

Salinity of Groundwater in the Brazilian Continental Region Estimated by Modeling

Paulo R. M. Francisco*, George do N. Ribeiro**, José H. S. de Sousa***,
José N. Silva****, Luciano F. Saboya*****, Franciele S. do Nascimento*****

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

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

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

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

*****Dr. Prof. Associado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, lsaboya@hotmail.com

*****Graduanda em Eng. Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, simoesfranciele9@gmail.com

Received 19 September; accepted 19 October.

ABSTRACT

This work aimed to estimate and map the salinity of groundwater, for irrigation purposes in the Brazilian continental region. Electrical Conductivity (EC) data and Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}) and Sodium (Na^+) parameters were obtained from 12,129 wells in SIAGAS[®] and using QGIS[®] they were geospatialized using B-Spline Multilevel interpolation through the plugin SAGA[®]. In the QUALIGRAF[®] software, groundwater classification was carried out for irrigation purposes. The use of geoprocessing and interpolation techniques proved to be an efficient and fast tool that presented satisfactory results in the use of multilevel B-Spline modeling in mapping the risk of salinity in groundwater. The use of geostatistics demonstrated the variability of Electrical Conductivity, Adsorption Ratio and Salinity Risk of groundwater in the study area. The normality tests were similar to each other and there was a low correlation between the RAS and the CE. The High, Very High and Exceptionally High risks total 26.09% of the study area, and in this case, precautionary measures should be adopted regarding irrigation using groundwater in these areas. The areas with the greatest salinity risks are located under the Borborema Plateau with similar geological characteristics under different stratigraphic and lithological units in the semi-arid region and related to regions of higher altitudes and lower rainfall. The salinity of groundwater for irrigation purposes showed variability between medium to exceptionally high risk classes (C_2S_1 to C_5S_4).

Keywords: water quality, irrigation, Wells, geostatistics, multilevel B-Spline.

Salinidade das Águas Subterrâneas de Região Continental Brasileira Estimada por Modelagem

RESUMO

Este trabalho objetivou estimar e mapear a salinidade das águas subterrâneas, para fins de irrigação para parte da região continental brasileira. Foram obtidos dados de Condutividade Elétrica (CE) e os parâmetros de Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Sódio (Na^+) de 12.129 poços no SIAGAS[®] e utilizando o QGIS[®] foram geoespacializados utilizando a interpolação B-Spline Multinível através do plugin SAGA[®]. No software QUALIGRAF[®] foi realizada a classificação da água subterrânea para fins de irrigação. No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio[®]. O uso das técnicas do geoprocessamento e da interpolação demonstraram serem uma ferramenta eficiente e rápida onde apresentou resultados satisfatórios no uso da modelagem por B-Spline multinível no mapeamento do risco a salinidade das águas subterrâneas. O uso da geoestatística demonstrou a variabilidade da Condutividade Elétrica, da Razão de Adsorção e do Risco de Salinidade das águas subterrâneas da área de estudo. Os testes de normalidade apresentaram-se semelhantes entre si e houve baixa correlação entre o RAS e o CE. Os riscos Alto, Muito Alto e Excepcionalmente Alto totalizam 26,09% da área de estudo, devendo-se neste caso, adotar medidas de cautela quanto a irrigação utilizando águas subterrâneas nestas áreas. As áreas com maiores riscos a salinidade estão localizadas sob o Planalto da Borborema com características geológicas similares sob diversas unidades estratigráficas e litológicas na região semiárida e relacionadas a regiões de maiores altitudes e de menor pluviosidade. A salinidade das águas subterrâneas para fins de irrigação, apresentaram variabilidade entre as classes de risco médio à excepcionalmente alto (C_2S_1 a C_5S_4).

Palavras-chave: qualidade de água, irrigação, Poços, geoestatística, B-Spline multinível.

1 Introdução

O uso atual das águas subterrâneas no Brasil é feito por 2,5 milhões de poços tubulares que extraem apenas 2% da recarga efetiva, demonstrando seu grande potencial para atender às demandas futuras no campo e nas cidades (Hirata & Suhogusof, 2019). As águas subterrâneas constituem uma reserva estratégica. Hoje, representa um fator competitivo no mercado global (Andrade et al., 2009). A crescente demanda por água está fazendo com que os países maximizem o uso de suas reservas de água. Neste contexto, alternativas têm sido usados para aumentar a disponibilidade de água, principalmente para a procura rural difusa existente nas zonas áridas e semiáridas (Lima et al., 2013).

As águas subterrâneas ocorrem preenchendo as zonas de fraqueza das rochas (fendas e fraturas) formando um aquífero fissural que, embora seja em geral referido como de baixo potencial hidrogeológico e com problemas de salinização, tem um papel muito importante no suprimento de população rural e uso na pecuária, notadamente naqueles setores fora da área de influência de reservatórios superficiais ou barragens (Costa, 2002). Nas regiões interioranas, especialmente nas regiões áridas/semiáridas, as águas subterrâneas constituem a maior fonte disponível de água doce (Dehbandi et al., 2019; Morris et al., 2003; Van Loon & Duffy, 2011) e está ganhando cada vez mais importância como fonte de abastecimento de água para usos domésticos, industriais e agrícolas (Bovolo et al., 2009; Gleick, 2009; Karen et al., 2017).

Considerando as características geológicas da região semiárida brasileira, os aquíferos aluviais são essenciais para a agricultura e a economia doméstica (Andrade et al., 2014; Fontes Júnior & Montenegro, 2017; Montenegro et al., 2010). No Nordeste brasileiro existem milhares de poços e açudes cujas águas são utilizadas para irrigação, representando um importante insumo na cadeia produtiva; no entanto, sua qualidade varia no tempo e no espaço. O uso de água de má qualidade pode trazer danos ao meio ambiente, com sérios reflexos socioeconômicos (Silva Jr. et al., 1999). De acordo com Andrade et al. (2012), o conhecimento da qualidade da água subterrânea relativo à concentração salina e de como ela está espacialmente distribuída, é necessário ao planejamento da exploração e ao manejo das águas do aquífero, a fim de garantir sua sustentabilidade e prevenir a degradação dos recursos hídricos.

Para fins de uso na agricultura irrigada, os parâmetros físico-químicos e a salinidade são

muito importantes na avaliação da qualidade da água (Holanda et al., 2016; Souza & Ribeiro, 2019). A qualidade da água para fins agrícolas é um termo que se utiliza para indicar a conveniência ou limitação de seu uso para fins de irrigação onde, faz-se necessário à sua avaliação para posterior planejamento e manejo da irrigação (Carneiro et al., 2012). Além de água em quantidade, a qualidade é outro aspecto muito importante a se considerar na irrigação, pois a adequação da água não depende unicamente do teor total, mas, também, de seus tipos (Ayers & Wescott, 1999).

A RAS determina a sodicidade da água de irrigação, considerando a proporção de sódio em relação ao cálcio e magnésio. Este sódio presente na água de irrigação tende a elevar a porcentagem de sódio trocável no solo (PST), afetando a capacidade de infiltração deixando os solos com certa dificuldade de ser manejado, pois suas características físicas (porosidade, permeabilidade entre outras) são afetadas diretamente (Cavalcante, 2012).

Thorne e Rickeenback (1972), relatam que a condutividade elétrica (CE), que representa uma medida indireta da concentração total de sais solúveis, e a relação de adsorção de sódio (RAS), constituem os principais parâmetros de classificação e qualidade das águas para irrigação (Nunes Filho et al., 2000). Ribeiro et al. (2005) afirmam que, a condutividade elétrica é a variável mais empregada para se avaliar o nível de salinidade, ou a concentração de sais solúveis na água de irrigação e no solo.

A qualidade das águas subterrâneas pode variar no tempo e no espaço, e se sabe que na época de estiagem seus níveis de sais são mais elevados, quando também são mais altas as temperaturas e a evapotranspiração, com as culturas exigindo maior suprimento de água (Medeiros, 1992; Silva Júnior et al., 1999). De acordo com Souza et al. (2008) e Cichota et al. (2003), trabalhos 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.

Os fenômenos naturais apresentam frequentemente uma certa estruturação nas variações entre vizinhos, e também uma observação realizada em um determinado tempo guarda semelhança com realizações observadas em tempos futuros. Desta forma, pode-se dizer que as variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial e/ou temporal (Silva et al., 2007).

Montenegro et al. (2001) afirmam que, a análise da variabilidade espacial é possível através de metodologia geoestatística, baseada na estrutura de correlação espacial da variável em estudo. Vários autores (Vieira et al., 1981; Vieira et al., 1983; Trangmar et al., 1985; Souza et al., 1998; Salviano et al., 1998; Oliveira et al., 1999; Berg & Oliveira, 2000) têm mostrado, através das técnicas geoestatísticas, que a variabilidade não é puramente aleatória, apresentando correlação ou dependência espacial. 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.

Dentre os procedimentos geoestatísticos, se destaca como a técnica do algoritmo B-spline multinível (MBS) para interpolação espacial de dados dispersos. O algoritmo faz uso de uma hierarquia grosseira à fina de redes de controle para gerar uma sequência de funções B-spline bicúbicas, cuja soma se aproxima da função de interpolação desejada em que, grandes ganhos de desempenho são obtidos usando o refinamento do B-spline para reduzir a soma dessas funções em uma função B-spline equivalente (Lee et al., 1997).

