

Land Salinization Risk Index by Irrigation Inferred by Parametric Modeling Using GIS

Paulo R. M. Francisco*, José H. S. de Sousa**, George do N. Ribeiro***, José N. Silva****
Fernanda P. de Sousa*****, Renan N. R. da Rocha*****, Raimundo C. M. Rodrigues*****

*Dr. em Eng. Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, paulomegna@gmail.com

**Mestrando em Eng. Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, hugosimplicio123@gmail.com

***Dr. Prof. Associado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, george.nascimento@professor.ufcg.edu.br

****Dr. Prof. Associado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, nilton@eq.ufcg.edu.br

*****Enga. Agrônoma, Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional, MIDR, fernanda.pessoa@mdr.gov.br

*****Dr. em Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG,
renannicolauribeiro@gmail.com

*****Dr. Prof. Associado, Universidade Estadual do Maranhão, UEMA, calixto@cca.uema.br

Received 10 November; accepted 19 December.

ABSTRACT

This work aimed to estimate and map the risk index of salinization of land due to irrigation in the State of Paraíba. Data in raster format of salinity and sodicity estimated by pedometry and interpolated data of surface and underground salinity were used. Using QGIS®, the index was inferred using a simplified parametric model and classified with risk weights of Low (7-10), Medium (10-13), High (13-17), Very High (17-22), and Extremely High (22-30). In the statistical treatment, descriptive analysis of the data and the Kolmogorov-Smirnov test of normality and non-parametric probability distribution were carried out using plugins from the R®Core Team software. The simplified parametric model of the land salinization risk index for irrigation allowed classifying, mapping and identifying the most limiting attributes. Lilliefors' normality tests were similar among the variables. The largest standard deviation occurred in the groundwater salinity parameter. The greatest correlation occurred between the salinity parameters of groundwater and surface water. The low-risk class occurred in 1.46% of the State's land, followed by the medium risk in 22.41%. The upper, very upper and extremely upper classes represent 76.13% of the land.

Keywords: chemical attributes, salinity, soils, estimation, spatial distribution.

Índice de Risco de Salinização das Terras para Irrigação Inferido por Modelagem Paramétrica Utilizando SIG

RESUMO

Este trabalho objetivou estimar e mapear o índice de risco de salinização das terras por irrigação do Estado da Paraíba. Utilizou-se dos dados em formato *raster* de salinidade e sodicidade estimada por pedometria e dados interpolados de salinidade superficial e subterrânea. Utilizando o QGIS® o índice foi inferido por modelo paramétrico simplificado e classificadas com pesos de risco Baixo (7-10), Médio (10-13), Alto (13-17), Muito Alto (17-22), e Extremamente Alto (22-30). No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade e distribuição de probabilidade não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov utilizando plugins do software RCore Team®. O modelo paramétrico simplificado do índice de risco de salinização das terras à irrigação permitiu classificar, mapear e identificar os atributos mais limitantes. O teste de normalidade de Lilliefors apresentou semelhante entre si entre as variáveis. O maior desvio padrão ocorreu no parâmetro salinidade da água subterrânea. A maior correlação ocorreu entre os parâmetros salinidade de água subterrânea e superficial. A classe de risco baixo ocorreu em 1,46% das terras do Estado, seguido do risco médio em 22,41%. As classes alta, muito alta e extremamente alta representam 76,13% das terras.

Palavras-chave: salinidade, solos, estimativa, distribuição espacial.

1 Introdução

O Estado da Paraíba possui uma porção significativa de seu território inserida em ambiente semiárido. Nestas condições, o uso da irrigação se desdobra como uma importante tecnologia para aumentar a produção e diversidade de culturas agrícolas. Contudo, para o desenvolvimento de uma agricultura irrigada sustentável requer a disponibilidade de terras e águas com características favoráveis à essa prática (Francisco et al., 2022). Chaves et al. (2005) afirmam que, a agricultura irrigada é uma excelente opção para a produção de alimentos principalmente em áreas que apresentam como característica a irregularidade da distribuição temporal das precipitações. De acordo com Brito (2002), o Nordeste brasileiro apresenta uma área potencial para irrigação estimada em 6 milhões de ha.

Cordeiro (2001) afirma que, a definição favorável ou contrária à utilização de uma água para fins de irrigação requer não somente ter presentes as condições de caráter químico que apresenta a água no momento em que é analisada, como também as características físico-químicas dos solos em que vai ser aplicada. De acordo com Ayers e Westcot (1976), a qualidade da água para irrigação está relacionada a seus efeitos prejudiciais aos solos e às culturas, requerendo muitas vezes técnicas especiais de manejo para controlar ou compensar eventuais problemas associados à sua utilização.

No Nordeste existem milhares de poços cujas águas são utilizadas para a irrigação, representando um importante insumo na cadeia produtiva; no entanto, o uso de água de má qualidade pode trazer danos ao meio ambiente, com sérios reflexos socioeconômicos (Silva Júnior et al., 1999). No Nordeste, as águas usadas na irrigação são provenientes de rios, açudes e poços tubulares em que são consideradas de boa qualidade e não apresentam maiores problemas para irrigação sob condições adequadas de manejo. Todavia, em decorrência do inadequado balanço de sais, comumente verificado por falta de drenagem, observa-se uma gradativa salinização do perfil do solo irrigado e progressivo aumento das áreas problemáticas (EMBRAPA, 2001).

A prática de irrigação é indispensável para a garantia da produção das culturas nas regiões áridas e semiáridas Nordesteiras (Mendes et al., 2008; Santos et al., 2009; Figueredo Júnior et al., 2013), entretanto, a agricultura irrigada resulta em altas concentrações de sais no solo, muitas vezes além da capacidade de tolerância para a maioria das plantas (Araújo Neto et al., 2010).

Levando-se em consideração que a água é o fator fundamental na produção vegetal, e que em regiões áridas e semiáridas a concentração de sais nas águas de irrigação varia de acordo com a taxa de evaporação e com as propriedades químicas das rochas/solos atravessados por estas águas, a falta de uma informação completa e sistemática a respeito de suas qualidades poderia conduzir ao uso de águas de qualidade inadequada, com os consequentes efeitos deletérios sobre as propriedades físicas e químicas dos solos (Costa & Ghey, 1984).

Na atualidade o Mapeamento Digital de Solos (MDS) está se difundindo nas ciências do solo (Hengl et al., 2007a; Lagacherie, 2008; Lagacherie & Mcbratney, 2007; Mcbratney et al., 2003). O MDS é baseado em métodos quantitativos e técnicas estatísticas, ao contrário das abordagens tradicionais de mapeamento, que enfatizam o uso do conhecimento empírico (Hengl et al., 2007). O MDS difere de metodologias convencionais de mapeamento de solos, pois é baseado em pixels, os quais podem ser visualizados em diferentes resoluções. Um modelo preditivo baseia-se na estimativa das propriedades do solo, a partir de sua probabilidade de ocorrência (Andrade & Mendonça-Santos, 2016).

