



Avaliação e espacialização de parâmetros físico-químicos em águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Piauí nordeste, Brasil

Evaluation and spatialization of physical-chemical parameters in groundwater in the northeastern Piauí river basin, Brazil

J. M. Silva¹; P. E. Rocha²; D. C. Santos³; J. B. Jesus⁴; C. A. B. Garcia^{1*}; S. S. L. Costa¹

¹Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Laboratório de Tecnologia e Monitoramento Ambiental (LTMA), Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

²Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

³Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO), 49020-380, Aracaju-Sergipe, Brasil

⁴Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

carlosabgarcia@gmail.com

(Recebido em 02 de outubro de 2023; aceito em 16 de setembro de 2024)

Águas com concentrações elevadas de sais dissolvidos utilizadas para irrigação podem gerar problemas de salinização e/ou sodificação dos solos. Tais efeitos podem ser sentidos na área de estudo, logo este trabalho busca avaliar a qualidade da água subterrânea e realizar a estimativa da ocorrência desses parâmetros por interpolação para a água de 15 poços tubulares, distribuídos ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí no sul sergipano. Foram determinados os parâmetros de Condutividade Elétrica pelo método eletrométrico e os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} por cromatografia iônica. Observou-se na porção noroeste da bacia que a maioria das águas apresentam restrições quanto ao uso devido aos riscos de salinização e sodificação, especialmente no município de Simão Dias, apenas 20,0% das águas não apresentam nenhum risco, relacionadas as porções litorâneas da bacia. Espacialmente as regiões localizadas na porção centro-litorânea apresentam águas com melhores padrões de qualidade em relação a todas as variáveis estudadas, a aplicação da krigagem refletiu a influência da distribuição dos diferentes tipos de solo e condições climáticas. Tais resultados podem auxiliar na criação de planos de manejo mais eficientes que garantam uma melhor qualidade dos solos e da água utilizada para irrigação nessa região.

Palavras-chave: salinização, sodificação, irrigação.

Water with high concentrations of dissolved salts used for irrigation can generate salinization and/or sodification problems in the soil. Such effects can be felt in the study area, so this work seeks to evaluate the quality of groundwater and estimate the occurrence of these parameters by interpolation for the water of 15 tubular wells, distributed along the Piauí River Basin in southern Sergipe. The Electrical Conductivity parameters were determined by the electrometric method and the Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} cations by ionic chromatography. It was observed in the northwest portion of the basin that most of the waters have restrictions on use due to the risks of salinization and sodification, especially in the municipality of Simão Dias, only 20.0% of the waters do not present any type of risk, related to the portions coastal areas of the basin. Spatially, the regions located in the central-coastal portion have water with better quality standards in relation to all variables studied, the application of kriging reflected the influence of the distribution of different types of soil and climatic conditions. Such results can help in the creation of more efficient management plans that guarantee a better quality of soils and water used for irrigation in this region.

Keywords: salinization, sodification, irrigation.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a demanda por água em qualidade e quantidade tem crescido ao longo dos anos em âmbito global, movida especialmente pelo desenvolvimento de diversas atividades econômicas, das quais se destacam a agricultura, indústria e pecuária, além do abastecimento humano que deve ser prioritário em relação aos demais usos, conforme preconiza a Política Nacional dos Recursos Hídricos, estabelecidos pela Lei n° 9433, de 08 de janeiro de 1997 [1]. No

Brasil, o setor da agricultura é responsável pelo consumo de aproximadamente 66,1% da água potável, esse recurso constitui-se num elemento essencial para essa prática [2]. A disponibilidade hídrica está relacionada a diversos fatores como precipitação, evapotranspiração e geologia, avaliando-se a disponibilidade hídrica constatou-se que a carga fluvial e precipitação costumam ser os principais fatores de recarga em aquíferos, e a água subterrânea costuma ser utilizada como fonte alternativa para abastecimento humano e irrigação [3].

A região Nordeste apresenta diversidade de solo e clima, o que possibilita a produção de diversos cultivos, porém a precipitação irregular torna quase imprescindível o uso de irrigação, uma vez que, as condições de evapotranspiração superam as precipitações podendo levar a perdas por estresse hídrico [4]. A distribuição irregular e pequenos volumes de chuvas nas regiões áridas e semiáridas, aumentam o risco de salinização dos solos, podendo ser resultado de causas naturais, no entanto, atividades antrópicas podem potencializar esse processo, principalmente a adoção de métodos inadequados na agricultura [5].

Águas que apresentam concentrações de sais elevadas podem limitar o cultivo de diversas culturas, acarretando inclusive salinização e/ou sodificação do solo, nos casos mais severos levando a redução da permeabilidade, distúrbios nutricionais e efeitos tóxicos às plantas [6]. A avaliação dos efeitos da salinização pode ser mensurada de diferentes formas, sendo uma delas a análise especial dos elementos, por meio da ferramenta geoestatística. O estudo dessa variabilidade espacial pode ser realizado para uma grande quantidade de parâmetros e em áreas de diferentes dimensões, facilitando o entendimento da causa e efeito, por meio de mapas de krigagem [7].

Nesse contexto, teve-se como objetivo avaliar a qualidade da água subterrânea que pode ser utilizada para fins de irrigação, apontar os riscos de salinização e sodificação e criar mapas com estimativas dos parâmetros estudados para 15 poços tubulares inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (BHRP), apresentada na Figura 1, foi definida como área de estudo, nesta bacia destacam-se entre os principais usuários da água subterrânea o setor da agropecuária, industrial e abastecimento doméstico.

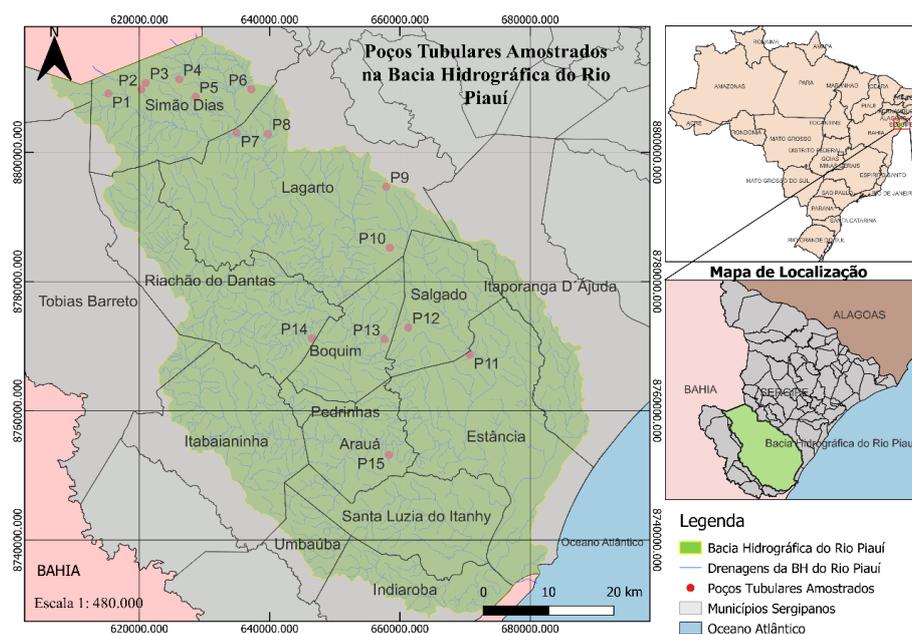


Figura 1: Mapa contendo os poços amostrados na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí.

