

VULNERABILIDADE À SALINIZAÇÃO POR INTRUSÃO MARINHA EM AQUÍFERO COSTEIRO DO ESTADO DO CEARÁ

Karen Vendramini de ARAÚJO

Itabaraci Nazareno CAVALCANTE

Diolande Ferreira Gomes FREIRE

Rafael Mota de OLIVEIRA

Saulo Robério Rodrigues MAIA

Joel Pedrosa SOUSA

Inácio Ocinaí de LIMA NETO

RESUMO

Os aquíferos costeiros constituem importante fonte de abastecimento de água para o estado do Ceará, sobretudo na época de estiagem, quando os reservatórios superficiais não apresentam a totalidade de seus volumes. Assim, esses aquíferos são frequentemente afetados pelo problema de intrusão marinha induzida pela exploração inadequada. O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de identificar o grau de vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha para o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras no município de Icapuí, Ceará, bem como avaliar a qualidade das águas subterrâneas com base nos parâmetros associados à salinização, tendo em vista a sua importância para a região, por constituir a principal fonte de abastecimento de água. Para tanto foi aplicada a metodologia GALDIT, que utiliza indicadores mapeáveis, representados pelo tipo de aquífero, condutividade hidráulica, altura da superfície potenciométrica, distância dos poços em relação à costa, razão $rCl/rHCO_3^-$ e espessura saturada, para quantificar e classificar a vulnerabilidade de aquíferos costeiros à intrusão da água do mar. Os resultados indicaram áreas com vulnerabilidade média e alta à salinização no sistema aquífero, definidas, principalmente, pela distância dos poços em relação à costa, altura da superfície potenciométrica e razão $rCl/rHCO_3^-$. A qualidade das águas subterrâneas encontra-se comprometida, em relação à concentração de sais, em mais de 60% das amostras analisadas, porém, essa salinização está, provavelmente, mais relacionada aos aerossóis marinhos e/ou à infiltração de águas salobras de lagoas costeiras do que à mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pela intrusão salina. Entretanto, a vulnerabilidade do sistema aquífero Dunas/Barreiras na área requer maior atenção em relação a gestão dos recursos hídricos, visto que modificações na demanda atual, com consequente aumento na exploração, podem acarretar no avanço da cunha salina em direção ao continente.

Palavras-chave: GALDIT; Cunha salina; Salinidade; Aquífero Dunas/Barreiras.

ABSTRACT

VULNERABILITY TO SALINIZATION DUE TO MARINE INTRUSION IN A COASTAL AQUIFER IN THE STATE OF CEARÁ. Coastal aquifers are an important source of water supply for the State of Ceará, especially during the dry season, when surface reservoirs are not at their full volumes. In this way, these aquifers are often affected by the problem of marine intrusion induced by inadequate exploitation. The

present study was developed with the objective of identifying the degree of vulnerability to salinization by marine intrusion for the Dunas/Barreiras coastal aquifer system in the Municipality of Icapuí, Ceará, as well as evaluating the quality of groundwater based on parameters associated with salinization, in view of its importance for the region, as it constitutes the main source of water supply. For this purpose, the GALDIT methodology was applied, which uses mappable indicators, represented by the type of aquifer, hydraulic conductivity, potentiometric surface height, distance of the wells from the coast, $rCl/rHCO_3^-$ ratio and saturated thickness, to quantify and classify the vulnerability from coastal aquifers to seawater intrusion. The results indicated areas with medium and high vulnerability to salinization in the aquifer system, defined mainly by the distance of the wells in relation to the coast, the height of the potentiometric surface and the $rCl/rHCO_3^-$ ratio. In relation to the concentration of salts, the quality of the groundwater is compromised in more than 60% of the analyzed samples; however, this salinization is probably more related to marine aerosols and/or the infiltration of brackish waters from coastal lagoons than the mixing of marine and continental groundwater promoted by saline intrusion. On the other hand, the vulnerability of the Dunas/Barreiras aquifer system in the area requires greater attention in relation to the management of water resources, since changes in current demand, with a consequent increase in exploitation, may lead to the advance of the saline wedge towards the continent.

Keywords: GALDIT; Saline wedge; Salinity; Dunas/Barreiras Aquifer.

1 INTRODUÇÃO

Os aquíferos costeiros têm sido submetidos à constante pressão em decorrência da crescente urbanização nessas regiões, com consequente aumento da demanda de água para as diversas atividades domésticas, agrícolas e industriais.

A exploração inadequada desses recursos causa efeitos negativos, como o avanço da cunha salina, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas em relação à salinidade, restringindo seu uso ou, a depender do nível de comprometimento, exigindo a utilização de sistemas de tratamento, como dessalinização por osmose reversa, para permitir o seu aproveitamento. Dessa maneira, a identificação do grau de vulnerabilidade dos aquíferos em relação à intrusão marinha contribui de forma direta para a boa gestão dos recursos hídricos.

Estudo realizado por SILVA & GOMES (2007) na região da beira-mar de Fortaleza - Ceará comprovou o problema de intrusão marinha nos poços da área gerado pela superexploração de água subterrânea dentro da zona de transição entre água doce e água marinha.

Segundo LOBO FERREIRA & CABRAL (1991), a vulnerabilidade, em se tratando das águas subterrâneas, é definida como a sensibilidade da qualidade das águas a uma carga contaminante imposta, por diferentes poluentes ou à intrusão da

água do mar, determinada pelas características intrínsecas do aquífero.

Para aquíferos costeiros, é necessária a utilização de uma metodologia apropriada para mapear a distribuição espacial das áreas litorâneas em relação à vulnerabilidade potencial de intrusão da água do mar, que leve em conta os fatores hidrogeológicos, principalmente aqueles que podem ser obtidos com certa facilidade nos órgãos gestores de recursos hídricos, ou a partir de experimentos simples e rápidos (COSTA SOBRINHO *et al.* 2015).

CHACHADI *et al.* (2003) desenvolveram a metodologia GALDIT para representar um índice de vulnerabilidade específico para salinização de aquíferos costeiros que pudesse vir a substituir, nestas situações, o índice DRASTIC (ALLER *et al.* 1987). O método GALDIT é composto por duas partes principais: a designação de unidades mapeáveis, denominadas configurações hidrogeológicas, e a superposição de um sistema de classificação. Dessa maneira, tem sido aplicado em estudos com diferentes tipos de aquíferos costeiros, sejam semi-confinados a confinados (RECINOS *et al.* 2015) ou não confinados (SAVARIYA & BHATT 2014, COSTA SOBRINHO *et al.* 2015, HALLAL *et al.* 2019).

Neste estudo, o índice GALDIT foi aplicado para o sistema aquífero Dunas/Barreiras que cons-

titui a principal fonte de abastecimento para a região costeira do município de Icapuí, Ceará, com o objetivo de identificar e delinear as áreas mais vulneráveis à salinização por intrusão marinha, bem como avaliar a qualidade das águas subterrâneas com base nos parâmetros físico-químicos associados à salinização, buscando fornecer subsídios para a gestão adequada e preservação dos recursos hídricos costeiros.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a faixa urbana costeira do município de Icapuí, localizado no extremo leste do estado do Ceará (Figura 1), com aproximadamente 421 km² e cerca de 20.000 habitantes, concentrados principalmente na zona costeira do município. Nos últimos dez anos é notável o aumento no número de pousadas, bares e restaurantes com maior fluxo de turistas e consequente aumento na demanda por água.

O clima é caracterizado como tropical quente semiárido brando, a temperatura média está entre 26 e 28 °C e a pluviosidade média é de 949 mm, apresentando chuvas mais expressivas nos meses de janeiro a maio (IPECE 2021).

O abastecimento de água é realizado por meio de poços tubulares administrados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) e

poços particulares, que captam água principalmente do Sistema Aquífero Dunas/Barreiras.

