

Variação sazonal da qualidade das águas subterrâneas em diferentes domínios hidrogeológicos na bacia hidrográfica do Rio Piauí (Sergipe)

Seasonal variation in groundwater quality across different hydrogeological domains in the Piauí River basin (Sergipe)

M. E. S. Vieira¹; M. B. Santos¹; T. V. S. Silveira¹; C. S. M. Santos¹;
J. M. da Silva²; C. A. B. Garcia²; R. D. Gonçalves^{1,2*}

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH), Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

*roger.dias@academico.ufs.br

(Recebido em 13 de julho de 2025; aceito em 05 de dezembro de 2025)

Este estudo avaliou a qualidade das águas subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (SE), com foco na potabilidade para abastecimento humano, considerando as variações sazonais e os domínios hidrogeológicos cárstico, fissural e granular. Foram amostrados 15 poços nas estações seca e chuvosa de 2022, analisados cloreto, nitrato, sulfato, sódio, sólidos totais dissolvidos (STD) e dureza e comparados aos limites da Resolução CONAMA 396/2008 e da Portaria GM/MS nº 888/2021. Os resultados indicaram variações sazonais e influência direta da litologia na composição da água. No período chuvoso, cloreto, STD, nitrato, sulfato e sódio ultrapassaram os limites do CONAMA e da Portaria do Ministério da Saúde em poços do domínio cárstico, associados à dissolução de rochas carbonáticas. Já no período seco, observaram-se concentrações elevadas de nitrato nos domínios fissural e granular. A dureza apresentou valores acima do limite da Portaria no domínio cárstico durante o período chuvoso, enquanto no domínio fissural verificou-se nitrato elevado associado à dureza, potencialmente relacionado à lixiviação de fertilizantes agrícolas. A influência do domínio hidrogeológico foi determinante: o cárstico concentrou maiores teores de sódio, cloreto e sulfato, enquanto o fissural apresentou predominância de nitrato. A atividade agrícola e a ausência de saneamento básico foram identificadas como potenciais fontes de contaminação. O estudo evidencia a necessidade de monitoramento contínuo e de estratégias de gestão sustentável voltadas à proteção dos aquíferos, além de preencher uma lacuna sobre a influência comparativa dos domínios hidrogeológicos em regiões semiáridas, fortalecendo a compreensão da vulnerabilidade hídrica e subsidiando políticas públicas de preservação.

Palavras-chave: contaminação antrópica, íons dissolvidos, vulnerabilidade hidrogeológica.

This study evaluated groundwater quality in the Piauí River Basin (Sergipe, Brazil) with emphasis on potability for human supply, considering seasonal variation and the karst, fractured, and granular hydrogeological domains. Fifteen wells were sampled in the dry and rainy seasons of 2022. Chloride, nitrate, sulfate, sodium, total dissolved solids (TDS), and hardness were analyzed and compared with the limits set by CONAMA Resolution 396/2008 and Brazilian Ministry of Health Ordinance GM/MS No. 888/2021. Results showed clear seasonal effects and a direct lithologic control on water composition. During the rainy season, chloride, TDS, nitrate, sulfate, and sodium exceeded legal limits in wells within the karst domain, consistent with carbonate-rock dissolution. In the dry season, elevated nitrate occurred mainly in the fractured and granular domains. Hardness exceeded the sanitary limit in the karst domain during the rainy period, whereas in the fractured domain high nitrate coincided with higher hardness, likely linked to the leaching of agricultural fertilizers. The hydrogeological domain was decisive: the karst domain showed higher sodium, chloride, and sulfate, while the fractured domain was dominated by nitrate. Agricultural activity and the lack of basic sanitation were identified as potential contamination sources. The study highlights the need for continuous monitoring and sustainable management strategies to protect aquifers and addresses a gap on the comparative influence of hydrogeological domains in semiarid regions, improving understanding of groundwater vulnerability and informing preservation-oriented public policies.

Keywords: anthropogenic contamination, dissolved ions, aquifer vulnerability.

1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico e ambiental, sendo essencial para a agricultura, a indústria, a pecuária, a manutenção de inúmeros ecossistemas e, sobretudo, para o abastecimento humano [1], considerado prioritário conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 [2].

