

QUALIDADE DA ÁGUA E ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DO AQUIFERO ALUVIONAR DO RIO JAGUARIBE, MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DO JAGUARIBE, CEARÁ

Antônio Flávio Costa PINHEIRO

Diolande Ferreira Gomes FREIRE

Itabaraci Nazareno CAVALCANTE

Rafael Mota de OLIVEIRA

Karen Vendramini de ARAÚJO

RESUMO

Este artigo discute os aspectos construtivos dos poços e a qualidade físico-química das águas subterrâneas no cenário do Domínio Hidrogeológico Sedimentar do aquífero aluvionar do baixo vale do rio Jaguaribe, São João do Jaguaribe, Ceará, e sua interface com o uso e ocupação do solo. Dos poços mapeados, grande parte apresenta alguma deficiência quanto aos aspectos construtivos e de proteção sanitária recomendados pela ABNT. Em relação à qualidade das águas subterrâneas, foram feitas análises físico-químicas de 30 amostras representativas do aquífero aluvionar, com determinações do pH, turbidez, condutividade elétrica, cátions e ânions maiores, sólidos totais dissolvidos, sílica, dureza, alcalinidade, compostos nitrogenados, fluoreto, ferro, turbidez, alumínio e fosfato. As concentrações dos compostos nitrogenados das águas do aquífero aluvial não sugerem importante contaminação antrópica local do aquífero, visto que o nitrito e a amônia raramente foram detectados e o nitrato apresentou concentrações traço. Constatou-se que a qualidade da água é naturalmente prejudicada principalmente pela elevada concentração de ferro, que se reflete na turbidez e cor da água de quase todos os poços. Sódio e cloreto em 37% das amostras estão em concentrações que caracterizam águas salobras; no restante das amostras a concentração de sólidos totais dissolvidos é inferior a 1000 mg L⁻¹. Desse modo, predominam na área de estudo águas doces, que submetidas a tratamento para remoção do ferro, podem se tornar adequadas para diversos usos. Valores de pH, amônia, nitrito, nitrato, sulfato e alumínio estão 100% dentro dos máximos permitidos. O principal processo geoquímico relacionado à qualidade da água é a interação rocha-água, devido ao longo tempo de residência da água no aquífero aluvionar, que, em média, considerando a série histórica 1973–2020, não recebe recarga pluvial.

Palavras-chave: Aquífero; Aluvião; Hidroquímica.

ABSTRACT

WATER QUALITY AND CONSTRUCTION ASPECTS OF THE WELLS IN THE JAGUARIBE RIVER ALLUVIAL AQUIFER, MUNICIPALITY OF SÃO JOÃO DO JAGUARIBE, CEARÁ. This article discusses the constructive aspects of the wells and the physicochemical quality of groundwater in the Sedimentary Hydrogeological Domain scenario of the alluvial aquifer of the Lower Jaguaribe River Valley, São João do Jaguaribe, Ceará, in relation to land use and occupation. A significant portion of the mapped wells exhibits deficiencies in terms of construction aspects and sanitary protection recommended by ABNT. Regarding the quality of groundwater, physicochemical analyses were carried out on 30 samples, determining parameters such as pH, turbidity, electrical conductivity, major cations and anions, total dissolved solids, silica,

hardness, alkalinity, nitrogenous compounds, fluoride, iron, aluminum, and phosphate. The concentrations of nitrogenous compounds in the waters of the alluvial aquifer do not suggest significant local anthropogenic contamination, as nitrite and ammonia were rarely detected, and nitrate showed trace concentrations. The primary natural factor affecting water quality is the high concentration of iron, which is reflected in the turbidity and color of the water in almost all wells. Sodium and chloride levels in 37% of the samples characterize brackish water, while the remaining samples have total dissolved solids concentrations of less than 1000 mg L⁻¹. Therefore, in the study area, fresh water that requires iron removal treatment may become suitable for various uses. pH, ammonia, nitrite, nitrate, sulfate, and aluminum levels all fall within the maximum allowable values. The primary geochemical process affecting water quality is the rock-water interaction due to the long residence time of water in the alluvial aquifer, which, on average, considering the historical series (1973–2020), does not receive rainfall recharge.

Keywords: Aquifer; Alluvium; Hydrochemistry.

1 INTRODUÇÃO

A área de estudo está situada no contexto do perímetro das secas, apresentando o tipo climático tropical semiárido, caracterizado por alta temperatura, pequena pluviosidade anual, curto período chuvoso, irregularidade das chuvas no tempo e no espaço e elevada evapotranspiração. A semiaridez é um fator que dificulta as condições de produção econômica e de sustentabilidade da ocupação antrópica. Contudo, o rio Jaguaribe e o potencial de água subterrânea, essencialmente na aluvião, amenizam as condições climáticas. Os depósitos aluvionares são representados por sedimentos areno-argilosos recentes, que ocorrem margeando as calhas dos rios e riachos que drenam a área.

As rochas cristalinas, ígneas e metamórficas, dominantes no Estado do Ceará, dão origem aos aquíferos fissurais, nos quais a porosidade é função das fissuras ou outras descontinuidades. Assim, em determinadas zonas do maciço, onde não ocorre nenhuma fissura, a porosidade é praticamente nula (FEITOSA *et al.* 2008). Já nas rochas sedimentares a porosidade pode chegar a 50%, a depender do material. Assim, os aquíferos aluviais assumem, apesar das pequenas dimensões, importante papel no suprimento de água para diversos fins.

A ocupação e exploração do espaço aluvionar, principalmente com atividades agrícolas, pecuaristas e carcinicultura, têm relação com a disponibilidade de água e condições de solo mais favoráveis da planície de inundação. Contudo, essas atividades econômicas têm ocorrido sem preocu-

pação com a capacidade de resiliência ambiental, resultando em processos de desertificação do solo, erosão, assoreamento de riachos, lagoas e do próprio rio Jaguaribe, contaminação das águas de superfície e subterrâneas com resíduos de adubos sintéticos de herbicidas e de praguicidas (FIGUEIRÊDO *et al.* 2006, GUERRA 2009, ARAÚJO *et al.* 2019, BRAGA *et al.* 2021).

Não se pode ainda ignorar a situação específica das condições de saneamento ambiental. Há demandas quanto ao aprimoramento dos sistemas de esgotamento sanitário e este problema tem de ser enfrentado com intervenções estruturantes, que definam maior eficiência dos sistemas de esgotamento sanitários urbanos e soluções adequadas para o destino e tratamento final do lixo.

A planície fluvial do Baixo Jaguaribe constitui espaço valorizado para uso e ocupação, dadas às suas melhores condições de acesso à água e solos agricultáveis. Em seu baixo curso, desenvolve uma planície com cerca de 80 km de extensão por 10 km de largura, onde se concentram as atividades agrícolas mais importantes do estado (MAIA & CAVALCANTE 2006).

As planícies aluviais são os ambientes que mais merecem cuidados especiais nas decisões de planejamento e gestão ambiental. Fato que, na maior parte das vezes, não é levado em conta nas decisões de uso e ocupação do solo. São espaços que costumam ser ocupados irregularmente, principalmente nas faixas urbanas. Isso acontece pela inexistência de planos preventivos, uma vez que tanto a sociedade como o poder público não têm conhecimento ou desconsidera a importância e a fragilidade ambiental destes terrenos.

Os aluviões, por apresentarem, de modo geral, boa vazão e qualidade de água, são extensivamente usados nas práticas agrícolas e de carcinicultura; no entanto, devido à sua vulnerabilidade intrínseca, podem ser contaminados.

Estudo realizado por VASCONCELOS *et al* (2010) sobre a caracterização hidrogeológica do aquífero aluvionar na região do Baixo Jaguaribe, mostrou vazão média de 50,27 m/h com coeficiente de variação maior que 40%, indicando populações irregulares, devido à heterogeneidade intrínseca dos aquíferos aluviais. Observou-se ainda espessura saturada entre 1,6 e 16,9 m, transmissividade média, obtida de dois poços de observação, de $3,83 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $2,48 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (com coeficientes de variação de 7,68% e 7,68% respectivamente) e condutividade elétrica média de 939,86 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com coeficiente de variação de 37%. De acordo com estes autores, apesar das excelentes características do aquífero, existem fatores que ameaçam a integridade de suas águas, como a perfuração indiscriminada de poços, a ausência de saneamento básico, as atividades agrícolas e a existência de poços abandonados.

Esta pesquisa teve como objetivo compreender quantitativamente o aquífero aluvionar do rio Jaguaribe em São João do Jaguaribe - CE, em especial as condições físico-químicas de suas águas e sua recarga, bem como analisar a evolução tecnológica de captação das águas subterrâneas e suas implicações socioeconômicas e ambientais.

Na área aluvionar do baixo Jaguaribe, no município de São João do Jaguaribe, foram cadastrados, no período de julho de 2019 a maio de 2020, 816 poços. Destes, 30 foram selecionados em ambas as margens da área aluvionar, para a realização de análises físico-químicas, cujos resultados são apresentados e discutidos nessa pesquisa.