Diversos autores têm realizado estudos sobre a qualidade das águas subterrâneas para irrigação no Brasil, como por Silva et al. (2003) e Andrade Júnior et al. (2006) no Piauí; Costa et al. (2006), Lima et al. (2019), no Rio Grande do Norte; em Pernambuco Montenegro et al. (2001), Souza et al. (2006), Fernandes et al. (2009), Andrade et al. (2012), Cary et al. (2013; 2015), Fontes Júnior e Montenegro (2017) e Almeida et al. (2024); na Paraíba por Albuquerque (1986), Lima et al. (2004), Ceballos et al. (2006) e Azevedo et al. (2012); no Ceará por Andrade et al. (2008; 2010), Kreis et al. (2024);

Portanto, este trabalho objetiva estimar e mapear a salinidade das águas subterrâneas, para fins de irrigação de parte da região continental brasileira utilizando modelagem.

2 Material e Métodos

A área de estudo compreende a região Nordeste e os Estados de Minas Gerais, Maranhão e Amapá com diversidade de ambientes, biomas, vegetação, elevação (Figura 1a), solos, e tipos de clima (Figura 1b) e precipitação pluviométrica (Figura 1c). De acordo com Alvares et al. (2013),

na área de estudo, o clima é formado pelos tipos Af, Aw, As, BSh, Cwa e Cwb.

O Brasil é um país megadiverso onde seu território abrange 6 biomas únicos denominados Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pampa, Pantanal e Mata Atlântica, em que possuem características distintas em termos de estrutura e composição da vegetação, características físicas e químicas do solo, disponibilidade de água, biodiversidade com ecossistemas endêmicos, condições climáticas e atividades de uso da terra (Souza Jr. et al., 2020).

Os ambientes tropicais caracterizam-se pela elevada incidência de radiação solar, insolação e temperatura. Quanto mais próximo do Equador, mais crítica é a incidência, como é o caso das regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste do Brasil (Bayer, 2004; Bley Jr., 1999). Quanto a precipitação, a América do Sul, como tem grande parte do seu território em área tropical, recebe anualmente volumes elevados de precipitação. Além disso, há grande variabilidade temporal e espacial da precipitação (Reboita et al., 2010; Monteiro et al., 2021; Reboita & Ambrizzi, 2022).

Quanto a caracterização geológica (Figura 2a), a margem continental brasileira está dividida em três províncias fisiográficas distintas, a Plataforma continental Amazonas-Maranhão, incluindo a Cone Amazônico; a plataforma continental da costa norte-nordeste, abrangendo Barreirinhas, Ceará, Potiguar, Recife-João Pessoa, Sergipe-Alagoas, ao Sul bacias da Bahia e Jequitinhonha; leste-sudeste plataforma continental costeira, na qual se situam as zonas costeiras e bacias marítimas de Cumuruxatiba, Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas. A seção estratigráfica brasileira conta com oito unidades principais, o Escudo Brasileiro Pré-cambriana, composto por rochas metamórficas dobradas e ígneas intrusivos; e cobertura de plataforma metassedimentar do Pré-cambriano ao Cambro-Ordoviciano, e seis sequências litoestratigráficas: duas paleozóicas, duas mesozóicas e duas cenozóicas em idade, delimitadas por discordâncias inter-regionais (Campos et al., 1974). O território do Brasil coincide quase inteiramente com a Plataforma Sul-Americana, o núcleo cristalino do continente. Seu embasamento é composto por antigas rochas metamórficas e ígneas e não sofreu nenhuma regeneração tectônica desde o início do Fanerozóico. Rochas sedimentares com estratificação quase horizontal cobrem este embasamento cristalino (Almeida et al., 1981).

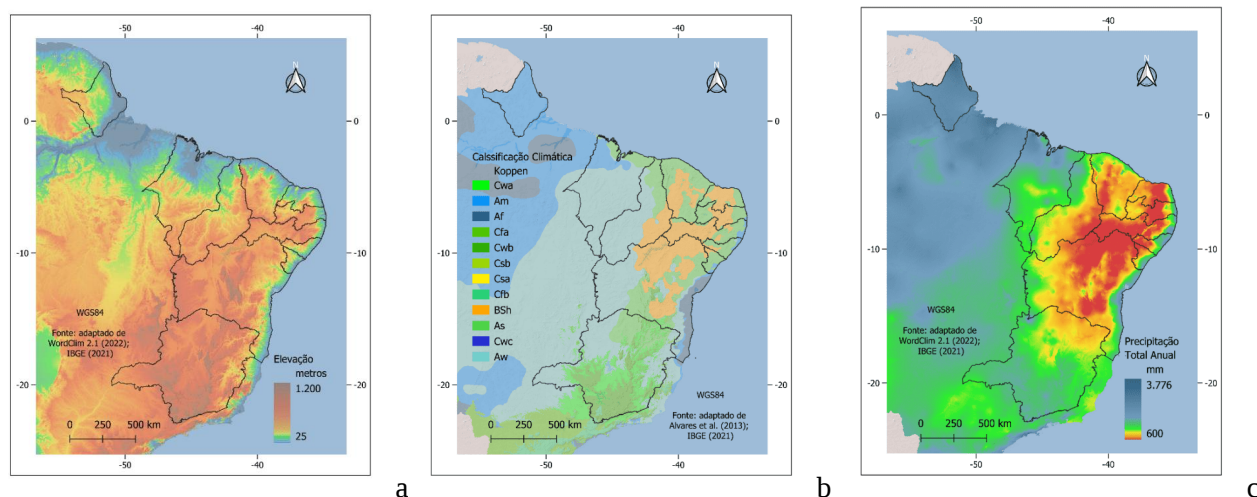


Figura 1. Elevação (a); Classificação climática de Köppen (b); Precipitação total (c).
Fonte: adaptado de WorldClim[®] 2.1 (2022); Alvares et al. (2013); IBGE (2021).

O Brasil possui uma grande diversidade de solos em sua extensão continental (Figura 2b), decorrente da ampla diversidade de pedoambientes e de fatores de formação do solo. Predominam os Latossolos, Argissolos e Neossolos, que no conjunto se distribuem em aproximadamente 70% do território nacional. As classes Latossolos e Argissolos ocupam aproximadamente 58% da área e são solos profundos, altamente intemperizados,

ácidos, de baixa fertilidade natural e, em certos casos, com alta saturação por alumínio. Também ocorrem solos de média a alta fertilidade, em geral pouco profundos em decorrência de seu baixo grau de intemperismo. Estes se enquadram principalmente nas classes dos Neossolos, Luvisolos, Planossolos, Nitossolos, Chernossolos e Cambissolos (Santos, 2010).

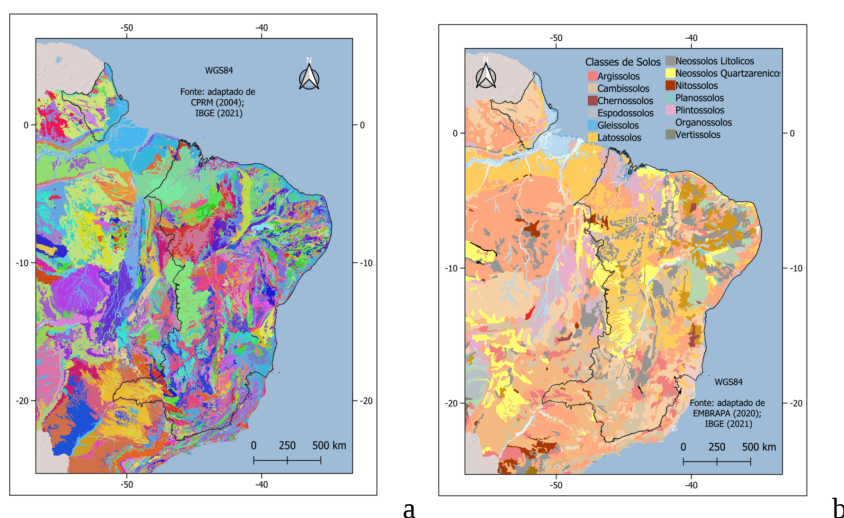


Figura 2. Geologia da área de estudo (a), Solos da área de estudo (b).
Fonte: adaptado de CPRM (2004); EMBRAPA (2020); IBGE (2021).

Na metodologia deste trabalho foram utilizados dados obtidos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS[®] do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM, 2024), entre 1962 a 2004 totalizando 12.129 poços distribuídos por 1.223 municípios da área de estudo, dados estes de Condutividade Elétrica (CE) em $\mu\text{mhos/cm}$, os parâmetros de Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Sódio (Na^+) em meqL^{-1} .