Para atender às crescentes demandas e aos usos múltiplos da água, a exploração de aquíferos configura-se como uma alternativa estratégica, especialmente em regiões com baixa disponibilidade de recursos hídricos superficiais. De acordo com o relatório mais recente da Conjuntura Nacional dos Recursos Hídricos de 2024 [3], cerca de 40% das sedes municipais utilizam exclusivamente águas subterrâneas para abastecimento humano.

Um dos principais fatores que justificam o uso desse recurso é sua tendência a apresentar melhor qualidade em parâmetros físico-químicos. No entanto, essa qualidade pode ser afetada por fatores geológicos, como processos naturais de dissolução mineral, e por atividades antrópicas [4] como a agricultura, a pecuária e o descarte inadequado de resíduos industriais e domésticos [5]. Assim, uma análise adequada de variáveis como temperatura, condutividade elétrica, pH, sólidos totais dissolvidos, cátions e ânions é essencial para avaliar sua potabilidade e verificar sua conformidade com as normas ambientais vigentes, em especial a Resolução CONAMA nº 396/2008 [6] e a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde [7].

Por se tratar de uma fonte essencial para o abastecimento humano e o desenvolvimento de diversas atividades econômicas, a água subterrânea requer atenção constante quanto à sua qualidade. É fundamental que os órgãos responsáveis exerçam uma fiscalização mais rigorosa sobre esse recurso, garantindo que ele permaneça saudável e adequado para o consumo. Segundo Arcanjo et al. (2021) [8] a conscientização sobre o uso racional da água e sua preservação deve envolver tanto os gestores públicos quanto a sociedade, a fim de evitar riscos à saúde pública e à sustentabilidade ambiental.

A Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (BHRP) possui uma área total de 4.175 km², dos quais aproximadamente 221,6 km² (5,3%) pertencem ao estado da Bahia, e 3.953,4 km² (94,7%) ao estado de Sergipe, o que corresponde a cerca de 19% do território sergipano. A região é influenciada por três tipos climáticos predominantes no estado: Litoral Úmido, Agreste e Semiárido, com precipitações concentradas entre os meses de março e julho, o que afeta diretamente a recarga hídrica da bacia [9].

Além da relevância socioeconômica da água subterrânea, especialmente em regiões semiáridas como ocorre no estado de Sergipe, é fundamental compreender a influência dos diferentes domínios hidrogeológicos sobre sua qualidade. A disponibilidade e a potabilidade desse recurso estão diretamente associados à natureza das rochas aquíferas e ao grau de vulnerabilidade à contaminação por fontes antrópicas, como fertilizantes agrícolas e resíduos [10].

Os aquíferos fissurais são caracterizados por fraturas nas rochas que servem como condutos preferenciais para o fluxo da água. A complexidade da rede de fraturas e as interações fluido-rocha exigem abordagens específicas para a análise do risco de contaminação e de vulnerabilidade. A forma como as fraturas estão distribuídas no meio rochoso influencia diretamente o transporte de contaminantes, sendo necessário considerar essas particularidades na caracterização da vulnerabilidade hídrica [11].

Além disso, a incorporação de critérios geológicos e hidrogeológicos específicos tem se mostrado eficaz para refinar a identificação de zonas mais suscetíveis à contaminação, como demonstrado por estudos que utilizaram dados de qualidade da água para validação de áreas críticas [12]. Esses avanços reforçam a importância de métodos que levem em conta a estrutura fraturada do meio aquífero no planejamento e na gestão da qualidade da água subterrânea.