Essa Bacia Hidrográfica (BH) possui uma área de 4175,0 km² de extensão total, dessa uma pequena porção pertencente ao estado da Bahia, compreendendo 221,6 km² (5,3% da área total da BH), no estado de Sergipe cobre aproximadamente 3953,4 km², equivalente a 19% da área do território sergipano [8].

Nessa bacia hidrográfica são observados três climas predominantes, sendo Litoral Úmido, Agreste e Semiárido. A precipitação média, considerando toda a bacia, é de aproximadamente 1200 mm/a, na faixa corresponde ao clima de Litoral Úmido as precipitações são em média 2000 mm/a, enquanto no Agreste correspondem em média a aproximadamente 1000 mm/a, e para a faixa do semiárido não supera 800 mm/a, as precipitações se concentram nos meses de março a julho [9].

2.2 Mapa de solos

A disponibilidade e comportamento dos elementos químicos disponíveis para as plantas dependem das reações e composição dos solos no qual estão fixadas. As características físicas do solo, como textura, densidade porosidade e permeabilidade, também são fatores importantes para o cultivo e as interações com a água que percola no lençol freático [10].

No Brasil, devido a diversidade de tipos de solos, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), através de ideias e propostas emanadas das Reuniões de Classificação e Correlação dos Solos no Campo (RCCs) incorporam desde 1999 na sua 1ª edição o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS), atualmente na sua 5ª edição [11], trás a classificação dos solos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização de solos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Tipo de Solo	Características
Argissolos	Constituídos por material mineral com argila de baixa atividade, ou atividade alta quando conjugada com bases ou caráter alumínico, e horizonte B logo abaixo do horizonte A.
Cambissolos	Constituídos por material mineral que apresentam horizonte A ou hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos, seguido de horizonte B insipiente.
Espodossolos	Constituídos por material mineral, apresenta horizonte B espódico abaixo do horizonte E, A ou hístico de 200 a 400 cm, se um destes ultrapassar 200 cm.
Gleissolos	Constituídos por material mineral, com horizonte glei dentro de 50 cm a partir da superfície ou menor que 150 cm quando abaixo dos horizontes A, E ou hístico com espessura insuficiente para caracterizar um Organossolo.
Latossolos	Constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A até 200 cm ou até 300 cm se o horizonte A apresentar mais de 150 cm.
Luvissolos	Constituídos por material mineral, apresenta horizonte B textural, com argila de alta atividade e saturações por bases maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA), imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A (exceto A chernozêmico) ou sob horizonte E.
Neossolos	Constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura e não apresenta nenhum tipo de horizonte B.
Planossolos	Constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguido de horizonte B plânico.
Vertissolos	Constituídos por material mineral com horizonte vértico iniciando dentro de 100 cm a partir da superfície, relação textural insuficiente para caracterizar horizonte B textural.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2018) [11].

Na BHRP são observados vários tipos de solos (Figura 2), visto a grande variedade de tipos litológicos e processos físico-químicos e biológicos envolvidos na formação desses solos.

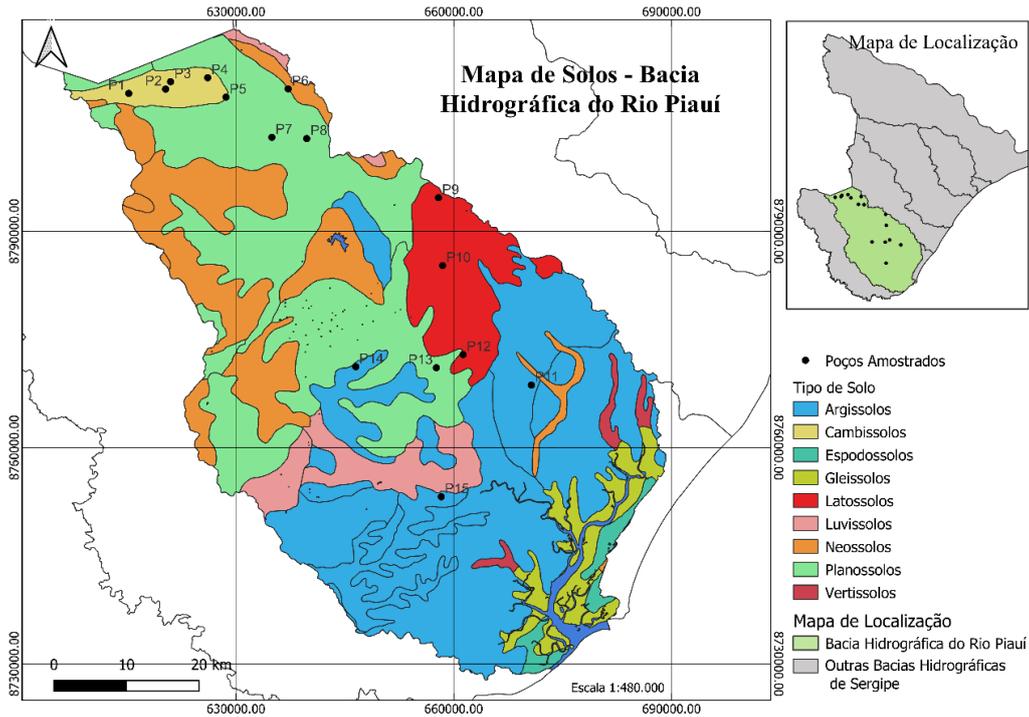


Figura 2: Tipos de solos encontrados na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí.

2.3 Classificação das águas para fins de irrigação

Foi adotada a classificação proposta pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL), proposta por Richards (1954) [12], cuja principal finalidade corresponde a avaliação de águas naturais para irrigação. A classificação das águas quanto a salinidade é expressa em função da Condutividade Elétrica (C.E.), como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação de salinidade para águas naturais em função da CE.

Classe	Classificação	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
C1	Salinidade baixa	< 250
C2	Salinidade média	250 – 750
C3	Salinidade alta	750 – 2250
C4	Salinidade muito alta	2250 – 5000

Legenda: CE – Condutividade elétrica. Fonte: adaptado de Ricards et al. (1954) [12].

Originalmente foram consideradas quatro classes de risco a salinização, porém trabalhos mais recentes consideram uma quinta classe (C5), para águas excepcionalmente salinas, com valores de C.E. superiores a 5000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. São divididas em classes segundo a Relação de Adsorção de Sódio (RAS), que expressa as relações entre a atividade relativa dos íons sódio em reações de troca iônica com o solo, com base na comparação dos valores das RAS com os da CE.

A RAS é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Onde:

RAS: Relação de Adsorção de Sódio;

Na: concentração de sódio expresso em mmol L^{-1} ;

Ca: concentração de cálcio expresso em mmol L^{-1} ;

Mg: concentração de magnésio expresso em mmol L^{-1} .

Com base nos valores de RAS são definidas as classes de perigo a sodificação:

- S1 – Água com baixo teor de sódio;
- S2 – Água com teor médio de sódio;
- S3 – Água com alto teor de sódio;
- S4 – Água com teor muito alto de sódio.