O Aquífero Dunas corresponde aos depósitos eólicos quaternários que ocorrem ao longo de toda a faixa costeira, com espessuras que variam de 6 a 20 m, compostos, segundo FERRO (2018), por areias quartzosas bem selecionadas, de granulação fina a média.

O Aquífero Barreiras é composto por sedimentos de idades que variam do Mioceno até o Plioceno-Pleistoceno e ocorre tanto subjacente ao aquífero Dunas quanto aflorante, possuindo o maior potencial hídrico da área.

A Formação Barreiras aflora na área sob a forma de falésias ao longo da costa, a partir das quais, SOUSA (2002) identificou duas seções individualizáveis verticalmente. A primeira corresponde à seção superior, composta por arenitos avermelhados de aspecto maciço, granulometria de areia média a grossa. A composição é predominantemente quartzosa, com grãos eventualmente recobertos por óxido de ferro, em matriz argilosa. Na seção inferior ocorrem arenitos finos silto-argilosos em cimento argiloso, localmente maciços com estratificação cruzada de baixo ângulo, e tonalidades amareladas, roxas e avermelhadas. São compostos, predominantemente, por grãos de quartzo, angulosos a sub-arredondados, e presença subordinada de feldspatos.

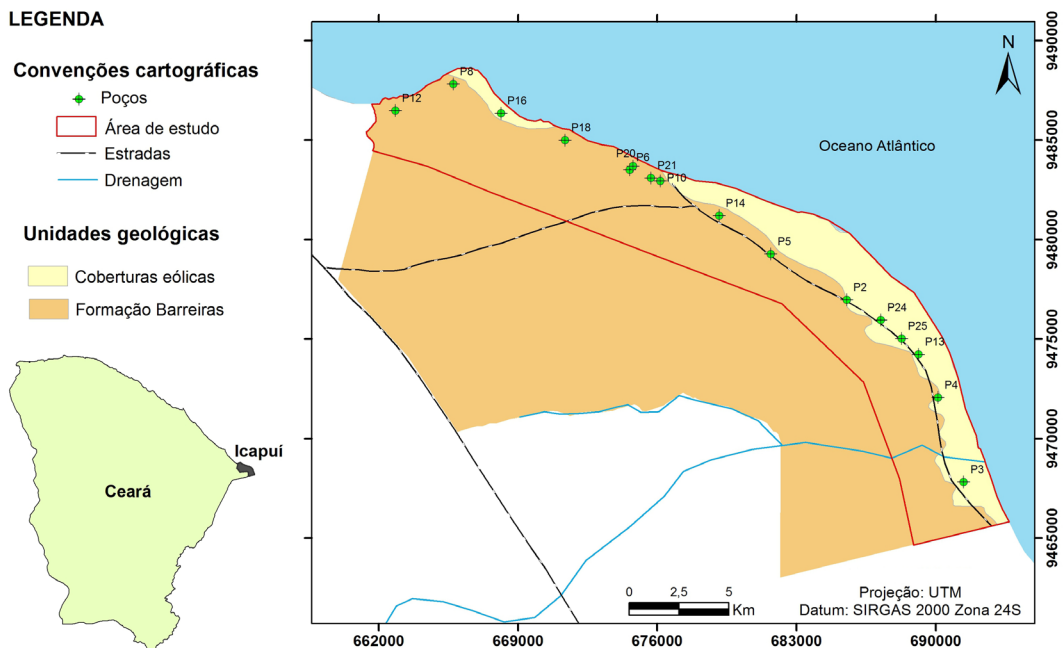


FIGURA 1 – Distribuição dos poços amostrados e unidades geológicas na área de estudo.

FIGURE 1 – Distribution of sampled wells and geological units in the study area.

Neste estudo as duas unidades aquíferas foram consideradas um sistema hidráulico único, Dunas/Barreiras, conforme indicado por MELO (1998), a partir de análise das variações das cargas hidráulicas e das feições litológicas e estruturais dos aquíferos, e ainda, conforme identificado por VASCONCELOS *et al.* (2015), pela não demarcação do contato entre o topo da Formação Barreiras e a base dos sedimentos de dunas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados neste estudo dados de 16 poços localizados na faixa urbana costeira do município de Icapuí, Ceará (Figura 1), a partir dos quais foram obtidos os parâmetros utilizados na aplicação da metodologia GALDIT e coletadas amostras para realização de análises físico-químicas.

A amostragem das águas subterrâneas foi dividida em duas campanhas, totalizando 32 amostras coletadas, a primeira realizada em fevereiro (período chuvoso) e a segunda em agosto (período de estiagem) de 2019, visando identificar variações sazonais nas características químicas relacionadas à salinização. Os parâmetros obtidos englobam condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e Cl^- , que foram analisados pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal do Ceará, utilizando a metodologia estabelecida pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA 2012).

O método GALDIT, desenvolvido por CHACHADI & LOBO FERREIRA (2001), utiliza seis parâmetros, para os quais são atribuídos pesos

relativos à influência no processo de intrusão de águas marinhas no aquífero. São utilizadas variáveis indicadoras com faixas de valores para os parâmetros mensuráveis. As variáveis são classificadas com base na importância para o comprometimento da vulnerabilidade do aquífero, variando de muito baixa a alta (Tabela 1).

Os valores das classes das variáveis indicadoras referentes a cada parâmetro foram utilizados para confecção de mapas temáticos, a partir dos quais foi calculado o índice de vulnerabilidade GALDIT (*IG*), por meio da relação ponderada apresentada na equação 1:

$$IG = \frac{\sum_{i=1}^6 (W_i, R_i)}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad \text{Eq.1}$$

Onde *W* é o peso para cada parâmetro, que varia conforme a influência de 1 (fraca) a 4 (forte), e *R* é o valor da classificação para cada variável, que, de acordo com a importância, vai de 2,5 (muito baixa) a 10 (alta).

Para o parâmetro G (ocorrência da água subterrânea) o sistema aquífero Dunas/Barreiras foi classificado como não confinado com base nos perfis construtivos e litológicos dos poços cadastrados na área (SIAGAS 2021), nos quais não foi identificada a presença de camadas com características confinantes ou semiconfinantes sobrepostas ao aquífero.

A condutividade hidráulica, parâmetro A, foi obtida a partir de dados disponíveis na literatura em estudos desenvolvidos para o sistema aquífero Dunas/Barreiras devido à ausência de dados necessários para a determinação desse parâmetro utilizando os poços cadastrados na área. Dessa ma-

TABELA 1 – Parâmetros utilizados na metodologia GALDIT.

TABLE 1 – Parameters used in the GALDIT method.

Parâmetro	Peso	Variáveis indicadoras			
		2,5 (muito baixa)	5 (baixa)	7,5 (média)	10 (alta)
G - Ocorrência da água subterrânea	1	Aquífero limitado	Aquífero semiconfinado	Aquífero não confinado	Aquífero confinado
A - Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	3	< 5	5 - 10	10 - 40	> 40
L - Altura do nível do lençol freático acima do nível do mar (m)	4	> 2	1,5 - 2	1 - 1,5	< 1
D - Distância do ponto em relação à costa (m)	4	> 1000	750 - 1000	500 - 750	< 500
I - Impacto do estado existente de intrusão de água do mar ($\text{rCl}^-/\text{rHCO}_3^-$)	1	< 1	1 - 1,5	1,5 - 2	> 2
T - Espessura do aquífero (saturada) (m)	2	< 5	5 - 7,5	7,5 - 10	> 10

neira, foi utilizado o valor médio de condutividade hidráulica determinado por MELO (1998), que sumarizou os dados históricos dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras.