Uma ferramenta para auxílio ao processo decisório em políticas de gestão de recursos hídricos são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os SIGs constituem-se em um conjunto harmônico composto por uma base de dados, um ou mais softwares que permitam a manipulação de informações e uma interface gráfica para acesso do usuário (Câmara & Queiroz, 2008). De acordo com Garção e Chacaltana (2009), modelos numéricos validados são ferramentas indispensáveis à gestão e ao gerenciamento de sistemas ambientais, capazes de resultar na otimização de custos de monitoramento e medições através da integração de informações espacialmente dispersas

Conforme Filippini Alba (2014), a modelagem via Sistema de Informação Geográfica possibilita a fusão dessas camadas de informações, ampliando a capacidade de interpretação dos dados e auxiliando na tomada de decisão para a gestão do sistema de produção. Trabalhos em diversas áreas utilizaram técnicas de modelagem como por Polizelli Júnior (2008), Fanti (2016), Sabino e Macêdo (2019), Cano (2022), Francisco et al. (2023), em que obtiveram excelentes resultados.

Pesquisas que enfocam a variabilidade espacial de propriedades físicas, químicas e hidráulicas de solos têm grande relevância na literatura, principalmente como subsídio para o

manejo racional de água e solo em perímetros irrigados (Cichota et al., 2003). De acordo com Pessoa (2006), a utilização de ferramentas geoestatísticas, além de identificar a possível existência de dependência espacial entre as observações, pode ser aplicada em mapeamento, orientação de futuras amostragens e modelagem.

A estatística descritiva compreende técnicas que se usam para resumir e descrever dados. Conforme Silvestre (2007), a estatística descritiva é constituída pelo conjunto de métodos destinados à organização e descrição dos dados através de indicadores sintéticos ou sumários. Já a distribuição normal é o modelo probabilístico contínuo mais importante, porque a maioria dos métodos estatísticos é baseada nesse modelo, e a maioria dos fenômenos aleatórios pode ser descrita de forma aproximada por ele (Bussab & Morettin, 2003). Testes de aderência como o Kolmogorov-Smirnov adaptado por Lilliefors (1967), é amplamente utilizado para análise de aderências de distribuições (Cargnelutti Filho et al., 2004; Assis et al., 1996; Catalunha et al., 2002), e por ser um dos mais eficientes e utilizados em estudos sobre

interpolação de dados espaciais (Mello et al., 2003; Remacre et al., 2008; Araújo et al., 2008; Francisco et al., 2015).

Neste sentido, propõe-se por este trabalho, estimar e mapear o risco de salinização das terras por irrigação do Estado da Paraíba através de modelo paramétrico simplificado utilizando técnicas de modelagem e inferência.

2 Material e métodos

O Estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil, apresenta uma área de 56.467,24 km² (IBGE, 2021). Seu posicionamento encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. Ao Norte, limita-se com o Estado do Rio Grande do Norte; ao Leste, com o Oceano Atlântico; a Oeste, com o Estado do Ceará; e ao Sul, com o Estado de Pernambuco (Francisco, 2010). De acordo com PARAÍBA (2016), o Estado da Paraíba contempla 11 bacias e sub-bacias hidrográficas (Figura 1).

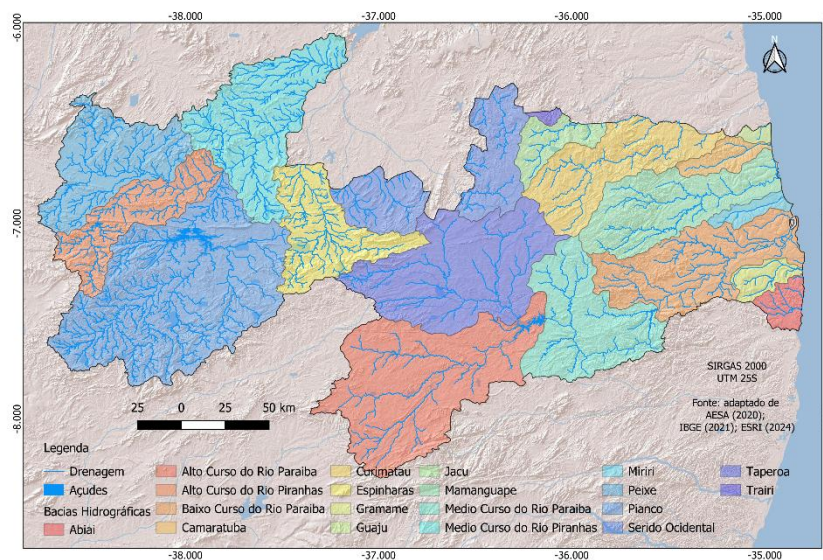


Figura 1. Bacias hidrográficas e drenagem principal do Estado da Paraíba.

Fonte: adaptado de AESA (2020); IBGE (2021); ESRI (2024).

O clima caracteriza-se por temperaturas médias elevadas (22 a 30°C) e uma amplitude térmica anual muito pequena, em função da baixa latitude e elevações (<700m). A precipitação varia de 400 a 800mm anuais, nas regiões interiores semiáridas, e no Litoral, mais úmido, pode ultrapassar aos 1.600mm (Varejão-Silva et al., 1984). Conforme Francisco et al. (2015), apresenta classificação climática de Köppen, em quatro tipos diferentes de clima, o clima Aw, que caracteriza a região do Litoral norte como Tropical com estação

seca no inverno, o clima Am no Litoral norte e Sul do Estado, o tipo climático As que dominam em sua maioria nas regiões de parte do Litoral, Brejo, Agreste e em pequena faixa da região do Sertão e em toda área do Alto Sertão. O tipo climático Bsh é predominante na área do Cariri/Curimataú, e boa parte da área do Sertão.

As classes predominantes de solos área de estudo estão descritas no Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 1978), e estas diferem pela diversidade geológica,

pedológica e geomorfológica; atendendo também a uma diversidade de características de solo, relacionadas à morfologia, cor, textura, estrutura, declividade e pedregosidade e outras características (Francisco et al., 2013). De uma forma geral os solos predominantes são os Luvisolos crômicos, Neossolos Litólicos,

Planossolos Solódicos, Neossolos Regolíticos Distróficos e Eutróficos distribuídos pela região do sertão e nos cariris, os Vertissolos na região de Souza, e os Argissolos Vermelho Amarelo e os Neossolos Quartzarênicos no litoral do Estado (Francisco, 2010) (Figura 2).