Os aquíferos cársticos, por sua vez, são formados por rochas carbonáticas dissolvidas ao longo do tempo e apresentam alta permeabilidade e condutividade hidráulica devido ao desenvolvimento de condutos e fissuras, o que permite uma circulação rápida da água. Embora essa estrutura favoreça grande produtividade, ela também torna o sistema extremamente vulnerável à contaminação. Estudos recentes demonstram que a qualidade da água subterrânea em aquíferos cársticos sofre influência significativa do uso do solo e das condições climáticas regionais [13-15]. Nesse cenário, temos áreas agrícolas sobre aquíferos cársticos que apresentam

riscos médios a altos de salinização e contaminação por nitrato, associadas à atividade antrópica e características geológicas locais [13]. De modo semelhante, a sobre-exploração hídrica e as mudanças climáticas vêm reduzindo a recarga natural e promovendo degradação da qualidade da água, com flutuações acentuadas de nitrato em períodos úmidos e sinais de envelhecimento da água subterrânea [14]. Além disso, é cada vez mais frequente águas subterrâneas em aquíferos cársticos que excedem os limites de nitrato, destacando o impacto das atividades humanas mesmo em áreas com boa recarga natural [15].

Já os aquíferos granulares, também conhecidos como porosos, possuem elevada porosidade intergranular, o que proporciona boa capacidade de armazenamento de água, mas com condutividades hidráulicas variadas dependendo da compactação e granulometria. Em termos de qualidade, estudos revelam que a vulnerabilidade à contaminação pode ser moderada a alta, especialmente em zonas urbanas ou agrícolas intensivas [16].

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a distribuição da qualidade das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, para fins de abastecimento humano, com base em parâmetros físico-químicos de potabilidade em diferentes domínios hidrogeológicos (cárstico, fissural e granular). Parte-se da hipótese de que a qualidade da água subterrânea varia de acordo com o tipo de domínio, refletindo tanto diferenças litológicas quanto vulnerabilidades distintas à contaminação. Dessa forma o estudo busca não apenas caracterizar a variação espacial e sazonal dos parâmetros analisado, mas também fornecer subsídios técnicos para a gestão e tomada de decisão sobre a proteção dos aquíferos, evidenciando sua importância estratégica como fonte hídrica em uma região sujeita à pressão agrícola e urbana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Área

A Bacia Hidrográfica do Rio Piauí está localizada na região sul do estado de Sergipe, abrangendo 15 municípios. A área de estudo apresenta uma geologia diversificada, composta por diferentes domínios hidrogeológicos que influenciam a disponibilidade e a qualidade da água subterrânea, sendo caracterizada pela presença dos domínios cárstico, fissural e granular (Figura 1).

O domínio granular, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, é representado pelas Formações Cenozoicas Superficiais compostas por rochas sedimentares e sedimentos pouco a inconsolidadas, em especial do Grupo Barreiras, próximo ao litoral destacam-se depósitos detríticos, metassedimentos marinhos e continentais costeiros [17]. O domínio fissural é representado por rochas metassedimentares com alto grau de compactação do Grupo Estância, e rochas cristalinas do Complexo Gnáissico-Migmatítico e Granulítico onde o acúmulo de água depende da ocorrência de fraturas distensivas, como abordado pelos trabalhos de Bomfim et al. (2002) [17] e Teixeira (2014) [18]. Já o domínio cárstico é dominado por carbonatos e metacarbonatos, abrangendo a porção noroeste da bacia, representada pelas Formações Frei Paulo, Jacaré, Olhos D'água, Jacoca e Membro Sapucari da Fm. Cotinguiba que ocorre em pequenas áreas em Estância, de acordo com Bomfim et al. (2002) [17].

O clima na região varia conforme a localização, englobando características dos climas do Agreste, do Litoral Úmido e do Semiárido [19]. Essa variabilidade climática exerce influência direta na recarga dos aquíferos, afetando a disponibilidade hídrica e a variação dos parâmetros físico-químicos dessas águas [20]