Os intervalos para classificação das águas, segundo os riscos associados ao uso para irrigação, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Classes de restrição ao uso da água para irrigação, segundo os riscos associados.

Risco	Variáveis	Classe de restrição		
		Nenhuma	Leve a moderada	Severa
Salinização	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	<700	700 a 3000	>3000
	STD (mg L^{-1})	<450	450 a 2000	>2000
		Nenhuma	Leve a moderada	Severa
Sodificação (redução da infiltração de água no solo)	RAS (mmol L^{-1})			
	0 – 3	>0,7	0,7 a 0,2	<0,2
	3 – 6	>1,2	1,2 a 0,3	<0,3
	6 – 12	>1,9	1,9 a 0,5	<0,5
	12 – 20	>2,9	2,9 a 1,3	<1,3
	20 – 40	>5,0	5,0 a 2,9	<2,9

Legenda: CE – Condutividade elétrica; STD – Sólidos totais dissolvidos; RAS – Relação de Adsorção de Sódio.
Fonte: adaptado de Ayers and Westcoat (1985) [13].

2.4 Amostragem e análises

Os pontos amostrais correspondem a poços tubulares, disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) [14], contendo informações acerca de cada poço. Essas águas são utilizadas para abastecimento humano e irrigação, este último sendo principal destino para poços da região noroeste da BHRP.

As campanhas de amostragem ocorreram em janeiro de 2022, correspondendo ao período mais seco do ano, e junho de 2022 correspondendo ao período das chuvas. No Estado de Sergipe o período seco ocorre entre os meses de setembro e fevereiro, enquanto o período mais úmido ocorre entre março e agosto, com maiores volumes de chuvas concentrados entre os meses de março a julho [15].

A determinação das concentrações dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+) foi realizada por cromatografia iônica, através de cromatógrafo METROHM modelo 882 Compact IC Plus. A condutividade elétrica determinada pelo método eletrométrico, utilizando-se condutímetro modelo W120, marca BEL ENGINEERING.

Para interpolação dos parâmetros foi utilizada Krigagem Ordinária com ajuste do modelo linear. A escolha do melhor modelo teórico foi baseada na menor soma dos resíduos quadrados (SQR), maior coeficiente de determinação (R^2) e a confiança do modelo escolhido e testado pela validação cruzada. Landim e Sturaro (2002) [16] recomendam que o número de pontos amostrados não deve ser inferior a 30 na aplicação do método de interpolação por krigagem, devido ao número insuficiente de pares de amostras para a modelagem do semivariograma, por isso, foram utilizados dados pretéritos de outros poços distribuídos ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí para satisfazer tal exigência metodológica. Utilizou-se os softwares QualiGraf versão 1.17 para realizar avaliações hidroquímicas, além do QGIS versão 3.22.8 LTR para geração de mapas temáticos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios da coleta dos períodos seco e chuvoso, para os parâmetros cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+) e condutividade elétrica (CE), pH e temperatura (T), determinados para os 15 poços estudados distribuídos na BHRP, podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores dos parâmetros avaliados para águas subterrâneas de poços da BHRP.

Poço	Na^+ (mg L^{-1})	Ca^{2+} (mg L^{-1})	Mg^{2+} (mg L^{-1})	CE* ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)
P1	624,66	416,84	86,93	5610,0	6,70	27,75
P2	667,30	215,13	94,58	4143,3	7,08	27
P3	919,41	274,90	148,64	4055,0	7,38	26,5
P4	396,34	160,26	34,90	2398,3	7,22	26,5
P5	344,88	213,70	89,82	2849,6	7,7	28
P6	645,51	247,15	100,74	2743,3	7,03	27,75
P7	68,32	21,63	6,43	379,3	6,75	27,5
P8	119,84	62,01	15,36	843,5	6,94	24,75
P9	65,46	5,27	11,24	411,6	4,49	26,25
P10	33,29	2,57	4,83	186,4	5,24	27,75
P11	18,70	2,78	2,31	112,9	5,88	28,75
P12	47,49	16,48	15,05	648,8	6,52	27
P13	48,45	5,79	10,01	298,5	6,41	27
P14	106,21	30,19	31,48	822,1	6,83	25,5
P15	110,50	12,99	17,00	217,6	6,97	26,75

Legenda: Na^+ – Concentração de íons sódio; Ca^{2+} – Concentração de íons cálcio; Mg^{2+} – Concentração de íons magnésio; e CE* – Condutividade elétrica.

Na Tabela 4, é possível visualizar um resumo estatístico dos parâmetros avaliados.

Tabela 4: Resumo estatístico dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea de poços na BHRP.

Parâmetro	Média	Mediana	SD	Mín.	Máx.	Outliers
Na^+	281,09	112,33	315,8	15,92	1232,3	1
Ca^{2+}	4,60	3,27	4,53	0,42	24,27	
Mg^{2+}	44,62	27,9	49,79	1,81	200,57	
CE	1714,58	821,15	1777,47	110,6	5930	2
T	26,98	27	1,49	24	30	
pH	6,61	6,7	0,91	4,37	7,88	

Legenda: SD – Desvio padrão; Mín. – Mínimo; Máx. – Máximo.

A estatística descritiva dos dados apresenta valores semelhantes para os resultados dos atributos média e mediana, indicando um comportamento de distribuição normal dos dados, exceto para condutividade elétrica que apresentou elevado desvio padrão (1777,47), o que não compromete a utilização da ferramenta geoestatística, que leva em consideração a variação espacial dos dados [17].

Verificou-se também a correlação entre os parâmetros estudados, através da correlação linear de Pearson (r), com nível de significância $p < 0,05$, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Correlação linear de Pearson entre os parâmetros físico-químicos de águas subterrâneas da BHRP.

	CE	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH	T
CE		0,856	0,900	0,813	0,447	0,033
Na ⁺	0,856		0,898	0,961	0,390	-0,006
Ca ²⁺	0,900	0,898		0,875	0,373	0,075
Mg ²⁺	0,813	0,961	0,875		0,410	0,023
pH	0,447	0,390	0,373	0,410		-0,099
T	0,033	-0,006	0,075	0,023	-0,099	

Legenda: CE – Condutividade elétrica; Na⁺ – Sódio; Ca²⁺ – Cálcio; Mg²⁺ – Magnésio; pH – Potencial hidrogeniônico; e T – Temperatura.

Verificou-se alta correlação entre os parâmetros Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ com a condutividade elétrica, uma vez que esta se dá em função da concentração de íons em solução, também foi observado alto grau de correlação entre Mg²⁺ e Na⁺ com o Ca²⁺, e entre o Mg²⁺ e o Na⁺, muito provavelmente em função dos efeitos de interação água-rocha que acabam disponibilizando esses íons para a água, ou ainda devido a outros efeitos como o aerossol marinho, como sugerem os trabalhos de Onwuka et al. (2019) [18] e Monteiro et al. (2021) [19], respectivamente. E fracas correlações entre pH e temperatura com todas as outras variáveis indicando que não são dependentes entre si.