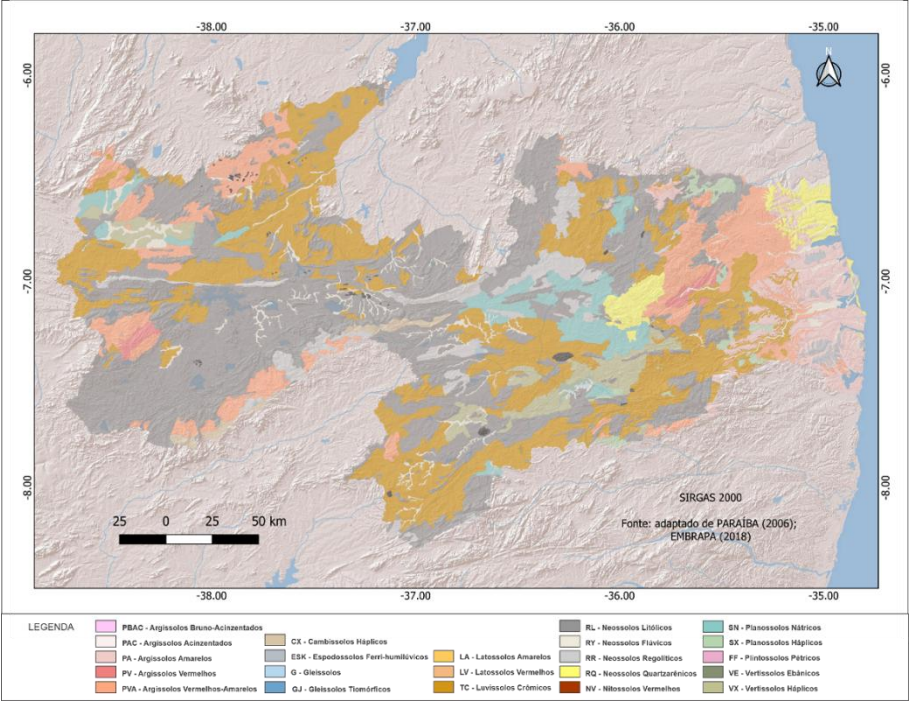


Figura 2. Solos do Estado da Paraíba. Fonte: Francisco et al. (2023a).

Na metodologia deste trabalho, foram utilizados dados geoespacializados de Francisco et al. (2013), da salinidade dos solos do Estado da Paraíba, elaborado com dados descritos nos perfis representativos de BRASIL (1972); PARAÍBA

(1978; 2006) em que, a classificação dos solos afetados por sais quanto à salinidade e sodicidade, foi estimada por pedometria e modelado utilizando-se os parâmetros de Richards (1954) recomendado pela EMBRAPA (2015) (Figura 2).

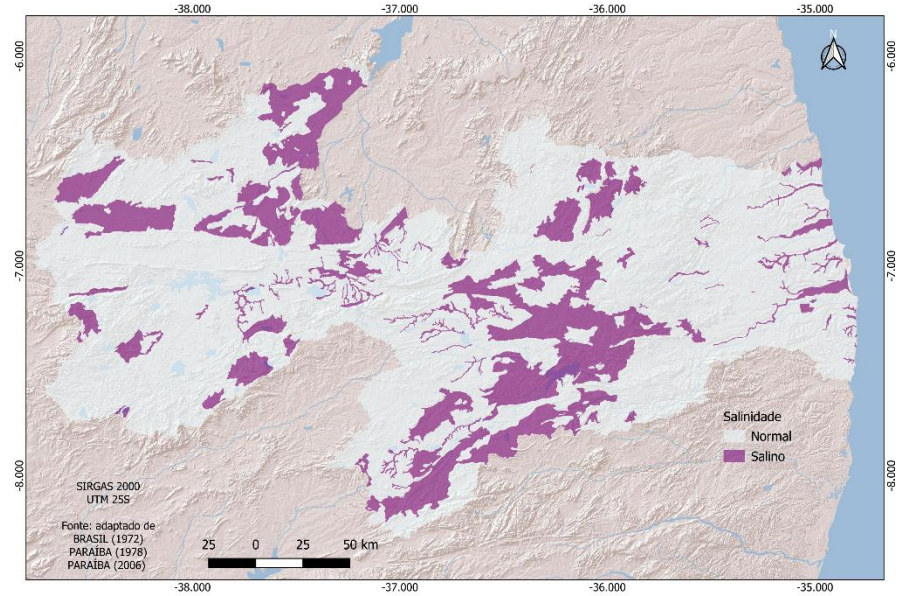


Figura 3. Salinidade dos solos do Estado da Paraíba. Fonte: Francisco et al. (2023b).

Foram utilizados dados interpolados por B-Spline Multinível (MBS) e geoespacializados por Francisco et al. (2024a; 2024b), de salinidade superficial e subterrânea do Estado da Paraíba (Figura 4), obtido de 83 amostras de análises de águas superficiais de açudes e rios obtidas entre 1984 a 2019, e dados obtidos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS[®] do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM, 2024), entre 1962 a 2004 de 460 poços, dados estes de Condutividade Elétrica de Cálcio, Magnésio e Sódio. Onde foram classificados de acordo com Richards (1954) sendo dado o grau de restrição de

uso da água para irrigação, quanto ao risco de sodificação do solo de acordo com Ayers e Westcot (1999) e classificadas conforme Bernardo (1995) em C₁ - águas com baixa salinidade, C₂ - águas com salinidade média, C₃ - águas com salinidade alta e C₄ - águas com salinidade muito alta. Quanto ao risco de sodicidade as águas são divididas em quatro classes segundo a RAS: S₁ - águas com baixa concentração de sódio, S₂ - águas com concentração média de sódio, S₃ - águas com alta concentração de sódio e S₄ - águas com muito alta concentração de sódio.