Identificar e avaliar as áreas que estão sofrendo contaminação da água, mesmo que em baixos níveis, bem como os fatores causadores, torna-se importante no sentido de tomar medidas para evitar o aumento e a disseminação da contaminação por todo o aquífero sedimentar, o que poderia inviabilizar o uso da água para o abastecimento. A interpretação dos dados hidrogeológicos, em especial, as informações físico-químicas das águas, tiveram como meta possibilitar e fomentar a elaboração de propostas para um planejamento do uso e manejo das águas subterrâneas aluvionares de maneira sustentável.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São João do Jaguaribe está localizado na mesorregião do Baixo Jaguaribe, na porção nordeste do estado do Ceará, portanto, no domínio do perímetro das secas, o qual apresenta clima semiárido. Limita-se a Norte com Limoeiro do Norte, Tabuleiro do Norte e Morada Nova, ao Sul com Alto Santo, a Leste com Tabuleiro do Norte e a Oeste com Morada Nova. Apresenta uma área absoluta de 280,44 km² (0,19% do território cearense), altitude média de 51 m e distancia-se 172 km da capital Fortaleza (Figura 1).

O município está inserido no bioma caatinga, apresenta pluviometria média anual de 779,2 mm, com uma variação de 548 a 992 mm e precipitações concentradas nos meses de fevereiro a abril, temperatura média anual de 27,1 °C, oscilando entre 22,3 e 34,8 °C, e clima Tropical Quente Semi Árido (IPECE 2017).

Como vegetação dominante em toda área aluvionar se destacam como principais variedades a carnaúba, oiticica e formações herbáceas. As planícies fluviais representam ambientes de formação aluvial que exibem características influenciadas pela presença e dinâmica das águas correntes, que transportam e depositam sedimentos de diversos tamanhos e composições, tais como argila, silte, areia e material orgânico, ao longo de suas margens. Possuem formação geológica recente (Quaternário) e relevo plano. Os solos presentes são basicamente neossolo flúvico, vertissolo e planossolo. Quanto ao tipo de uso e ocupação da planície do Baixo Jaguaribe, na área de estudo, destacam-se a agricultura de subsistência, cultivos irrigados, extrativismo vegetal e mineral e a crescente atividade de carcinicultura.

Do ponto de vista geológico, distinguem-se na área pesquisada o Domínio Hidrogeológico Cristalino, representado pelo Complexo Jaguaretama, Suíte Granitoide Serra do Deserto e Supersuíte Granitoide Tardi a Pós-orogênico Indiferenciado, e o Domínio Hidrogeológico Sedimentar, representado pela Formação Faceira e Deposições Quaternárias, com dominância da aluvião do rio Jaguaribe (GONÇALVES 2009, ALMEIDA *et al.* 2014, NUNES *et al.* 2011).

Segundo GOMES *et al.* (2009), durante sondagens realizadas na aluvião do Baixo Jaguaribe, com espessura de 7 a 20 m de profundidade, foram coletados sedimentos de testemunhos em vários níveis de profundidade para análises granu-

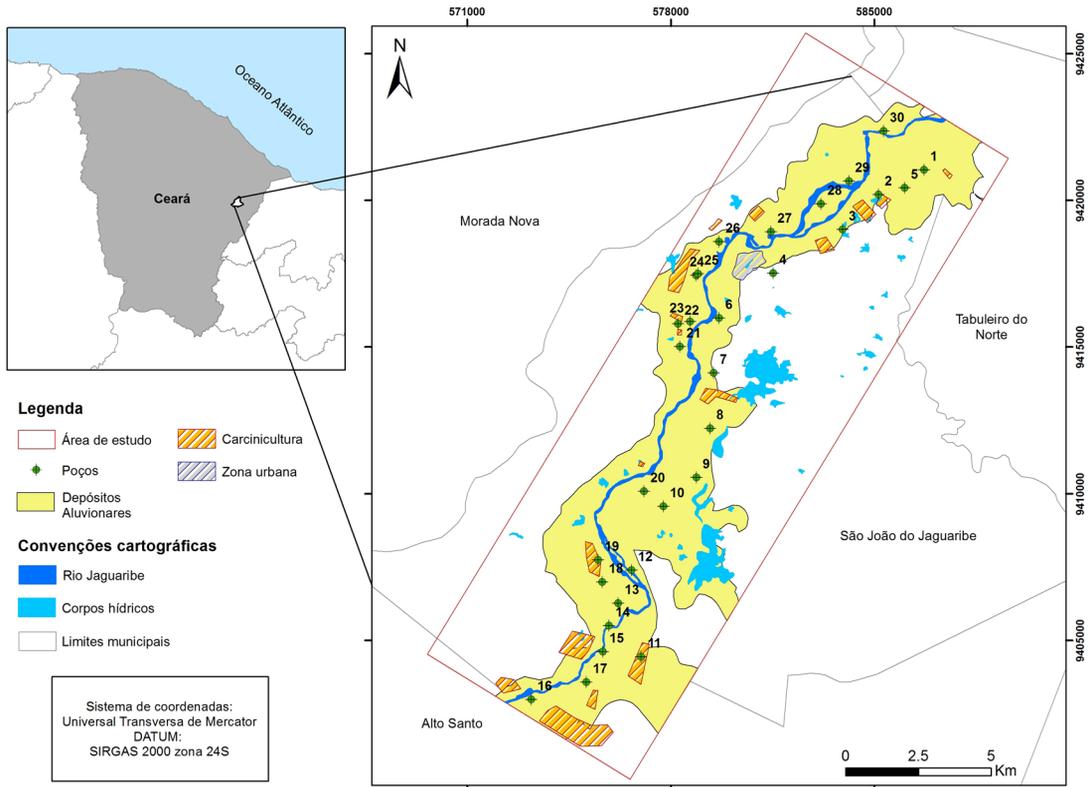


FIGURA 1 – Mapa de localização da área estudada e poços analisados.

FIGURE 1 – Location map of the studied area and the analyzed wells.

lométricas. Com base no diagrama triangular de Shepard, evidenciaram as seguintes classes texturais: cascalho, cascalho arenoso, areia cascalhosa, areia, areia lamosa, lama arenosa, lama e lama areno cascalhosa com predominância das classes areia lamosa e lama arenosa. Na camada aquífera, predominam as classes cascalho, areia cascalhosa e areia.

2.1 Aspectos dos sistemas técnicos de captação de água

A região do Baixo Jaguaribe desde cedo assumiu papel de grande importância na história da formação do Estado do Ceará como acesso preferencial aos sertões da antiga província (aproveitando-se de sua rede hídrica), quer como área propícia para instalação de população, dada à fertilidade do solo aluvial e à presença abundante de água em boa parte de seu território. A partir da década de 1960 a planície aluvial foi gradativamente ocupada por pomares, cuja expansão deveu-se ao uso de cata-ventos (Figura 2) para irrigação das culturas de banana, laranja e limão, e do crescimento dos

mercados consumidores das cidades de Fortaleza e circunvizinhos.

A partir da segunda metade da década de 1970 os cataventos coexistiram com os gasogênios, também chamados de gaseificadores, que funcionavam com a queima de lenha, carvão ou resíduos agrícolas, tais como bagaços de cana, cascas de frutos e sabugos de milho, se obtendo uma mistura gasosa que funcionava como combustível (Figura 3).

Principalmente a partir da metade da década de 1980 começaram a dominar o sistema elétrico motor e bomba (Figura 4), passando a dominar também os poços tubulares e mistos.

Dos 816 poços cadastrados, 39,2% são mistos, 38,8% são cacimbões e 21,9% são tubulares. Poço misto refere-se àquele onde se escava uma cacimba, de 5 a 10 m de profundidade, para colocar um motor (de baixa potência) dentro, e no centro da cacimba instala-se um poço tubular. Predominam os poços rasos com profundidade variando de um mínimo de 1,55 m e máximo de 21,40 m, com uma média de 8,73 m (Figura 5). O Nível Estático (NE) varia de 0,050 m a 14,30 m, com média de 4,30 m;



FIGURA 2 – Métodos de exploração de água no baixo Jaguaribe. À esquerda, catavento com estrutura de madeira, e à direita, catavento com estrutura metálica.

FIGURE 2 – Water exploitation methods in the lower Jaguaribe are demonstrated with a wooden windmill on the left and a metallic windmill on the right.



FIGURA 3 – Método de exploração de água – Gasogênio. Resquício de estrutura para gasogênio (à esquerda). A – Forno à carvão para produção do vapor para funcionamento do sistema gasogênio (Década 70 e início de 80); B – Sistema elétrico que substituiu o de gasogênio, principalmente a partir da década de 80; C – Tanque de armazenamento da água após bombeada, para irrigação por gravidade em sistema de alagamento; D – Cacimão de alvenaria. Motor gasogênio (à direita).

FIGURE 3 - Water exploitation method - Gasogen. Remnant structure for gasogen (on the left): A - Charcoal furnace for steam production to operate the gasogen system (1970s and early 1980s); B - Electrical system that replaced the gasogen system, primarily from the 1980s onwards; C - Water storage tank after being pumped, for gravity irrigation in a flooding system; D - Masonry well. Gasogen engine (on the right).

lâmina de água variando 0,15 m a 13,10 m, com uma média 4,45 m.

Um dos aspectos mais discutidos sobre águas subterrâneas é a vulnerabilidade das obras de captação em relação às diversas fontes de poluição e contaminação, principalmente de origem antrópica (PINHEIRO *et al.* 2019). É importante ressaltar que um poço tubular é uma obra de engenha-

ria hidrogeológica, requerendo para sua construção um projeto técnico/construtivo, onde, o conhecimento hidrogeológico local associado ao emprego de técnicas e material adequado é de fundamental importância para o sucesso da obra. A Associação Brasileira de Normas Técnicas, a partir da NBR nº12.212 de 30/04/2006 (ABNT 2006) estabelece os padrões para construção de poços.



FIGURA 4 – Métodos de captação d’água. Motor elétrico (à esquerda) e bomba submersa de captação d’água de sistema elétrico (à direita).