Utilizando planilha Excel[®] foram inseridos os dados obtidos e após, utilizando o QGIS[®] 3.36

foram importados e geoespacializados utilizando a interpolação B-Spline Multinível (MBS) através do plugin SAGA[®] gerando imagens no formato *raster* com células de 1 km^2 , com limiar de erro de 0,0001 e 11 como nível máximo. Método de interpolação em que, à medida que a hierarquia avança de nível, o controle de látex aplicado por cada multinível suaviza e interpola o conjunto de pontos que compõem a superfície, gerando uma representação aproximada da realidade (Lee et al., 2005). Em seguida foram classificados de acordo

com a Tabela 1, mapeados e recortados utilizando os limites da área de estudo (IBGE, 2021). Utilizando a calculadora *raster* do QGIS® foi determinado a Razão de Adsorção de Sódio (RAS), de acordo com a Equação 1.

$$RAS = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{0.5} \text{ (Eq.1)}$$

Em seguida, com o objetivo de verificar o comportamento dos dados foi realizada a estatística descritiva dos dados obtidos utilizando o plugin SAGA®.

Após, utilizando o software QUALIGRAF® (Möbius, 2003), desenvolvido e disponibilizado pela FUNCEME, foi realizada a classificação da água subterrânea para fins de irrigação utilizando-se a classificação proposta pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL), que leva em consideração a CE e a RAS, para os riscos de salinização e/ou sodificação da água (Richards, 1954) (Tabela 1). Para a Relação de Adsorção de Sódio (RAS) utiliza este parâmetro numa combinação de intervalos de valores de RAS com

CE da água, sendo dado o grau de restrição de uso da água para irrigação, quanto ao risco de sodificação do solo (Ayers & Westcot, 1999). Quanto ao risco de salinidade, as águas são classificadas 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 (Bernardo, 1995).

Os valores de classificação obtido para os pontos foram geoespacializados utilizando-se a interpolação B-Spline Multinível (MBS) através do plugin SAGA® do QGIS® 3.36. Em seguida as imagens *raster* foram transformados em formato vetorial, classificada e recortado em seus limites conforme Tabela 1. Após, com o objetivo de realizar o cálculo das áreas, foi utilizado o plugin *r.report* do GRASS®.

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

Condutividade Elétrica CE (µmohs/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	Excepcionalmente 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 e Westcot (1999).

No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio® v.2022 Para avaliação dos dados das amostras de água 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, foram usados os testes de hipóteses não paramétricos Anderson-Darling (1954), Lilliefors (1967), Jarque-Bera (1987). Na elaboração de correlação paramétrica foi utilizado a metodologia de correlação de Spearman (1904). Buscou-se identificar uma correlação entre o RAS e o CE utilizando o método de Pearson (1895).

3 Resultados e discussão

Na Figura 3 pode-se observar a distribuição espacial dos 12.129 pontos de dados obtidos com menor concentração de poços com dados nos Estados do Piauí e Maranhão e nenhum dado no Estado do Amapá, talvez devido a maior disponibilidade hídrica promovida pela pluviosidade regional, neste caso sendo desconsiderado qualquer valor no Amapá. O Estado da Bahia apresenta o maior número de dados devido sua maior extensão territorial, seguido do Ceará (Tabela 2).

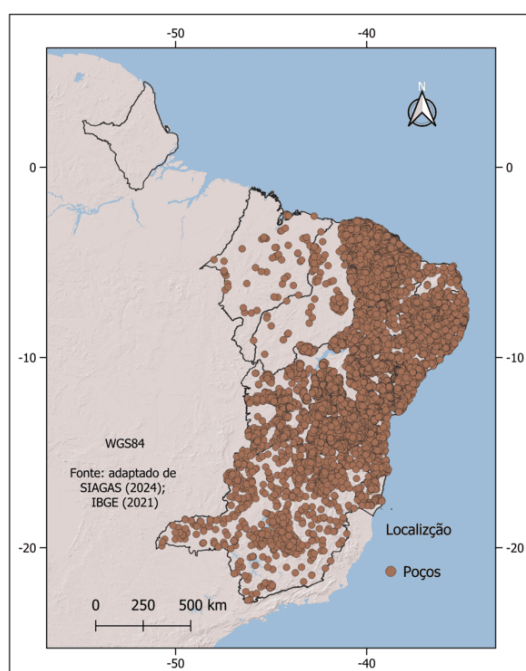


Figura 3. Distribuição espacial dos poços. Fonte: adaptado de SIAGAS (2024); IBGE (2021).

Tabela 2. Dados obtidos

Estado	Dados	Municípios
AL	250	61
BA	6.800	244
CE	2.086	184
MA	71	45
PB	460	115
PE	1.011	136
PI	110	43
RN	115	43
SE	112	45
MG	1.114	307
AP	0	0
Total	12.129	1.223

No mapa da geoespacialização do Na⁺ (Figura 4a), observa-se que os maiores valores se distribuem na região setentrional de toda a região semiárida até os limites do Estados do Piauí localizados em sua maioria sob o Planalto da Borborema em diversas unidades estratigráficas e litológicas. O Planalto da Borborema é uma das principais faixas de dobramento do Brasil, marcando as rochas com diferentes graus de metamorfismo (Neves, 2003).

Na Figura 4b, referente ao Ca^{2+} , pode-se verificar que os maiores valores se encontram distribuídos por toda a região central do Estado da Bahia, região do Sertão em Sergipe, Alagoas e Pernambuco, na Paraíba e Rio Grande do Norte sob o Planalto da Borborema, e por todo o Estado do Ceará, adentrando ao sul do Piauí. Os menores valores localizam-se em todo litoral em sua maioria sob solos Sedimentares. De acordo com Lima et al. (2009), os aquíferos sedimentares, por apresentarem melhor poro-permeabilidade, oferecem melhores condições de infiltração e circulação de suas águas subterrâneas, o que influencia de modo decisivo a salinidade. Fernandes et al. (2009), quanto ao Ca^{2+} , obtiveram valores entre 0,9 a 7,2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ em Pernambuco no semiárido.

Quanto ao Mg^{2+} (Figura 4c), apresenta pouca influência em toda a área de estudo com os maiores valores distribuídos na região central da Bahia, Pernambuco e Paraíba, com menor ocorrência nos demais Estados. Na bacia sedimentar do Rio do Peixe, Sertão da Paraíba, Ceballos et al. (2006) observaram valores médios de $17,85 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$. De acordo com Yaron (1973), a composição de determinada água está de acordo com o tipo de rocha e do solo sobre o qual ela flui e da composição iônica da rocha matriz onde ela é armazenada. Leprun (1983) destaca que, águas oriundas de regiões sedimentares, de baixa salinidade, são principalmente bicarbonatadas, sulfatadas ou mistas, enquanto nas fissuras das rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino, com tendência a águas mais salinas, há predominância unicamente de águas cloretadas de sódio ou magnésio. Silva Jr. et al. (1999), quanto ao teor de magnésio, observaram variação de valores para alguns Estados do Nordeste, para o Rio Grande do Norte entre 1,08 a 1,68; Paraíba entre 2,38 a 5,20 e Ceará entre 1,33 a 5,23 (mmol L^{-1}).

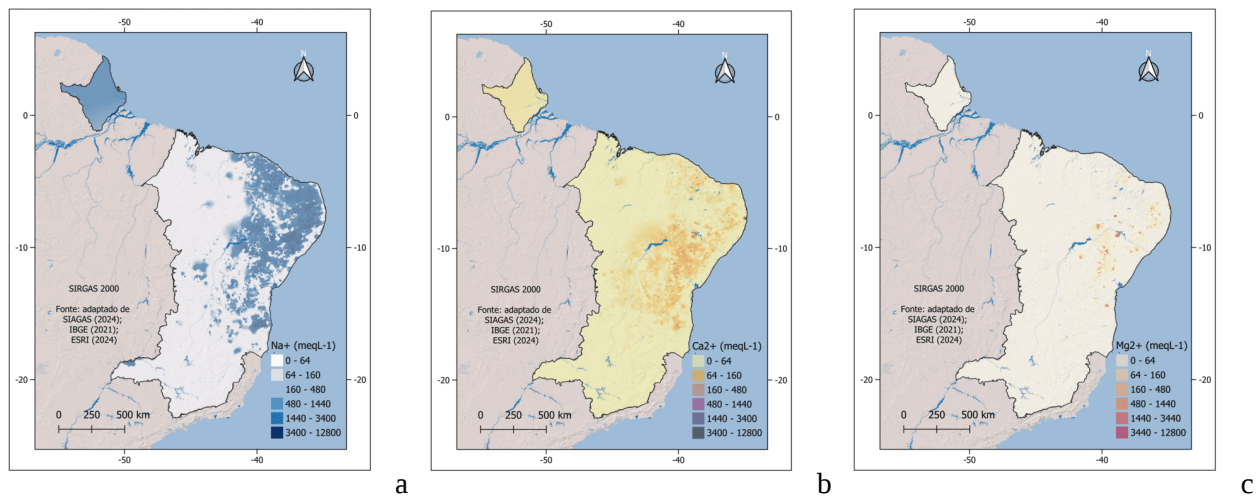


Figura 4. Distribuição espacial, a) Na^+ , b) Ca^{2+} , c) Mg^{2+} (meqL^{-1}). Fonte: adaptado de SIAGAS (2024); IBGE (2021); ESRI (2024).

