aplicou-se a krigagem para a estimativa dos valores e de seus respectivos desvios-padrão. Para avaliar a correlação entre a variável primária e os índices espectrais, utilizou-se a cokrigagem, com base na modelagem de semivariogramas cruzados, permitindo a análise dos desvios-padrão obtidos a partir do uso da variável secundária, conforme detalhado em Silva et al. (2025).

RESULTADOS

Com base na análise estatística realizada, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de estatística descritiva para as variáveis condutividade elétrica, matéria orgânica, EVI e NDVI

	Média	Mínimo	Máximo	DP	CV	1º Q	3º Q	LL	UL
EC	1.830	0.118	5.680	1.563	0.854	0.448	3.245	-3.747	7.440
OM	33.831	11.563	61.431	9.337	0.276	26.53	40.108	6.163	60.475
EVI	0.440	0.200	0.721	0.092	0.208	0.380	0.496	0.205	0.671
NDVI	0.218	0.107	0.332	0.044	0.203	0.187	0.247	0.098	0.336

Em que, DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Q: Quartil; LL: Limite inferior; UL: Limite superior

A condutividade elétrica (CE) apresentou coeficiente de variação de 0.854, caracterizando alta variabilidade espacial, enquanto a matéria orgânica (MO), o EVI e o NDVI apresentaram variabilidade moderada. Os valores médios e a amplitude observada entre os valores mínimos e máximos, indicam heterogeneidade espacial mais acentuada para a CE, refletida também no maior desvio padrão em comparação às demais variáveis.

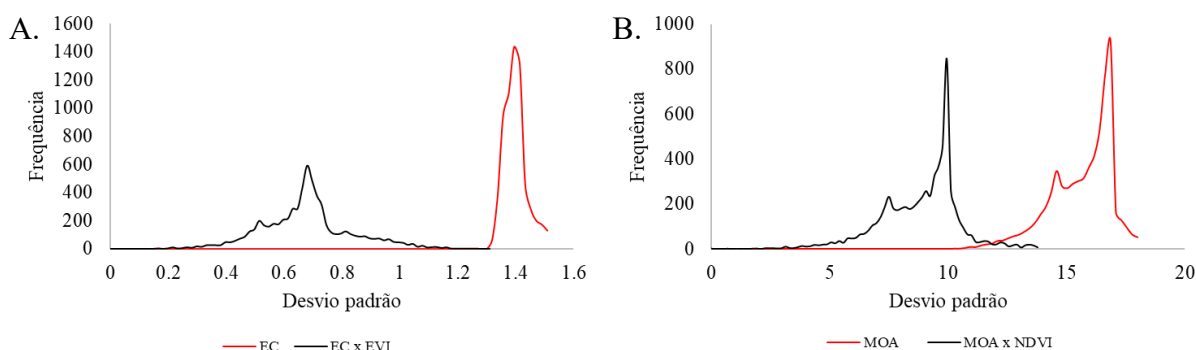
A Tabela 3 apresenta os modelos de semivariogramas simples e cruzados ajustados a partir da análise geoestatística. Observa-se adequado ajuste dos modelos exponencial e gaussiano às variáveis analisadas, com diferenças nos parâmetros de efeito pepita, patamar e alcance, evidenciando distintos níveis de dependência espacial e escalas de continuidade entre a CE, a MO e os índices espectrais.

Tabela 3 – Modelos de semivariogramas e semivariogramas cruzados ajustados

	CE	CE x EVI	MO	MO x NDVI
Modelo	Exponencial	Gaussiano	Exponencial	Gaussiano
Efeito pepita	1.238	0.024	12.600	0.000
Patamar	2.580	0.080	97.000	0.069
Alcance	2.300	7.500	1.300	6.500

A partir dos semivariogramas validados e dos mapas gerados por krigagem, analisaram-se as frequências dos desvios-padrão associados às estimativas da condutividade elétrica (Figura 1a) e da matéria orgânica (Figura 1b).

Figura 1 – Frequência de desvio padrão para a condutividade elétrica (a) e matéria orgânica (b)



Os resultados indicam média de desvio padrão de 1.39 para a condutividade elétrica, sendo reduzida para 0.67 após correlação e estimativa utilizando o EVI. Por outro lado, para a matéria orgânica, observou-se desvio médio de 15.55 para a variável isolada e 8.78 quando correlacionado com o NDVI. Mais detalhes podem ser encontrados em Silva et al. (2025).

CONCLUSÕES

As análises demonstraram o potencial de uso de imagens de drones na melhoria de estimativa das variáveis primárias. O NDVI demonstrou bom desempenho de índice para melhoria das estimativas, especialmente em malhas com maior resolução. O índice EVI apresentou boa resposta na melhoria da estimativa da condutividade elétrica, indicando alta correlação com os sais presentes no solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Projeto MAIDAI processo 403.622/2020-4), FACEPE e CAPES, pelo apoio financeiro, à UFRPE pelo apoio institucional, e ao Laboratório de Água e Solo da UFRPE.

REFERÊNCIAS

- Almeida, T.A.B.; Montenegro, A.A.A.; de Lima, J.L.M.P.; Farias, C.W.L.A.; Carvalho, A.A.; de Paiva, A.L.R. Spatiotemporal Variability of Groundwater Quality for Irrigation: A Case Study in Mimoso Alluvial Valley, Semiarid Region of Brazil. *Water* **2025**, *17*, 410.
- Almeida, T.A.B.; Montenegro, A.A.d.A.; Mackay, R.; Montenegro, S.M.G.L.; Coelho, V.H.R.; Carvalho, A.A.d.; Silva, T.G.F.d. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: Impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2024**, *53*, 101784.
- Andrade, T.S.; Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A.A.; Rodrigues, D.F. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. *Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambient.* **2012**, *16*, 496–504.
- Hoaglin, D.C.; Mosteller, F.; Tukey, J.W. *Análise Exploratória de Dados: Técnicas Robustas*; Edic.es Salamandra: Lisboa, Portugal, **1992**; 446p.
- Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Leeuwen, W.V. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* **1997**, *59*, 440–451.
- Lourenco, V.R.; Montenegro, A.A.A.; Carvalho, A.A.; Sousa, L.B.; Almeida, T.A.B.; Almeida, T.F.S.; Vilar, B.P. Spatial variability of biophysical multispectral indexes under heterogeneity and anisotropy for precision monitoring. *Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambient.* **2023**, *27*, 848–857.
- Mayer, M.C.; Medeiros, S.S.; Batista, M.M.; Barbosa, R.A.; Lambais, G.R.; Santos, S.L.; Van Haandel, A. Tratamento de esgoto na zona rural visando ao reuso agrícola no semiárido brasileiro. *Rev. DAE* **2021**, *69*, 104–114.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*; Freden, S.C., Mercanti, E.P., Becker, M., Eds.; NASA: Washington, DC, USA, **1974**; Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351; pp. 309–317.
- Silva, E. G. F. A.; Almeida, T. A. B.; Melo, R. E., Lima, M. C. G.; Sousa, L. B.; Silva, J. A. S.; Silva, M. V., Montenegro, A. A. A.; Spatial Variability in Soil Attributes and Multispectral Indices in a Forage Cactus Field Irrigated with Wastewater in the Brazilian Semiarid Region. *AgriEngineering*. **2025**, *7*, 221.
- Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. *Manual de Métodos de Análise de Solo*; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, Brazil, **2017**; 573p.
- Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In *Applications of Soil Physics*; Hillel, D., Ed.; Academic Press: New York, NY, USA, **1980**; pp. 319–344.
- Yeomans, J.C.; Bremner, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **1988**, *19*, 1467–1476.