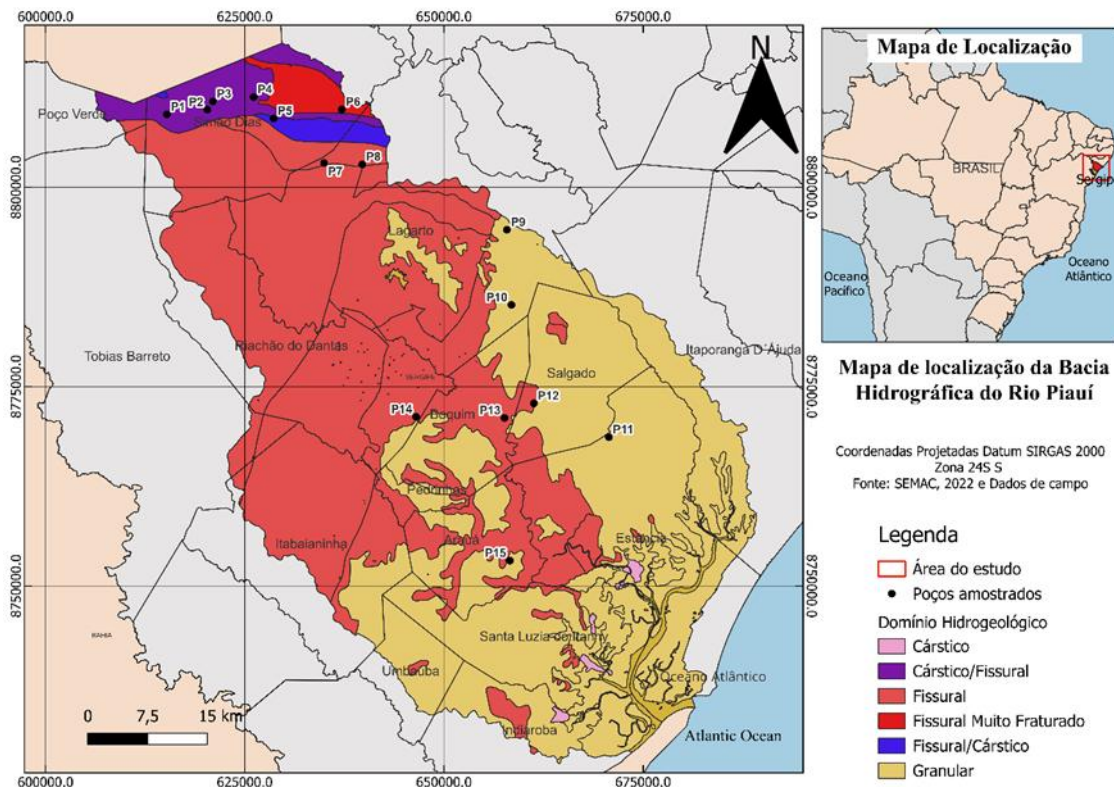


Figura 1: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, no estado de Sergipe, indicando os municípios abrangidos e a distribuição dos domínios hidrogeológicos.

2.2 Procedimentos Metodológicos

A coleta das águas subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí foi realizada em 15 poços distribuídos ao longo da área, abrangendo três domínios hidrogeológicos distintos: cárstico (P1 a P5), fissural (P6, P12 a P15) e granular (P7 a P11). As amostragens foram realizadas em poços devidamente registrados, com perfil litológico e construtivo conhecido, priorizando inicialmente os pontos situados no domínio poroso, conforme descrito por SEMAC [21]. Apesar da expressiva quantidade de poços na região, a maioria não possui registro junto aos órgãos competentes.

As coletas ocorreram em dois períodos distintos do ano de 2022: período seco (setembro a fevereiro) e período chuvoso (março a agosto), com o objetivo de avaliar a variação sazonal da qualidade das águas subterrâneas. Os poços selecionados estão distribuídos ao longo da bacia e inseridos em domínios hidrogeológicos com características geológicas e hidrodinâmicas específicas, que influenciam a qualidade e a disponibilidade da água subterrânea [22].

Para a avaliação da qualidade da água destinada ao abastecimento humano, foram utilizados como referência os parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA nº 396/2008 e na Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Os parâmetros analisados incluíram características físico-químicas, foram determinados os parâmetros físico-químicos, in loco foram determinados temperatura e pH pelo método eletrométrico através de medidores digitais calibrados, e em laboratório foram determinadas análises em triplicata seguindo a metodologia proposta pelo Standard Methods [23] para cloreto (SMWW 4500 - Cl⁻), nitrato (SMWW 4500 - NO₃⁻), sulfato (SMWW 4500 - SO₄²⁻), dureza (SMWW 2340- Dureza), STD (2540 - Sólidos) e sódio (cromatografia iônica) utilizando equipamentos calibrados previamente conforme recomendações do fabricante. Utilizou-se de software de geoprocessamento QGis v.3.40.10 para elaboração de mapas. Os resultados foram comparados com os valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação ambiental e sanitária, a fim de verificar a potabilidade da água e identificar possíveis vetores de contaminação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Uso e Cobertura do Solo