O nível d'água acima do mar (NA) foi calculado a partir da profundidade do nível estático (NE) e da cota altimétrica (CA) de cada poço (Equação 2). As medidas de nível estático foram feitas utilizando medidor eletro-sonoro de nível estático com capacidade para 100 m e as cotas altimétricas foram obtidas com GPS Garmin GPSmap 60CSx. Os dados calculados foram interpolados utilizando o método de krigagem para produzir o mapa referente ao zoneamento do parâmetro L.

$$NA = CA - NE \quad \text{Eq. 2}$$

As distâncias dos poços em relação à costa foram estimadas considerando, conforme o método, três distâncias perpendiculares à linha de maré alta de 500, 750 e 1000 m. Os intervalos definidos para cada distância foram confeccionados em ambiente SIG para gerar o mapa referente ao parâmetro D.

A razão $rCl/rHCO_3^-$ pode ser utilizada como critério na identificação do impacto da intrusão marinha em aquíferos costeiros, tendo em vista que o Cl^- é o íon dominante na água do mar, estando disponível apenas em pequenas quantidades nas águas subterrâneas continentais. As razões $rCl/rHCO_3^-$ nas amostras analisadas foram calculadas a partir da conversão das concentrações em $mg L^{-1}$ desses elementos para $meq L^{-1}$ e os valores obtidos foram interpolados utilizando o método de krigagem para a confecção do mapa de zoneamento para o parâmetro I.

O parâmetro T, representado pela espessura do aquífero, foi estimado a partir das fichas técnicas dos poços, utilizando dados construtivos e litológicos, obtidos em órgãos públicos como Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e Serviço Geológico do Brasil - SGB, neste último, por meio do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS 2021).

A classificação da vulnerabilidade GALDIT foi feita a partir dos intervalos apresentados na tabela 2. Os valores obtidos para cada poço foram interpolados pelo método de krigagem para gerar o mapa de zoneamento da vulnerabilidade GALDIT para o aquífero.

Para avaliar as águas subterrâneas com base nos parâmetros associados à salinização foram utilizados, inicialmente, os valores estabelecidos pela Resolução Conama nº 357 (CONAMA 2005), que classifica as águas em doces, salobras e salgadas, a partir das concentrações de sólidos totais dissolvidos (Tabela 3).

Posteriormente, foi realizada a classificação iônica para identificar quais fácies hidroquímicas representam as águas da região, utilizando o diagrama triangular de Piper elaborado no programa Qualigraf (MOBÜS 2003).

Os resultados das análises físico-químicas foram comparados com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL 2021) e com as recomendações da Organização Mundial da Saúde (WHO 2011) visando avaliar a adequação para o consumo humano.

Para avaliar a qualidade das águas subterrâneas para uso na agricultura (irrigação) foi adotada a classificação proposta pelo U.S. Salinity Laboratory, que relaciona a condutividade elétrica (CE), como indicadora do perigo de salinização do solo, e a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) (Equação 3), como indicadora do perigo de sodificação.

$$RAS = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{r(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}}} \quad \text{Eq. 3}$$

TABELA 2 – Classificação da vulnerabilidade pelo índice GALDIT.

TABLE 2 – Vulnerability classification using the GALDIT index.

Índice GALDIT	Classe de Vulnerabilidade
< 5	Baixa
5 - 7,5	Média
> 7,5	Alta

TABELA 3 – Enquadramento das águas com base na salinidade.

TABLE 3 – Water classification based on salinity.

Classificação	STD ($mg L^{-1}$)
Águas Doces	< 500
Águas Salobras	500 – 30.000
Águas Salinas	> 30.000

Fonte: CONAMA (2005)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Vulnerabilidade do aquífero à salinização

A partir dos parâmetros propostos pelo método GALDIT foram estimados os índices de vulnerabilidade à intrusão salina para o sistema aquífero costeiro na área.

Os dados obtidos nos dois períodos sazonais não apresentaram variações significativas nos valores a ponto de promover alterações nas variáveis indicadoras. Dessa maneira, tanto para o período seco quanto para o chuvoso, as amostras se enquadraram nas mesmas classes de acordo com o método GALDIT.

4.1.1 Ocorrência da água subterrânea (G)

O aquífero não confinado submetido à pressão atmosférica está mais susceptível ao avanço da cunha salina do que o semiconfinado, pois este mantém a pressão hidráulica a um mínimo, devido às fugas associadas aos aquíferos adjacentes, protegendo-se assim da intrusão marinha. Ao contrário, um aquífero confinado, sob alta pressão hidráulica, é o mais vulnerável pela existência de importantes cones de depressão e pela imediata ex-

pulsão de água dos poços durante o bombeamento (HALLAL *et al.* 2019).

Na área de estudo, o sistema aquífero Dunas/Barreiras possui caráter não confinado, conforme identificado por meio de perfis litológicos dos poços, por exemplo P4 e P8 (Figura 2). Portanto, a classe de ocorrência da água subterrânea para todos os pontos, corresponde ao valor 7,5.

4.1.2 Condutividade hidráulica (A)

Por definição, a condutividade hidráulica do aquífero é uma medida da capacidade do aquífero de transmitir água sob o efeito do gradiente hidráulico. A maior condutividade hidráulica resulta em um cone de depressão mais amplo e de maior extensão para intrusão de água do mar (SAVARIYA & BHATT 2014). A condutividade hidráulica média estimada para o sistema aquífero Dunas/Barreiras foi de 14,7 m/dia (MELO 1998), sendo atribuído o valor de 7,5 para todos os pontos.

4.1.3 Altura do nível da água subterrânea acima do nível do mar (L)

Quanto maior o nível de água subterrânea acima do nível médio do mar, maior a carga

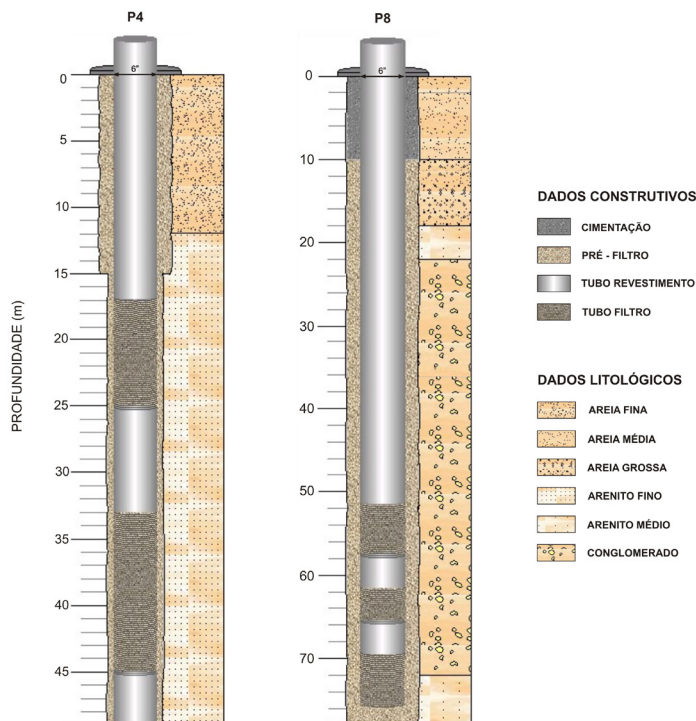


FIGURA 2 – Perfis construtivos e litológicos dos poços P4 e P8 cadastrados na área de estudo.

FIGURE 2 – Construction and lithological profiles of wells P4 and P8 registered in the study area.

hidráulica e menor o risco de intrusão marinha. Na maior parte da área (Figura 3), os poços apresentam nível d'água acima de 2 m, sendo atribuído para estes pontos o valor de 2,5, apenas dois poços (P4 e P8) apresentam nível d'água entre 1 e 1,5 m correspondendo ao valor de classificação 7,5.

4.1.4 Distância do ponto em relação à costa (D)

O impacto da intrusão da água do mar geralmente diminui quando se desloca perpendicularmente da costa para o interior. Observa-se na figura 4 que 50% dos poços encontram-se a menos de 500 m da linha de costa em maré alta e os outros 50% estão a mais de 1000 m da referida linha. Assim, de acordo com a distância dos poços em relação à costa foram atribuídos valores de 2,5 e 10,0 para este parâmetro.

