

MONITORAMENTO DA SALINIZAÇÃO DO SOLO EM AMBIENTE DE PRODUÇÃO DE MILHO ATRAVÉS DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Ygor Ferreira Barros¹, Joel Alves de Oliveira², Maria Tatiane Ferreira Bento³, Everton Kauan Elias Batista², Alexandre Reuber Almeida da Silva⁴, Carlos Newdmar Vieira Fernandes⁴

RESUMO: A salinização do solo é um dos principais desafios para a agricultura em regiões semiáridas. Assim, objetivou-se integrar dados multiespectrais obtidos por veículo aéreo não tripulado (VANT) com atributos químicos indicativos da salinidade e respostas agronômicas do milho, visando desenvolver uma metodologia para monitoramento da salinidade em ambiente comercial de produção de milho para silagem no semiárido cearense. Propôs-se, ainda, a determinação de um índice integrado de salinidade do solo, capaz de reunir condutividade elétrica (CE), percentagem de sódio trocável (PST) e pH em uma única medida funcional. O estudo foi conduzido em área irrigada de milho, em Iguatu, Ceará, onde foram avaliados CE, PST e pH, a partir dos quais foi calculado o índice integrado de saúde salina do solo, além da produtividade de biomassa seca em nove pontos amostrais. Imagens multiespectrais foram adquiridas por VANT para cálculo dos índices VARI, GLI e NGRDI. As correlações entre índices espectrais, atributos químicos e produtividade de biomassa seca foram avaliadas pelo coeficiente de Pearson. O ambiente de produção apresentou solos não salinos, porém com níveis moderados de sodicidade e alcalinidade, que limitaram o desempenho agronômico do milho. O índice integrado demonstrou que os solos locais estão funcionando, em média, com aproximadamente 50% de sua capacidade potencial, devido à salinidade. Os índices espectrais, especialmente, o GLI, apresentaram correlação moderada com a CE, mas baixa associação com PST, pH, índice integrado e produtividade, indicando potencial para diagnóstico da salinidade, porém limitação na detecção isolada ou integrada das demais restrições químicas do solo.

PALAVRAS-CHAVE: índices espectrais; solos halomórficos; *Zea Mays* L.

¹ Graduando em Engenharia Agrícola, IFCE – campus Iguatu, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, Iguatu, Ceará – Brasil, CEP: 63503-790. Fone: (88) 9650-5627. Email: ygor.ferreira.barros09@aluno.ifce.edu.br

² Graduando em Engenharia Agrícola, Departamento de Ensino, IFCE – campus Iguatu, Iguatu, Ceará

³ Graduanda em Engenharia Agrícola, Departamento de Ensino, IFCE – campus Iguatu, Iguatu, Ceará.

⁴ Prof. Doutor, Departamento de Ensino, IFCE – campus Iguatu, Iguatu, Ceará.

MONITORING SOIL SALINIZATION IN CORN PRODUCTION ENVIRONMENTS USING MULTISPECTRAL IMAGES FROM UMANNED AERIAL VEHICLES

ABSTRACT: Soil salinization is one of the main challenges for agriculture in semiarid regions. Therefore, the objective was to integrate multispectral data obtained by unmanned aerial vehicles (UAVs) with chemical attributes indicative of corn salinity and agronomic responses, aiming to develop a methodology for monitoring salinity in a commercial corn silage production environment in the semiarid region of Ceará. The study also proposed the determination of an integrated soil salinity index, capable of combining electrical conductivity (EC), exchangeable sodium percentage (ETP), and pH into a single functional measure. The study was conducted in an irrigated corn field in Iguatu, Ceará, where EC, ETP, and pH were evaluated, from which the integrated soil salinity health index was calculated, in addition to dry biomass productivity at nine sampling points. Multispectral images were acquired by UAVs to calculate the VARI, GLI, and NGRDI indices. Correlations between spectral indices, chemical attributes, and dry biomass productivity were assessed using Pearson's coefficient. The production environment featured non-saline soils, but with moderate levels of sodicity and alkalinity, which limited corn agronomic performance. The integrated index demonstrated that local soils are functioning, on average, at approximately 50% of their potential capacity due to salinity. Spectral indices, especially GLI, showed a moderate correlation with EC but a low correlation with PST, pH, the integrated index, and productivity, indicating potential for diagnosing salinity, but limitations in detecting other soil chemical constraints in isolation or in combination.