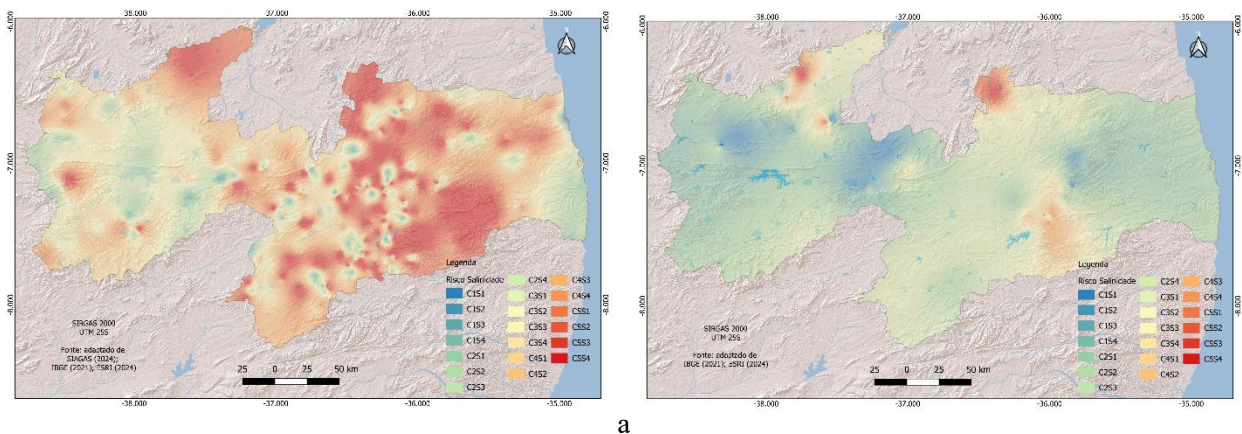


Figura 4. Salinidade das águas, a) subterrânea, b) superficial. Fonte: Francisco et al. (2024a; 2024b).

Utilizando-se o software QGIS[®] 3.34 foram importadas as imagens em formato *raster* da salinidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas. A classificação do risco a salinidade foi inferida por modelo paramétrico simplificado denominado Índice de Risco a Salinidade das Terras à Irrigação, utilizando linguagem algébrica através da calculadora *raster* do QGIS[®] (Equação 1).

$$IRSTI = (SS + SA_{Sub} + SA_{Sup})/3 \text{ (Eq.1)}$$

Onde: IRSTI = Índice de Risco a Salinidade das Terras à Irrigação; SS = Salinidade dos Solos; SA_{Sub} = Salinidade das águas subterrâneas; SA_{Sup} = Salinidade das águas superficiais.

Este modelo considera que variáveis/atributos têm como pesos os valores de 7 a 30 e a resultante classe 1 indica risco Baixo (7-10), classe 2 indica risco Médio (10-13), classe 3 infere classe de risco Alto (13-17), classe 4 infere classe de risco Muita Alto (17-22), e a classe 5 denota risco Extremamente Alto (22-30). Para os

cálculos de áreas foi utilizada a calculadora *raster* e o *plugin* GRASS[®] *r.report*.

No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando *plugins* do software R[®] Core Team (2024) do QGIS[®]. Para avaliação dos dados das amostras foi utilizado a regressão clássica, conforme o modelo de regressão (Equação 2).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i \text{ (Eq.2)}$$

Onde: Y_i é uma observação da variável dependente; X₁, X₂, ..., X_n são as variáveis independentes; β = (β₀, β₁, β₂, ..., β_n) são referidos como coeficientes de regressão correspondentes, e ε_i é o erro associado às observações da variável dependente.

Para verificar se as amostras procediam de uma determinada distribuição de probabilidade, foi usado *plugin* do R[®] Core Team (2024) do QGIS[®] do teste de hipóteses não paramétricos de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 95% adaptado por Lilliefors (1967).

Após, utilizando o *plugin r.covar* do GRASS® foi realizado a covariância para se obter a matriz de correlação com o objetivo de medir as relações entre as variáveis.

3 Resultados e discussão

Tabela 1. Estatística descritiva

Atributo/Variável	Mín.	Máx.	Média	Mediana	Intervalo	Des. Pad.	Var.	IQR
Salinidade da água superficial	1	20	6,99	12	21	2,76	22	7
Salinidade da água subterrânea	1	22	13,66	8	21	3,83	22	9
Salinidade dos solos	4	5	4,22	15	1	0,42	25	0
Risco a Salinidade das Terras à Irrigação	7	30	15,77	15	23,58	3,60	25	6

No boxplot do risco a salinização (Figura 5a) verifica-se a distribuição que se concentra entre as classes de risco médio, alto e extremamente alto entre 10 a 20. Os quantis teórico e acumulado (Figura 5b) apresenta-se uma distribuição normal.

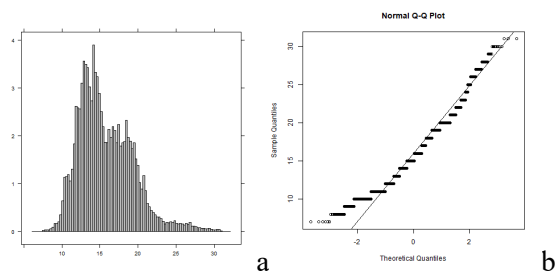


Figura 5. Boxplots do risco de salinização, a) frequência da distribuição, b) quantis da distribuição.

Pela Tabela 1 da estatística descritiva, pode-se verificar a variabilidade dos atributos, em que, o maior desvio padrão ocorre na salinidade da água subterrânea, isto devido a maior variação na área de estudo. O Índice de risco a salinidade das terras apresenta a maior média entre as demais, devido ao modelo utilizado elevar a soma dos valores.

No teste de normalidade (Tabela 2), pode-se observar que todas as variáveis apresentam resultados similares entre si, com menor variação do p-valor na variável salinidade da água superficial, isto devido a sua menor variação da distribuição na área de estudo, sendo aceito o resultado.

Na Tabela 3, observa-se os resultados da matriz de correlação entre as variáveis deste trabalho onde o $N = 290021$, em que a salinidade superficial e salinidade subterrânea, apresentam-se com valor mais significativos entre elas.

No histograma de distribuição das classes de risco a salinidade das terras por irrigação (Figura 6) pode-se verificar a média ao nível de 15,77 (classe muito alto) e o desvio padrão próximo ao nível de 19,37.

Tabela 2. Teste de normalidade

Atributo/Variável	Lilliefors	
	D	p-valor
Salinidade da água superficial	0,08029	<0,005708
Salinidade da água subterrânea	0,09237	<2,2e ⁻¹⁶
Salinidade dos solos	0,50186	<2,2e ⁻¹⁶
Risco a Salinidade das Terras à Irrigação	0,08929	<2,2e ⁻¹⁶

Tabela 3. Matriz de correlação entre os parâmetros

Parâmetro	Salinidade da água subterrânea	Salinidade da água superficial	Salinidade dos solos
Salinidade de água subterrânea	1	0,448619	0,106016
Salinidade de água superficial	0,448619	1	0,115707
Salinidade dos solos	0,106016	0,115707	1

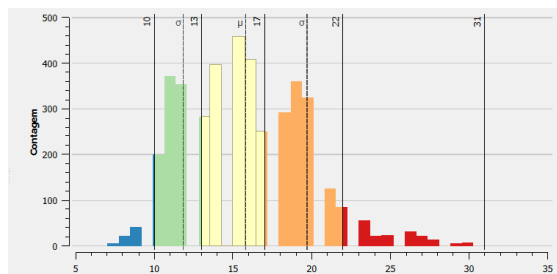


Figura 6. Histograma de distribuição das classes.