4.1.5 Impacto do estado existente de intrusão de água do mar (I)

A razão $rCl/rHCO_3^-$ varia de 0,1 a 5,0 em águas continentais (CUSTÓDIO & LLAMAS 1983). Como o conteúdo em HCO_3^- é relativamente

constante nas águas subterrâneas, essa razão presta-se para mapear o processo de concentração de sais no sentido do fluxo subterrâneo; ainda que o processo faça crescer ligeiramente o denominador, um aumento na razão $rCl/rHCO_3^-$ indica um avanço no processo de concentração (SANTOS 2008).

Na maior parte da área de estudo a razão $rCl/rHCO_3^-$ foi maior que 2,0, correspondendo ao valor de classificação 10,0 (alta) em 87% das amostras (Figura 5). Apenas nas amostras P2 e P4 a razão $rCl/rHCO_3^-$ foi inferior a 2,0 (Tabela 4); para estes pontos foram atribuídos os valores GALDIT 5,0 e 7,5, respectivamente. Os altos valores para a razão $rCl/rHCO_3^-$ indicam a ocorrência de um processo de salinização com contribuição marinha devido a predominância do íon Cl^- sobre o HCO_3^- nas águas subterrâneas da área.

4.1.6 Espessura saturada do aquífero (T)

A espessura saturada de um aquífero livre desempenha um papel importante na determinação da extensão da intrusão de água do mar na área costeira, pois quanto mais espesso o aquífero, maior a vulnerabilidade à intrusão da água do mar (SAVARIYA

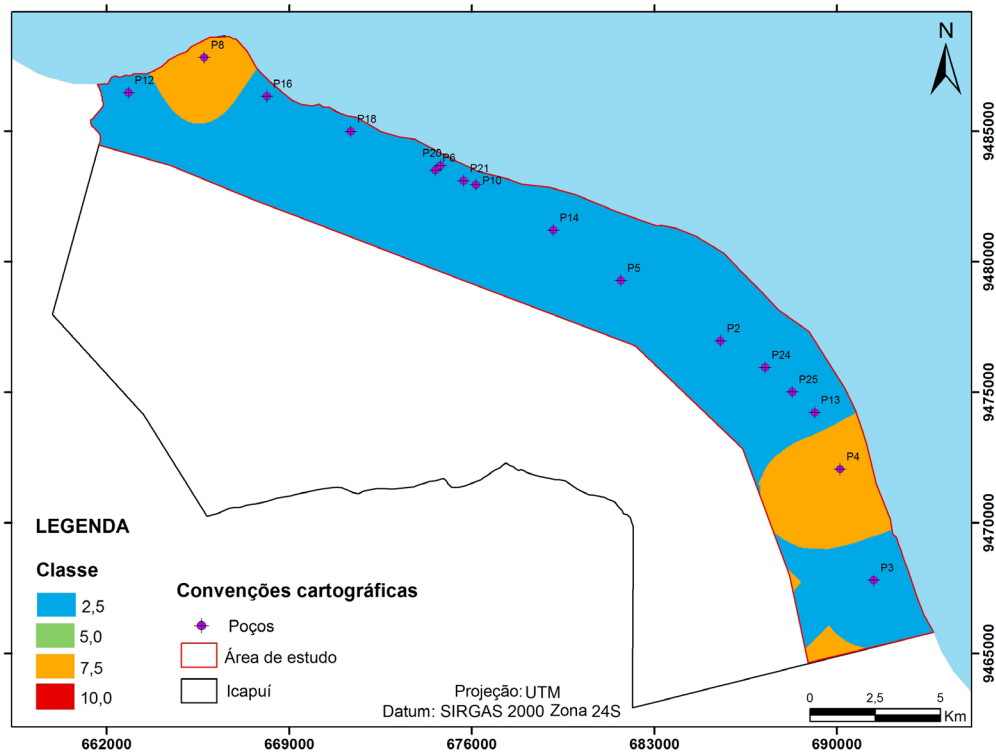


FIGURA 3 – Altura do nível da água acima do nível do mar (parâmetro L).

FIGURE 3 – Height of the water level above sea level (parameter L).

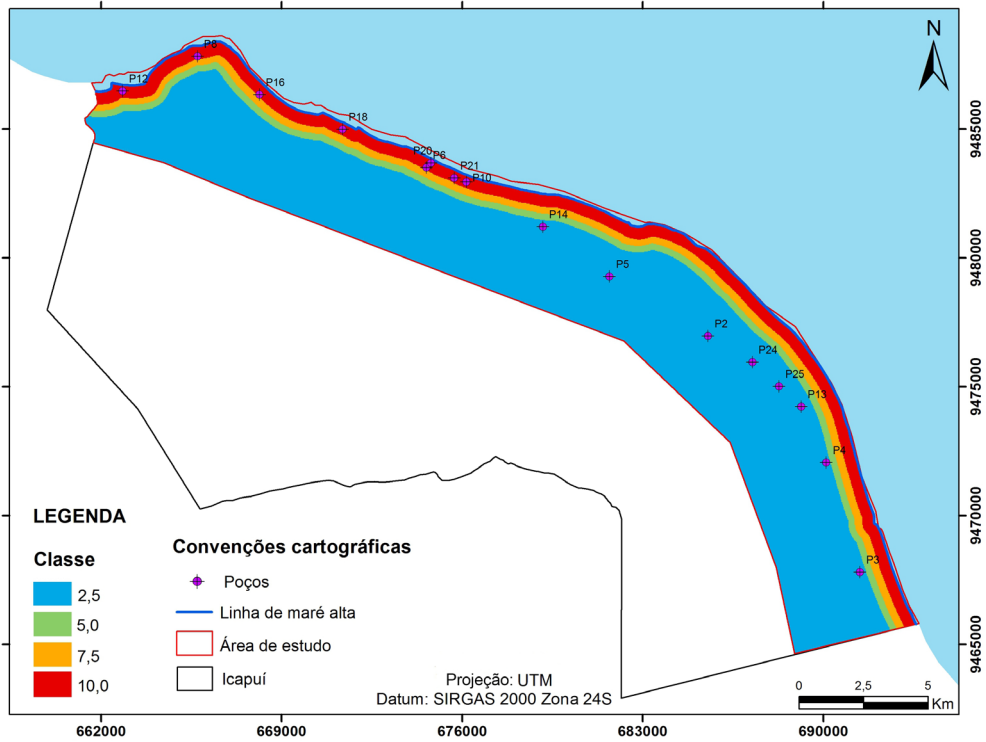


FIGURA 4 – Distância dos poços em relação à costa (parâmetro D).

FIGURE 4 – Distance of the wells from the coast (parameter D).