KEYWORDS: spectral índices; halomorphic soils; *Zea Mays* L.

INTRODUÇÃO

A salinização do solo é uma ameaça crescente à produtividade agrícola e à sustentabilidade dos agroecossistemas, especialmente, em regiões semiáridas. O acúmulo excessivo de sais solúveis na zona radicular compromete a absorção de água pelas plantas, altera propriedades físico-químicas do solo e afeta negativamente a atividade biológica, impactando o funcionamento do solo e a produtividade das culturas (Guo et al., 2023). Os

principais indicadores utilizados para diagnosticar a salinidade são a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE), a percentagem de sódio trocável (PST) e o pH (Justo et al., 2021). Apesar de inter-relacionados, a interpretação conjunta desses parâmetros ainda é desafiadora, dificultando avaliações integradas do estado salino-sódico do solo. Para superar essa limitação, a construção de índices compostos, como os propostos por Bieluczyk et al. (2025), tem se mostrado uma alternativa promissora para avaliar a saúde salina do solo. Paralelamente, os métodos convencionais de análise laboratorial exigem tempo e recursos, dificultando o monitoramento da salinidade do solo em larga escala. Nesse cenário, o sensoriamento remoto tem ganhado relevância por possibilitar a avaliação da salinidade em grandes áreas (Barreto et al., 2023). Sensores multiespectrais embarcados em veículos aéreos não tripulados (VANT's) vêm se destacando por captar variações espectrais na vegetação associadas ao estresse salino com alta resolução (Salcedo et al., 2022). Embora índices de vegetação (IVs) já sejam utilizados para inferência indireta da salinidade (Hossain et al., 2025), ainda são escassas as abordagens que integram dados espectrais, atributos edáficos e desempenho agrônômico das culturas. Diante disso, objetivou-se integrar dados multiespectrais, atributos químicos do solo e produtividade de biomassa do milho para desenvolver uma metodologia robusta e prática de monitoramento da salinidade no semiárido cearense. Adicionalmente, propôs-se a mensuração de um índice de saúde salina do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em área irrigada de milho para silagem (23 ha), sob manejo convencional, localizada na Fazenda Canteiros, no município de Iguatu, CE (6°21' S; 39°21' W; 232,53 m), em clima BSh segundo Köppen. Utilizou-se o híbrido K7510 VIP3, cultivado em Neossolo Flúvico de textura franco - arenosa (0 – 20 cm), com histórico de cinco anos de cultivo contínuo (duas safras anuais). As coletas de solo e planta foram realizadas aos 79 dias após a semeadura (dezembro de 2024), um dia antes da colheita. Nove pontos amostrais foram distribuídos em grade regular (50 m). Em cada ponto, foram coletadas amostras deformadas de solo (0 – 20 cm) e da parte aérea da planta, em área de 0,25 m². A biomassa foi pesada e seca a 65 °C até peso constante, com posterior extrapolação para kg ha⁻¹. As análises químicas do solo corresponderam a condutividade elétrica (CE), percentagem de sódio trocável (PST) e pH. Com base nesses parâmetros, foi calculado o Índice de Saúde Salina do Solo (ISS), conforme Bieluczyk et al. (2025). CE e PST foram transformados em escores normalizados do tipo