FIGURE 4 – Water exploitation methods. Electric motor (on the left) and submersible water intake pump of the electrical system (on the right).

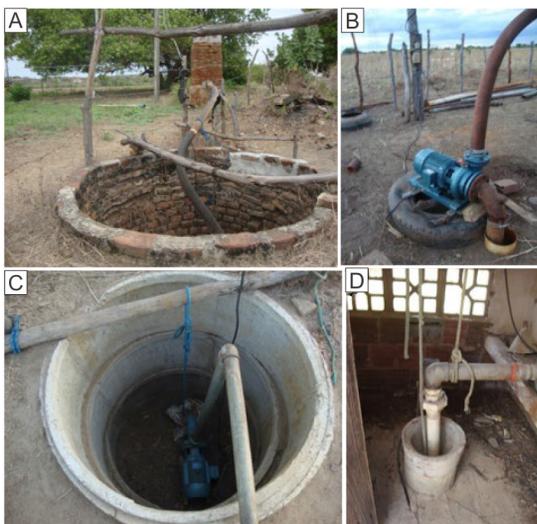


FIGURA 5 – Tipos de poços. A – Cacimba; B – Poço tubular de PVC; C – Poço Misto; D – Poço tubular de cimento.

FIGURE 5 – Types of wells. A – Dug well; B – PVC well; C – Dug-Tube well; D – Cemented well.

No estudo da qualidade da água subterrânea, realizado por MIGLIORINI (2000), na região urbana de Cuiabá, foi observada elevada concentração em bactérias do grupo coliformes, o que foi atribuído a falhas no saneamento básico, aliadas a inadequadas técnicas construtivas dos poços tubulares em meio fraturado.

Dos poços mapeados na área de estudo, pode-se constatar que grande parte apresenta algumas deficiências quanto aos aspectos construtivos e de proteção sanitária recomendados pela ABNT, sendo estas, principalmente relacionadas à falta de proteção sanitária, revestimento de material inadequado (Figura 5), ausência de caixa de proteção para as bombas, bem como a regularização dos poços perante os órgãos competentes (outorga). Vale ressaltar ainda que a falta de manutenção dos poços diminui a vida útil, com conseqüente abandono.

3 METODOLOGIA

A partir de diversas etapas de campo realizadas no período de julho de 2019 a maio de 2020,

foram cadastrados um total de 827 poços na área, onde se observou as características construtivas dos poços e se coletou as amostras de água para as análises.

A escolha dos pontos de coleta das águas para análises físico-químicas teve como referência os seguintes critérios: consumo, localização em relação às comunidades e distribuição espacial na área. A água foi coletada depois de bombeamento de 5 min e as amostras foram mantidas refrigeradas até serem entregues no Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada, setor de Geoquímica Ambiental, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará - UFC.

Para a caracterização das águas subterrâneas da área foram analisadas trinta (30) amostras coletadas em ambas as margens da área aluvionar, numa espacialização que representasse todo o contexto aluvionar estudado (Figura 1). As amostras coletadas foram submetidas a análises físico-químicas dos seguintes parâmetros e íons: pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Turbidez (UNT), Alcalinidade (CaCO_3), Dureza (CaCO_3), Bicarbonato (HCO_3^-), Cálcio (Ca^{+2}), Magnésio (Mg^{+2}), Sódio (Na^+), Potássio (K^+), Cloreto (Cl^-), Nitrato (NO_3^-), Nitrogênio Amôniacal Total ($\text{N-NH}_{3,4}$), Fluoreto (F^-), Nitrito (NO_2^-), Sílica (SiO_2), Ferro (Fe), Fosfato (P-PO_4^{-3}), Sulfato (SO_4^{-2}) e Alumínio (Al). A partir dos resultados foram obtidos índices de saturação, diagrama de Piper, razões iônicas e diagrama de Gibbs, para auxiliar na compreensão dos fatores controladores da qualidade da água. As metodologias de análise de água seguiram as diretrizes gerais do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA 2012). Os seguintes equipamentos foram utilizados: fotômetro de chama da marca Analyser - modelo 910, espectrofotômetro da marca Thermo Scientific - modelo Evolution 300 UV - Vis, medidor pH/ISE da marca Thermo Scientific - Orion Star A324, medidor pH/ISE/CE/RDO/DO da marca Thermo Scientific - Orion Star A329 e Turbidímetro da marca Thermo Orion - modelo Aquafast II.

A classificação iônica das águas foi baseada no diagrama de Piper, usando o software Diagrammes version 6.77, desenvolvido por Roland Simler, do *Laboratoire d'Hydrologie d'Avignon* (LHA 2023). A representação do diagrama é feita em três campos onde são plotados os valores percentuais das concentrações dos principais constituintes iônicos para os cátions e os ânions, sendo possível identificar as fácies hidroquímicas. O mesmo software,

Diagrammes, foi empregado na obtenção do índice de saturação da calcita (ISA), a partir dos dados de pH, temperatura e íons maiores, cálculo do balanço iônico, estatística e razões iônicas.

Para a determinação do balanço hídrico da área de estudo foram utilizados os dados pluviométricos e de temperatura do período 1973–2020 fornecidos pela FUNCEME (2021), a partir dos quais foi possível fazer uma estimativa da parcela de precipitação que se infiltra no subsolo, permitindo uma avaliação do processo de renovação das reservas de água subterrânea. Foi aplicada a equação de THORNTHWAITE & MATHER (1955), que considera as médias mensais de pluviometria (PPT) e temperatura (T), fornecendo a evapotranspiração potencial (ETP) e a avaliação de evapotranspiração real (ETR), permitindo a obtenção da recarga real (infiltração eficaz - IE), aquela que chega no aquífero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Recarga subterrânea

O balanço hídrico da área mostrou ausência de excedente hídrico (Tabela 1), o que não significa que não ocorra recarga subterrânea. Em média a recarga não existe, mas em anos individualizados, dependendo das condições climáticas, pode haver um excedente hídrico (superior a capacidade de armazenamento do solo - 100 mm), provavelmente em março e abril, meses em que a pluviometria, historicamente, é superior à evapotranspiração real.

Comparando os dados da evapotranspiração real com a evapotranspiração potencial, observa-se que apenas nos meses de março e abril assumem valores semelhantes; tal fato é justificado, pois nesse período as precipitações atmosféricas são superiores à evapotranspiração potencial, proporcionando um excedente hídrico na região (Figura 6).

4.2 Características hidroquímicas

pH, Alcalinidade e Salinidade

As águas do aquífero aluvial apresentaram valores de pH homogêneos e predominantemente em torno do neutro – média de $7,11 \pm 0,29$ (Tabela 2). Essa parece ser uma característica da aluvião do baixo Jaguaribe, visto que GOMES (2005), analisando a água da aluvião do Baixo Jaguaribe na região de Limoeiro do Norte (CE), durante um período de dois anos, encontrou pH médio de $6,98 \pm 0,25$.

TABELA 1 – Balanço hídrico da área de estudo - São João do Jaguaribe - CE - Estação 134 (Ano: 1973–2020).

TABLE 1 - Water balance of the study area - São João do Jaguaribe - CE - Station 134 (Year: 1973–2020).

Mês	PPT (mm)	T média (°C)	Im	K	ETP (mm)	PPT - ETP	C	ETR (mm)	Ie (mm)
Jan	81,85	28,6	13,680	1,06	188,71	-106,86	0,00	81,85	0,00
Fev	113,91	27,9	13,181	0,95	153,15	-39,24	0,00	113,91	0,00
Mar	160,6	27,3	12,758	1,04	153,67	6,93	6,93	153,67	0,00
Abr	154,41	27,0	12,548	1,00	141,36	13,05	19,98	141,36	0,00
Mai	89,00	27,0	12,548	1,02	144,19	-55,19	0,00	89,00	0,00
Jun	43,95	26,6	12,271	0,99	131,83	-87,88	0,00	43,95	0,00
Jul	17,23	26,5	12,202	1,02	133,79	-116,56	0,00	17,23	0,00
Ago	5,51	27,5	12,899	1,03	156,71	-151,20	0,00	5,51	0,00
Set	0,66	28,2	13,394	1,00	168,26	-167,60	0,00	0,66	0,00
Out	2,96	28,5	13,609	1,05	184,33	-181,37	0,00	2,96	0,00
Nov	2,59	28,8	13,824	1,03	188,56	-185,97	0,00	2,59	0,00
Dez	13,68	28,8	13,824	1,06	194,06	-180,38	0,00	13,68	0,00
Total	686,35		156,740		1938,61		26,91	666,37	0,00

PPT = Precipitação; T = Temperatura; Im = Índice térmico mensal; K = Fator de correção, que depende da latitude do lugar; ETP = Evapotranspiração potencial; C = Capacidade de armazenamento; ETR = Evapotranspiração real; Ie = Infiltração estimada. Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME, 2021

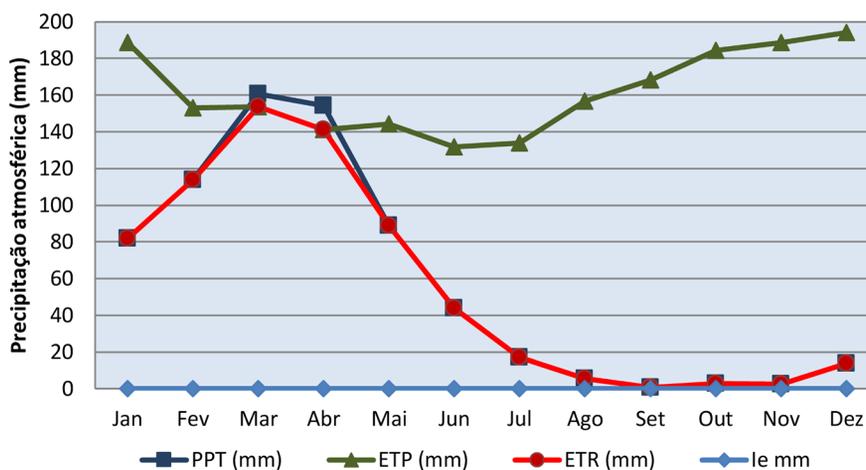


FIGURA 6 - Balanço hídrico normal mensal da área de estudo - São João do Jaguaribe - CE - Estação 134 (Ano: 1973–2020). Fonte: Elaborado a partir de FUNCEME (2021). PPT – Precipitação, ETP – Evapotranspiração potencial, ETR – Evapotranspiração, Ie – Infiltração estimada.