Pela Figura 5a, quanto ao CE, pode-se verificar que os maiores valores se distribuem na região setentrional de toda a região semiárida, isto devido as características geológicas da região, com menores valores na região do litorânea, excluindo em sua maioria as áreas dos Estados do Maranhão, Minas Gerais e Piauí. Resultados similar ao da CPRM elaborado por Diniz et al. (2014).

No Estado do Piauí, Andrade Jr. et al. (2006), obtiveram maiores valores de condutividade elétrica $1,20 \text{ dS m}^{-1}$, presentes ao leste divisa com o Ceará, condizente com a formação geológica da região, representados no afloramento do cristalino, mostrando forte interferência da geologia sobre a qualidade da água subterrânea (Shalhevet & Kamburov, 1976). Em vários estudos como por Leprun (1983), Laraque (1989), Leite (1991), Martins (1993); e Audry e

Suassuna (1995), têm-se observado a existência de correlações altamente significativas entre condutividade elétrica e diferentes características químicas das águas utilizadas para irrigação no Nordeste do Brasil. Fernandes et al. (2009), obtiveram valores de CE entre 500 a 4.580 Scm^{-1} , em Pernambuco no semiárido.

Quanto ao RAS (Figura 5b), apresenta-se maior concentração de valores em pequenas áreas esparsas, a oeste de Minas Gerais divisa com Goiás, próximo ao litoral sul da Bahia e divisa com o Piauí, e grande influência na região do Sertão Alagoano, divisa com Pernambuco sob rochas metamórficas. Em Pernambuco no município de Serra Talhada, Fernandes et al. (2009) obtiveram valores de RAS entre $2,12$ a $24,2$. No Agreste da Paraíba, Melo et al. (2016) observaram valores de $0,46$ a $1,4$ em 3 poços.

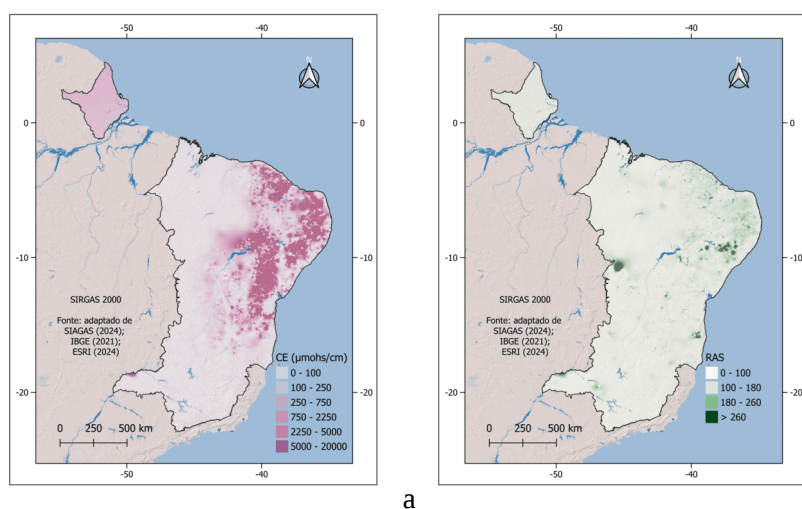


Figura 5. Distribuição espacial, a) CE ($\mu\text{mhos/cm}$), b) RAS (adimensional). Fonte: adaptado de SIAGAS (2024); IBGE (2021); ESRI (2024).

Na Figura 6, mapa de distribuição espacial do risco de salinidade das águas subterrâneas para

fins de irrigação, verifica-se que os maiores valores entre as classes C_4S_1 e C_5S_4 , de muito alto a

excepcionalmente alto risco de salinidade, estão localizados na região central semiárida sob o Planalto da Borborema com características geológicas similares e em diversas unidades estratigráficas e litológicas com maior predominância na região central da Bahia, Sertão de Alagoas e Pernambuco, Agreste de Pernambuco e Paraíba, no Rio Grande do Norte na região do Sertão excluindo o Litoral, e no Ceará distribuído pela área central até próximo a região litorânea do Estado.

As classes C_2S_1 a C_3S_4 , de Médio a Alto risco de salinidade, apresentam-se distribuídas espacialmente ao entorno das classes de maiores valores e entre as classes C_1S_1 e C_1S_4 , de Baixo risco, distribuídas por toda a borda da área de estudo, em regiões interioranas do Continente de menor influência da semiaridez do clima. Conforme Lima et al. (2009), a salinidade das águas cresce, de uma maneira geral, do litoral em direção ao interior, na razão inversa dos índices pluviométricos.

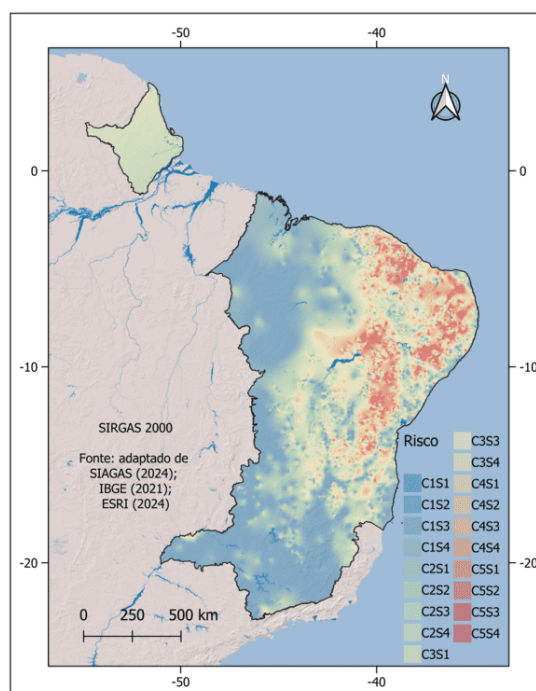


Figura 6. Distribuição espacial do risco de salinidade das águas subterrâneas para fins de irrigação. Fonte: adaptado de SIAGAS (2024); IBGE (2021); ESRI (2024).

Leprun (1983), analisando 33 amostras de água de poços do Nordeste obteve as classes C_1S_1 a C_3S_1 de risco baixo a alto, resultado similar a este trabalho. Quanto aos resultados deste trabalho apresentam-se similar aos resultados obtidos no Atlas Nacional do Brasil (IBGE, 2010) no mapa de Classificação das águas subterrâneas para fins de irrigação da Região Nordeste de área de atuação da SUDENE.

No Piauí, Andrade Jr. et al. (2006), observaram a excelente qualidade de água, extraída por poços que atingem a Formação Serra Grande, em que permite o uso da água subterrânea para

irrigação, resultado similar a este trabalho. Em Pernambuco no município de Serra Talhada, Fernandes et al. (2009) obtiveram a classificação das águas superficiais para irrigação entre C_3S_1 a C_4S_3 neste caso, com risco de salinização e sodificação.

No histograma do mapa de risco de salinidade a irrigação por águas subterrâneas (Figura 7a) observa-se que, a maior frequência apresenta-se na Classe C_1S_1 a C_1S_4 com Baixo risco, concordando com os dados descritivos da Tabela 3 distribuídos em 49,20% da área de estudo.

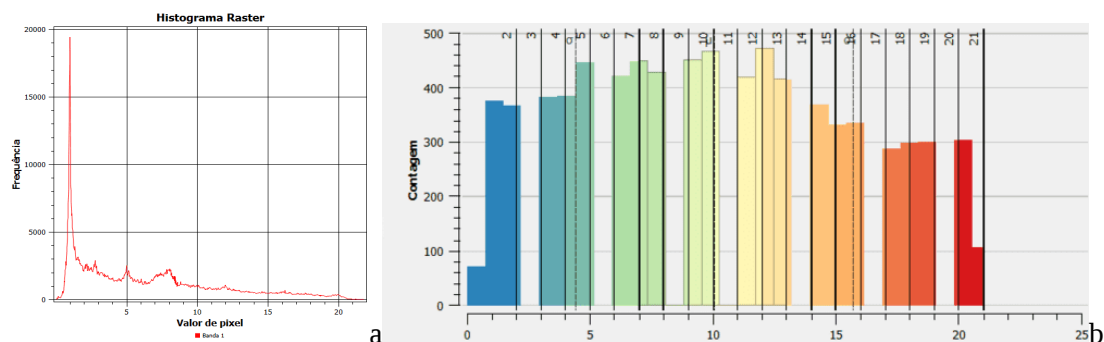


Figura 7. a) Histograma de frequência, b) Distribuição das classes de risco a salinidade.

Pela Tabela 3, observa-se a distribuição do risco de salinidade das águas subterrâneas, onde a classe de médio de risco está localizada em 24,71% da área, seguida da classe alto (C_3S_1 a C_3S_4) está representada em 13,44%, a classe muito

alta de risco (C_4S_1 a C_4S_4) em 8,19%, e em somente 4,46% está representado pela classe excepcionalmente alto de risco a salinidade (C_5S_1 a C_5S_4).