Conforme proposto por Richards (1954) [12], águas com condutividade elétrica acima de 750 $\mu\text{S cm}^{-1}$ representam risco de salinização do solo, valor este facilmente ultrapassado para os pontos P1 a P6, com variação de 2398,35 a 5610,00 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e discretamente menor que o observado no ponto P8 e P14, com valor de 843,50 e 822,15 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente. Valores mais altos corroboram com as características dos solos onde estão alocados esses poços, visto que, cambissolos e planossolos tendem a ter alta saturação por bases e argilas de alta atividade que acabam favorecendo a ocorrência de águas mais salinizadas. Sales et al. (2020) [20], em uma região semiárida no município de Poço Redondo-SE, observaram altos valores de CE entre 2.250 e 5.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, indicando que águas com tais características não devem ser utilizadas para irrigação em solos com drenagem deficiente, sendo necessárias práticas de controle da salinidade. Os demais pontos deste estudo apresentam CE variando de 112,95 a 648,85 $\mu\text{S cm}^{-1}$, não representando nenhum grau de risco quando seu uso for destinado à irrigação, estando mais relacionadas a ocorrência de argissolos e latossolos, que na área de estudo representam sedimentos mais arenosos e, portanto, mais estáveis, consequentemente menos reativos com a água que acaba menos mineralizada por interação com os mesmos.

Valores elevados de condutividade elétrica indicam alto teor de íons dissolvidos, estes podem levar a riscos de salinização e/ou sodificação dos solos que entrem em contato com esse tipo de água. Entre os principais cátions encontrados em águas subterrâneas naturais destacam-se o Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺, que são utilizados para realizar o cálculo da RAS, que expressa o risco a sodificação.

A classificação de risco potencial à salinização e sodificação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação de risco a sodificação e salinização para amostras de água subterrânea da BHRP.

Classe	Risco do sódio		Risco de salinização		
	n°	%	Classe	n°	%
S1	9	60	C1	3	20
S2	2	13	C2	4	27
S3	4	27	C3	2	13
S4	0	0	C4	5	33
			C5	1	7

Legenda: S1 – Risco baixo; S2 – Risco médio; S3 – Risco alto; S4 – Risco muito alto; C1 – Risco nulo; C2 – Risco baixo; C3 – Risco alto; C4 – Risco muito alto; e C5 – Risco excepcionalmente alto.

Relacionado a altos riscos de sodificação (Classe S3) foram observados os pontos P1, P2, P3 e P6, os demais pontos apresentaram teor de sódio variando de baixo a médio não representando riscos ao ser utilizados para irrigação. Aqueles poços que apresentaram as piores classificações estão localizados nas áreas a noroeste da bacia, no município de Simão Dias, onde justamente a atividade da agricultura com a prática de irrigação é mais relevante dentro da bacia, nas quais se apresentam as principais áreas de ocorrência de cambissolos com grande capacidade de troca iônica e enriquecimento mineral da água. Alencar et al. (2019) [21] em um estudo no sertão cearense, com faixa de temperatura (26 a 32°C), pluviosidade (725 mm/a) e solos rasos, semelhantes ao observado na porção noroeste deste estudo, também observaram águas com elevado risco de sodificação para a maioria dos poços estudados sugerindo a não utilização para fins de irrigação ou que sejam tomadas medidas de dessalinização e drenagem do solo.

O risco de salinização também segue os mesmos padrões do risco de sodificação, principalmente na porção noroeste da bacia, onde ocorrem predominantemente rochas carbonáticas que justificam tais concentrações elevadas de sais, uma vez que rochas carbonáticas são bastante susceptíveis a dissolução favorecendo o enriquecimento de sais e conseqüentemente maior salinidade das águas dessa região, outros fatores importantes são o clima seco e baixa pluviosidade que intensificam os processos de salinização das águas subterrâneas [22].

A classificação de águas para fins de irrigação dos poços inseridos na BHRP pode ser observada na Figura 3.

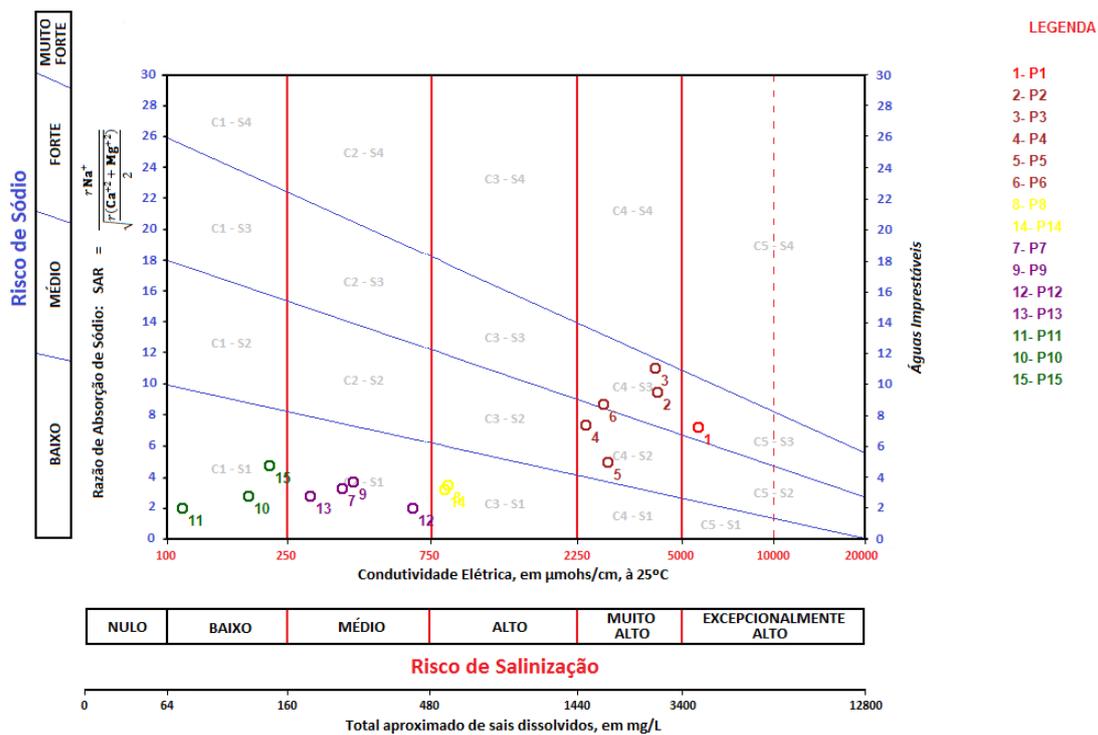


Figura 3: Classificação de águas para irrigação de poços na BHRP.

Análise do diagrama permite observar três amostras (P10, P11 e P15) classificadas como C1-S1, água de salinidade baixa e baixa concentração de sódio, indicando que não apresenta nenhuma restrição quanto ao uso para irrigação. Também foram observadas águas de salinidade média e baixo sódio (P7, P9, P12 e P13), classificadas como C2-S1, cujo uso não provoca problemas ambientais, mas indica a necessidade de boa gestão do recurso hídrico para evitar deterioração da qualidade da água. Lima et al. (2020) [4] observaram que 12% das amostras de água subterrânea no município de Candiba, no Estado da Bahia, apresentaram salinidade média e baixo teor de sódio, onde também requer atenção na gestão das águas, semelhante ao observado para 26,6% das amostras deste estudo.