FIGURE 6 - Normal monthly water balance for the study area - São João do Jaguaribe - CE - Station 134 (Year: 1973–2020). Source: Prepared from FUNCEME (2021). PPT - Precipitation, ETP - Potential Evapotranspiration, ETR - Evapotranspiration, Ie - Estimated Infiltration.

Os poços P4, P9, P18 e P22 são os de águas relativamente mais básicas, pH entre 7,5 e 7,7. Desses 4 poços, o P4 e o P22 também se diferenciam pela elevada alcalinidade, 444 mg CaCO₃ L⁻¹ e 507 mg CaCO₃/L, respectivamente, enquanto a média dos 30 poços é de 170±99 mg CaCO₃ L⁻¹, constituindo, portanto, águas com maior capacidade de manter o pH estável quando, por exemplo, a água da chuva é introduzida no corpo hídrico ou sofre infiltração de águas residuárias.

Sabe-se que as águas que percolam rochas calcárias, em geral, possuem alcalinidade alta, no entanto, tais rochas não estão presentes na área. Granitos e gnaisses, que dominam as litologias adjacentes ao pacote aluvionar, podem ter influência pela lixiviação de minerais cálcicos e magnesianos, contudo, é menos intensa do que no contexto das litologias carbonáticas.

Diversos estudos já demonstraram os efeitos benéficos do consumo de água natural alcalina

TABELA 2 – Composição hidroquímica do aquífero aluvial.

TABLE 2 – Hydrochemical composition of the alluvial aquifer

Pogo	pH a 25 °C	Condutividade Elétrica (µs/cm)	Bicarbonato (mg HCO ₃ ⁻ L ⁻¹)	Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Clorato (mg Cl ⁻ L ⁻¹)	Calcio (mg Ca ²⁺ L ⁻¹)	Magnésio (mg Mg ²⁺ L ⁻¹)	Dureza Total (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ L ⁻¹)	Sódio (mg Na ⁺ L ⁻¹)	Potássio (mg K ⁺ L ⁻¹)	Silica (mg SiO ₂ L ⁻¹)	Nitrato (mg N-NO ₃ ⁻ L ⁻¹)	Nitrito (mg N-NO ₂ ⁻ L ⁻¹)	Nitrogênio Amoniacal Total (mg N-NH ₄ ⁺ L ⁻¹)	Ferro Total (mg Fe ²⁺ L ⁻¹)	Fluoreto (mg F ⁻ L ⁻¹)	Alumínio (mg Al ³⁺ L ⁻¹)	Turbidez (UNT)	Amônia (como NH ₃) (mg NH ₃ L ⁻¹)	Fosfato reativo (mg P-PO ₄ ³⁻ L ⁻¹)	Sólidos Totais Dissolvidos (mg L ⁻¹)	
01	7,04	483,8	160,2	131,3	64,0	20,8	7,7	84,0	1,2	65,4	4,9	27,4	0,4	<0,001	<0,01	1,3	0,2	<0,01	17	<0,01	<0,01	<0,01	352
02	7,36	602,5	175,0	143,4	91,0	26,4	13,9	124,0	0,9	74,7	11,3	15,4	0,2	<0,001	0,20	2,4	0,2	<0,01	19	0,24	0,01	0,01	409
03	6,98	423,2	120,8	99,0	67,0	21,6	8,2	88,0	0,9	57,3	5,6	22,9	0,1	<0,001	0,19	3,5	0,1	<0,01	97	0,23	<0,01	<0,01	304
04	7,63	1.325	542,2	444,4	155,0	17,6	8,2	78,0	2,5	226,8	2,0	48,0	0,2	<0,001	<0,01	0,5	2,0	<0,01	19	<0,01	0,15	1,002	1.002
05	7,20	471,9	145,4	119,2	70,0	26,4	10,6	110,0	0,6	54,7	8,5	17,2	0,1	<0,001	0,13	2,7	0,2	<0,01	18	0,16	<0,01	<0,01	333
06	7,28	970,7	273,5	224,2	169,9	20,0	24,0	150,0	2,1	138,7	8,4	23,3	0,2	<0,001	0,36	3,6	0,4	<0,01	33	0,44	0,01	0,01	660
07	6,91	1.251	179,9	147,5	285,9	14,4	45,1	224,0	19,2	143,0	6,9	20,7	0,1	<0,001	0,42	3,7	0,1	<0,01	231	0,51	<0,01	<0,01	715
08	7,18	507,7	167,6	137,4	72,0	25,6	10,1	106,0	<0,5	60,0	9,8	18,6	0,2	<0,001	0,19	0,1	0,2	<0,01	1	0,23	<0,01	<0,01	364
09	7,69	507,5	165,1	135,3	73,0	28,0	11,0	116,0	0,9	57,3	9,8	17,6	0,2	<0,001	0,13	1,2	0,1	0,03	24	0,16	0,01	0,01	363
10	7,01	490,3	130,6	107,1	78,0	23,2	9,1	96,0	11,7	60,0	6,9	22,8	0,2	<0,001	0,14	3,5	0,1	0,02	45	0,17	<0,01	<0,01	342
11	7,29	367,3	138,0	113,1	41,0	16,8	8,6	78,0	3,5	35,0	3,5	21,6	0,1	<0,001	0,15	3,2	0,2	<0,01	52	0,18	0,01	0,01	268
12	7,28	554,8	167,6	137,4	87,0	25,6	14,9	126,0	0,5	57,4	7,1	14,1	0,1	<0,001	0,30	3,4	0,1	<0,01	61	0,36	<0,01	<0,01	374
13	6,94	410,3	130,6	107,1	58,0	19,2	8,2	82,0	8,1	52,6	5,5	25,3	0,2	<0,001	0,02	3,8	0,1	0,03	63	0,02	0,01	0,01	308
14	7,14	694,3	167,6	137,4	126,0	19,2	19,7	130,0	3,9	93,2	8,2	20,6	<0,1	<0,001	0,14	3,5	0,1	<0,01	48	0,17	0,01	0,01	459
15	7,00	1.109	167,6	137,4	246,9	15,2	31,2	168,0	5,3	143,0	6,9	20,8	0,1	<0,001	<0,01	2,4	0,1	<0,01	19	<0,01	<0,01	<0,01	635
16	7,25	1.501	231,7	189,9	345,9	54,4	26,9	248,0	4,3	204,3	5,6	27,6	<0,1	<0,001	0,46	3,6	0,2	<0,01	38	0,56	0,06	0,06	901
17	7,13	297,8	123,2	101,0	28,0	21,6	8,6	90,0	3,3	28,0	7,0	15,5	0,3	0,01	<0,01	0,5	0,1	<0,01	11	<0,01	0,07	0,07	235
18	7,72	2.526	195,6	163,6	673,8	72,0	40,3	348,0	6,9	369,5	11,0	31,8	1,1	0,03	0,06	2,9	0,2	<0,01	42	0,07	0,03	0,03	1.405
19	6,70	1.364	73,9	60,6	367,9	47,2	24,0	218,0	5,9	161,9	7,0	15,1	0,7	0,04	0,07	3,3	0,1	<0,01	37	0,08	<0,01	<0,01	703
20	7,16	1.795	221,8	181,8	435,9	30,4	20,2	160,0	7,9	309,7	5,6	31,2	0,1	<0,001	0,44	3,6	0,4	<0,01	47	0,53	0,03	0,03	1.063
21	7,19	1.294	295,7	242,4	252,9	30,4	16,8	146,0	8,0	219,9	5,6	29,4	0,1	<0,001	<0,01	0,3	0,4	<0,01	9	<0,01	0,11	0,11	859
22	7,45	2.793	618,6	507,0	577,8	40,0	25,9	208,0	24,9	557,2	5,6	23,2	<0,1	<0,001	0,10	3,6	0,09	<0,01	31	0,12	<0,01	<0,01	1.873
23	6,94	414,9	113,4	92,9	66,0	20,8	8,6	88,0	2,3	49,2	5,6	23,2	0,8	<0,001	<0,01	0,7	0,1	<0,01	12	<0,01	0,04	0,04	289
24	6,44	3.244	86,3	70,7	954,7	112,0	50,4	490,0	23,4	423,6	11,2	22,5	<0,1	0,01	0,38	3,1	0,05	0,01	134	0,46	<0,01	<0,01	1.684
25	6,59	3.095	120,8	99,0	869,7	120,0	52,8	520,0	19,2	352,1	11,2	24,3	<0,1	<0,001	0,40	3,6	0,06	0,01	393	0,49	<0,01	<0,01	1.570
26	6,97	3.266	325,3	266,6	854,7	76,0	40,8	360,0	6,4	485,8	2,8	35,7	<0,1	<0,001	0,11	3,7	0,4	<0,01	148	0,13	0,03	0,03	1.828
27	6,70	1.699	147,9	121,2	441,9	54,4	25,9	244,0	3,5	237,6	8,4	23,4	0,2	<0,001	0,60	3,4	0,1	<0,01	263	0,73	<0,01	<0,01	943
28	7,13	967,3	372,1	305,0	121,0	23,2	20,2	142,0	6,2	158,4	4,3	43,3	<0,1	<0,001	<0,01	3,7	0,4	<0,01	40	<0,01	0,02	0,02	749
29	7,16	655,3	194,7	159,6	102,0	28,0	12,0	120,0	3,0	84,5	6,2	25,9	<0,1	<0,001	0,08	1,8	0,3	<0,01	19	0,10	<0,01	<0,01	456
30	6,98	1.153	273,5	224,2	220,9	12,0	41,3	202,0	2,5	142,6	5,6	26,1	<0,1	<0,001	0,14	3,8	0,2	<0,01	224	0,17	<0,01	<0,01	725