Tabela 3. Distribuição espacial das classes de risco de salinidade das águas subterrâneas

Risco Salinidade								
Classe	Área (km²)	%	Classe	Área (km²)	%	Classe	Área (km²)	%
C ₁ S ₁	620.101	27,18	C ₃ S ₁	90.817	3,98	C ₅ S ₁	34.006	1,49
C ₁ S ₂	218.988	9,60	C ₃ S ₂	74.635	3,27	C ₅ S ₂	29.381	1,29
C ₁ S ₃	146.784	6,43	C ₃ S ₃	79.157	3,47	C ₅ S ₃	26.608	1,17
C ₁ S ₄	136.377	5,98	C ₃ S ₄	61.877	2,71	C ₅ S ₄	11.846	0,52
Subtotal	1.122.250	49,20	Subtotal	306.486	13,44	Subtotal	101.841	4,46
C ₂ S ₁	141.934	6,22	C ₄ S ₁	54.749	2,40			
C ₂ S ₂	117.825	5,17	C ₄ S ₂	44.468	1,95			
C ₂ S ₃	185.618	8,14	C ₄ S ₃	45.001	1,97			
C ₂ S ₄	118.314	5,19	C ₄ S ₄	42.676	1,87			
Subtotal	563.691	24,71	Subtotal	186.894	8,19	Total	2.281.162	100,00

Pela Figura 8 da classificação das águas subterrâneas para fins de irrigação, observa-se que, a maioria dos valores das amostras se distribuem em todas as classes, em que a classe de risco baixo se apresenta a maioria das amostras, seguida classe

média de risco, as classes forte e muito forte representam a minoria, mas demonstra o maior risco a salinização dos solos pela água subterrânea dos poços amostrados.

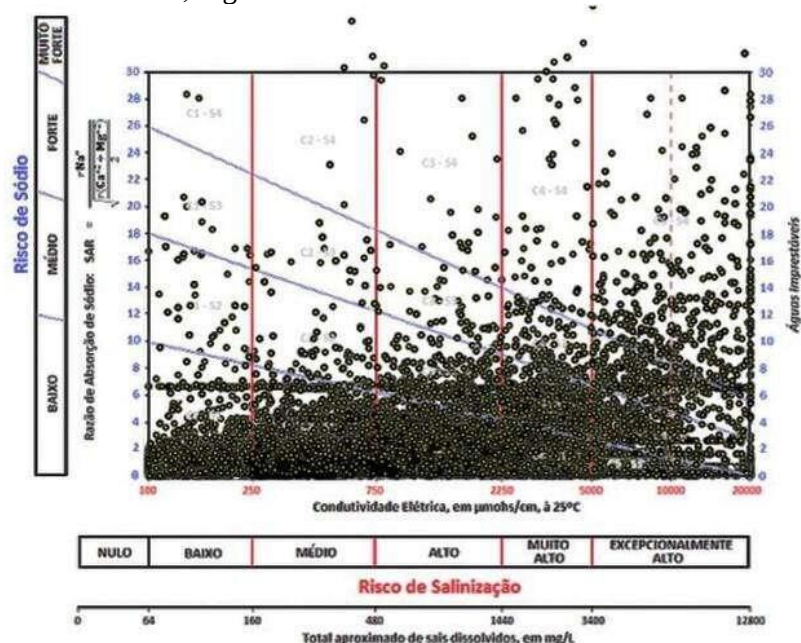


Figura 8. Classificação das águas subterrâneas para fins de irrigação.

De acordo com Almeida (2010), águas com esse tipo de classificação (C₃, C₄ e C₅) não são apropriadas para irrigação sob condições ordinárias, apenas em circunstâncias muito especiais. Já para o risco de sódio, o uso dessas águas na agricultura pode trazer sérios riscos ao solo, podendo torná-lo infértil em pouco tempo, sendo necessárias práticas de manejo especiais, como boa drenagem, fácil lixiviação e aporte de matéria orgânica.

Nos dados estatísticos das variáveis apresentados na Tabela 4, pode-se observar que, entre as variáveis Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, a maior média apresenta-se no Ca²⁺, seguido pelo maior desvio padrão no Na⁺. A variável CE apresenta alta variabilidade. A variável RAS por ser adimensional apresenta um desvio padrão de 65,29 com média de 19,99.

Tabela 4. Dados estatísticos das variáveis

Atributo/Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Pad.	Alcance	Curtose	1.º Quart	3.º Quart
Na ⁺	242,17	47,95	0	49.479	892,75	49.479	1.375,46	17,70	200
Ca ²⁺	266,81	83,13	0	32.464	589,17	32.464	866,27	20,91	329
Mg ²⁺	127,94	32,85	0	45.526	608,75	45.526	3.388,52	7,90	104
CE	2.478,20	960,50	0	19.999	3.838,14	19.999	7,52	317,00	2.703
RAS	19,99	8,75	0	4.380	65,29	4.380	2.003,34	2,78	20

Leprun (1983), obteve valores máximos de CE de 9.990 para 504 amostras da região Nordeste e valores médios de 918 quanto a condutividade elétrica da água subterrânea. No Maranhão, Almeida et al. (2012) obtiveram valores de condutividade elétrica (CE) em 26 amostras amostradas entre 200 e 4.000 (µmohs/cm).

Com relação à variabilidade entre as observadas por meio das caixas interquáliticas do

gráfico boxplot para cada atributo, observa-se que na variável CE apresenta maior variabilidade (Figura 9d).

Quanto ao *quantis*, observa-se que a distribuição apresenta irregularidades em todas as variáveis. Observa-se que a maior irregularidade apresenta na variável CE (Figura 10d).

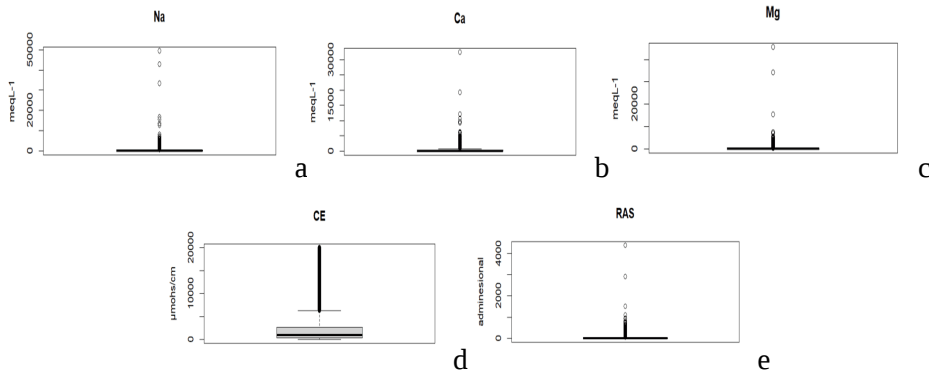


Figura 9. Boxplot das variáveis das amostras. a) Na⁺, b) Ca²⁺, c) Mg²⁺, d) CE, e) RAS.

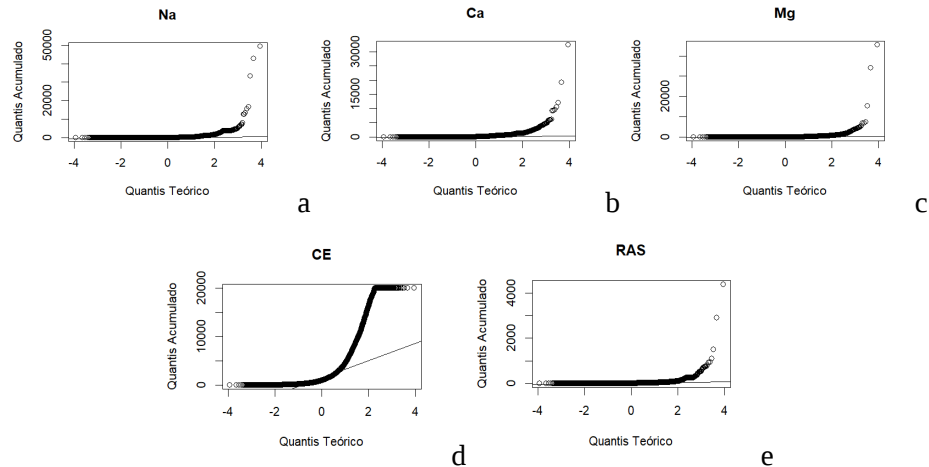


Figura 10. Quantis das variáveis das amostras. a) Na⁺, b) Ca²⁺, c) Mg²⁺, d) CE, e) RAS.

No teste de normalidade (Tabela 5) pode-se verificar que os resultados dos testes de Anderson-Darling, Lilliefors e Jarque-Bera

apresentam-se semelhantes entre si para todas as variáveis com $p\text{-valor} < 2,2e^{-16}$, o que leva a aceitar a hipótese de normalidade nos dados.