Aproximadamente 53,3% das amostras apresentam riscos elevados de salinização e sodificação visto que as amostras P8 e P14 foram classificadas como C3-S1 água com salinidade alta e concentrações baixas de sódio, duas amostras (P4 e P5) classificadas como C3-S2 água com salinidade alta e médio teor de sódio, três amostras (P2, P3 e P6) classificadas como C4-S3 água com salinidade muito alta e concentração de sódio muito alta, e uma outra amostra (P1) classificada como C5-S3 água com salinidade excepcionalmente alta e teor de sódio muito alto. Tais comportamentos indicam que as atividades de irrigação provavelmente estão contribuindo para a salinização e sodificação dos solos nessa porção da área estudada, resultados que corroboram com dados apresentados no estudo de Villanueva et al. (2014) [22] para águas subterrâneas da região centro-oeste da Bahia, onde também são encontradas rochas carbonáticas e condições de clima próximas as observadas neste estudo.

Para a confecção dos mapas de distribuição dos parâmetros avaliados, foi utilizado o método estatístico da Krigagem Ordinária. Os semivariogramas foram avaliados através dos modelos Linear, Gaussiano e Esférico, obtendo melhores respostas para o modelo Linear, considerando os índices de correlação R^2 , Moran e p-valor, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Índices da correlação para os semivariogramas ajustados pelo modelo linear para os parâmetros estudados.

Parâmetro	R^2	I Moran	p-valor
Ca ²⁺	0,892	0,773	0,05
Mg ²⁺	0,758	0,650	0,05
Na ⁺	0,915	0,812	0,01
CE	0,956	0,863	0,002
RAS	0,874	0,770	0,005

Legenda: Ca²⁺ – Cálcio; Mg²⁺ – Magnésio; Na⁺ – Sódio; CE – Condutividade elétrica; RAS – Relação de Adsorção do Sódio.

O valor coeficiente de determinação (R^2) apresentou valores próximo de 1,0 indicando uma forte correlação entre as variáveis analisadas, o menor valor observado foi para magnésio (0,758), porém muitos autores consideram valores acima de 0,7 como de forte correlação capaz de explicar a variabilidade dos dados, enquanto os maiores valores foram observados para Relação de Adsorção de Sódio (0,874), cálcio (0,892), sódio (0,915) e condutividade elétrica (0,956), podendo indicar uma forte correlação entre as variáveis, mas não necessariamente que uma variável causa a outra. O índice Moran (I Moran) [23] é utilizado para a autocorrelação espacial de uma variável.

A dependência especial entre áreas pode ser medida através do cálculo de correlação espacial, que considera a covariância do produto dos desvios em relação à média, relacionando o valor de um fenômeno/variável em um local específico à medida dos valores observados em seus vizinhos, levando a formação de clusters entre áreas com características comuns [24]. Observou-se, de modo geral, para os parâmetros avaliados, altos valores positivos (> 0,7) indicando que há regiões com valores, altos ou baixos, próximos entre si. Também foi realizado p-valor como medida da compatibilidade entre os dados e o modelo utilizado, como todos os valores observados para os parâmetros avaliados foram <0,05, considerou-se então como resultados estatisticamente significativos [25].

A partir dos dados obtidos foram produzidos mapas, apresentados nas figuras 4 (A, B e C) e 5 (A e B), por Krigagem ordinária com ajuste do modelo linear, o valor R^2 para os modelos variou de 0,723 a 0,843 para os parâmetros analisados, refletem de maneira satisfatória a dependência espacial das variáveis, visto que em pontos mais próximos uns dos outros se observam condições de litologia, composição, textura e permeabilidade dos solos semelhantes.

Silva et al. (2010) [26] representaram de maneira satisfatória a variabilidade espacial de atributos, acidez e matéria orgânica, em um latossolo, utilizando-se da geoestatística para quantificar a dependência espacial, utilizando como critério maior coeficiente de determinação (R^2), menor SQR (Soma dos Quadrados dos Resíduos) e maior valor do coeficiente de correlação obtida pelo Método de Validação Cruzada. De maneira análoga, para a BHRP, especialmente as

regiões localizadas na porção centro-litorânea apresentam águas com melhores padrões de qualidade em relação a todas as variáveis estudadas, a aplicação da krigagem refletiu a influência da distribuição dos diferentes tipos de solo e condições climatogeográficas, como pode ser observado nas Figuras 4, 5 e 6.

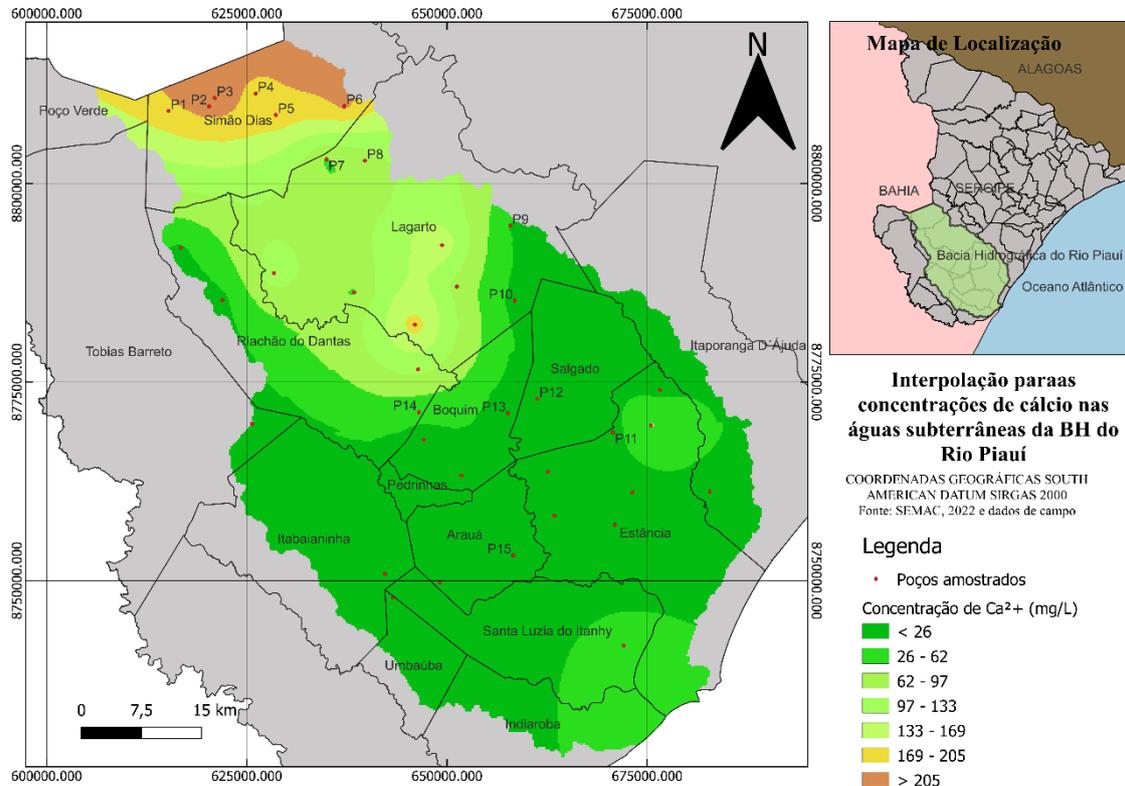


Figura 4: Distribuição dos íons Ca²⁺ para águas subterrâneas na BHRP.