na saúde humana (MOUSA 2016, CHAVES *et al.* 2020); geralmente são águas potáveis com significativo conteúdo em sais minerais essenciais. Na área de estudo, as águas de maior pH, entre 7,4 e 7,7, não são recomendadas para consumo humano devido ao elevado conteúdo inorgânico tornar a água subterrânea salobra, com STD > 1000 mg L⁻¹. Apenas a água captada do P09 é doce (STD de 363 mg L⁻¹), com pH tendendo a alcalino, 7,69.

A salinidade da água, expressa em termos de quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE), mostrou uma considerável variabilidade espacial, visto que são encontradas águas doces (STD igual ou inferior a 500 mg L⁻¹) e salobras (STD entre 501 a 1.800 mg L⁻¹). As águas doces e salobras estão dispersas por toda a área aluvionar, no entanto, as mais salobras – P22, P24, P25 e P26 – concentram-se na margem esquerda da aluvião, nas proximidades da mancha urbana, que podem apresentar influência de resíduos provenientes das atividades de carcinicultura, de áreas urbanas e da adubação química das atividades agrícolas. É pouco provável que a maior concentração de STD nesta região seja causada por influência dos litotipos da suíte granítica milonitizada Serra do Deserto, presente nos terrenos adjacentes, já que os poços são rasos, com superfície freática entre 0,05 m a 14 m, situados na área aluvionar. NOBRE *et al.* (2018) também observaram significativa variabilidade espacial na qualidade da água, em termos de salinidade, no aquífero aluvionar do baixo Jaguaribe, município de Itaiçaba, de 226 µS/cm (águas doces) a 2.291 µS/cm (águas salobras) e mencionaram a influência da carcinicultura e do rio salobro como possíveis causas.

O Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 – alterado pela Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021 (BRASIL 2021), que é referência normativa sobre os padrões de potabilidade, estabelece como valor máximo permitido (VMP) de STD a concentração de 500 mg L⁻¹. Considerando apenas esse parâmetro de qualidade de água, pode-se dizer que a maioria dos poços (54%) capta águas impróprias para o consumo humano (Tabela 2).

Ferro, Turbidez e Fósforo

Sobre as fontes de ferro para as águas subterrâneas, FEITOSA *et al.* (2008) destacam os minerais ferromagnesianos (piroxênios, olivinas e biotitas), presentes nos litotipos e também nos solos lateríticos. As águas do aquífero aluvionar ao serem captadas apresentam cor amarelo-avermelha-

da, denunciando as elevadas concentrações em ferro. As águas com alto conteúdo de Fe, ao saírem do poço são incolores, mas ao entrarem em contato com o oxigênio do ar tornam-se amarelo-avermelhadas, pois, naturalmente, a associação “ar-água” favorece a transformação do hidróxido ferroso em hidróxido férrico. Na maioria das águas naturais, o pH não é baixo o suficiente para evitar a formação de hidróxidos e, sob condições oxidantes, praticamente todo o ferro é precipitado como hidróxido férrico (HEM & CROPPE 1959).

Vale ressaltar que as águas analisadas são de poços rasos (freáticos), portanto, pode-se encontrar zonas em condições oxidantes e, desse modo, a água bombeada já sair com cor característica de águas ricas em ferro.

O ferro em grandes quantidades confere sabor e cor desagradáveis às águas, tornando-as inadequadas ao uso doméstico e industrial, como observado na área de estudo, cuja concentração média em ferro total foi de 2,7±1,2 mg L⁻¹ (Tabela 2).

Para os parâmetros ferro e manganês, são permitidos valores superiores aos VMPs estabelecidos no Anexo 11 da Portaria Nº 888 (BRASIL 2021), desde que sejam observados os seguintes critérios:

I – os elementos ferro e manganês estejam complexados com produtos químicos comprovadamente de baixo risco à saúde, conforme preconizado no Inciso VII do Art. 14 e nas normas da ABNT; e

II – as concentrações de ferro e manganês não ultrapassem 2,4 e 0,4 mg L⁻¹, respectivamente.

Dos 30 poços investigados apenas 8 não ultrapassam concentrações de 2,4 mg L⁻¹ e esses, assim como os demais, apresentaram águas com cor e turbidez elevadas. Esses altos valores de turbidez, média de 72±90 UNT, podem ser explicados pelas grandes concentrações de ferro, evidenciado pelas análises laboratoriais e em campo pelo fenômeno da *capa rosa*, termo popularmente conhecido nas zonas rurais para designar águas com excesso de ferro, na forma de manchas de tonalidade amarelo-avermelhada nos terrenos, em plantações e nas tubulações, que chegam a entupir em função do acúmulo interno de precipitados de ferro. O poço P8 destaca-se por captar águas doces de aspecto límpido, ou seja, sem cor, baixa turbidez, 1 UNT, e conteúdo de ferro de apenas 0,1 mg L⁻¹. Foram poucas as amostras com teor de ferro baixo, em torno do VMP.

Apenas nas amostras P4, P8, P17 e P21 observou-se a presença de fósforo, determinado na

forma de ortofosfato solúvel. A presença de fosfato na água tem origem de fontes naturais, a partir do intemperismo de rochas e minerais como a apatita, e de fontes artificiais como fertilizantes, esgotos e efluentes de carcinicultura.

Duas amostras com concentrações bem acima da média, P4 (0,15 mg L⁻¹) e P21 (0,11 mg L⁻¹), são sugestivas de contaminação antrópica, com possível contribuição de resíduos químicos usados na atividade de carcinicultura, para a qual os poços onde foram coletadas as amostras (P21 e P4) se destinam. Os poços P16 e P17, na zona de carcinicultura, também apresentaram concentrações relativamente elevadas de 0,06 e 0,07 mg L⁻¹, respectivamente (Tabela 2).

De acordo com a Resolução nº 357 do CONAMA, de 17 de março de 2005, o VMP para águas Classe 2 é 0,1 mg L⁻¹ de fósforo total. Tendo como referência esse valor, pode-se dizer que, dependendo da direção do fluxo das águas subterrâneas com elevadas concentrações em fósforo (0,11 e 0,15 mg L⁻¹ de P-PO₄³⁻), estas podem constituir fonte potencial para a eutrofização do rio Jaguaribe, no Baixo Jaguaribe, visto que o fósforo é um dos principais elementos controladores deste processo.

NISBETH *et al.* (2019) concluíram que as entradas de água subterrânea para o lago Norreso, na Dinamarca, mesmo constituindo um terço do total, foram responsáveis por 90% da carga extrema de fósforo anual total.

As concentrações de fósforo nas águas subterrâneas podem influenciar a qualidade das águas superficiais, especialmente durante períodos de pouca chuva, quando a maioria do fluxo nos rios e riachos representa o fluxo de base (WELCH *et al.* 2010).

Em condições aeróbias o íon fosfato é adsorvido a óxidos e hidróxidos de ferro férrico e nas condições de baixa concentração de oxigênio e sobretudo em anaerobiose, a liberação do fosfato é facilitada devido à dissolução dos complexos de ferro (ESTEVES 2011). Observa-se uma possível relação entre P e Fe, visto que a concentração de ferro total nas águas é elevada (2 a 4 mg L⁻¹) em cerca de 85% das amostras, causando cor amarelo-avermelhada e turbidez elevada, sem presença de fósforo. Nos 15% restantes, a concentração média de ferro foi de 0,5 mg L⁻¹, enquanto o fosfato foi detectado em concentrações relativamente elevadas, entre 0,04 e 0,15 mg L⁻¹. Pode-se supor que a variação espacial na concentração de fósforo na água, entre outros fatores, é afetada pela presença ou ausência de oxigênio dissolvido. Deste modo,

as amostras com alto teor em ferro insolúvel e ausência de fosfato podem ser oriundas de camadas de sedimentos mais grossos e pouco profundas, onde o fosfato pode estar adsorvido aos complexos de ferro. Já nas camadas mais profundas, associadas aos poços com elevado teor em fosfato, a dissolução dos óxidos e hidróxidos de Fe tende a aumentar pela falta de oxigênio, liberando o fosfato e aumentando a concentração em ferro ferroso (solúvel).

Compostos nitrogenados

A manifestação de compostos de nitrogênio, consoante a literatura (FOSTER & HIRATA 1993, ALABURDA & NISHIHARA 1998), em seus diferentes momentos de oxidação, é usada como indicativo de contaminação do aquífero, o que pode revelar condições higiênico-sanitárias insatisfatórias. A presença de componentes de nitrogênio também pode denunciar o modelo de produção agropecuária com o uso de produtos químicos como NPK (Nitrogênio-Fósforo-Potássio).