Tabela 5. Testes de normalidade

Variável\Teste	Anderson-Darling		Lilliefors		Jarque-Bera	
	A	p-valor	D	p-valor	X ²	p-valor
Na ⁺	2669,9	<2,2e ⁻¹⁶	0,39309	<2,2e ⁻¹⁶	9,6e ⁺⁰⁸	<2,2e ⁻¹⁶
Ca ²⁺	1645,5	<2,2e ⁻¹⁶	0,32533	<2,2e ⁻¹⁶	3,8e ⁺⁰⁸	<2,2e ⁻¹⁶
Mg ²⁺	2888,3	<2,2e ⁻¹⁶	0,41677	<2,2e ⁻¹⁶	6e ⁺⁰⁹	<2,2e ⁻¹⁶
CE	1489,9	<2,2e ⁻¹⁶	0,25925	<2,2e ⁻¹⁶	4,31e ⁺⁰⁴	<2,2e ⁻¹⁶
RAS	2521,5	<2,2e ⁻¹⁶	0,37972	<2,2e ⁻¹⁶	2e ⁺⁰⁹	<2,2e ⁻¹⁶

Pode-se verificar na Figura 11 que, entre as variáveis deste trabalho o CE e o RAS, apresenta uma correlação de 0,154, o maior valor de

correlação compreende-se entre o RAS e o Na (0,544), e a menor correlação entre o RAS e o Ca (0,016).

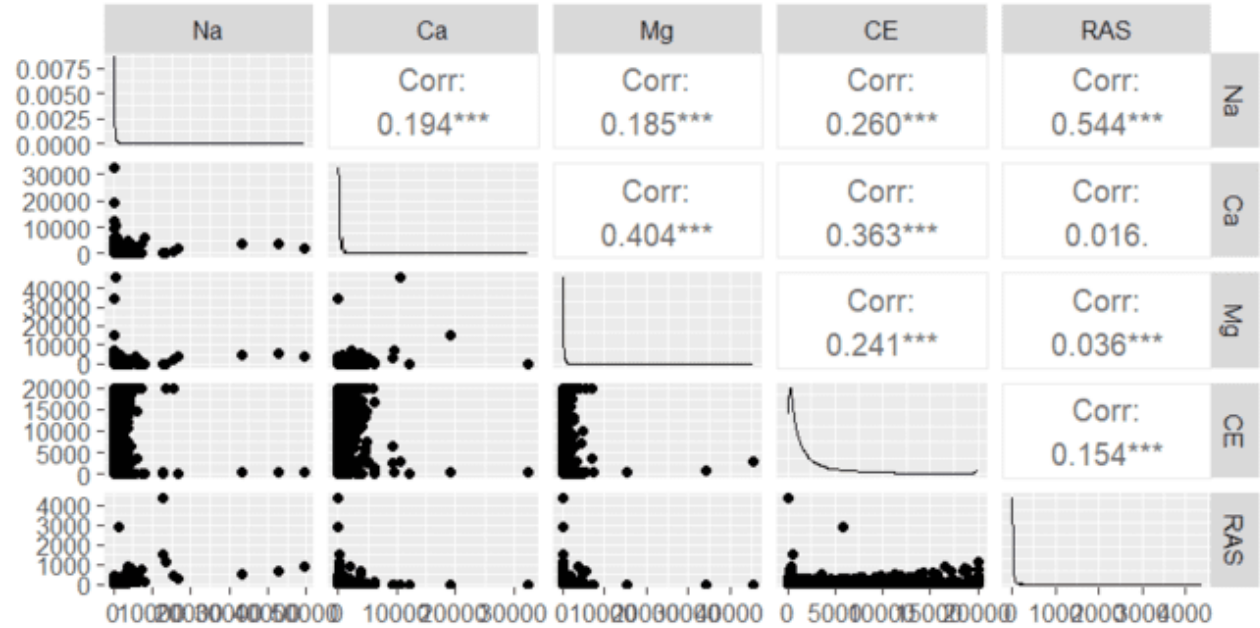


Figura 11. Correlação entre as variáveis.

Para o Rio Grande do Norte em região sedimentar, Oliveira e Maia (1998) obtiveram valores de classificação entre C₁S₁ e C₂S₂.

Estudos realizados por Costa e Gheyi (1984), com o intuito de caracterizar as águas usadas para irrigação na região de Catolé do Rocha, Sertão da Paraíba, utilizando águas de diversas fontes (poços amazonas e açudes, principalmente) e coletadas no período seco e chuvoso, mostram que, de modo geral, o Na⁺ predomina sobre o Ca²⁺ e Mg²⁺.

No interior do Ceará, Veríssimo e Feitosa (2001), identificaram águas subterrâneas classificadas entre C₄S₂ a C₅S₃ não indicadas para a irrigação comum podendo causar danos aos solos. Na região semiárida do Ceará, as águas subterrâneas dos aquíferos cristalinos do Pré-Cambriano são salobras ou salinas, com principalmente fácies tipo cloreto e condutividade elétrica (CE) atingindo até 20.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Kreis,

2021; Kreis et al., 2023). A alta variabilidade espacial dos níveis de CE das águas subterrâneas e da composição geoquímica dos aquíferos reflete a forte compartimentação lateral dos aquíferos (Araújo, 2017; Kreis et al., 2020).

Conclusão

O uso das técnicas do geoprocessamento e da interpolação demonstraram serem uma ferramenta eficiente e rápida onde apresentou resultados satisfatórios no uso da modelagem por B-Spline multinível no mapeamento do risco a salinidade das águas subterrâneas.

O uso da geoestatística demonstrou a variabilidade da Condutividade Elétrica, da Razão de Adsorção e do Risco de Salinidade das águas subterrâneas da área de estudo.

Os testes de normalidade apresentaram-se semelhantes entre si e houve baixa correlação entre o RAS e o CE.

Os riscos Alto, Muito Alto e Excepcionalmente Alto totalizam 26,09% da área de estudo, devendo-se neste caso, adotar medidas de cautela quanto a irrigação utilizando águas subterrâneas nestas áreas.

As áreas com maiores riscos a salinidade estão localizadas sob o Planalto da Borborema com características geológicas similares sob diversas unidades estratigráficas e litológicas na região semiárida e relacionadas a regiões de maiores altitudes e de menor pluviosidade.

A salinidade das águas subterrâneas para fins de irrigação, apresentaram variabilidade entre as classes de risco médio à excepcionalmente alto (C₂S₁ a C₅S₄).

Referências

- Albuquerque, J. do P.T. 1986. O Sistema Aquífero Rio do Peixe. In: Congresso Brasileiro de Águas, Subterrâneas, 4, 1986, Brasília. Anais...Brasília.
- Almeida, F.F.M. de; Hasui, Y.; Neves, B.B. de B.; Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews* 17(1-2) 1-29.
- Almeida, J.B.; Barros, J.F.; Santiago, M.M. F.; Frischkorn, H. 2012. Salinidade de águas subterrâneas na bacia do Rio da Prata em São Luís/MA. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 17 e Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 18, 2012, Bonito. Anais...Bonito.
- Almeida, O.A. 2010. Qualidade da água de irrigação. EMBRAPA Mandioca e Fruticultura. Cruz das Almas. 234p.
- Almeida, T.A.B.; Montenegro, A.A. de A.; Mackay, R.; Montenegro, S.M.G.L.; Coelho, V.H.R.; Carvalho, A.A. de; Silva, T.G.F. da. 2024. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: Impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 53 e101784.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6) 711-728.
- Anderson, T.W.; Darling, D.A. 1954. A test of goodness of t. *Journal of American Statistical Association* 49 765-769.
- Andrade Júnior, A.S.; Silva, E.F.F.; Bastos, E.A.; Melo, F.B.; Leal, C.M. 2006. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semiárido piauiense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 10 873-880.
- Andrade, E.M. de; Lopes, F.B.; Palácio, H.A.Q.; Aquino, D. do N.; Alexandre, D.M.B. 2010. Land use and groundwater quality: The case of Baixo Acaraú Irrigated Perimeter, Brazil. *Revista Ciência Agronômica* 41(2) 208-215.
- Andrade, E.M. de; Palácio, H.A.Q.; Souza, I.H.; Leão, R.A. de O.; Guerreiro, M.J. 2008. Land use effects in groundwater composition of an alluvial aquifer (Trussu River, Brazil) by multivariate techniques. *Environmental Research* 106(2) 170-177.
- Andrade, E.M.; Aquino, D.N. de; Crisóstomo, L. de A.; Rodrigues, J. de O.; Lopes, F.B. 2009. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. *Ciência Rural* 39(1) 88-95.
- Andrade, T.S.; Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A.A.; Rodrigues, D.F.B. 2014. Estimation of alluvial recharge in the semiarid. *Revista Engenharia Agrícola* 34(2) 211-221.
- Andrade, T.S.; Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A.A.; Rodrigues, D.F.B. 2012. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16(5) 496-504.
- Araújo, A. 2017. Mecanismos dominantes na salinização de água em rochas anisotrópicas com base em razões iônicas e número fuzzy, em área do sertão central no Ceará. 188f. Tese (Doutorado). Departamento de Geologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
- Audry, P.; Suassuna, J. 1995. A salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no sertão nordestino. Recife: ORSTOM/FUNDAJ, 128p.
- Ayers, R.; Westcot, D.W. 1999. Water Quality for Agriculture. FAO. (Trad.) Gheyi, H.R.; Medeiros, J.F. de. Campina Grande: UFPB. 217p.
- Azevedo, C.A.V. de; Pordeus, R.V.; Dantas Neto, J.; Azevedo, M.R.Q. de A.; Lima, V.L.A. de. 2012. Dependência espacial da qualidade da água subterrânea no perímetro irrigado de São Gonçalo, Paraíba. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 7(2) 129-136.
- Bayer, C. 2004. Manejando os solos agrícolas para alta qualidade em ambientes tropicais e subtropicais. In: FERTBIO, 26, 2004, Lages. Anais...Lages.
- Berg, M. Van Den; Oliveira, J.B. 2000. Variability of apparently homologeneous soilscapes in São