No mapa de risco de salinização das terras à irrigação (Figura 7), pode-se observar a distribuição espacial do índice inferido pelo modelo paramétrico simplificado.

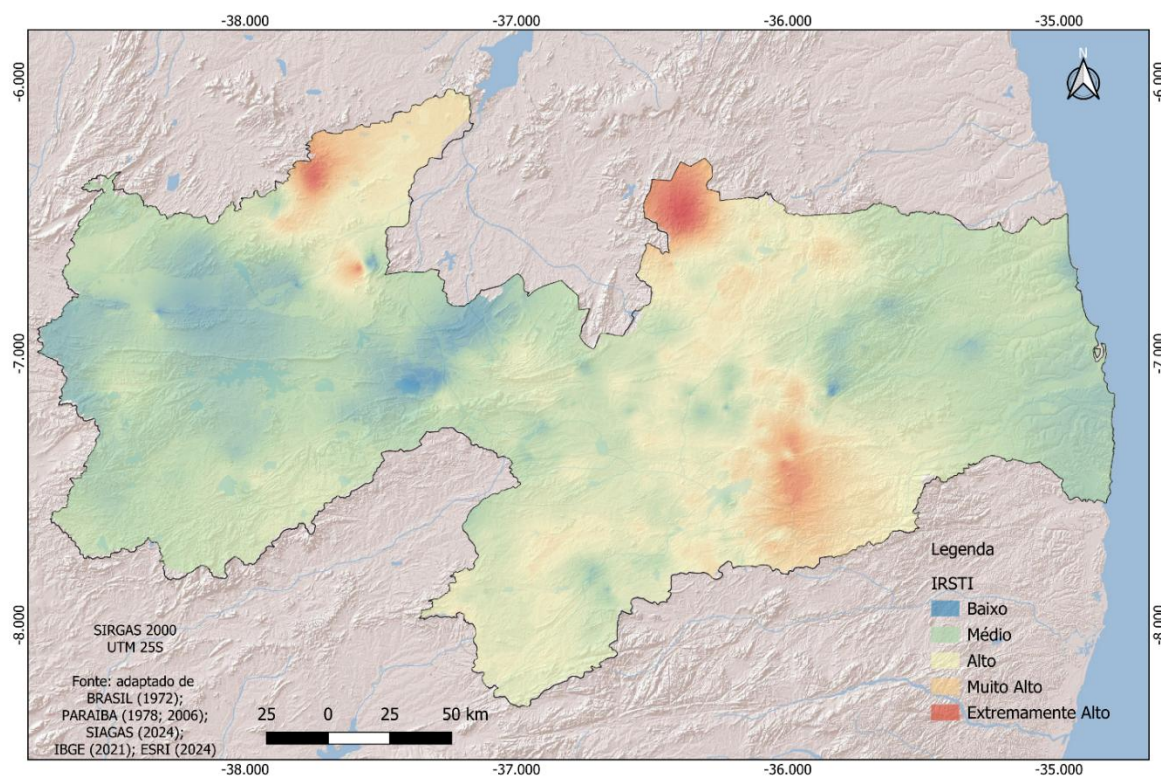


Figura 7. Risco de salinização das terras à irrigação do Estado da Paraíba.

Fonte: adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); SIAGAS (2024); IBGE (2021); ESRI (2024); Francisco et al. (2023; 2024a; 2024b).

Verifica-se que a classe de risco baixo apresenta área mapeada de 824,72 km² representando somente 1,46% da área do Estado (Tabela 4). Esta se distribui na região do Sertão na bacia do rio Piranhas, região a oeste do Estado nos municípios de Aparecida, São João da Lagoa Tapada e em Sousa, na bacia do rio Espinharas na região de Patos, Santa Teresinha e São Mamede.

Ocorre ainda na bacia do rio do Peixe em Cachoeira dos Índios. Resultados de menor risco devido as águas apresentarem menor potencial de salinidade e os solos da região não apresentarem salinidade. Demonstrando maior possibilidade de uso das terras para irrigação com águas providas, tanto subterrâneas, como superficiais.

Tabela 4. Distribuição espacial do índice de risco a salinidade das terras por irrigação

Classe de risco	Área (km ²)	%
Baixo	824,72	1,46
Médio	12.644,92	22,41
Alto	24.592,82	43,58
Muito Alto	15.625,31	27,69
Extremamente Alto	2.739,47	4,85
Total	56.427,24	100,00

De acordo com Francisco (2010), o rio Piranhas situa-se área de domínio do solo Luvisso Crômico fase pedregosa associado à Neossolo Litólico fase pedregosa e rochosa em vegetação do tipo caatinga hiperxerófila. Na bacia do Rio do Peixe, ocorre o Argissolo, Luvisso e Neossolo Litólico, nas áreas mais altas das cabeceiras ao norte, limite com o Rio Grande do Norte; no nível médio de altitude o Planossolo Nátrico e Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico textura argilosa cascalhenta e raso textura média cascalhenta, e o Vertissolo Háptico relevo plano na bacia sedimentar do Rio do Peixe, afluente do rio Piranhas, que corta a cidade de Sousa. Região com maior fertilidade dos solos e predominância de relevo suave ondulado, estas são áreas de cultivo de milho, feijão (algodão) associadas à criação de gado, sendo frequente nas várzeas, o cultivo do arroz. Na bacia do Piranhas, polarizada pelas cidades de Patos, Piancó, Pombal os solos predominantes é o Luvisso Crômico fase pedregosa relevo suave ondulado associado ao Neossolo Litólico Eutrófico fase pedregosa e rochosa relevo ondulado; ocorrendo a presença de Luvisso Crômico vértico à medida que a altitude decresce para nordeste, ao longo da drenagem, área tradicional de cultivo de algodão, hoje com pecuária e agricultura de subsistência.

