

ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA NA ESTIMATIVA DA SALINIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

PAULO ROBERTO MEGNA FRANCISCO¹, JOSÉ NILTON SILVA²,
GEORGE DO NASCIMENTO RIBEIRO³, JOSÉ HUGO SIMPLICIO DE SOUSA⁴

¹Pós-doutorando em Desenvolvimento Regional, UEPB, Campina Grande-PB, paulomegna@gmail.com

²Eng. Químico, Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, nilton@eq.ufcg.edu.br

³Eng. Agrôn. Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, george.nascimento@professor.ufcg.edu.br

⁴Doutorando em Eng. Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, hugosimplicio123@gmail.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
13 a 16 de outubro de 2026

RESUMO: Este estudo analisou a salinidade das águas subterrâneas em parte do semiárido brasileiro para fins de irrigação, utilizando dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS[®]) de 12.129 poços. A metodologia empregou modelagem por B-Spline Multinível no QGIS e classificação via software QUALIGRAF[®], baseada nos critérios do Laboratório de Salinidade dos EUA. Os resultados indicaram que os maiores teores de sódio e condutividade elétrica concentram-se no Planalto da Borborema, devido a fatores geológicos e climáticos. Embora a maioria das amostras apresente risco baixo a médio, 26,09% da área total exibe riscos de salinização entre alto e excepcionalmente alto (classes C₄S₁ a C₅S₄). Tais condições exigem manejo cauteloso da irrigação para evitar a degradação do solo e prejuízos às culturas. A abordagem geoestatística demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a gestão de recursos hídricos regionais.

PALAVRAS-CHAVE: manejo de irrigação, modelagem geoestatística, geoprocessamento, nordeste brasileiro.

GEOSTATISTICAL APPROACH TO ESTIMATING GROUNDWATER SALINITY

ABSTRACT: This study analyzed the salinity of groundwater in part of the Brazilian semi-arid region for irrigation purposes, using data from the Groundwater Information System (SIAGAS[®]) from 12,129 wells. The methodology employed Multilevel B-Spline modeling in QGIS and classification via QUALIGRAF[®] software, based on the criteria of the US Salinity Laboratory. The results indicated that the highest sodium and electrical conductivity levels are concentrated in the Borborema Plateau, due to geological and climatic factors. Although most samples present low to medium risk, 26.09% of the total area exhibits high to exceptionally high salinization risks (classes C₄S₁ to C₅S₄). Such conditions require careful irrigation management to avoid soil degradation and crop damage. The geostatistical approach has proven to be an effective tool for regional water resource management.

KEYWORDS: irrigation management, geostatistical modeling, geoprocessing, brazilian northeast.

INTRODUÇÃO

A avaliação da salinidade é essencial para o planejamento hídrico e manejo da irrigação (Andrade Júnior et al., 2006; Zamberlan et al., 2013). No Nordeste, a qualidade das águas oscila geograficamente, elevando riscos de salinização do solo (Costa e Gheyi, 1984; Laraque, 1989).

O excesso de sais reduz a disponibilidade de água e inibe severamente o crescimento das plantas (Ayers & Westcot, 1999; Vysotskaya et al., 2010). Tais condições representam uma ameaça direta à produtividade e à viabilidade da produção agrícola regional.

Este trabalho objetiva estimar e mapear a salinidade das águas superficiais para fins de irrigação em parte do continente brasileiro. Para isso, utiliza-se a modelagem fundamentada em técnicas avançadas de geoprocessamento.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS® (1962-2004) de 12.129 poços em 1.223 municípios, abrangendo Condutividade Elétrica (CE) e íons de Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Sódio (Na^+) em meqL^{-1} . As informações foram processadas em Excel® e geoespacializadas no QGIS® 3.38 via interpolação B-Spline Multinível (SAGA®). A Razão de Adsorção de Sódio (RAS) foi calculada na calculadora *raster* do QGIS® seguindo a Equação 1:

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]0,5 \text{ (Eq.1)}$$

Posteriormente, utilizou-se o software QUALIGRAF® (Möbüs, 2003), para classificar os riscos de salinização e sodificação da água. A classificação seguiu os critérios do Laboratório de Salinidade dos EUA, integrando intervalos de CE e RAS conforme a Tabela 1. As águas foram categorizadas de C1 a C5 para salinidade e de S1 a S4 para sodicidade.