- Paulo state, Brazil: I. Spatial analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 24(2) 377-391.
- Bley JR., C. 1999. Erosão Solar: riscos para a agricultura nos trópicos. *Ciência Hoje* 25(148) 24-29.
- Byers, E.; Gidden, M.; Leclère, D.; Balkovic, J.; Burek, P.; Ebi, K.; Greve, P.; Grey, D.; Havlik, P.; Hillers, A.; Johnson, N.; Kahil, T.; Krey, V.; Langan, S.; Nakicenovic, N.; Novak, R.; Obersteiner, M.; Pachauri, S.; Palazzo, A.; Parkinson, S.; Rao, N.D.; Rogelj, J.; Satoh, Y.; Wada, Y.; Willaarts, B.; Riahi, K. 2018. Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots. *Environmental Research Letters* 13(5) e055012.
- Campos, C.W.M.; Ponte, F.C.; Miura, K. 1974. Geology of the Brazilian Continental Margin. In: Burk, C.A.; Drake, C.L. (eds). *The Geology of Continental Margins*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Carneiro, M.D.F.; Ingá, M.A.M.; Silva Filho, H.A.; Santos, E.V.M.; Rolim, H.O.; Chaves, J.R. 2012. Avaliação da Qualidade da Água para Irrigação no Perímetro Irrigado Jaguaribe Apodi no Município de Limoeiro do Norte-CE. In: CONNEPI, 7, 2012, Palmas. Anais...Palmas.
- Cary, L.; Petelet-Giraud, E.; Bertrand, G.; Kloppmann, W.; Aquilina, L.; Martins, V.; Hirata, R.; Montenegro, S.; Pauwels, H.; Chatton, E.; Franzen, M.; Aurouet, A.; Lasseur, E.; Picot, G.; Guerrot, C.; Fléhoc, C.; Labasque, T.; Santos, J. G.; Paiva, A.; Braibant, G.; Pierre, D. 2015. Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): A multi-isotope approach. *Science of The Total Environment* 530-531 411-429.
- Carya, L.; Petelet-Giraud, E.; Montenegro, S.; Hirata, R.; Martins, V.; Aurouet, A.; Pauwels, H.; Kloppmann, W.; Aquilina, L. 2013. Groundwater salinization in a coastal multilayer aquifer: preliminary results on origins and mechanisms-example of Recife (Brazil). *Procedia Earth and Planetary Science* 7 118-122.
- Cavalcante, L.F. et al. 2012. Água para agricultura: irrigação com água de boa qualidade e água salina. In: *O maracujazeiro amarelo e a salinidade da água*. João Pessoa: Sal da Terra. p.17-65.
- Ceballos, B.S.O.; Albuquerque, J.D.P.T.; Maracajá, J.R. de A.; Pinheiro, K.M.; Galvão, M.J. da T.G.; Guimarães, A.O.; Srinivasan, V.S. 2006. Distribuição da qualidade da água subterrânea da bacia sedimentar do Rio do Peixe-PB. In: *Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 8, 2006, Gravatá. Anais...Gravatá.
- Cichota, R.; Van Lier, Q.J.; Leguizamón Rojas, C. 2003. A Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27(5) 789-798.
- Costa, A.M.B. 2002. Zoneamento hidroquímico do aquífero cristalino do Rio Grande do Norte. 169f. Dissertação (Mestrado Geociências). Departamento Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.
- Costa, A.M. de B.; Melo, J.G. de; Silva, F.M. da. 2006. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Águas Subterrâneas* 20(1) 67-82.
- Costa, R.G.; Gheyi, H.R. 1984. Variação da qualidade de água de irrigação da microrregião de Catolé do Rocha, PB. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 19(8) 1021-1025.
- CPRM. 2004. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Diretoria de Geologia e Recursos Minerais. Geologia do Brasil. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/4de151f5-6d20-4e87-b49c-c9b0ea65440c>. Acesso em: 22 de maio de 2024.
- Dehbandi, R.; Abbasnejad, A.; Karimi, Z.; Herath, I.; Bundschuh, J. 2019. Hydrogeochemical controls on arsenic mobility in an arid inland basin, southeast of Iran: the role of alkaline conditions and salt water intrusion. *Environment Pollut* 249 910-922.
- Diniz, J.A.O.; Monteiro, A.B.; Silva, R. de C. da; Paula, T.L.F. de. 2014. Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: Nota técnica. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 45p. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15556?local=e=en>. Acesso em: 12 de julho de 2024.
- EMBRAPA. 2024. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mapa de solos do Brasil no primeiro nível categórico. Disponível em: <https://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/2489>. Acesso em: 22 de maio de 2024.
- EMBRAPA. 2018. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SiBCS. (org) Santos, H.G. dos; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C. dos; Oliveira, V.A. de; Lumberras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. de; Araujo Filho, J.C. de; Oliveira, J.B. de; Cunha, T.J.F. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- ESRI. 2023. Mapa Topográfico Mundial. Disponível em: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: dezembro de 2023.
- Fernandes, J.G.; Freire, M.B.G.S.; Cunha, J.C.; Galvêncio, J.D.; Correia, M.M.; Santos, P.R.

2009. Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 4 27-34.
- Fontes Júnior, R.V.P.; Montenegro, A.A.A. 2017. Temporal dependence of potentiometric levels and groundwater salinity in alluvial aquifer upon rainfall and evapotranspiration. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 22 e54.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Secretaria dos Recursos Hídricos. Governo do Estado do Ceará. Qualigraf. 2023. Disponível em: <https://qualigraf.funceme.br/page/6>. Acesso em: 1 de janeiro de 2024.
- Gleick, P.H. 2009. China and Water. In: Gelick, P.H.; Morikawa, C.M.; Palaniappan, M.; Morrison, J.; Cohen, M.J. *The World's Water 2008-2009: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Washington DC.
- GRASS-GIS. 2024. Geographic Resource Analysis Support System. Disponível em: <http://grass.osgeo.org>.
- Hirata, R.; Suhogusof, A.V. 2019. How much do we know about the groundwater quality and its impact on Brazilian society today? *Acta Limnologica Brasiliensia* 31 e109.
- Holanda, J.S.; Amorim, J.R.A.; Ferreira Neto, M.; Holanda, A.C.; Sá, F.V.S. 2016. Qualidade da água para irrigação. In: Gheyi, H.R.; Dias, N.S.; Lacerda, C.F.; Gomes Filho, E. (org.). *Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados*. 2. ed. Fortaleza: INCTSal. p.43-62.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas Nacional do Brasil. Santos, M. 2010. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/atlas/nacional/atlas_nacional_do_brasil_2010/2_territorio_e_meio_ambiente/atlas_nacional_do_brasil_2010_pagina_83_classificacao_das_aguas_superficiais_para_fins_de_irrig.pdf. Acesso em: 2 de junho de 2024.
- 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 2024.
- 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 dezembro de 2023.
- Jarque, C.M.; Bera, A.K. 1987. A test for normality of observations and regression residuals. *International Statistical Review* 55 163-172.
- Karen, A.B.; Fernando, P.S.; Rosana, B.T. 2017. Hot spring resort development in Laguna Province, Philippines: Challenges in water use regulation. *Journal of Hydrology* 11 96-106.
- Kendall, M.A.; Stuart, A. 1967. *The advanced theory of statistics*. 2 ed. Londres: Charles Griffin.
- Kreis, M.B.; Taupin, J.D.; Lachassagne, P.; Patris, N.; Martins, E.S.P.R. 2024. Transpiration from crystalline unconfined aquifers as the cause of groundwater salinization in a semiarid area of Brazil. *Hydrogeology Journal* 32 739-758.
- Kreis, M. 2021. Origine et dynamique de salinité des aquifères fracturés cristallins de la région semi-aride du Ceará, Brésil. 440f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará. Université de Montpellier (France).
- Kreis, M.; Taupin, J.D.; Patris, N.; Vergnaud-Ayraud, V.; Leduc, C.; Lachassagne, P.; Burte, J. D. P.; Martins, E.S.P.R. 2023. Explaining the groundwater salinity of hard-rock aquifers in semi-arid hinterlands using a multidisciplinary approach. *Hydrology Science Journal* 68(15) 2189-2207.
- Kreis, M.; Taupin, J.D.; Patris, N.; Martins, E.S. 2020. Isotopic characterisation and dating of groundwater recharge mechanisms in crystalline fractured aquifers: example of the semi-arid Banabuiú watershed (Brazil). *Isot Environ Health Stud* 56(5-6) 418-430.
- Laraque, A. 1989. Estudo e previsão da quantidade de água de açudes do nordeste semi-árido brasileiro. Recife: SUDENE. 65p. Série Hidrológica, 26.
- Lee, S.; Wolberg, G.; Shin, S. 1997. Scattered data interpolation with multilevel bsplines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3(3) 228-244.
- Leite, R.M. 1991. Caracterização da qualidade da água superficial na Bacia Capiá-AL para fins da irrigação. 96p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.
- Leprun, J.C. 1983. Primeira avaliação das águas superficiais do Nordeste. Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo no Nordeste Brasileiro (1982-1983). SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. ORSTOM. Office de Larecherche Scientifique Ettechnique Outre-Mer-França. Recife. 291p.
- 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.
- Lima, A. de O.; Lima-Filho, F.P.; Dias, N. da S.; Chipana-Rivera, R.; Ferreira Neto, M.; Souza,