No entanto, Chaves et al. (1998), constataram a ocorrência de problemas de salinidade e sodicidade em Vertissolos, Neossolos Flúvicos eutrófico e Argissolos Vermelho-Amarelos eutrófico em Sousa. Na região do Sertão próximo ao município de Sousa observa-se a salinidade em Neossolos Flúvicos localizados em região do perímetro irrigado, em que Leite et al. (2012) afirmam que, nesses perímetros irrigados, os problemas de sais nos solos decorrem da drenagem deficiente da água, sendo consequências da baixa permeabilidade dos solos, das condições topográficas desfavoráveis e da constante exploração agrícola das terras. Vital et al. (2005) recomendam o uso do corretivo gesso em solo salino-sódico como alternativa para a redução do pH e dos teores de sódio.

Quanto a classe de risco médio, apresenta área de 12.644,92 km² (22,41%), está distribuída a oeste do Estado nas bacias hidrográficas da região do Sertão, e ao leste na região central da bacia do Mamanguape, região do Agreste, e na região do Litoral nas bacias de Miriri, Gramame, Abiaí, no baixo curso do rio Paraíba e Mamanguape. Resultados de risco médio devido as águas apresentarem maior potencial de salinidade e os solos da região não apresentarem risco a salinidade.

Os solos predominantes na área do Agreste são os Neossolos Regolíticos Distrófico, polarizada pela cidade de Esperança, onde até pouco

tempo era conhecida pelo cultivo da batatinha, hoje feijão e erva doce; na área, ao norte, ocorrem os Neossolos Regolíticos Eutrófico e os Luvisso Crômico Litólico, área polarizada pela cidade de Arara, grande produtora de feijão, milho e fava. Litoral é a região formada pelas Várzeas e Tabuleiros. Nas áreas de várzeas e baixadas litorâneas, com exceção das Dunas e dos Mangues, a terra é intensivamente ocupada pela cana-de-açúcar, coqueiros, fruteiras diversas e culturas de subsistência. Nas áreas de Tabuleiros, os solos são Latossolos e Argissolos, e ao norte, por Neossolos Quartzarênicos. Estas áreas são hoje, amplamente ocupadas pela cultura da cana-de-açúcar, além de abacaxi, inhame e mandioca (Francisco, 2010).

A classe de risco alto representando 43,58% (24.592,82 km²), localiza-se na região do Sertão na bacia do rio Piancó divisa com o Estado de Pernambuco, sob o Planalto da Borborema na região central na bacia do rio Taperoá, Espinharas e do Seridó, e no Alto curso do rio Paraíba. Na região do Agreste e Litoral nas bacias do Curimataú, Mamanguape, Camaratuba, Guaju e no centro da bacia do baixo curso do rio Paraíba. O Agreste é uma região geográfica com características de clima semiárido que se inicia na área da Planície Atlântica, devido à depressão formada pela dissecação dos rios Paraíba e Mamanguape. Ocorre logo após os Tabuleiros, e se estende a sudoeste, até os limites superiores dos contrafortes orientais do Planalto da Borborema. Já foi área de cultivo de algodão, agora com cultivo de milho para forragem e agricultura de feijão e fava. Predominam solos medianamente profundos a rasos, férteis e argilosos (Francisco, 2010).

O risco muito alto de salinização representando 27,69% da área (15.625,31 km²), esta classe ocorre na região de Catolé do Rocha na bacia do médio curso do rio Piranhas, no Cariri na parte central do alto curso do rio Paraíba, parte do Taperoá, médio curso do rio Paraíba, Jacú, Trairi, Curimataú e Seridó Oriental. No Curimataú a vegetação é do tipo caatinga hiperxerófila, os solos são rasos e pedregosos (Neossolos Litólicos Eutrófico e Afloramento de Rochas), relevo suave ondulado e ondulado área mais seca e pastoril; e o Luvisso Crômico Vértico relevo ondulado, nas bacias de drenagem do riacho de Barra de Santa Rosa, contribuinte do rio Curimataú, e na bacia do rio Jacú, áreas, que pela fertilidade deste solo, já foram grande produtora de algodão e agave, e hoje, produzem palma forrageira, milho para forragem e culturas alimentares (Francisco, 2010).

Quanto a classe de risco extremamente alto, apresenta-se distribuído em 4,85% das terras do Estado, representando 2.739,47 km² da área total. Estas áreas localizam-se na região de Catolé do

Rocha, no médio curso do rio Piranhas, e ocorre também na região central da bacia do médio curso do rio Paraíba, e na bacia do Seridó Ocidental nos municípios de Picuí e Frei Martinho. Na região de Catolé do Rocha, predomina o Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico associado à Neossolo Litólico Eutrófico fase pedregosa rochosa caatinga hiperxerófila. Área tradicional de cultivo de algodão, hoje com pecuária e agricultura de subsistência. O Seridó compreende as encostas ocidentais do Planalto da Borborema, em que ocorrem os Neossolos Regolíticos Eutróficos, áreas mais agrícolas, em seguida, em relevo forte ondulado e montanhoso os solos Neossolos Litólicos na região dos municípios de Pedra Lavrada e Picuí. Área de pastejo extensivo e mineração (Francisco, 2010). Amorim et al. (2010) avaliando a qualidade da água subterrânea para irrigação na bacia hidrográfica do Rio Piauí, em Sergipe, concluíram que as maiores restrições ao uso da água para irrigação se localizaram na porção de domínio cristalino e predominância de clima semiárido. Resultado similar a este trabalho.

De acordo com Nielsen et al. (1973), os solos são formações naturais reconhecidamente heterogêneas. No entanto, Russo e Bresler (1981) demonstraram que, os parâmetros relacionados à água no solo são altamente variáveis, inclusive em pequenas áreas. Cambardella et al. (1994) apontam que as distribuições espaciais das propriedades dos solos nas escalas de campo e da bacia podem afetar respostas hidrológicas e de transporte de solutos na subsuperfície e na água subterrânea. A salinização dos solos por águas de irrigação representa um risco às culturas principalmente devido à perda de rendimentos por redução da disponibilidade de água para a planta (Ayers & Westcot, 1994).

Valladares e Faria (2004), analisando o risco de salinização na bacia do rio Coruripe, Estado de Alagoas, região semiárida, utilizando modelagem e informações de solos, geologia e geomorfologia, observaram que os maiores riscos ocorreram em Gleissolos, Organossolos, Espodossolos e Planossolos, em sua maioria com atividade alta da argila e imperfeitamente drenados. No entanto, por este trabalho, estes não apresentam maiores influências nos resultados, devido a maior influência da qualidade das águas de irrigação.

Castro e Santos (2015), avaliando a susceptibilidade ambiental à salinização das terras da microrregião de Petrolina-PE, utilizando modelagem e como parâmetros solo, relevo e uso da terra, observaram que a combinação de solos com alta susceptibilidade a salinização apresentou resultados de classe alta. Resultados não similares a este estudo, devido não levar em consideração o parâmetro água na modelagem.