“quanto menos, melhor”, enquanto os escores de pH seguiram os intervalos de Schiebelbein e Cherubin (2024). Os três indicadores foram integrados por média ponderada (peso 0,33). Simultaneamente às coletas, realizou-se aerolevanteamento com VANT Phantom 4 (DJI), equipado com sensor RGB (bandas centradas em 660, 550 e 475 nm) e sistema GPS/GLONASS. O voo foi executado a 59 m de altitude. As imagens foram processadas para obtenção dos seguintes índices de vegetação: VARI (Visible Atmospherically Resistant Index), GLI (Green Leaf Index) e NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index). Para vinculação aos pontos amostrais, foi criado um buffer de 10 m ao redor de cada ponto, extraindo-se a média dos valores espectrais por meio da ferramenta Estatísticas Zonais no QGIS. Realizou-se análise estatística descritiva das variáveis analisadas. As correlações entre essas variáveis foram avaliadas pelo coeficiente de Pearson e interpretadas conforme a classificação de Oliveira et al. (2025). As análises foram realizadas através do software Jamovi®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos avaliados apresentaram condutividade elétrica média de 1,19 dS m⁻¹, classificando-se como não salinos, embora valores próximos ao limiar de salinidade leve (2 dS m⁻¹) tenham sido observados. A média da porcentagem de sódio trocável (PST) foi de 14,78%, com máximos de 25%, indicando presença de solos ligeiramente a moderadamente sódicos. O pH médio de 7,93; com valores de até 9,00; revela um ambiente alcalino, compatível com os processos de sodificação evidenciados. O Índice de Saúde Salina (ISS) variou de 0,30 a 0,74, com média de 0,51, refletindo condições moderadamente comprometidas na capacidade de funcionamento do solo devido à salinidade-sodicidade-alcalinidade, indicando que, em média, os solos locais estão funcionando com aproximadamente 50% de suas capacidades potenciais devido aos sais. A produtividade de biomassa seca (BS) apresentou ampla variação (de 8,18 a 23,19 t ha⁻¹), com coeficiente de variação de 41,7%, evidenciando influência das condições sódicas sobre o desempenho da cultura. Os índices espectrais GLI, VARI e NGRDI apresentaram valores médios de 0,20, 0,15 e 0,09, respectivamente, com baixa a moderada variabilidade, refletindo diferenças no vigor vegetativo das plantas de milho que podem estar parcialmente associadas à variabilidade das condições químicas indicadoras da salino-sodicidade do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos atributos condutividade elétrica do extrato de saturação (CE), porcentagem de sódio trocável (PST), potencial hidrogeniônico (pH), do índice de saúde salina (ISS), da produtividade de biomassa seca (BS) e dos índices espectrais (GLI, VARI e NGRDI) em ambiente de produção de milho para silagem.

Parâmetros estatísticos	CE	PST	pH	ISS	BS	GLI	VARI	NGRDI
	(dS m ⁻¹)	(%)	(-)	(-)	(t ha ⁻¹)	(-)	(-)	(-)
Média	1,19	14,78	7,93	0,51	13,65	0,20	0,15	0,09
Mínimo	0,46	9,00	7,20	0,30	8,18	0,16	0,09	0,05
Máximo	1,91	25,00	9,00	0,74	23,19	0,25	0,19	0,11
Desvio Padrão	0,42	5,78	0,57	0,14	5,69	0,03	0,03	0,02
Coefficiente de variação (%)	35,06	39,13	7,24	28,42	41,71	14,50	20,34	20,98

Os índices espectrais avaliados apresentaram correlações quase perfeitas entre si (Tabela 2), evidenciando alta consistência na caracterização da cobertura vegetal e redundância na resposta espectral. Quanto aos atributos de salinidade do solo, observou-se correlação muito alta entre o percentual de sódio trocável (PST) e o pH ($r = 0,796$), indicando um processo de alcalinização relacionado à sodificação dos solos. As correlações entre a condutividade elétrica (CE) e os demais parâmetros foram baixas, sugerindo que CE, PST e pH refletem componentes distintos do processo salino-sódico. O Índice de Saúde Salina (ISS), obtido por meio da integração ponderada desses três atributos, apresentou correlações negativas de alta magnitude com PST ($r = -0,867$), pH ($r = -0,708$) e CE ($r = -0,554$), demonstrando sua capacidade de sintetizar as condições salinas, alcalinas e sódicas em um único indicador. As correlações entre o ISS e os índices espectrais, contudo, foram muito baixas ($r \leq 0,107$), indicando que a vegetação, ao menos no estágio fenológico avaliado, não refletiu diretamente o estado integrado de salinidade do solo. Por outro lado, observou-se que os índices espectrais apresentaram correlações moderadas com a CE do solo, especialmente GLI ($r = 0,542$), seguido por VARI ($r = 0,436$) e NGRDI ($r = 0,463$), sugerindo que a condutividade elétrica afeta a resposta espectral da vegetação, possivelmente via estresse osmótico e alterações no vigor foliar. Todavia, as correlações dentre os índices de vegetação com PST e pH foram baixas. No tocante à produtividade de biomassa seca, os índices espectrais apresentaram correlações moderadas e negativas com VARI ($r = -0,387$) e NGRDI ($r = -0,377$), sugerindo que os valores mais elevados desses índices estiveram associados aos menores acúmulo de biomassa, possivelmente em função dos estresses decorrentes da salinidade. A correlação do ISS com a produção de biomassa seca foi praticamente nula ($r = -0,010$), o que pode ser atribuído à complexidade das interações entre salinidade, estado nutricional, variabilidade espacial e a resposta produtiva da cultura (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os índices espectrais (GLI, VARI, NGRDI), atributos químicos indicadores da salinidade do solo (PST, pH, CE), o Índice de Saúde Salina (ISS) e a produtividade de biomassa seca (BS) em ambiente de produção de milho para silagem.