Os principais usos das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí estão relacionados à agricultura e ao abastecimento urbano e rural, portanto é importante garantir que esse recurso atenda às exigências em relação a sua potabilidade. O tipo de uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica influencia significativamente a qualidade das suas águas subterrâneas, afetando diretamente o grau de vulnerabilidade do aquífero, principalmente por efeito de atividades antrópicas desenvolvidas na área da bacia, comportamento semelhante ao observado no trabalho de Ribeiro et al. (2024) [23]. Na Figura 2, é apresentado o mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí.

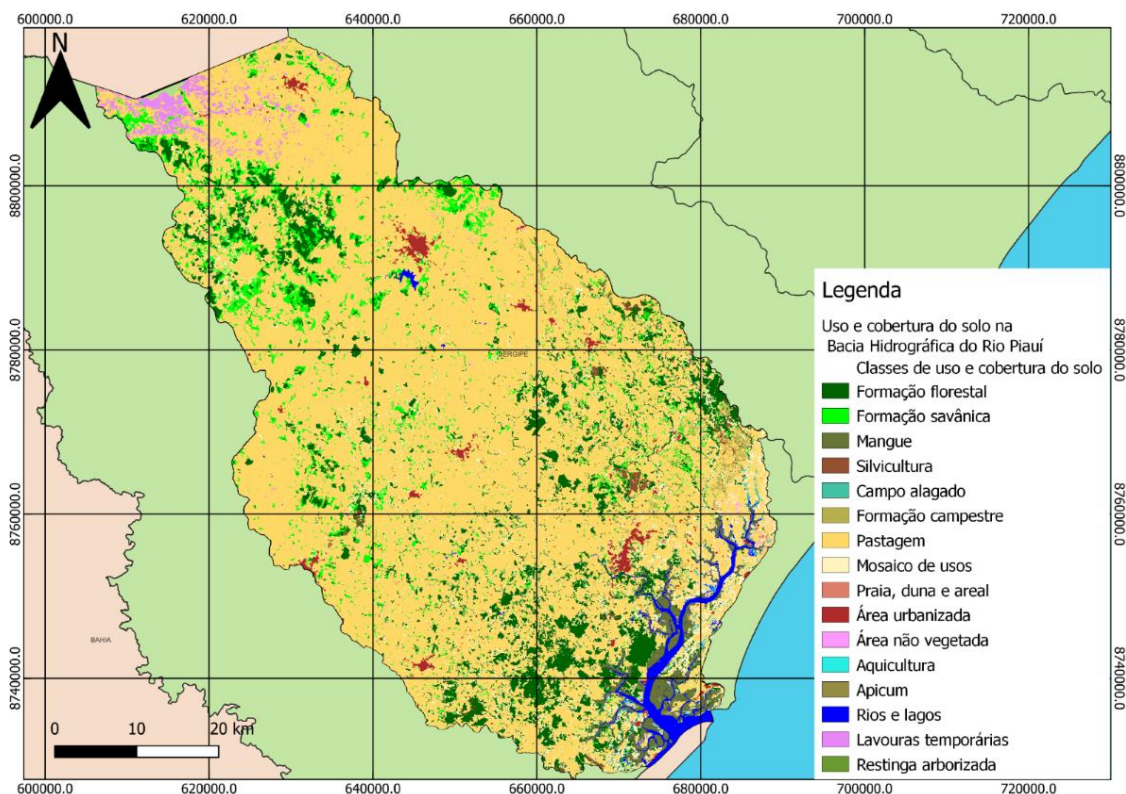


Figura 2: Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, em Sergipe, destacando as áreas agrícolas, urbanas e de vegetação nativa. Fonte: Adaptado de MapBiomias (2022).