Luiz et al. (2017), utilizando metodologia similar a este trabalho no mapeamento de risco de sodificação de solos em microbacia hidrográfica no Rio Grande do Sul, observaram que, o uso da água subterrânea para a atividade de agricultura é fortemente dependente da salinidade e de fatores condicionantes do solo, como a permeabilidade e as condições de drenagem, observaram ainda que, o modelo apresentou distintas respostas à introdução de águas subterrâneas para irrigação. Resultados similares observados por este trabalho, em que o maior fator de risco de salinidade é causado pelas águas subterrâneas.

Observa-se que os resultados deste trabalho podem ser utilizados para tomadas de decisão e aplicações de políticas públicas quanto a indicação de áreas para irrigação evitando a salinização dos solos.

4 Conclusão

O uso das geotecnologias e da geoespacialização dos atributos foi realizada com rapidez e precisão e proporcionou resultados satisfatórios.

O modelo paramétrico simplificado do índice de risco de salinização das terras à irrigação permitiu classificar, mapear e identificar os atributos mais limitantes.

Embora a metodologia utilizada neste trabalho apresente limitações, permitiu levantar informações de suma importância sobre a área estimando dados quantitativos do risco de salinização das terras à irrigação.

Os testes de normalidade de Lilliefors apresentaram-se semelhantes entre si entre as variáveis. O maior desvio padrão ocorreu no parâmetro salinidade da água subterrânea. A maior correlação ocorreu entre os parâmetros salinidade de água subterrânea e superficial.

A classe de risco baixo ocorreu em 1,46% das terras do Estado, seguido do risco médio em 22,41%. As classes alta, muito alta e extremamente alta representam 76,13% das terras.

Referências

- AESA. 2024. Agência de Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportall/shapes.html>. Acesso em: 4 de janeiro de 2024.
- Amorim, J.R.A. de; Cruz, M.A.S.; Resende, R.S. 2010. Qualidade da água subterrânea para irrigação na bacia hidrográfica do Rio Piauí, em Sergipe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 14(8) 804-811.

- Andrade, S.F. de; Mendonça-Santos, M. de L. 2016. Predição da fertilidade do solo do polo agrícola do Rio de Janeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51(9) 1386-1395.
- Araújo Neto, J.R.; Meireles, A.C.M.; Andrade, E.M.; Palácio H.A.Q.; Paulino, W.D. 2010. Modelagem da concentração de cloreto nas águas dos açudes poço da pedra e favelas. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 2010, Fortaleza. Anais...Fortaleza.
- Araújo, L.E. de; Sousa, F. de A.S. de; Ribeiro, M.A. de F.M.; Santos, A.S. dos; Medeiros, P. da C. 2008. Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba. *Revista Brasileira de Meteorologia* 23(2) 162-169.
- Assis, F.N. de; Arruda, H.V. de; Pereira, A.R. 1996. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: UFPEL. 161p.
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W. 1976. Water quality for agriculture. Rome: FAO. 97p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 29).
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W. 1999. Water Quality for Agriculture. FAO. (Trad.) GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. DE. Campina Grande: UFPB, 217p.
- Bernardo, S. 1995. Manual de Irrigação. 6.a ed. Viçosa: UFV.
- BRASIL. 1972. Ministério da Agricultura. Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro. (Boletins DPFS-EPE-MA, 15 - Pedologia 8). Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL.
- Brito, L.K.F.L. 2002. Avaliação da resposta in vitro de duas variedades de abacaxizeiro (*Ananascomosus* (L.) Merr) a um segundo cultivo na presença de NaCl. 62f. Monografia (Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.
- Bussab, W.O.; Morettin, P.A. 2003. Estatística Básica. 5. ed. São Paulo: Atual.
- Câmara, G.; Queiroz, G.R. 2001. Arquitetura de sistemas de informações geográficas. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V. Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos, 345p. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.2.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2024.
- Cambardella, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J.M.; Parkin, T.B.; Karlen, D.L.; Turco, R.F.; Konopka, A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Soc. American Journal* 58 1501-1511.
- Cano, É. V. 2022. Métodos de interpolação da batimetria adquirida por veículo de superfície não tripulado. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais, Geoprocessamento Aplicado). Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande.
- Cargnelutti Filho, A.; Matzenauer, R.; Trindade, J.K. da. 2004. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39(12) 1157-1166.
- Castro, F.C.; Santos, A.M. dos. 2015. Susceptibilidade ambiental a salinização das terras em municípios da microrregião de Petrolina - Pernambuco – Brasil. *Caminhos de Geografia* 16(56) 160-172.
- Catalunha, J.M.; Sediya, G.C.; Ribeiro, A.; Leal, B.G.; Soares, C.P.B. 2002. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a série de precipitação pluvial do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 10(1) 153-162.
- Chaves, L.H.G.; Menino, I.B.; Araújo, I.A.; Chaves, I.B. 1998. Avaliação da fertilidade dos solos das várzeas do município de Sousa, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 2 262-267.
- Chaves, L.H.G. 2005. Avaliação de potássio, matéria orgânica e fósforo em Neossolos dos perímetros irrigados Engenheiro Arcoverde e São Gonçalo-PB. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 5(2) 48-56.
- Cichota, R.; Lier, Q. de J. van; Rojas, C.A.L. 2003. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27(5) 789-798.
- Cordeiro, G.G. 2001. Qualidade de água para fins de irrigação (Conceitos básicos e práticas). Petrolina: Embrapa SemiÁrido. 32p.
- Costa, R.G.; Ghey, H.R. 1984. Variação da qualidade da água de irrigação da microrregião homogênea de Catolé do Rocha, PB. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 19(8) 1021-1025.
- EMBRAPA. 2001. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Semi-Árido, Petrolina. Documentos 167.
- EMBRAPA. 2018. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Santos et al. 5a. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa. 359p.
- ESRI. 2024. Mapa Topográfico Mundial. Disponível em: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: dezembro de 2024.
- Fanti, C.E. 2016. Reconstrução de superfícies tridimensionais utilizando B-splines com peso associado à redução do número de pontos de