	GLI	VARI	NGRDI	PST	pH	CE	ISS
VARI	0,929						
NGRDI	0,921	0,995					
PST	-0,271	-0,141	-0,094				
pH	-0,027	0,049	0,064	0,796			
CE	0,542	0,436	0,463	0,128	0,258		
ISS	0,107	0,021	-0,032	-0,867	-0,708	-0,554	
BS	-0,184	-0,387	-0,377	-0,173	-0,074	0,166	-0,010

CONCLUSÕES

O ambiente de produção avaliado apresentou solos não salinos, porém com níveis moderados de sodicidade e alcalinidade, os quais limitaram o desempenho agrônômico da cultura do milho. O índice integrado de saúde salina (ISS) proposto demonstrou que os solos locais estão funcionando, em média, com aproximadamente 50% de sua capacidade potencial, devido aos atributos indicadores da salinidade. Os índices espectrais apresentaram correlação moderada com a CE, porém baixa associação com o PST, o pH, o ISS e a produtividade de biomassa, indicando capacidade promissora para o diagnóstico da salinidade, mas limitada para a detecção isolada e/ou integrada da sodicidade e da alcalinidade, especialmente através do índice GLI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRETO, A. C. et al. Comparative analysis of spectral indexes for soil salinity mapping in irrigated areas in a semi-arid region, Brazil. **Journal of Arid Environments**, [S.l.], v. 209, 104888, 2023. ISSN 0140-1963.
- BIELUCZYK, W. et al. From overgrazed land to forests: assessing soil health in the Caatinga biome. **Journal of Environmental Management**, [S.l.], v. 374, 124022, 2025. ISSN 0301-4797.
- GUO, B. et al. Mapping soil salinity using a combination of vegetation index time series and single-temporal remote sensing images in the Yellow River Delta, China. **CATENA**, [S.l.], v. 231, 107313, 2023. ISSN 0341-8162.

HOSSAIN, Md. K. et al. Geospatial analysis of soil salinity dynamics: Exploring topographic and vegetation influences in coastal Bangladesh. **Geosystems and Geoenvironment**, [S.l.], v. 4, n. 3, 100418, 2025. ISSN 2772-8838.

JUSTO, J. F. A. et al.. Identification and diagnosis of salt-affected soils in the Baixo-Açu irrigated perimeter, RN, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 480–484, jul. 2021.

OLIVEIRA, G. S. de et al. Correlation between the growth index and vegetation indices for irrigated soybeans using free orbital images. **AgriEngineering**, [S.l.], v. 7, n. 3, art. 67, 2025.

SALCEDO, F. P. et al. Soil salinity prediction using remotely piloted aircraft systems under semi-arid environments irrigated with salty non-conventional water resources. *Agronomy*, Basel, v. 12, p. 2022, 2022. ISSN 2073-4395.

SCHIEBELBEIN, B. E.; CHERUBIN, M. R. **Guia do usuário de campo do Kit SOHMA de saúde do solo**. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2024.