As classes de uso relativas às pastagens e lavouras representam quase 90% do território da Bacia, representam usos que demandam uma grande quantidade de água para garantir as condições de produção, além dos grandes volumes exigidos, trazem outros riscos como a utilização de fertilizantes e pesticidas que podem atingir os aquíferos. Santos et al. (2023) [24] identificam em seu estudo que os municípios sergipanos com maior proporção de estabelecimentos agropecuários estão concentrados no sudeste e centro-sul do estado (onde se localiza a bacia), com destaque para o município de Lagarto (porção central da bacia) que conta com mais de mil estabelecimentos com produção de lavouras, gerando um ambiente mais provável de contaminações relacionadas a essas atividades.

A irrigação de cultivos agrícolas demanda grandes volumes de água, intensificando a exploração dos aquíferos e elevando o risco de contaminação por fertilizantes e defensivos agrícolas. Além disso, a expansão de áreas urbanas e povoados, especialmente nos municípios de Estância, Santa Luzia do Itanhhy e Indiaroba, tem provocado o uso intensivo das águas

subterrâneas para abastecimento público, enquanto a carência de saneamento básico e o descarte inadequado de resíduos representam sérias ameaças à qualidade desse recurso hídrico [25]. Dessa forma, a exploração para fins agrícolas e urbanos afeta diretamente a quantidade e a qualidade da água disponível, tornando essencial o gerenciamento sustentável para evitar a superexploração e a contaminação dos aquíferos.

3.2 Análise da Qualidade das Águas Subterrâneas

A Figura 3 apresenta os dados dos parâmetros de potabilidade que ultrapassaram os limites estabelecidos em algum dos 15 poços analisados. Destaca-se que o poço P04, utilizado exclusivamente para irrigação, foi o único que não apresentou destinação para abastecimento humano, nos dois períodos amostrados (seco e chuvoso). Ainda, a Figura 3 inclui os valores máximos permitidos segundo a Resolução CONAMA nº 396/2008 e a Portaria GM/MS nº 888/2021, a saber: cloreto (250 mg L^{-1}); STD (1000 mg L^{-1}) (para a resolução CONAMA) (500 mg L^{-1}) (para a Portaria GM/MS nº 888/2021); nitrato (NO_3^- como N) (10 mg L^{-1}); sulfato (250 mg L^{-1}); sódio (200 mg L^{-1}) e dureza total (300 mg L^{-1}).

A partir das campanhas de coleta e análise da água subterrânea, verificou-se que tanto o domínio hidrogeológico quanto o período de coleta influenciam significativamente os resultados obtidos. Essa relação é determinante para a interpretação da qualidade da água com base nos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008 e pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, permitindo uma avaliação mais precisa da potabilidade e das variações sazonais.



Figura 3: Valores dos parâmetros em mg/l de Cloreto (a), Sólidos Totais Dissolvidos (STD) (b), Nitrato (c), Sulfato (d), Sódio (e) e Dureza (f) nos poços amostrados, com indicação dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008 e Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde.

As características hidroquímicas da água costumam variar sazonalmente, especialmente pelo efeito de recarga dos aquíferos por águas da chuva, podendo diluir ou concentrar espécies químicas, como evidenciado pelo trabalho de Satyam et al. (2024) [26] ao analisar as variações espaço-temporais em parâmetros físico-químicos de águas subterrâneas em 51 distritos na Índia. Também foram observadas diferenças significativas entre amostras do período chuvoso e seco por Boudellah et al. (2023) [27] ao estudar amostras de água subterrânea no sudeste do Marrocos, enquanto Ismail et al. (2021) [28] utilizaram técnicas de SIG e geoestatística para explicar as variações espaço-temporais de águas subterrâneas em planícies aluviais quaternárias na região de Lahore no Paquistão.

Durante o período chuvoso, todos os parâmetros analisados apresentaram, em ao menos um poço, valores acima dos limites legais. Esse comportamento foi especialmente notável nos poços P01 a P05, localizados no domínio hidrogeológico cárstico, onde a dissolução de rochas carbonáticas pode ter contribuído para o aumento da concentração de compostos como cloreto, STD, nitrato, sulfato, sódio e dureza, além do poço P06, localizado no domínio fissural na transição com o domínio cárstico.