Tabela 1. Classificação do risco de salinização das águas para irrigação

Condutividade Elétrica CE ($\mu\text{mhos/cm}$)			Razão de Adsorção de Sódio RAS			Risco de Sódio	Risco de Salinização (mg/L)	
Classe	Tipo de Água com Salinidade	Valor	Classe	Concentração de Sódio	Valor	Classe	Classe	Valor
							Nulo	0-64
C1	Baixa	100-250	S1	Baixa	0-10	Baixo	Baixo	64-160
			S2	Média	10-18	Médio		
			S3	Alta	18-26	Forte		
			S4	Muito Alta	> 26	Muito Forte		
C2	Média	250-750	S1	Baixa	0-8	Baixo	Médio	160-480
			S2	Média	8-15	Médio		
			S3	Alta	15-22	Forte		
			S4	Muito Alta	> 22	Muito Forte		
C3	Alta	750-2.250	S1	Baixa	0-7	Baixo	Alto	480-1.440
			S2	Média	7-13	Médio		
			S3	Alta	13-19	Forte		
			S4	Muito Alta	> 19	Muito Forte		
C4	Muito Alta	2.250-5.000	S1	Baixa	0-5	Baixo	Muito Alto	1.440-3.400
			S2	Média	5-10	Médio		
			S3	Alta	10-15	Forte		
			S4	Muito Alta	> 15	Muito Forte		
C5	Excepcionalmente Alta	5.000-20.000	S1	Baixa	0-3	Baixo	Excepcionalment e Alto	3.400-12.800
			S2	Média	3-8	Médio		
			S3	Alta	8-12	Forte		
			S4	Muito Alta	> 12	Muito Forte		

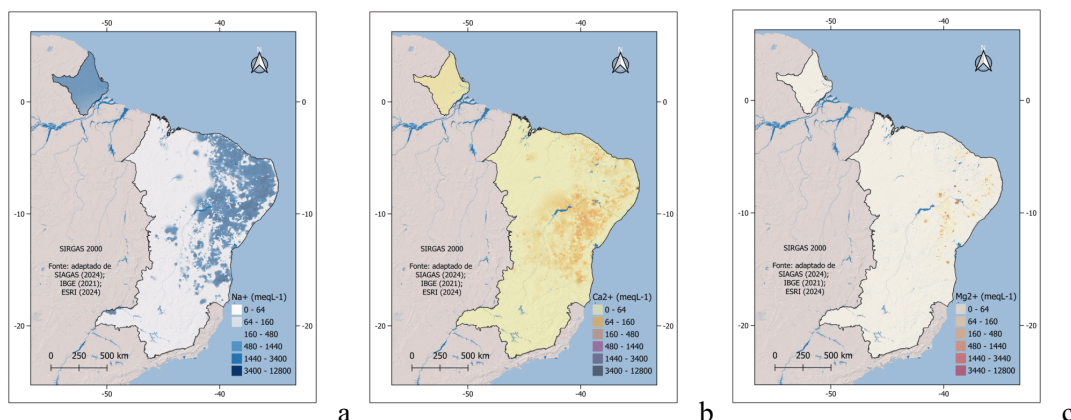
Fonte: adaptado de Ayers & Westcot (1999).

Os resultados foram mapeados e recortados conforme os limites da área de estudo do IBGE (2021). Por fim, as imagens *raster* foram convertidas em vetores e as áreas calculadas via *plugin* *r.report* do GRASS®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores teores de sódio (Na^+) e condutividade elétrica (CE) concentram-se na porção setentrional do semiárido, especialmente sob o Planalto da Borborema, devido às características geológicas locais. Em contraste, o cálcio (Ca^{2+}) distribui-se amplamente pelo Ceará e interior da Bahia e do Nordeste, enquanto o magnésio (Mg^{2+}) possui menor influência geral na área de estudo (Figuras 1 e 2).