Conforme apresentado na Figura 4, nota-se menores concentrações relacionadas as áreas mais próximas ao litoral, convergindo com as áreas onde ocorrem as maiores precipitações, com solos mais espessos e porosos que favorecem uma maior recarga do aquífero. O cálcio não costuma ser um fator determinante para se considerar a água imprópria para irrigação, no entanto é um dos elementos principais para a dureza da água, e também pode influenciar na salinidade e sodicidade, a sua precipitação pode acabar prejudicando o crescimento das plantas e absorção de minerais pelo sistema radicular, concentrações acima de 400 mg/L de cálcio comprometem o crescimento das plantas [27], na área de estudo as concentrações não chegam a ser críticas, concentrações acima de 200 mg L⁻¹ na porção nordeste do município de Simão Dias, porém é importante ressaltar que os íons podem se acumular ao longo do tempo, especialmente quando não se realiza um manejo adequado do solo e da água.

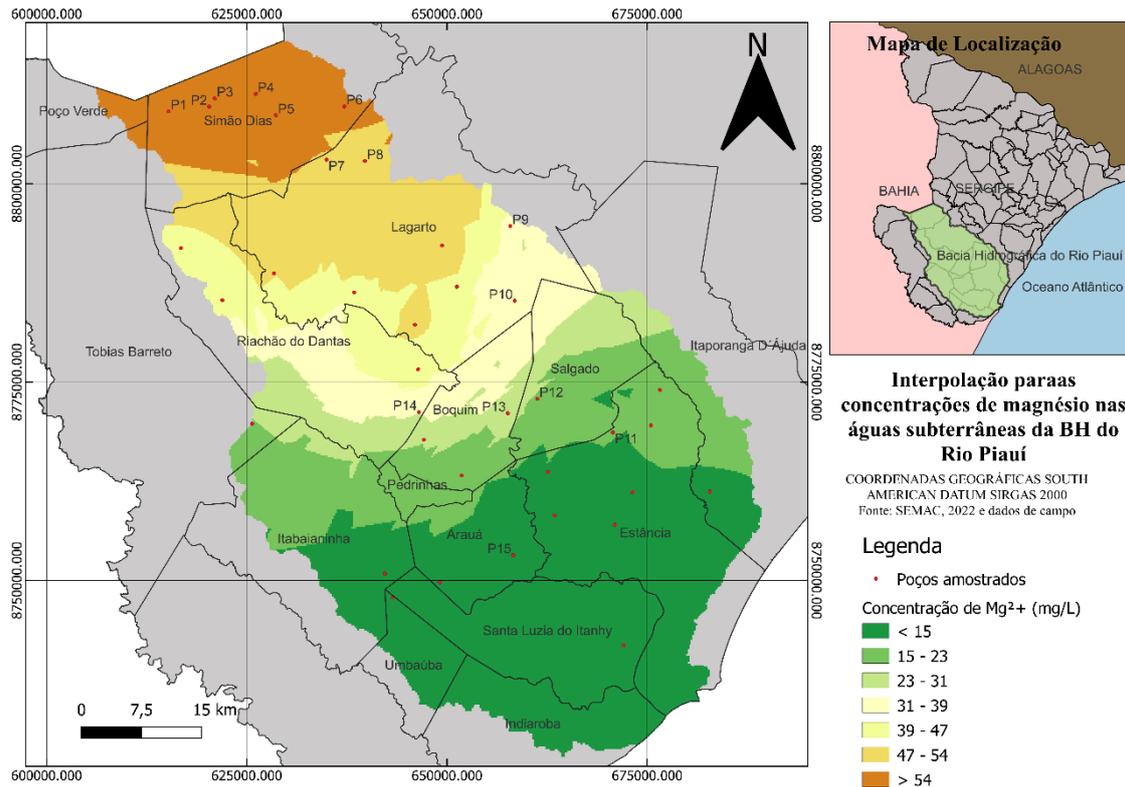


Figura 5: Distribuição dos íons Mg²⁺ para águas subterrâneas na BHRP.

A distribuição dos íons magnésio mostra um claro enriquecimento no sentido sudeste-noroeste, menores valores relacionados as áreas mais próximas ao litoral, em especial as áreas pertencentes a essa bacia nos municípios de Estância, Indiaroba, Santa Luzia do Itanhhy, Umbaúba, Arauá e Itabaianinha abaixo de 15 mg L⁻¹, relacionada as áreas onde ocorrem maiores precipitações, de argissolos espessos e com boa permeabilidade, enquanto as maiores concentrações foram registadas nos municípios de Simão Dias, as pequenas porções da bacia que pertencem aos municípios de Poço Verde e Tobias Barreto, a porção nordeste de Riachão do Dantas e a poção centro-norte de Lagarto, relacionadas a regiões com menores volumes de precipitação, ocorrência de gleissolos, neossolos e planossolos, estes costumam aparecer como camadas mais finas e com alto teor de argila o que dificulta a infiltração e recarga do aquífero. Concentrações superiores a 60 mg L⁻¹ podem comprometer o desenvolvimento das espécies vegetais [27], pois geralmente está relacionado a alta dureza, em casos mais severos pode realizar troca com os íons de sódio provocando aumento da salinidade.