- A. de M.; Rego, P.R. do A.; Fernandes, C. dos S. 2019. Variation of the water table and salinity in alluvial aquifers of underground dams in the semi-arid region of Rio Grande do Norte. Brazil. Bioscience Journal 35(2) 477-484.
- Lima, A.O.; Dias, N.S.; Ferreira Neto, M.; Santos, E.J.; Rego, P.R.A.; Lima-Filho, F.P. 2013. Barragens subterrâneas no semiárido Brasileiro: Análise histórica e metodologia de construção. Irriga 18(2) 200-211.
- Lima, E.A. de; Beraldo, V.J.; Guilera, S.C.; Brandão, L.C.R.; Costa, E.A.; Coutinho, R.M.P. 2009. Mapa de classificação química das águas subterrâneas da região Nordeste do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18, 2009, Campo Grande. Anais...Campo Grande.
- Lima, E.A. de; Nascimento, D.A. do; Brandão, L.C.R. 2004. Mapa Hidroquímica dos Mananciais Subterrâneos da Folha Souza (SB.24-Z-A). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. IBGE.
- Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend. Econometrica 13(3) 245-259.
- Martins, L.H. 1993. Avaliação da qualidade da água nos mananciais superficiais disponíveis para irrigação na zona Oeste Potiguar. Monografia. Escola Superior de Agricultura de Mossoró. Mossoró.
- Medeiros, J.F. 1992. Qualidade de água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo GAT nos Estados do RN, PB e CE. 173f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.
- Melo, R.F.; Oliveira, A.R. de; Silva, M.R.B. da; Santos, J.M.R. dos. 2016. Avaliação da qualidade de água de poço em barragens subterrâneas no Semiárido Paraibano. In: Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva, 10, 2016, Belém. Anais...Belém.
- Monteiro, A.F.M.; Yamamoto, A.L.C.; Silva, P.N.; Reboita, M.S. 2021. Conhecer a complexidade do sistema climático para entender as mudanças climáticas. Terræ Didática 17 1-12.
- Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A.A.; Ragab, R. 2010. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. Irrigation Science 28(4) 301-316.
- Morris, B.L.; Lawrence, A.R.L.; Chilton, P.J.C.; Adams, B.; Calow, R.C.; Klinck, B.A. 2003. Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management: early warning and assessment report series. United Nations Environment Programme.
- Neves, S.P. 2003. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. Tectonics 22 1031-1045.
- Nunes Filho, J.; Sousa, A.R.; Sá, V.A.L.; Lima, B.P. 2000. Relações entre a concentração de íons e a salinidade de águas subterrâneas e superficiais, visando à irrigação, no sertão de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 4(2) 189-193.
- Oliveira, J.J.; Chaves, L.H.G.; Queiroz, J.E.; Luna, J.G. de. 1999. Variabilidade espacial de propriedade química sem um solo salino-sódico. Revista Brasileira de Ciência do Solo 23(4) 783-789.
- Oliveira, M. de; Maia, C.E. 1998. Qualidade físico-química da água para irrigação em diferentes aquíferos na área sedimentar do estado do Rio Grande do Norte. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 2 17-21.
- Pearson, K. 1895. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. Proceedings of the Royal Society of London 58 240-242.
- 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.
- Pessoa, L.G.M.; Freire, M.B.G.D.S.; Wilcox, B.P.; Green, C.H.M.; Araújo, R.J.T. de; Araújo Filho, J.C. de. 2016. Spectral reflectance characteristics of soils in northeastern Brazil as influenced by salinity levels. Environment Monit. Assess. 188 616.
- QGIS. 2022. Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.
- RSTUDIO. 2023. Posit Software. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>.
- Reboita, M.S.; Ambrizzi, T. 2022. Climate system in a nutshell: An overview for understanding Climate change. International Journal of Development Research 12 e53365-53378.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. da; Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. Revista Brasileira de Meteorologia 25 185-204.
- Ribeiro, G.M.; Maia, C.E.; Medeiros, J.F. 2005. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a

- composição iônica da água de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9(1) 15-22.
- SAGA. 2024. System for Automated Geoscientific Analyses. Disponível em: <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>. Acesso em: 24 de janeiro de 2024.
- Salviano, A.A.C.; Vieira, S.R.; Sparovek, G. 1998. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22(1) 115-122.
- 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.
- Shalhevet, J.; Kamburov, J. 1976. Irrigation and salinity: A worldwide survey. New Delhi: International Commission on Irrigation and Drainage. 106p.
- Silva Júnior, L.G. de A.; Gheyi, H.R.; Medeiros, J.F. de. 1999. Composição química de águas do cristalino do Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 3(1) 11-17.
- Silva, E.F.F.; Silva, A.S.; Andrade Júnior, A.; Hermes, L.C.; Bastos, E.A.; Rufino, M.S.M. 2003. Características físico-químicas das águas subterrâneas do aquífero serra grande na mesorregião sudeste piauiense. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 32, 2003, Goiânia. Anais...Goiânia.
- Silva, J.R.L.; Andrade, T.S.; Souza, E.R.; Montenegro, A.A.A. 2007. Variabilidade temporal da precipitação pluviométrica no agreste de Pernambuco–Pesqueira. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 36, 2007, Bonito. Anais...Bonito.
- Souza Jr., C.M.; Shimbo, J.Z.; Rosa, M.R.; Parente, L.L.; Alencar, A.A.; Rudorff, B.F.T.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; Ferreira, L.G.; Souza-Filho, P.W.M.; Oliveira, S.W. de; Rocha, W.F.; Fonseca, A.V.; Marques, C.B.; Diniz, C.G. Costa, D.; Monteiro, D.; Rosa, E.R.; Vélez-Martin, E.; Weber, E.J.; Lenti, F.E.B.; Paternost, F.F.; Pareyn, F.G.C.; Siqueira, J.V.; Viera, J.L.; Ferreira Neto, L.C.; Saraiva, M.M.; Sales, M.H.; Salgado, M.P.G.; Vasconcelos, R.; Galano, S.; Mesquita, V.V.; Azevedo, T. 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian Biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing* 12 e2735.
- Souza, E.R.S.; Montenegro, A.A.A.; Montenegro, S.M.G.L.; Santos, T.E.M.; Andrade, T.S.; Pedrosa, E.R. 2008. Variabilidade espacial das frações granulométricas e de salinidade em um Neossolo flúvico do semi-árido. *Revista Ciência Rural* 38(3) 698-704.
- Souza, L.S.; Cogo, N.P.; Vieira, S.R. 1998. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo, em relação a sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22(3) 77-86.
- Souza, M.; Ribeiro, A.A. 2019. Qualidade da água para fins de irrigação em regiões áridas e semiáridas. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* 13(4) 355-359.
- Spearman, C. 1904. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology* 15(1) 72-101.
- Trangmar, B.B.; Yost, R.S.; Uehara, G. 1985. Applications of geoestatics to spatial studies of soil proprieties. *Advances in Agronomy* 38 45-94.
- Van Loon, G.W.; Duffy, S.J. 2011. Environmental chemistry: a global perspective. 3a ed. Oxford University Press. Oxford.
- Veríssimo, L.S.; Feitosa, F.A.C. 2001. Características das águas subterrâneas na região de Irauçuba, norte do Estado do Ceará, Brasil. In: Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste, 4, Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 12, 2001, Recife. Anais...Recife.
- Vieira, S.R.; Hatfield, J.L.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.W. 1983. Geostatistics theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia* 31(3).
- Vieira, S.R.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.W. 1981. Spatial vaiability of field-measured infiltration rate. *Soil Science Society America Journal* 45 1040-1048.
- WORDCLIM. 2024. Historical climate data. Disponível em: <https://worldclim.org/data/worldclim21.html>. Acesso em: 5 de abril de 2024.
- Yaron, B. 1973. Water suitability for irrigation. In: Yaron, E.; Danfors, E.; Vaadip, Y. (eds). *Arid zone irrigation. Ecological Studies*, 5. Berlin: Springer-Verlag. p.71-88.
- Zavoudakis, E.; Costa, M.; Siqueira, L.; Addad, J. E. 2007. Classificação hidroquímica e avaliação da salinidade da água freática em áreas do município de Vitória-ES. In: Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 15, Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, 1, 2007, Gramado. Anais...Gramado.