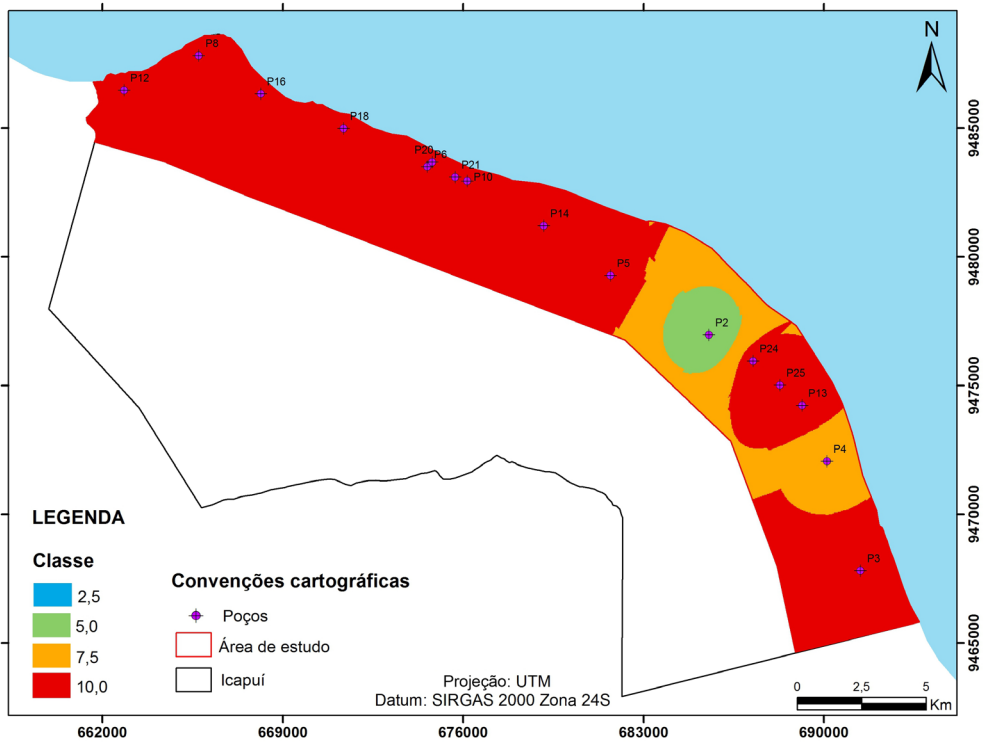


FIGURA 5 – Impacto do estado existente de intrusão de água do mar (parâmetro I).

FIGURE 5 – Impact of the existing state of seawater intrusion (parameter I).

TABELA 4 – Razões $rCl/rHCO_3^-$ nas amostras analisadas.TABLE 4 – $rCl/rHCO_3^-$ ratios in the analyzed samples.

Amostra	Período Chuvoso			Período Seco		
	Cl (meq L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹)	rCl/rHCO ₃ ⁻	Cl (meq L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹)	rCl/rHCO ₃ ⁻
P2	4,96	3,51	1,41	4,79	3,23	1,48
P3	7,56	0,69	11,00	7,56	0,69	11,00
P4	9,36	5,82	1,61	9,14	5,94	1,54
P5	11,96	2,30	5,19	15,79	2,34	6,74
P6	3,39	0,28	11,94	3,39	0,24	13,96
P8	9,02	0,28	31,83	8,97	0,28	31,63
P10	1,41	0,16	8,69	1,75	0,20	8,68
P12	15,23	3,84	3,97	13,76	3,51	3,92
P13	33,56	4,85	6,92	36,10	4,81	7,51
P14	0,85	0,08	10,54	2,20	0,08	27,40
P16	7,78	3,39	2,29	7,39	3,27	2,26
P18	5,24	0,73	7,21	5,24	0,73	7,21
P20	3,89	0,20	19,31	3,84	0,20	19,03
P21	2,20	0,20	10,91	2,14	0,12	17,68
P24	7,56	2,14	3,53	8,35	0,89	9,40
P25	10,27	4,16	2,47	11,28	4,16	2,71

& BHATT 2014). A partir dos perfis construtivos e litológicos dos poços cadastrados na área (SIAGAS 2021), estimou-se espessura saturada média de 29 m para o aquífero Dunas/Barreiras, portanto, para este parâmetro atribuiu-se o valor 10,0 a todos os pontos.

4.1.7 Vulnerabilidade GALDIT

Com base nos índices calculados, o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras apresenta vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha variando de média a alta. Na maior parte da área o aquífero possui vulnerabilidade média à salinização, porém na porção oeste observa-se a ocorrência de regiões com alta vulnerabilidade (Figura 6). As áreas mais vulneráveis estão associadas às regiões que apresentam nível d'água acima do nível do mar inferior a 1,5 m, poços localizados a menos de 500 m da linha de costa e águas com razão $rCl/rHCO_3^-$ superior a 2,0.

4.2 Salinidade e padrões de qualidade das águas subterrâneas

A salinização das águas está diretamente relacionada com o aumento dos sólidos dissolvidos. Dessa maneira, a Resolução Conama nº 357

(CONAMA 2005) classifica as águas em doces, salobras e salinas a partir das concentrações de STD.

Na área, cerca de 60% das amostras se enquadram como águas salobras e 40% como águas doces. De modo geral, as condições climáticas e fatores antrópicos não causaram mudanças apreciáveis na salinidade de um período sazonal para o outro e nem tendência de aumento ou diminuição.

Com base nos constituintes iônicos dominantes as águas são classificadas em cloretadas sódicas (Figura 7). A predominância dos íons Na⁺ e Cl⁻ sobre os demais corrobora para a maior contribuição marinha na salinização das águas subterrâneas, seja por intrusão da cunha salina, lixiviação de sais depositados no solo, proveniente de aerossóis marinhos, ou infiltração de água de lagoas costeiras, muitas vezes salobras, devido ao processo de evaporação e concentração de sais.

De acordo com MAIA (2018), essa salinização não está relacionada diretamente à mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pelo avanço da cunha salina, visto que o autor analisou o conteúdo isotópico de amostras de água coletadas em 56 poços na área de estudo, as quais apresentaram valores de $\delta^{18}O$ negativos, entre -2,56 e -5,31, $\bar{x} = -3,83$, compatíveis com dados obtidos pela IAEA (1981) para as chuvas do li-

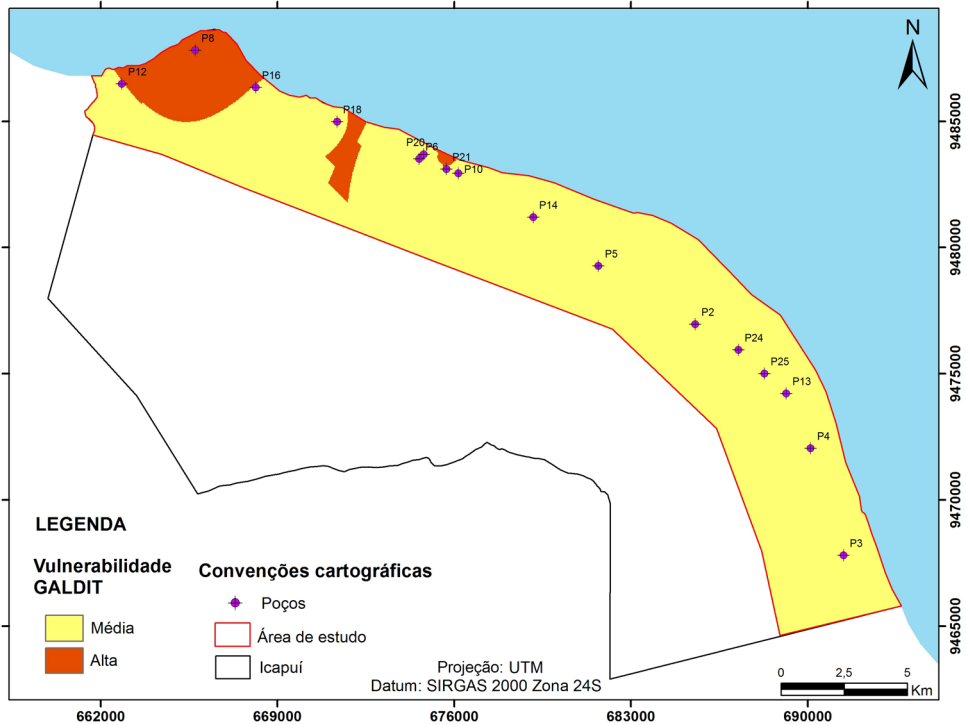


FIGURA 6 – Vulnerabilidade GALDIT para o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras.

FIGURE 6 - GALDIT vulnerability for the Dunas/Barreiras coastal aquifer system.