- controle. 125f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- Figueredo Júnior, L.G.M.; Ferreira, J.R.; Fernandes, C.N.V.; Andrade, A.C.; Azevedo, B.M.; Saraiva, K.R. 2013. Avaliação da qualidade da água do distrito de irrigação Tabuleiros Litorâneos do Piauí–DITALPI. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 7(3) 213-223.
- Filippini Alba, J.M. 2014. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, Embrapa. p.84-95.
- Francisco, P.R.M. 2010. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia.
- Francisco, P.R.M.; José H.S. de; Ribeiro, G. do N.; Rodrigues, R.C.M. 2023. Photovoltaic potential of urbanized areas in the State of Paraíba using geotechnologies. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 13(4) 484-496.
- Francisco, P.R.M.; Medeiros, R.M. de; Santos, D.; Matos, R.M. de. 2015. Classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8(4) 1006-1016.
- Francisco, P.R.M.; Santos, D.; Oliveira, F.P. de; Ribeiro, G. do N.; Silva, V.F.; Rodrigues, R.C.M. 2023b. Estimativa da salinidade dos solos do Estado da Paraíba utilizando pedotransferência e geotecnologias. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 23(2) 66-79.
- Francisco, P.R.M.; Silva, V.F.; Santos, D.; Ribeiro, G. do N.; Ayres, G.D.J. 2022. Irrigation potential of land in the middle course of the Paraíba River using geotechnologies. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 12(2) 45-55.
- Francisco, P.R.M.; Sousa, José H.S. de; Ribeiro, G. do N.; Silva, J.N.; Saboya, L.F.; Chaves, L.H.G.; Nascimento, F.S. do. 2024a. Salinity of surface water in the State of Paraíba geospatialized by multi-level b-spline modeling. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 14(1) 870-884.
- Francisco, P.R.M.; Sousa, José H.S. de; Ribeiro, G. do N.; Silva, J.N.; Saboya, L.F.; Nascimento, F.S. do. 2024b. Estimation of the salinity of groundwater in the State of Paraíba using interpolation and modeling. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 14(1) 956-969.
- Francisco, P.R.M.; Santos, D.; Oliveira, F.P. de; Ribeiro, G. do N.; Silva, V.F.; Silvino, G. da S. 2023. Atualização do mapa de solos do Estado da Paraíba utilizando geotecnologias. *Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology* 9(2) 20-28.
- Garção, H.F.; Chacaltana, J.T.A. 2009. Estudo da hidrodinâmica e salinidade na baía de Vitória através de modelagem computacional. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 18, 2009, Campo Grande. Anais...Campo Grande.
- Hengl, T. 2007. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. Luxembourg: European Commission.
- Hengl, T.; Heuvelink, G.B.M.; Rossiter, D.G. 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences* 33 1301-1315.
- IBGE. 2021. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas Territoriais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- Lagacherie, P. 2008. Digital soil mapping: a state of the art. In: Hertmink, A.E.; Mcbratney, A.; Mendonça-Santos, M. de L. *Digital soil mapping with limited data*. Ed. Springer. p.3-14.
- Lagacherie, P.; Mcbratney, A.B. 2007. Chapter 1. Spatial soil information system and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Developments in Soil Science* 31 3-22.
- Leite, M.H.; Santos, R.V.; Gomes, A.D.V.; Vital, A.F.M. 2012. Aplicação de corretivos e crescimento de oleaginosas em solos salinizados do semiárido. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 7(1) 87-95.
- Lilliefors, H.W. 1967. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association* 62(318) 399-402.
- Luiz, T.B.P.; Silva, J.L.S. da; Schröder, T.; Descovi Filho, L.L.V. 2017. Mapeamento de risco de sodificação de solos em microbacia hidrográfica no Rio Grande do Sul. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 12(1) 68-73.
- Mcbratney, A.B.; Mendonça-Santos, M.L.; Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117 3-52.
- Mello, C.R. de.; Lima, J.M.; Silva, A.M.; Mello, J.M.; Silva, M.S. 2003. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27(5) 925-933.

- Mendes, J.S.; Chaves, L.H.G.; Chaves, I.B. 2008. Qualidade de águas para fins de irrigação da região do Congo, PB. *Revista Caatinga* 21(2) 131-138.
- Nielsen, D.R.; Biggar, J.W.; Erh, K.T. 1973. Spatial variability of field measured soilwater properties. *Hilgardia* 42(7) 215-259.
- Osorio, D.S.Á.; León, J.C.M.; Contreras, A.C. 2011. Bathymetric digital models generated by interpolation methods IDW, Kriging, Shepard and B-Spline in the archipelago of Rosario islands. *Revista Geomática* 5 3-14.
- PARAÍBA. 1978. Governo do Estado. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. CEPA-PB. Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletoConsult Ltda. 448p.
- PARAÍBA. 2006. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo & Atlas. Brasília. 112p.
- Pessoa, A.L. 2006. Uma abordagem bayesiana para estudo estatístico e geoestatístico de estimativas de salinidade do solo utilizando sensor de indução eletromagnética. 103f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.
- Polizelli Junior, V. 2008. Métodos implícitos para reconstrução de superfícies a partir de nuvens de pontos. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- QGIS. Development Team. 2024. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2024.
- Remacre, A.Z.; Normando, M.N.; Sancevero, S.S. 2008. Krigagem das proporções utilizando a krigagem da média: uma ferramenta auxiliar na modelagem de reservatórios. *Revista Brasileira de Geociências* 38(1) 82-87.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Salinity Laboratory. (USDA: Agriculture Handbook, 60).
- Russo, D.; Bresler, E. 1981. Soil hydraulic properties as stochastic processes, I. An analysis of field spatial variability. *Soil Science Soc. American Journal* 45 682- 687.
- Sabino, S.M.L.; Macedo, D.R. 2019. Relação entre dados pluviométricos primários e modelos geoestatísticos interpolados em escala global. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19, 2019, Santos. Anais...Santos.
- SAGA. 2024. System for Automated Geoscientific Analyses. Disponível em: <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>. Acesso em: 24 de janeiro de 2024.
- Santos, J.C.N.; Meireles, A.C.M.; Andrade, E.M.; Araujo Neto, J.R. 2009. Modelagem da concentração de sódio, cálcio e magnésio nas águas superficiais da bacia do rio Acaraú. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 19, 2009, Montes Claros. Anais...Montes Claros.
- 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.
- Silva Júnior, L.G.A.; Gheyi, H.R.; Medeiros, J.F. 1999. Composição química de águas do cristalino do Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 3(1) 11-17.
- Silvestre, A.L. 2007. Análise de dados e estatística descritiva. Escolar Editora.
- Valladares, G.S.; Faria, A.L.L. 2004. SIG na análise do risco de salinização na bacia do rio Coruripe, AL. *Engvista* 6(3) 86-98.
- Varejão-Silva, M.A.; Braga, C.C.; Aguiar, M.J.N.; Nietzsche, M.H.; Silva, B.B. 1984. Atlas Climatológico do Estado da Paraíba. UFPB, Campina Grande.
- Vital, A.F.M.; Santos, R.V.; Cavalcante, L.F.; Souto, J.S. 2005. Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso e fósforo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9(1) 30-36.