A amônia pode estar presente naturalmente em águas superficiais ou subterrâneas, sendo que usualmente sua concentração é bastante baixa devido à sua fácil adsorção por partículas do solo ou à oxidação a nitrito e nitrato.

As concentrações de compostos nitrogenados na área de estudo não são preocupantes quanto ao uso da água para diversos fins, inclusive consumo humano (Tabela 2). Os níveis de nitrato (N-NO₃⁻) foram muito baixos, de no máximo 1,1 mg L⁻¹. O nitrogênio amoniacal total em 7 amostras não foi detectado e no restante ficou entre 0,02 mg L⁻¹ e 0,60 mg L⁻¹, portanto, abaixo do VMP para águas potáveis. No entanto, sua presença na maioria dos poços, bem como os traços de nitrito em algumas amostras, indica indício de um processo biológico ativo, e deve-se suspeitar de uma fonte de poluição por matéria orgânica, atual e contínua.

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888 (BRASIL 2021), que altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, a soma das razões das concentrações de nitrito e nitrato e seus respectivos VMPs não deve exceder 1. Considerando a soma dos valores máximos de N-Nitrato e N-Nitrito e seus respectivos VMPs, obtém-se o valor de 0,2, o qual demonstra que, em relação a esses parâmetros, a água da área estudada não oferece risco à saúde.

Em comparação com a região de Itaiçaba - CE, também na aluvião do baixo Jaguaribe, estu-

dada por NOBRE *et al.* (2018), a região de São João do Jaguaribe é menos impactada, a julgar pela concentração de nitrato.

Fluoreto

As fontes de flúor na água são em sua maioria geogênicas, embora contribuições importantes também venham das atividades industriais e da queima de carvão (GARCIA & BORGNINO 2015). Na área de estudo não são desenvolvidas atividades industriais, dessa forma, a presença de fluoreto na água é atribuída principalmente às litologias e sua mobilidade depende da interação de vários processos geoquímicos que determinam sua remoção ou liberação em solução.

Os íons fluoreto ocorrem em concentrações traços (média $0,15 \pm 0,3 \text{ mg L}^{-1}$) e em apenas um poço, P04, a concentração foi elevada, de 2 mg L^{-1} , portanto acima do VMP para águas potáveis (Tabela 2). O alto consumo de água com concentrações acima de $1,5 \text{ mg/L}$ aumenta o risco de fluorose dentária e com concentrações muito mais elevadas, $3\text{--}6 \text{ mg L}^{-1}$, é observado fluorose esquelética (WHO 2011).

A baixa concentração de fluoreto na área, entre outros fatores, pode estar associada à remoção desses íons a partir de processos de adsorção em hidróxidos de ferro, que, de acordo com GARCÍA & BORGNINO (2015), é relativamente rápida e depende do pH, com maior adsorção em valores de pH mais baixos.

Sabe-se, também, que a concentração de fluoreto tende a aumentar em profundidade no solo, contudo, as amostras analisadas foram coletadas em poços rasos em aquífero freático, o que não explicaria a anomalia da concentração de flúor de 2 mg L^{-1} na amostra P04. Das trinta amostras analisadas, com exceção de P04, as concentrações variaram de $0,05$ a $0,4 \text{ mg L}^{-1}$.

As concentrações de bicarbonato e sílica podem ter influência na concentração de fluoreto do aquífero aluvionar, visto que esses parâmetros tiveram boa correlação com o fluoreto, também apresentando teores significativos no poço anômalo (Tabelas 2 e 3).

Nas aluviões dos rios Jaguaribe e Banabuiú, estudos realizados por GOMES *et al.* (2010), MOURA (2013) e NOBRE *et al.* (2018) mostraram que o fluoreto ocorre em concentrações inferiores a 1 mg L^{-1} e apenas nos poços do cristalino, adjacentes ao pacote aluvionar, as concentrações são maiores, entre 2 e 5 mg L^{-1} .

Alumínio

Apenas em 4 amostras foi detectada a presença de alumínio, com concentração máxima de apenas $0,03 \text{ mg L}^{-1}$ (Tabela 1). No estudo de NOBRE *et al.* (2018) sobre a hidroquímica na aluvião do baixo Jaguaribe, também não foram detectadas concentrações significativas desse metal (superiores a $0,2 \text{ mg L}^{-1}$), embora em um poço com águas ácidas, pH $3,87$, a concentração tenha atingido $1,8 \text{ mg L}^{-1}$.

Na área de estudo o pH das águas é em torno do neutro, não favorecendo, portanto, a dissolução do alumínio.

Sílica

A concentração média de sílica reativa, $25 \pm 7 \text{ mg L}^{-1}$, foi compatível com a encontrada por GOMES (2005), $26 \pm 2 \text{ mg L}^{-1}$, também na aluvião do Jaguaribe, cerca de 40 km a montante da área de estudo.

As concentrações acima da média foram observadas nas amostras P04 ($48,0 \text{ mg L}^{-1}$), P28 ($43,3 \text{ mg L}^{-1}$), P26 ($35,7 \text{ mg L}^{-1}$) e P18 ($31,8 \text{ mg L}^{-1}$) na parte norte da aluvião, a jusante, obedecendo a dinâmica de fluxo, assim como podem ser influenciadas pela condutividade hidráulica e permeabilidade do material. Esses valores são semelhantes aos encontrados por GOMES (2005), média de $53 \pm 3 \text{ mg L}^{-1}$, para o aquífero cristalino do Complexo Jaguaretama, em poços de 70 m de profundidade.

O contexto litológico dos terrenos próximos, caracterizado pelas tipologias metamórficas (Complexo Jaguaretama) e graníticas, associado com a lógica de fluxos das águas, das vertentes em direção ao leito do rio e de montante para jusante, pode favorecer as maiores concentrações de sílica nas áreas mais próximas ao canal fluvial e principalmente nos setores meândricos. Vale ressaltar que a área aluvionar situada nas adjacências da parte nordeste da cidade recebe o fluxo de água proveniente das vertentes associadas à suíte granitoide tardi a pós orogênica, com possível contribuição do intemperismo físico-químico de minerais ferromagnesianos e dos feldspatos.

Elementos Maiores e tipologia

Observa-se pelo diagrama de Piper (Figura 7) que o tipo hidroquímico de água predominante é a cloretada sódica, seguida pela bicarbonatada sódica. No grupo das águas bicarbonatadas, destacam-se as amostras P17, sem predominância específica de um cátion, classificada como bicarbo-

A hidrogeoquímica das águas subterrâneas do baixo Jaguaribe, em São João do Jaguaribe, de acordo com o diagrama de Gibbs (GIBBS 1970) é controlada predominantemente pela interação entre as rochas e a água percolada no subsolo, quando se observa principalmente o diagrama TDS versus $Cl/(Cl+HCO_3)$ (Figura 8). Observa-se também que a precipitação não influencia a hidroquímica do aquífero aluvionar, pelo menos para o período do

estudo, e que outros fatores, além dos três principais, controlam a composição química da água, visto que alguns poços estão plotados fora dos domínios, o que pode estar relacionado à contaminação da água por atividades antrópicas. A contribuição de água do rio para o aquífero, ou de tanques de carcinicultura, não aparenta ser significativa, visto que a distribuição de poços no Domínio da Evaporação fica restrita à interface com o Domínio

TABELA 3 – Coeficiente de correlação de Pearson dos parâmetros analisados.

TABLE 3 - Pearson's correlation coefficient of the analyzed parameters.

	<i>pH</i>	<i>SiO₂</i>	<i>HCO₃</i>	<i>Fe</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cl</i>	<i>SO₄</i>	<i>NO₃</i>	<i>F</i>	<i>STD</i>
<i>pH</i>	—												
<i>SiO₂</i>	0,20	—											
<i>HCO₃</i>	0,49	0,62	—										
<i>Fe</i>	-0,30	-0,01	-0,02	—									
<i>Na</i>	-0,09	0,40	0,51	0,31	—								
<i>K</i>	-0,11	-0,55	-0,47	0,01	0,03	—							
<i>Ca</i>	-0,41	0,08	-0,12	0,24	0,69	0,44	—						
<i>Mg</i>	-0,41	0,10	0,04	0,48	0,68	0,32	0,69	—					
<i>Cl</i>	-0,36	0,22	0,13	0,36	0,91	0,25	0,89	0,84	—				
<i>SO₄</i>	-0,37	0,05	0,21	0,36	0,67	0,16	0,54	0,62	0,67	—			
<i>NO₃</i>	0,18	-0,06	-0,25	-0,28	-0,09	0,19	0,01	-0,11	-0,03	-0,21	—		
<i>F</i>	0,40	0,71	0,60	-0,32	0,12	-0,47	-0,16	-0,19	-0,08	-0,19	-0,04	—	
<i>STD</i>	-0,14	0,41	0,48	0,32	0,99	0,06	0,75	0,75	0,93	0,68	-0,11	0,14	—