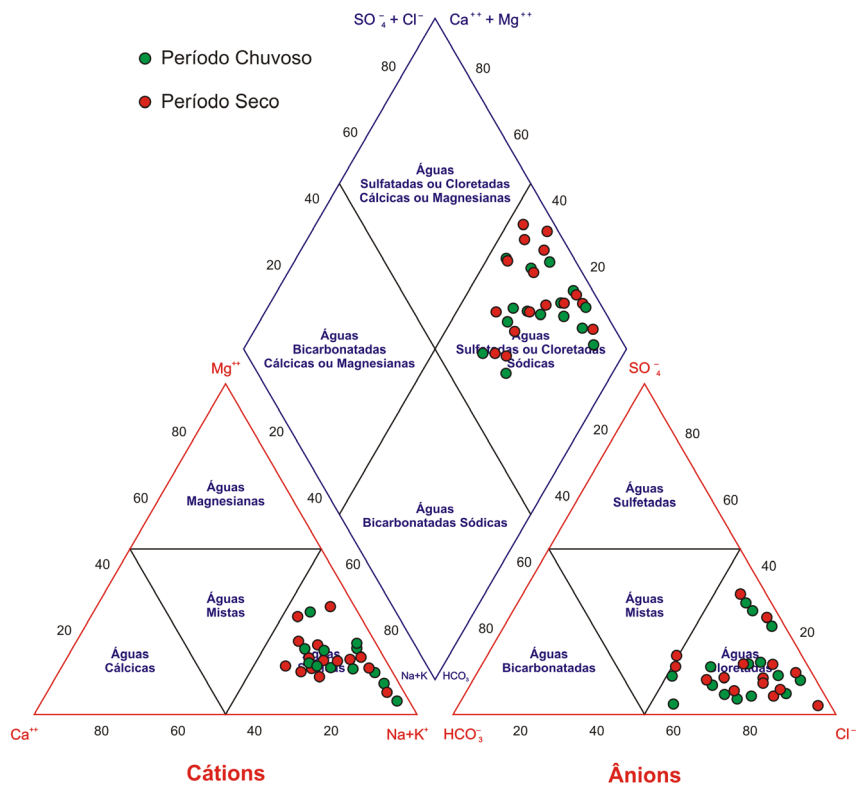


FIGURA 7 – Classificação iônica das águas subterrâneas.

FIGURE 7 – Ionic classification of groundwater.

toral de Fortaleza - CE, indicando águas de recarga pluviométrica atual.

A composição isotópica das águas subterrâneas, desde que não haja nenhum novo fator de modificação, deve ser semelhante à água de precipitação que a originou. No entanto, alguns fatores podem alterar sua composição isotópica, entre os quais pode-se citar a mistura com águas de origem não meteórica, como águas superficiais continentais ou marinhas, e a influência de águas fósseis. Nos reservatórios superficiais, submetidos ao processo de evaporação, ocorre um enriquecimento nos isótopos pesados, como o $\delta^{18}\text{O}$, na água residual em relação ao valor inicial (SALATI *et al.* 1971). Em estudo realizado por GOMES *et al.* (2007) no rio Jaguaribe - CE verificou-se que durante o período chuvoso as águas apresentaram valores negativos de $\delta^{18}\text{O}$, enquanto no período seco, com maior evaporação, as águas tornaram-se enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$, apresentando concentrações positivas. Dessa maneira, águas subterrâneas enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$ podem indicar infiltração de águas superficiais ou contaminação por águas marinhas, em decorrência de intrusão salina.

Como não foram verificadas grandes alterações na demanda de água na região durante o período entre a realização do estudo desenvolvido por MAIA (2018) e o desenvolvimento deste, segundo o Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), que justificassem alterações no equilíbrio da interface águas subterrâneas marinhas/continentais, e levando em conta o caráter livre do aquífero, a origem dos íons Na^+ e Cl^- pode ser atribuída à lixiviação de espécies químicas depositadas sob o solo, provenientes dos aerossóis marinhos, promovida pela recarga pluviométrica.

Com relação aos padrões de qualidade, os parâmetros associados à salinidade foram avaliados com base nos valores estabelecidos para consumo humano e uso na agricultura, tendo em vista os usos preponderantes na região.

As concentrações de STD apresentaram valores acima do máximo permitido (VMP) para consumo humano, que é de 500 mg L^{-1} , em cerca de 60% das amostras nos dois períodos sazonais. O cloreto apresentou concentrações superiores a 250 mg L^{-1} (VMP) em 56% das amostras, atingindo máximas de 1189,6 e $1279,6 \text{ mg L}^{-1}$ nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. O sulfato não apresentou concentrações fora do padrão de potabilidade (250 mg L^{-1}). No entanto, o sódio apresentou valores acima do VMP de 200 mg L^{-1} em cerca de 30% das

amostras, tanto no período chuvoso quanto no período seco.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO 2011), a presença de altos níveis de sólidos dissolvidos compromete a palatabilidade da água, conferindo sabor salgado, além de causar incrustação excessiva em tubulações de água, aquecedores, caldeiras e eletrodomésticos. A palatabilidade da água com um nível de STD inferior a cerca de 600 mg L^{-1} é geralmente considerada boa. A água potável torna-se significativamente menos palatável com níveis superiores a 1000 mg L^{-1} . Os limites de sabor para o ânion cloreto dependem do cátion associado e estão na faixa de 200 a 300 mg L^{-1} para cloreto de sódio, potássio e cálcio. Concentrações acima de 250 mg L^{-1} são cada vez mais prováveis de serem detectadas pelo paladar. A concentração limite de gosto para sódio na água depende do ânion associado e da temperatura da solução. À temperatura ambiente, o limiar de sabor médio para sódio é de cerca de 200 mg L^{-1} .

Com base na classificação para uso na agricultura (irrigação), as águas subterrâneas apresentaram variações do período chuvoso (Figura 8) para o período seco (Figura 9).

As amostras coletadas durante o período chuvoso possuem risco de salinização variando de baixo a muito alto (classes C1, C2, C3 e C4), enquanto as coletadas no período seco possuem risco de salinização médio a muito alto (classes C2, C3 e C4). Apenas a amostra P14 apresenta modificação no risco de salinização, representado pela condutividade elétrica, de um período sazonal para o outro, com menor risco no período chuvoso do que no período seco. Isso se deve, possivelmente, ao mecanismo de diluição promovido pela recarga pluviométrica refletido pela diminuição da condutividade elétrica nessa amostra, por se tratar de um poço raso associado a um ambiente arenoso com maior permeabilidade, tornando-o mais susceptível às alterações sazonais.

Segundo SANTOS (2008), a classe C1 corresponde às águas que podem ser utilizadas para a maioria das culturas, na maioria dos solos, com pequeno risco de incidentes quanto à salinização do solo; a classe C2 representa águas que podem ser utilizadas em solos de lixiviação moderada, como solos areno-argilosos, e não trazem risco para culturas de baixa tolerância salina; as águas pertencentes a classes C3 só são indicadas para solos bem drenados e apenas para os cultivos de alta tolerância salina; e a classe C4 representa águas não indicadas para irrigação.