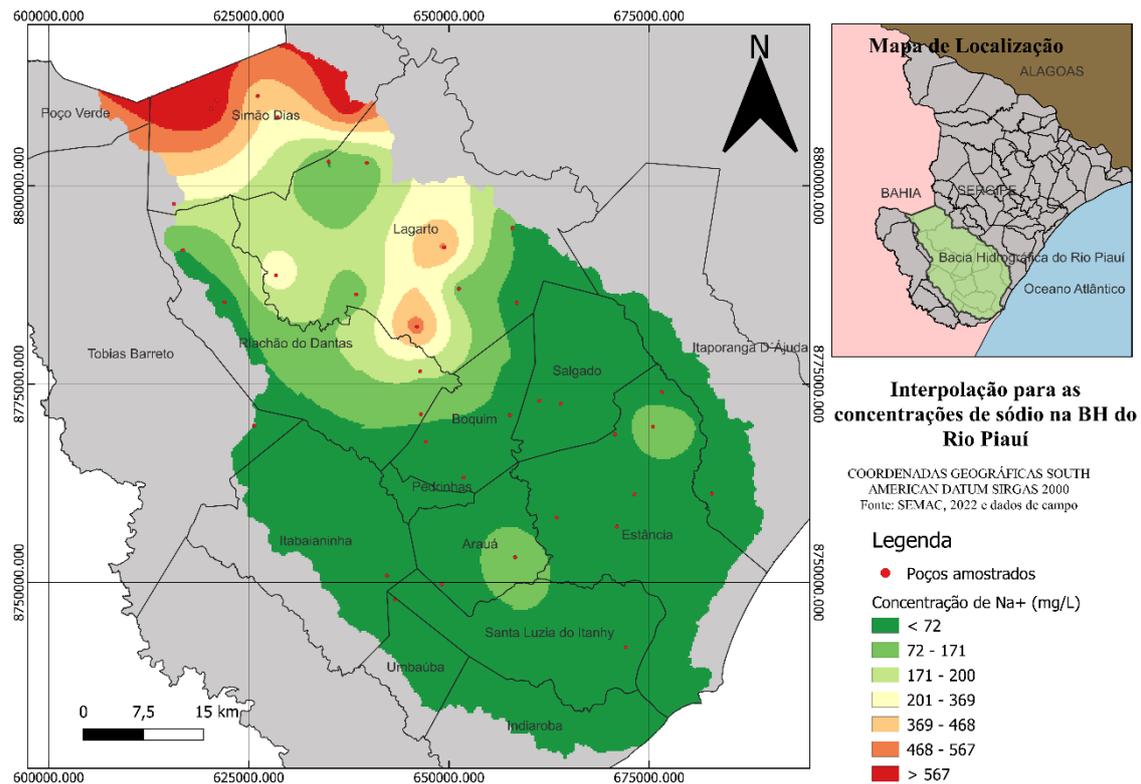


Figura 6: Distribuição dos íons Na⁺ para águas subterrâneas na BHRP

A espacialização dos íons de sódio seguiu um comportamento semelhante aos demais avaliados, se observa menores concentrações nas regiões mais úmidas e com solos mais espessos e porosos, abrangendo as áreas dentro da BHRP pertencente aos municípios de Estância, Indiaroba, Umbaúba, Arauá, Itabaianinha, Itaporanga D'Ajuda, Salgado, Arauá, Pedrinhas, Boquim e pequenas porções mais ao sul dos municípios de Lagarto e Riachão do Dantas. Valores acima de 200 mg L⁻¹ já indicam que há riscos de sodificação da água, além de efeitos de salinidade, para este estudo as áreas que chamam atenção para o excesso de sódio nas águas subterrâneas são a porção central do município de Lagarto, praticamente todo o território de Simão Dias e as porções da BHRP pertencentes aos municípios de Poço Verde e Tobias Barreto.

Também foi possível realizar a espacialização em mapas de risco à sodificação e de risco à salinização, apresentados na Figura 7, de maneira eficiente. O risco à salinização também representa a distribuição do parâmetro condutividade elétrica, visto que, o risco à salinização é dado em função deste parâmetro. Foi observado que as áreas do setor noroeste da bacia são as que possuem águas que representam maior risco a qualidade do solo podendo levar a salinização e/ou sodificação se utilizadas para irrigação e por isso exigem uma gestão e plano de manejo mais eficientes.

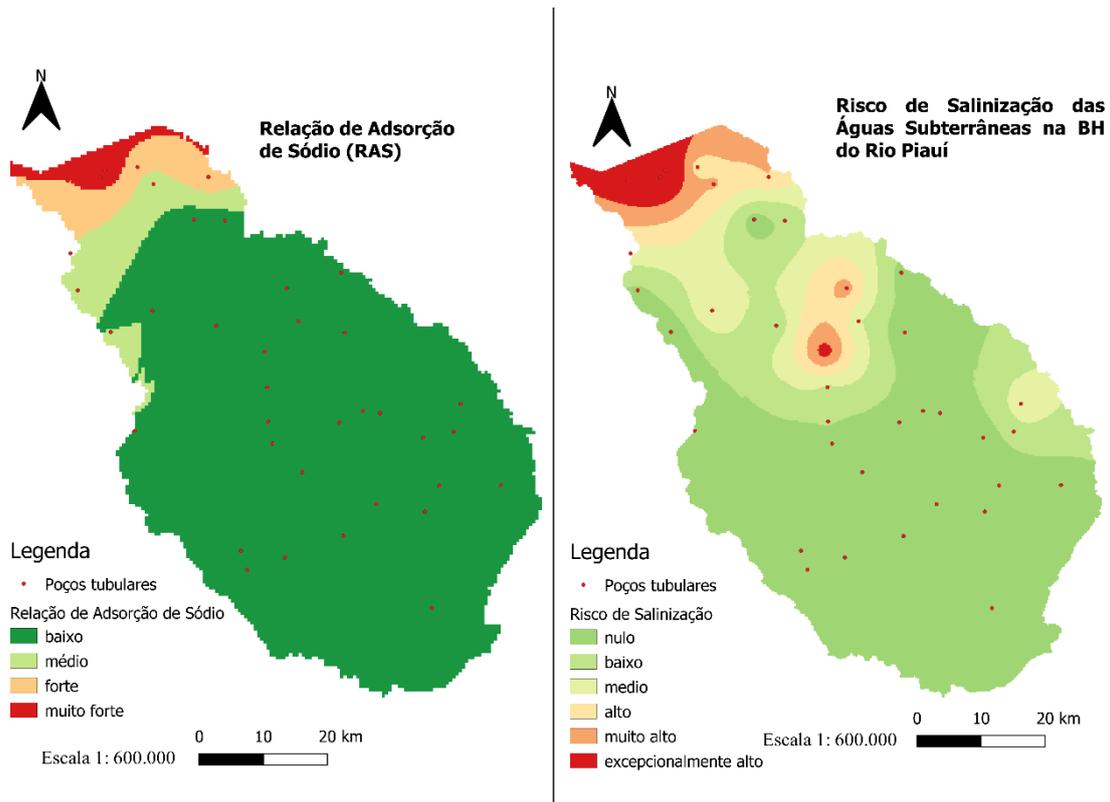


Figura 7: Distribuição espacial do risco de sodificação (RAS), e risco de salinização dado em função da condutividade elétrica.

De maneira análoga, Moreira et al. (2020) [16], utilizaram-se da friagem ordinária para construir modelos da distribuição de parâmetros físico-químicos (pH, CE, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e RAS) possibilitando a identificação de zonas de maior variabilidade das variáveis, refletindo as características do tipo de solo, pluviosidade e hidroquímica predominante em cada grupo formado, tais resultados apontam que as variáveis apresentam valores mais correlacionáveis onde se observou similaridades na composição e compactação dos solos, assim como áreas mais próximas entre si, corroborando com o que foi observado neste trabalho. Para RAS se observa que a área a noroeste da BHRP, especialmente no município de Simão Dias, apresenta risco muito elevado de sodificação diminuindo a medida que se aproxima da faixa litorânea. Quanto ao risco de salinização se observou valores muito altos para a região de Simão Dias, diminuindo para riscos médios a medida que se caminha para o município de Lagarto e áreas sem risco ao se aproximar das regiões mais costeiras, essas variações se dão principalmente em função dos diferentes tipos de solo e das condições de pluviosidade, que são maiores no litoral, em média 2.000 mm/a, e menores na região mais a noroeste na bacia, com médias de 800 mm/a.

4. CONCLUSÃO

Utilizando dos dados de campo através da ferramenta geoestatística da krigagem ordinária, foi possível estimar e espacializar as concentrações dos parâmetros analisados neste trabalho, delineando zonas com características homogêneas. Contribuindo dessa maneira para uma otimização do uso da água, ao identificar as áreas mais susceptíveis a salinização e sodificação, assim como na prevenção da degradação do solo, adotando práticas como a substituição de fertilizantes químicos por orgânicos, melhoria da porosidade do solo através da mobilização, e em casos mais severos a lavagem do solo. Além disso, tais informações também podem subsidiar no planejamento do uso da terra, promovendo a ocupação de áreas mais adequadas à prática agrícola, o que pode resultar em ganhos econômicos, ao possibilitar aumento da produção e, como consequência, trazer impacto positivo na segurança alimentar das comunidades locais.