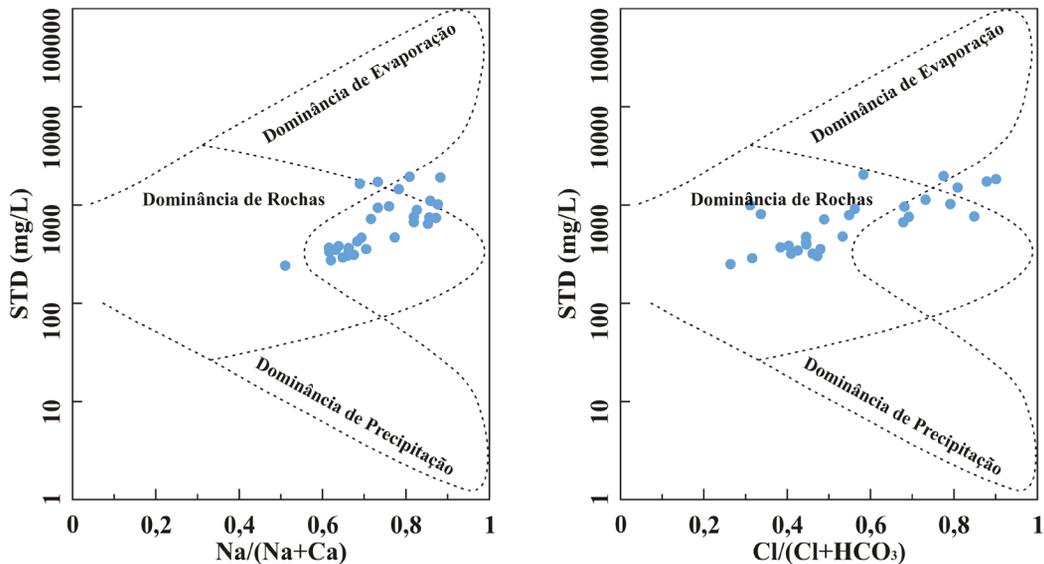


FIGURA 8 – Identificação dos principais mecanismos naturais de controle da composição química da água – Diagrama de Gibbs

FIGURE 8 - Identification of the primary natural mechanisms that control the chemical composition of water – Gibbs diagram.

da Rocha, embora se observe no gráfico uma ligeira tendência a águas evaporadas, onde ocorre abundância de Na sobre Ca e de Cl sobre HCO_3 .

A escassez de chuva na região (Tabela 1), com conseqüente longo tempo de residência da água subterrânea aluvionar, favorece o processo de interação rocha-água, dominante na área, dando origem a águas salobras do tipo cloretadas. De acordo com MESTRINHO (2008), as águas rasas e com menor tempo de residência, costumam se apresentar como bicarbonatadas e, ao passo em que se aprofundam e aumentam o tempo de residência no aquífero, tendem a evoluir para águas sulfatadas e cloretadas. Na água subterrânea da área, apesar de não ser profunda, predomina o tipo cloretada, sugerindo que outros fatores, como a recarga efetiva, contribuem na qualidade da água. Em média, esta recarga não existe, mas em meses de alta pluviosidade a água de percolação dissolve os sais acumulados no solo durante os extensos períodos de estiagem, fazendo aumentar a concentração de STD no aquífero.

Dureza total

A água natural é uma solução, cuja composição muda de acordo com a constituição do solo e das rochas presentes no seu percurso ou da atmosfera poluída. É muito mais frequente encontrar águas subterrâneas com dureza elevada, devido à influência do solo e das rochas, do que águas superficiais com essa característica.

No aquífero aluvial estudado não foram encontradas águas brandas ou moles, cuja dureza é igual ou inferior a 50 mg L^{-1} de CaCO_3 . Na área dominam as águas de dureza moderada, com valores entre 78 e 150 mg L^{-1} , correspondendo a 60% do total de amostras, seguidas das águas duras, 27%, e muito duras, 13%. As águas muito duras (dureza $> 300 \text{ mg L}^{-1}$) não são recomendadas para consumo humano, de acordo com a portaria GM/MS N°. 888, de 04/05/2021 (BRASIL 2021). Embora, na área de estudo, já a partir de 150 mg L^{-1} de CaCO_3 as águas sejam consideradas salobras (STD $> 500 \text{ mg L}^{-1}$), o que compromete seu uso para fins de

consumo humano. Exceção se faz para o ponto P04, em que a água é salobra (1.004 mg L^{-1} STD), mas a dureza é baixa ($78 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$), devido às baixas concentrações em cálcio ($17,6 \text{ mg L}^{-1}$) e magnésio ($8,2 \text{ mg L}^{-1}$) e elevada em sódio ($226,8 \text{ mg L}^{-1}$), dando origem a águas sódicas, segunda a classificação de Piper.

As águas do aquífero aluvial não apresentaram potencial de incrustação, ao contrário, são corrosivas com ISC negativo em 90% das amostras (Tabela 4). De modo geral, essas águas podem ser doces ou salobras e de pH abaixo de 7,4. Já as três amostras com tendência a formar incrustação calcária, P04, P18 e P22, possuem pH mais elevado, entre 7,4 e 7,7, além de serem salobras.

O cálcio é um elemento comum em água subterrânea e, no contexto estudado, com a presença de rochas ígneas e metamórficas, pode ser originado de plagioclásios, anfibólios e piroxênios. As variações de temperatura e de pressão levam à modificação do CO_2 dissolvido na água, o que reflete sobre seu conteúdo em Ca. No caso das águas subterrâneas estas variações ora levam à solubilização do carbonato de cálcio, ora levam à sua precipitação. Assim, a variabilidade espacial do cálcio, entre outros fatores, pode ser influenciada pela decomposição de material orgânico, gerado pela agropecuária, que libera CO_2 .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução tecnológica favoreceu uma maior exploração das águas subterrâneas, possibilitando maiores vazões e produtividade econômica às pequenas e médias atividades agrícolas da região e ao desenvolvimento da carcinicultura. Mas atenção deve ser dada ao uso inadequado de produtos químicos que destroem o equilíbrio natural do solo e poluem as águas de superfície (rios, lagoas e açudes) e do aquífero aluvionar.

Apesar das características construtivas da grande maioria dos 827 poços cadastrados estarem fora dos padrões adequados para as atividades desenvolvidas na área, os compostos de nitrogênio e

TABELA 4 – Índice de saturação da calcita – ISC

TABLE 4 – Calcite saturation index - CSI

Poço	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ISC	-0,77	-0,33	-0,94	0,20	-0,56	-0,38	-1,09	-0,53	0,01	-0,85	-0,66	-0,44	-0,99	-0,72	-0,99
Poço	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ISC	-0,09	-0,76	0,39	-1,18	-0,46	-0,28	0,34	-1,02	-1,10	-0,76	-0,16	-0,84	-0,33	-0,47	-0,91

fósforo não apresentaram fortes concentrações nas águas subterrâneas no trecho do aquífero aluvionar do rio Jaguaribe em São João do Jaguaribe, muito embora, para se chegar a conclusões mais consistentes, é importante analisar uma quantidade mais significativa de amostras, além das 30 analisadas, principalmente nos terrenos com maiores indícios de contaminação.

A amostra do poço P04 destaca-se no grupo das 30 amostras do aquífero aluvial, quanto às suas características hidroquímicas, por ser a mais bicarbonatada sódica, pH tendendo ao alcalino, significativa concentração em sílica e fósforo e baixo teor em ferro.

A água subterrânea captada na área de estudo, em seu estado natural, não é indicada para consumo humano, devido, sobretudo, à elevada turbidez, a qual pode estar associada a elementos nocivos à saúde. O tratamento da água para remoção do ferro tornaria os poços que captam água doce em condições de aproveitamento para o abastecimento, o que representaria 50% dos poços. Os demais, além de captarem águas com cor e turbidez elevada, apresentam palatabilidade desagradável, devido ao conteúdo em STD > 500 mg L⁻¹. Do total de amostras, apenas uma, P08, é de boa qualidade para abastecimento, visto que além de doce, apresenta valores de ferro e turbidez de acordo com a legislação; no entanto, seu consumo *in natura* é desaconselhado, visto que sua qualidade sanitária deve ser investigada quanto a presença de coliformes termotolerantes, uma vez que o poço é raso e detectou-se a presença de amônia.

Para uso dos poços há necessidade da obtenção de outorga pelo proprietário para assegurar o controle quantitativo e qualitativo do uso da água, que atenda às exigências das normas de construção de poços (laje de proteção, tubo de boca, perímetro imediato de proteção de 10 m e a não construção do poço próximo a fontes potenciais de poluição como currais e fossas etc.). É importante, ainda, a consulta aos mapas de vulnerabilidade dos aquíferos e estudos específicos de geologia para a escolha de locais destinados à instalação de atividades que possam configurar fontes potenciais de poluição.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao LGMA - Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada, setor Geoquímica Ambiental, da UFC, pela realização das análises químicas. Também agradecemos aos pareceristas da revista pelas sugestões apresentadas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2006. *NBR nº12.212 de 30/04/2006 Poço tubular – Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea*. ABNT, Rio de Janeiro, 10 p.
- ADIMALLA, N.; WU, J. 2019. Groundwater quality and associated health risks in a semi-arid region of south India: Implication to sustainable groundwater management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(1-2): Special issue: Sustainable Living with Risks): 191–216. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1546550>
- ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. 1998. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. *Revista de Saúde Pública*, 32(2): 160–165. <https://doi.org/10.1590/S0034-89101998000200009>
- ALMEIDA, A.R.; AGUIAR, D.C.; MONTEIRO, E.A.S.; BARROS, E.M.; MAIA, L.T.S.; BRAGA, L.R.C.; CARVALHO, L.R.B.; BARROS, P.G.R.M.; VASCONCELOS, S.M.S.; SILVA, T.M.; FERNANDES, T.R.C. 2014. *Carta geológica: Jaguaritama, folha SB.24-X-C-IV, escala 1:100.000*. Programa Geologia do Brasil – PGB, CPRM, Fortaleza.
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, 22th edition.
- ARAÚJO, P.H.M.; LIMA JÚNIOR, A.F.; MORAES, M.A.S. 2019. Análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo no baixo Jaguaribe-CE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, Foz do Iguaçu, *Anais*. Disponível em <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH1355-1-20190812-235814.pdf>. Acessado em 25 set. 2023.
- BRAGA, R.R.; MATUSHIMA, E.R. 2021. Vale do Jaguaribe: Um oásis em perigo no semiárido brasileiro - revisão sistemática sobre contaminação ambiental e potenciais danos à