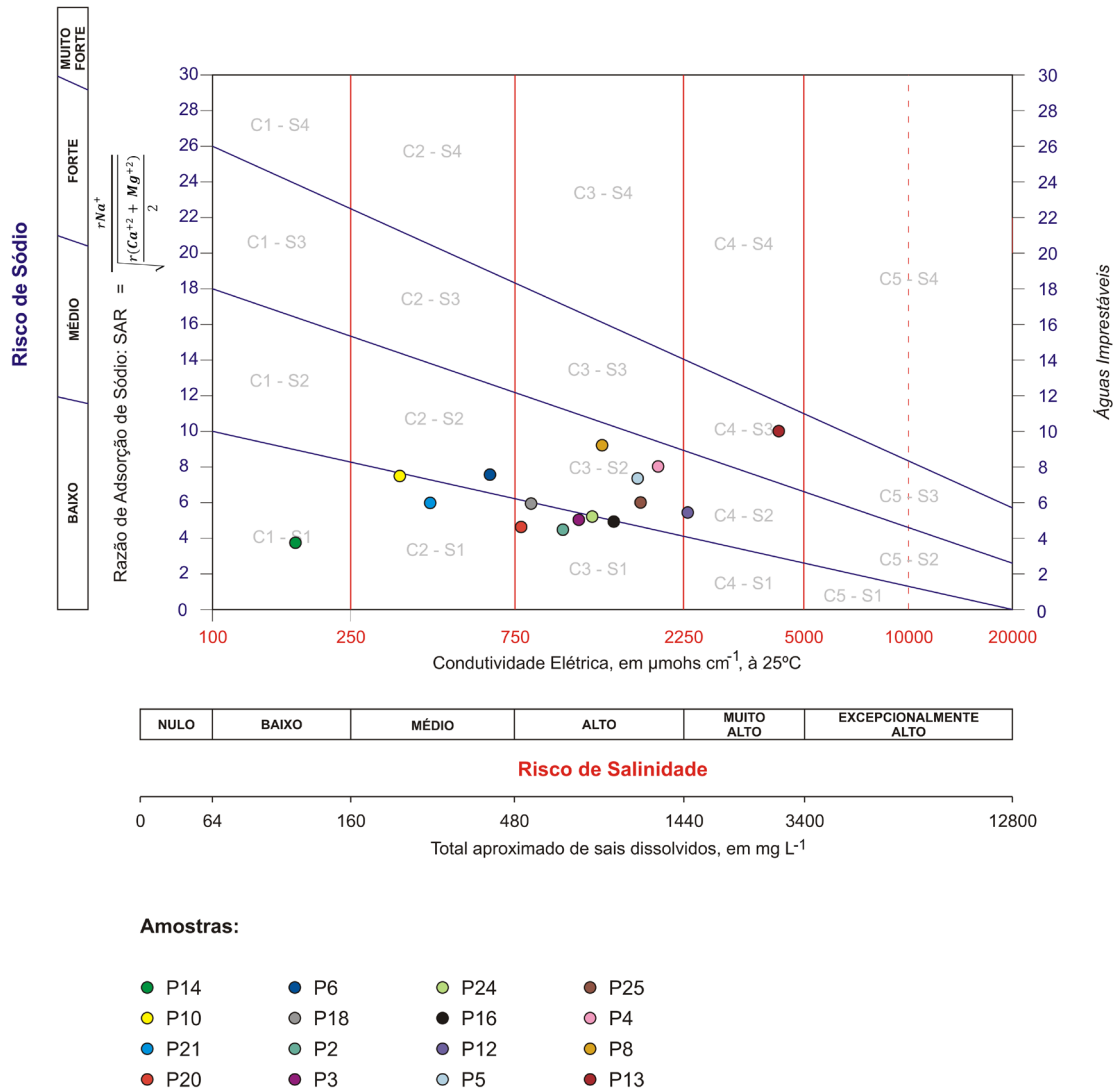


FIGURA 8 – Classificação das águas subterrâneas para uso na agricultura (período chuvoso).

FIGURE 8 - Classification of groundwater for use in agriculture (rainy season).

Em relação ao risco de sodificação, as amostras coletadas em ambos os períodos sazonais estão distribuídas nas classes S1, S2 e S3, com risco variando de baixo a forte. Nota-se que nas amostras P6, P18 e P24 o risco, representado pela razão de adsorção de sódio (SAR), é maior no período chuvoso do que no período seco. O aumento da SAR durante o período chuvoso pode estar associado à lixiviação do Na presente no solo oriundo dos aerossóis marinhos.

A classe S1 indica águas que podem ser utilizadas para a maioria dos solos e em quase todos os cultivos; as águas representadas pela classe S2 não são indicadas para solos de tex-

tura fina e forte capacidade de troca catiônica; enquanto as águas de classe S3 representam alto risco de teores nocivos de sódio para a maioria dos solos, sendo indicadas apenas para cultivos com alta tolerância a esse elemento (SANTOS 2008).

5 CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia GALDIT identificou para o sistema aquífero costeiro de Icapuí regiões com vulnerabilidade média e alta à salinização por avanço da cunha salina. Esses dois níveis de vulnerabilidade foram individualiza-

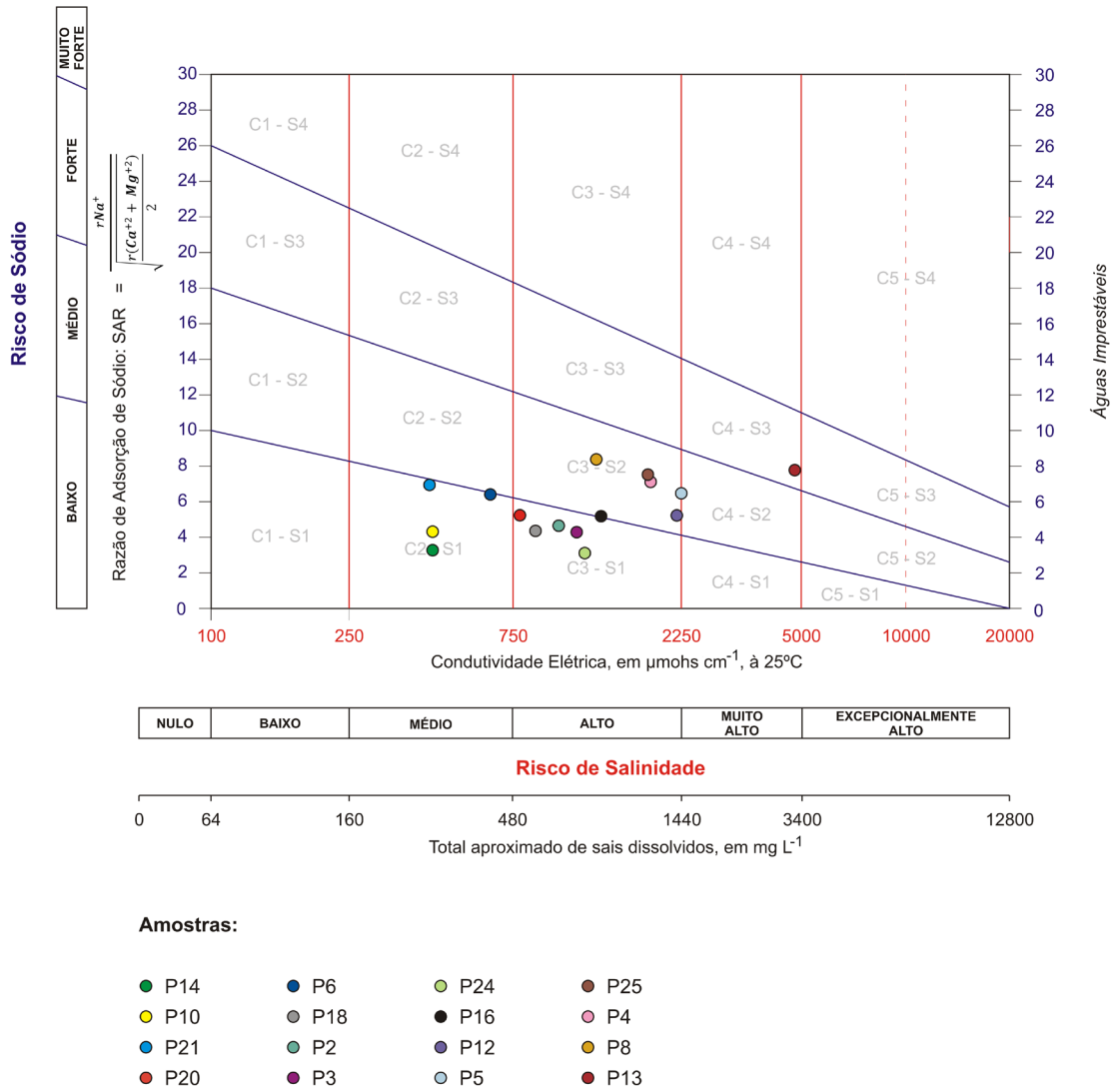


FIGURA 9 – Classificação das águas subterrâneas para uso na agricultura (período seco).