5. AGRADECIMENTOS

A Companhia de Saneamento de Sergipe – DESO. A agência de fomento Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe – FAPITEC/SE. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brasil. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm
2. Brasil. Agência Nacional de Águas (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Informe Anual; 2021 [citado em 18 fev 2023]. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>
3. Gonçalves JAC, Almeida MSL, Ferreira MAM, Paiva BLF. Disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas na bacia do Rio do Peixe – Itabira-MG. *Res Soc Dev*. 2019;8(12):1-17. doi: 10.33448/rsd-v8i12.1904
4. Lima BR, Oliveira EP, Donato Júnior EP, Bebé FV. Uso e qualidade da água subterrânea utilizada por agricultores familiares no Território Sertão Produtivo, Estado da Bahia, Nordeste do Brasil. *Rev Bras Gest Ambient Sustent*. 2020;7(16):679-89. doi: 10.21438/rbgas(2020)071615
5. Boul SW, Southard RJ, Graham RC, McDaniel PA. Soil genesis and classification [Internet]. 6. ed. SPi Publisher Services: Pondicherry (India); 2011. Chapter 4, Soil Materials and Weathering; p. 141-61. doi: 10.1002/9780470960622
6. Alves CP, Souza LSB, Jardim AMRF, Araújo Júnior GN, Pinheiro AG, Salvador KRS, et al. Resiliência agrícola no cultivo consorciado palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão. *Rev Bras Geogr Fís*. 2021;14(7):3931-52.
7. Zonta JH, Brandão ZN, Medeiros JC, Sana RS, Soffiati V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*. 2014;18(6):595-602. doi: 10.1590/S1415-43662014000600005
8. Sergipe. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH). Elaboração dos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Japarutuba, Piauí e Sergipe, Relatório Final – Bacia Hidrográfica do Rio Piauí; 2015.
9. Sergipe. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia. Superintendência de Recursos Hídricos. Atlas digital sobre recursos hídricos. Aracaju (SE): SEPLANTEC/SRH; 2004.
10. Manfron S, Thomé A, Cecchim I, Reddy KR. Aplicação de nanopartículas de ferro zero-valente (nFeZ) na remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas: uma revisão. *Quím Nova*. 2020;43(5):623-31. doi: 10.21577/0100-4042.20170523
11. Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. revisada e ampliada. Brasília (DF): Embrapa; 2018.
12. Richards LA, editor. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook* n° 60. Washington (US): US Department of Agriculture; 1954. Chapter 5, Quality of irrigation water; p.69-82.
13. Ayers RS, Westcot DW. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 29. Rome (IT): Food and Agriculture Organization; 1985.
14. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) [Internet]. CPRM. Serviço Geológico do Brasil; [citado em 13 jun 2022]. Disponível em: http://siagasweb.sgb.gov.br/pmapper/_sergipe.php?dg=station_spatial,station_spatial_rimas,br_rivers_bg,estados&me=-39.114223052777,-11.568133354187,-35.525581787311,-9.5147190093994&language=BR&config=sergipe
15. Ramos OEJO, de Medeiros ES, da Silva AQ, de Oliveira LA, Bicalho CC. Estudo do comportamento mensal das chuvas na cidade de Aracaju, Sergipe, Brasil. *Pesq Soc Desenv*. 2020;9(8):1-15. doi: 10.33448/rsd-v9i8.6188
16. Landim PMB, Sturaro JR. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos [Internet]. Rio Claro: DGA/IGCE, UNESP, 2002. (Laboratório de Geomatematica - Texto Didático 06). [citado em ago 2024]. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Sturaro-2/publication/251884208_KRIGAGEM_INDICATIVA_APLICADA_A_ELABORACAO_DE_MAPAS_PROBABILISTICOS_DE_RISCOS/links/55f8266f08ae07629dd0cce8/KRIGAGEM-INDICATIVA-APLICADA-A-ELABORACAO-DE-MAPAS-PROBABILISTICOS-DE-RISCOS.pdf

17. Moreira EV, Tavares Filho GS, Oliveira FF, Pereira Júnior FA, Araújo CAS, Matias SSR. Espacialidade dos atributos químicos de águas subterrâneas do município de Granito, PE. *Pesq Soc Desenv.* 2020;9(12):1-17. doi: 10.33448/rsd-v9i12.10779
18. Onwuka OS, Ezugwu CK, Ifediegwu SI. Assessment of the impact of onsite sanitary sewage system and agricultural wastes on groundwater quality in Ikem and its environs, South-eastern Nigeria. *Geol Ecol Landsc.* 2019;3(1):65-81. doi: 10.1080/24749508.2018.1493635
19. Monteiro ASC, da Silva EL, Moraes Silva RR, Alves JP. Mecanismos que controlam as características das águas dos reservatórios do estado de Sergipe, Nordeste do Brasil. *Sci Plena.* 2021;17(01):011701. doi: 10.14808/sci.plena.2021.011701
20. Sales JMJ, Aguiar Netto AO, Monteiro ASC, Carvalho CM. Variabilidade espaço-temporal da qualidade da água em área de agricultura irrigada. *Rev Bras Agric Irrigada.* 2020;14(3):4071-85. doi: 10.7127/rbai.v14n101167
21. Alencar FKM, Lima GRR, Souza SO, Araújo AL, Silva FJA. Qualidade de águas subterrâneas sob embasamento cristalino em porção do sertão central cearense. *Revista Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas.* 2019;33(4):1-11. doi: 10.14295/ras.v33i4.29614
22. Villanueva TCB, Leal LRB, Azevedo EG, Villanueva PR. Diagnóstico das águas subterrâneas e elaboração do mapa de uso e ocupação dos solos na região de Irecê-BA. *Rev Águas Subterr.* 2015;29(1):30-41. doi: 10.14295/ras.v29i1.27932
23. Anselin L. Local Indicators of Spatial Association – LISA. *Rev Geogr Anal.* 1995;27(2):93-184. doi: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x
24. Perobelli FS, Almeida ES, Alvim MISA, Ferreira PGC. Produtividade do setor agrícola brasileiro (1991-2003): uma análise espacial. *Rev Nova Econ.* 2007;17:65-91. doi: 10.1590/S0103-63512007000100003
25. Kunst VMH, Borges SG, Sanches Loebens L, Soares GHA, Muller VB, Gonçalves SMA, Flores RR. Análise estatística de correlação e de variância do monitoramento da água bruta da Estação de Tratamento de Água Terras Baixas – Pelotas/RS. *Rev Thema.* 2021;19(3):600-14. doi: 10.15536/thema.V19.2021.600-614.1702
26. Silva SA, Lima JSS, Xavier AC, Teixeira MM. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2010;34:15-22. doi: 10.1590/S0100-06832010000100002
27. Macedo DN. A importância da qualidade da água para seu uso na irrigação. *Bol Tempo Presente.* 2020;9(1):70-92.