- bacia e seus usuários. *Revista de Geociências do Nordeste*, 7(2): 24–34 <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24607>
- BRASIL. 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de março de 2005, Edição 53, p. 58–63. Disponível em http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acessado em 06 out. 2023.
- BRASIL. Ministério da Saúde. 2021. *Portaria Nº 888, de 4 de Maio de 2021*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 de maio de 2021, Edição 85, Seção 1, p. 127. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acessado em 06 out. 2023.
- CHAVES, J.R.; SOUZA, C.R.T.; MODESTO, A.A.C.; MOREIRA, F.C.; TEIXEIRA, E.B.; SARRAF, J.S.; ALLEN, T.S.R.; ARAÚJO, T.M.T.; KHAYAT, A.S. 2020. Effects of alkaline water intake on gastritis and miRNA expression (miR-7, miR-155, miR-135b and miR-29c). *American Journal of Translational Research*, 12(7): 4043–4050.
- ESTEVES, F.A. 2011. *Fundamentos de limnologia*. Interciência, Rio de Janeiro, 3ª ed., 826 p.
- FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. 2008. *Hidrogeologia: Conceitos & Aplicações*. CPRM, Rio de Janeiro, 812 p.
- FIGUEIRÊDO, M.C.B.; ARAÚJO, L.F.P.; ROSA, M.F.; MORAIS, L.F.S. PAULINO, W.D.; GOMES, R.B. 2006. Impactos ambientais da carcinicultura de águas interiores. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 11(3): 231–240. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000300006>
- FOSTER, S.; HIRATA, R. 1993. *Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes*. São Paulo: Instituto Geológico, 92 p. (Boletim, 10).
- FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. 2021. *Postos pluviométricos*. Disponível em <http://www.funceme.br>. Acessado em 15 jun. 2021.
- GARCÍA, M.G.; BORGNINO, L. 2015. Fluoride in the Context of the Environment. In: V.R. Preedy (ed.) *Fluorine: Chemistry, Analysis, Function and Effects*. London, Royal Society of Chemistry, p. 3-21. <https://doi.org/10.1039/9781782628507-00003>
- GIBBS, R.J. 1970. Mechanisms controlling World water chemistry. *Science*, 170: 1088–1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- GOMES, D.F. 2005. *Estudo hidroquímico, isotópico e da dinâmica do nível estático das águas subterrâneas e superficiais da região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe/Ceará*. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Tese de Doutorado, 218 p.
- GOMES, D.F.; FRISCHKOR, H.; COSTA, C.M.P. 2009. *Caracterização geométrica e hidrogeológica do aluvião do Rio Banabuiú, Ceará*. Relatório CNPq, 170 p.
- GOMES, D.F.; MOURA, I.B.M.; FRISCHKORN, H.; SANTOS, D.M.; FREIRE, G.S.S. 2010. Estudo Hidroquímico e Isotópico (O-18) do Aquífero Aluvial do rio Banabuiú – Trecho Morada Nova - Ceará. *Revista de Geologia*, 23(1): 32–48. <http://www.periodicos.ufc.br/geologia/article/view/1427>
- GONÇALVES, L.C. 2009. *Contribuição geofísica à análise do arcabouço do domínio Rio Grande do Norte, província Borborema, NE do Brasil*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 114 p.
- GUERRA, M.D.F.A. 2009. *Problemática da desertificação nos sertões do médio Jaguaribe, Ceará: o contexto do município de Jaguaribe*. Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, Dissertação de Mestrado,

- 170 p. https://www.uece.br/wp-content/uploads/sites/60/2020/02/maria_daniely_dissertacao.pdf
- HEM, J.D.; CROPPER, W.H. 1959. *Survey of ferrous-ferric chemical equilibria and redox potentials*. USGS Numbered Series, Water Supply Paper, Report (Series Number, 1459). <https://www.doi.org/10.3133/wsp1459A>
- IPECE – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGICA ECONÔMICA DO CEARÁ. 2017. *Perfil Básico Municipal de São João do Jaguaribe*. 2017. Disponível em https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Sao_Joao_do_Jaguaribe_2005.pdf. Acessado em 14 mai. 2020.
- LHA – LABORATOIRE D’HYDROLOGIE D’AVIGNON. 2023. *Diagrammes*. Disponível em <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>. Acessado em 11 mar. 2023.
- MAIA, R.P.; CAVALCANTE, A.A. 2006. Alterações de drenagem evidenciadas pelo uso de áreas fluviais: O caso do Rio Jaguaribe em Limoeiro do Norte – CE. In: UGB, SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, Goiânia, *Anais*, 12 p. <http://lsic.unb.br/ugb/sinageo/6/4/146.pdf>
- MESTRINHO, S.S.P. 2008. Geoquímica das águas subterrâneas. In: F.A.C. Feitosa, J. Manoel Filho, E.C. Feitosa, J.G.A. Demetrio (orgs.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM, 3ª ed. revisada e ampliada, p. 359-379.
- MIGLIORINI, R.B. 2000. *Hidrogeologia em meio urbano. Região de Cuiabá e Várzea Grande-MT*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 146 p. <https://doi.org/10.11606/T.44.2000.tde-15102014-100504>
- MOURA, I.B.M. 2013. *Estudos das águas da bacia do rio Banabuiu no trecho entre Quixeramobim e Banabuiu – Ceará*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Tese de Doutorado, 243 p.
- MOUSA, H.A. 2016. Health effects of alkaline diet and water, reduction of digestive-tract bacterial load, and earthing. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 22: 24–33. PMID: 27089527.
- NOBRE, M.E.S.; GOMES, D.F.; VASCONCELOS, S.M.S.; FRISCHKORN, H.; LIMA NETO, I.O.; FERREIRA, S.K.; SOUZA, D.P. 2018. Estudo hidroquímico-ambiental do aquífero aluvionar do baixo Jaguaribe, Itaiçaba, Ceará. *Revista do Instituto Geológico*, 39(3): 77–92. <http://doi.org/10.33958/revig.v39i3.601>
- NISBETH, C.S.; JESSEN, S.; BENNIKE, O.; KIDMOSE, J.; REITZEL, K. 2019. Role of groundwater-borne geogenic phosphorus for the internal P release in shallow lakes. *Water*, 11: 1783. <http://doi.org/10.3390/w11091783>
- NUNES, F.C.; SILVA, E.F.; VILAS BOAS, G.S. 2011. *Grupo Barreiras: características, gênese e evidências de tectonismo*. EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro, 31 p. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/937565>. Acessado em 24 jul. 2020.
- PINHEIRO, A.F.C.; PINHO, E.; CAVALCANTE, I.N.; GARCÊS, A.S.; OLIVEIRA. 2019. As águas do aquífero aluvionar Jaguaribe e sua relação com o uso/ocupação do solo: área piloto de São João do Jaguaribe - Ceará. In: J.G. Aguilera & A.M. Zuffo (orgs.) *Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida Através da Evolução Tecnológica 2*. Ponta Grossa, Atena Editora, v. 2, p. 27–41. <http://doi.org/10.22533/at.ed.7331911074>
- RICHTER, B.C.; KREITLER, C.W. 1993. *Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization*. Routledge, New York, 258 p. <https://doi.org/10.1201/9780203753668>
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1955. *The water balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, Publications in Climatology, VIII(1): 104 p.
- VASCONCELOS, S.M.S.; CORDEIRO, V.F.; MONTEIRO FILHO, C.G.; CAVALCANTE, I.N. 2010. Caracterização hidrogeológica da aluvião do Rio Banabuiu, Morada Nova, Ceará, Brasil. *Revista de Geologia*, 23(2):

182–190. <http://www.periodicos.ufc.br/geologia/article/view/40845>

<https://www.wri.msstate.edu/pdf/welch10.pdf>

WELCH, H.L.; KINGSBURY, J.A.; COUPE, R.H. 2010. Occurrence of phosphorus in groundwater and surface water of northwestern Mississippi. In: MISSISSIPPI WATER RESOURCES CONFERENCE, 40, Mississippi, *Abstract Archive*, p. 142–155.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, Geneva, 614 p. Disponível em <http://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>. Acessado em 11 out. 2023.

Endereço dos autores:

Antônio Flávio Costa Pinheiro (ID 0000-0001-5550-7616) – Escola Estadual João Mattos, Rua Almirante Rubin, s/n, Montese, CEP 60425-480, Fortaleza, Ceará, Brasil. *E-mail*: fpinheiro666@gmail.com

Diolande Ferreira Gomes Freire (ID 0000-0002-6296-0977), Itabaraci Nazareno Cavalcante (ID 0000-0001-6943-5318), Rafael Mota de Oliveira* (ID 0000-0001-7657-1262), Karen Vendramini de Araújo (ID 0000-0001-5522-5299) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, CEP 60.020-181, Fortaleza, Ceará, Brasil. *E-mails*: dfreire68@gmail.com, itabaracicavalcante@gmail.com, rafaelmotageo@gmail.com, karenva83@gmail.com

*Autor correspondente

Artigo submetido em 12 de abril de 2023, aceito em 16 de novembro de 2023.