FIGURE 9 - Classification of groundwater for use in agriculture (dry period).

dos com base na distância dos pontos em relação à costa, altura do nível d'água acima do nível do mar e a razão $rCl/rHCO_3^-$, que representa o impacto da intrusão marinha.

A salinização das águas subterrâneas indica influência marinha, comprometendo a qualidade para consumo humano em mais de 60% das amostras analisadas, e em cerca de 75% para uso na agricultura. Porém, provavelmente, está mais relacionada a uma contaminação oriunda dos aerossóis marinhos lixiviados do solo ou infiltração de água de lagoas costeiras do que por mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pela intrusão salina.

Entretanto, a vulnerabilidade média a alta do sistema aquífero Dunas/Barreiras na área requer maior atenção com o gerenciamento dos poços, tanto no que diz respeito aos aspectos qualitativos, quanto aos aspectos quantitativos, tendo em vista que modificações na demanda atual podem promover um desequilíbrio na exploração desse recurso, aumentando o risco do avanço da cunha salina em direção ao continente.

Dessa maneira, espera-se que as informações fornecidas neste estudo possam se constituir em subsídios para gestão dos recursos hídricos, bem como para o desenvolvimento de políticas públicas direcionadas à preservação, visto a sua

importância para a região, sob o risco do comprometimento da disponibilidade de água para fins de abastecimento em decorrência da contaminação por águas marinhas.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio na realização das análises físico-químicas. Aos pareceristas da revista *Derbyana* pelas sugestões apresentadas que aprimoraram o artigo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLER, L.; LEHR, J.H.; PETTY, R. 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. Environmental Protection Agency, Washington DC, 641 p.
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 2012. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. APHA, Washington D.C., 22th ed., 724 p.
- BRASIL. 2021. *Portaria nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde, Brasília, DF, 29 p.
- CHACHADI, A.G.; LOBO-FERREIRA, J.P. 2001. Cartographie de la vulnérabilité des aquifères dans l'intrusion d'eau de mer à l'aide de la méthode GALDIT. *Actes de l'atelier sur la modélisation en hydrogéologie*, Université Anna, Chennai, p 143-156.
- CHACHADI, A.G.; LOBO-FERREIRA, J.P.; CHOUDRI, B.S. 2003. Intrusion in Coastal Aquifers Using GALDIT Model. *In: APRH/CEAS, SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, Lisboa.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2005. *Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. CONAMA, Brasília, DF, 36 p.
- COSTA SOBRINHO, A.F.; CABRAL, J.J.S.P.; PAIVA, A.L.R.; MONTENEGRO, S.M.G.L. 2015. Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do Aquífero Boa Viagem – Região Metropolitana do Recife. *Águas Subterrâneas*, 29(1): 116-128. <http://doi.org/10.14295/ras.v29i1.28016>
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Omega, Barcelona, vol. 2, 2^a ed., 1161 p.
- FERRO, I.M.M. 2018. *Morfodinâmica e vulnerabilidade ambiental na região costeira de Icapuí, Ceará*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Dissertação de Mestrado, 156 p.
- GOMES, D.F.; FRISCHKORN, H.; FREIRE, J.S.S. 2007. Medidas de $\delta^{18}\text{O}$ e hidroquímica de águas superficiais e subterrâneas no estudo da interação rio – aquífero, na região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe – CE. *Águas Subterrâneas*, 21(1): 93-109. <https://doi.org/10.14295/ras.v21i1.16173>
- HALLAL, D.D.; KHELFI, M.E.A.; ZAHOUANI, S.; BENAMGHAR, A.; HADDAD, O.; AMMARI, A.; LOBO-FERREIRA, J.P. 2019. Application of the GALDIT method combined with geostatistics at the Bouteldja aquifer (Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 78: 22. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8005-2>
- IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 1981. *Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation*. Vienna: IAEA, 253 p. (Technical Reports Series, 206).
- IPECE – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. 2021. *Perfil básico municipal*. Disponível em http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2017/Icapui. Acessado em 14 out. 2021.
- LOBO-FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. 1991. *Proposal for an Operational Definition of Vulnerability from the European Community's Atlas of Groundwater*

- Resources*. Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group, Brussels.
- MAIA, S.R.R. 2018. *Estudo hidroquímico-ambiental do aquífero costeiro do município de Icapuí - CE*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Tese de Doutorado, 109 p.
- MELO, J.G. 1998. *Avaliação de riscos de contaminação e proteção das águas subterrâneas – Zona Norte de Natal, RN*. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN)/Divisão de Hidrogeologia, Natal (Relatório Interno).
- MOBÜS, G. 2003. *Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta*. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Fortaleza. Disponível em <http://www.funceme.br>. Acessado em 10 nov. 2021.
- RECINOS, N; KALLIORAS, A; PLIAKAS, F; SCHUTH, C. 2015. Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 73: 1017-1032. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3452-x>
- SALATI, E.; GUSMÃO, G.A.; MATSUI, E.; CERVELLINI, A. 1971. *Estudo preliminar das concentrações de ¹⁸O e D em águas do nordeste brasileiro*. Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP-CNEN, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 34 p. (Boletim Científico).
- SANTOS, A.C. 2008. Noções de Hidroquímica. In: F.A.C. Feitosa, J. Manoel Filho, E.C. Feitosa, J.G.A. Demetrio (Orgs.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM, cap. 5, 3ª ed. revisada e ampliada, p. 325-357.
- SAVARIYA, P.; BHATT, N. 2014. Assessing Groundwater Vulnerability to Seawater Intrusion in Morbi-Maliya Using GALDIT Method. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2(4): 595-599.
- SIAGAS – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 2021. *Banco de dados de poços do Ceará*. Disponível em <https://siagasweb.sgb.gov.br>. Acessado em 17 jun. 2021.
- SILVA, B.T.A.; GOMES, C.C. 2007. Intrusão marinha em poços de exploração de água subterrânea, na Beira-mar de Fortaleza – Ceará. In: ABRHidro, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, São Paulo, *Anais*, 20 p.
- SOUSA, D.C. 2002. *Litoestratigrafia e deformação cenozoica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)*. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Tese de Doutorado, 189 p.
- VASCONCELOS, M.B.; MELO, J.G.; DEMÉTRIO, J.G.A. 2015. Configuração hidrogeológica do sistema aquífero Dunas/Barreiras na zona norte de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, 10(1): 145-158. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v10i1.499>
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2011. *Guidelines for drinking-water quality*. WHO, Geneva, 564 p.

Endereço dos autores:

Karen Vendramini de Araújo* (ORCID 0000-0001-5522-5299), Itabaraci Nazareno Cavalcante (ORCID 0000-0001-6943-5318), Diolande Ferreira Gomes Freire (ORCID 0000-0002-6296-0977), Rafael Mota de Oliveira (ORCID 0000-0001-7657-1262), Joel Pedrosa Sousa (ORCID 0000-0002-9536-133X), Inácio Ocinaí de Lima Neto (ORCID 0009-0007-5802-9649) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, CEP 60.020-181, Fortaleza, Ceará, Brasil. *E-mails:* karenva83@gmail.com.br, itabaracicavalcante@gmail.com, dfreire68@gmail.com, rafaelmotageo@gmail.com, joelppedrosa1@gmail.com, inaciolimaneto@gmail.com

Saulo Robério Rodrigues Maia (ORCID 0000-0002-2523-3906) – Faculdade de Educação de Crateús, Rua Dr. José Sabóia Livreiro, 1480, Bairro Altamira, CEP 63.704-155, Crateús, Ceará, Brasil. *E-mail:* profsaulomaia@gmail.com

*Autor correspondente

Artigo submetido em 27 de abril de 2023, aceito em 4 de setembro de 2023.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.