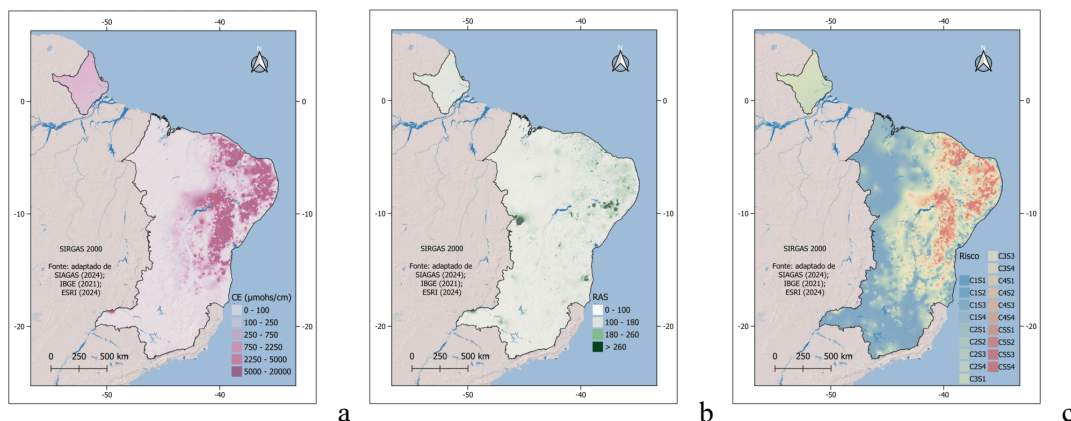
Figura 1. Distribuição espacial. a) Na^+ , b) Ca^{2+} , c) Mg^{2+} (meqL^{-1}).



Fonte: adaptado de SIAGAS (2024); IBGE (2021); ESRI (2024).

O litoral apresenta os menores valores de cátions, predominantemente sob solos sedimentares. Já a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) exibe concentrações elevadas em áreas esparsas, como no Sertão Alagoano sob rochas metamórficas e em divisas específicas de Minas Gerais e Bahia. (Figura 2).

Figura 2. Distribuição espacial. a) CE ($\mu\text{mhos/cm}$), b) RAS (adimensional), (c) Salinidade das águas subterrâneas para fins de irrigação.



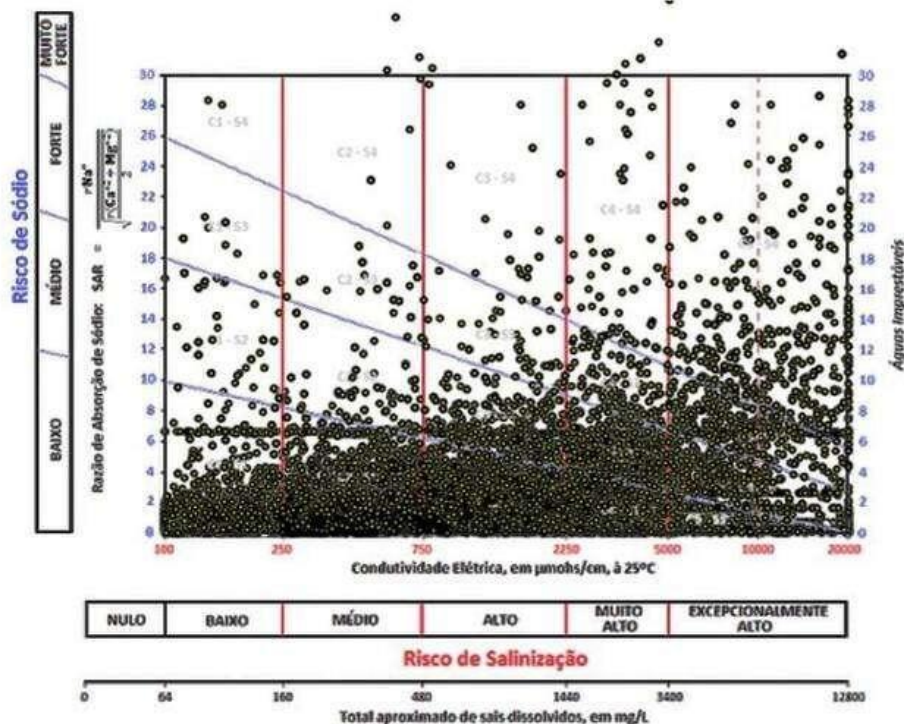
Fonte: adaptado de SIAGAS (2024); IBGE (2021); ESRI (2024).

O risco de salinização para irrigação é crítico (classes C_4S_1 a C_5S_4) na região central semiárida, abrangendo áreas da Bahia, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Essas zonas de risco muito alto a excepcional está vinculada a unidades litológicas similares sob o Planalto da Borborema. (Figura 2c).

As classes de risco baixo (C_1S_1 a C_1S_4) predominam nas bordas da área de estudo e em regiões interioranas menos afetadas pela semiaridez climática. As categorias de médio a alto risco (C_2S_1 a C_3S_4) atuam como zonas de transição espacial ao entorno dos núcleos de maior salinidade. (Figura 2c).

A classificação geral indica que a maioria das amostras se situa nas classes de baixo e médio risco. Contudo, a presença de amostras nas categorias "forte" e "muito forte" evidencia o perigo real de salinização dos solos pelo uso contínuo dessas águas subterrâneas para fins agrícolas. (Figura 3).

Figura 3. Classificação das águas subterrâneas para fins de irrigação.



CONCLUSÃO

As técnicas de geoprocessamento e a modelagem por B-Spline Multinível mostraram-se eficientes e rápidas para o mapeamento do risco de salinidade. A geoestatística revelou a variabilidade da Condutividade Elétrica e da Razão de Adsorção nas águas estudadas.

Os riscos Alto, Muito Alto e Excepcionalmente Alto abrangem 26,09% da área, exigindo cautela no manejo da irrigação. As zonas mais críticas situam-se no Planalto da Borborema, sob diversas unidades geológicas da região semiárida.

A salinidade variou entre as classes de risco médio e excepcionalmente alto, abrangendo os níveis C_2S_1 a C_5S_4 . Tais áreas de maior risco estão associadas a locais de altitudes elevadas e baixos índices pluviométricos.

REFERÊNCIAS

- Andrade Júnior, A.S.D.; Silva, Ê.F.D.F.; Bastos, E.A.; Melo, F.D.B.; Leal, C.M. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no Semi-Árido Piauiense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.4, p.873-880, 2006.
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W. A qualidade da água na agricultura: estudos, irrigação e drenagem. Manual FAO 29. 2 ed. Campina Grande: UFPB. 1999. 153p.
- Costa, R.G.; Gheyi, H.R. Variação da qualidade da água de irrigação da microrregião homogênea de Catolé do Rocha, PB. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.19, n.8, p.1021-1025, 1984.
- ESRI. Mapa Topográfico Mundial. 2025. Disponível em: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: novembro de 2025.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas territoriais. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024.
- Laraque, A. Estudo e previsão da qualidade química da água dos açudes do Nordeste. Recife: SUDENE. 1989. 97p. (SUDENE. Hidrologia, 26).

- Möbüs, G. QUALIGRAF. Programa para análise da qualidade de água. Fortaleza: Fundação Cearense Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). 2003.
- SGB. 2024. Serviço Geológico do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. SIAGAS WEB. Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>. Acesso em: 14 de janeiro de 2024.
- Vysotskaya, L.; Hedley, P. E.; Sharipova, G.; Veselov, D.; Kudoyarova, G.; Morris, J.; Jones, H. G. Effect of salinity on water relations of wild barley plants differing in salt tolerance. AoB Plants, v.10, n.6, 2010.
- Zamberlan, J.F.; Robaina, A.D.; Peiter, M.X.; Ferraz, R.C.; Mello Pinto, L. Índices sazonais de qualidade da água de irrigação via análise multivariada na região central do Rio Grande do Sul. Irriga, v.18, n.3, p.376-386, 2013.