No período seco, os poços P01 a P06 mantiveram comportamento semelhante ao período chuvoso, com exceção de pequenas variações nos teores de nitrato. Por outro lado, nos poços P09 e P10, também foi observada ultrapassagem do limite para nitrato, como ilustrado na Figura 3c. O nitrato é relatado em vários estudos como um dos principais contaminantes em águas subterrâneas, frequentemente atribuído ao uso de fertilizantes nitrogenados em excesso, e.g. Kaur et al. (2020) [29].

Ainda, irrigação com águas residuais, disposição de efluentes não tratados, presença de chorume e exposição a excrementos de animais também são fontes frequentes, como exposto em Zhang et al. (2019) [30] e Chen et al. (2017) [31]. A contaminação por compostos nitrogenados costuma se alastrar por grandes áreas e muito rapidamente por causa da alta solubilidade e mobilidade do nitrato [32], com os maiores índices de nitrato relacionados a presença de fossas sépticas e efluentes domésticos sem tratamento adequado, além de áreas com expressiva produção agrícola, especialmente na porção do domínio cárstico.

Na análise com base na Portaria do Ministério da Saúde, os parâmetros foram avaliados quanto à adequação à potabilidade. A Figura 3 (a-d, f) destaca os poços com valores acima dos limites permitidos para cloreto ($< 250 \text{ mg L}^{-1}$), STD ($< 500 \text{ mg L}^{-1}$), nitrato ($< 10 \text{ mg L}^{-1}$), sulfato ($< 250 \text{ mg L}^{-1}$) e dureza ($< 300 \text{ mg L}^{-1}$). Durante o período chuvoso, todos os parâmetros analisados nos poços P01 a P06 ultrapassaram os limites da Portaria GM/MS nº 888/2021.

O nitrato cuja concentração não deve exceder a $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, apresentou valores elevados nos poços P13 (variando de 12,8 a $15,4 \text{ mg L}^{-1}$), P14 (de 20,8 a $24,0 \text{ mg L}^{-1}$) e P15 (de 16,1 a $68,6 \text{ mg L}^{-1}$), localizados no domínio hidrogeológico fissural (Figura 3c). Esse comportamento pode estar associado à intensa atividade de irrigação na região, favorecendo a lixiviação de fertilizantes nitrogenados, o que reforça uma característica comum de contaminação difusa em ambientes fissurais. Uma fonte pontual pode ser a contribuição da atividade pecuária, devido à elevada carga orgânica proveniente de excrementos animais que pode ocorrer nesta região devido ao uso e ocupação do solo.

O excesso de cloreto e sódio pode estar conectado a diversas fontes naturais, como a dissolução de minerais evaporíticos, lixiviação de solos salinizados ou intrusão salina, enquanto o principal aporte antrópico está ligado a resíduos domésticos, industriais e escoamento urbano conforme descrito por Bahir et al. (2017) [33], Satyam et al. (2024) [26] e Adimalla e Li (2019) [34]. Ademais, o sódio também pode estar relacionado à dissolução de halita, silicatos e fertilizantes químicos, e.g. Egbi et al. (2020) [35].

Observou-se concentrações de cloreto (Figura 3a) e sódio (Figura 3e) acima do limite preconizado pela legislação, 250 e 200 mg L^{-1} respectivamente, para todos os poços do domínio cárstico (P01 a P05) e o poço P06 do domínio fissural, especialmente no período chuvoso, um forte indício que pode estar relacionado a fontes naturais como a dissolução dos carbonatos. Outra possibilidade no incremento desses íons está relacionada às condições climáticas semiáridas nessa mesma porção da bacia, com elevadas taxas de evapotranspiração, semelhante ao observado por Chen et al. (2017) [31] ao demonstrar a influência direta da evaporação na composição química da água subterrânea no norte da China.

A dureza em águas subterrâneas provoca uma série de efeitos indesejados como a precipitação de carbonatos de cálcio e magnésio, normalmente ligada a processos de dissolução de minerais como a calcita e dolomita em regiões dominadas por rochas calcárias, e influenciada pela dissolução de gipsita e anidrita em bacias sedimentares, como já descrito por Ravikumar et al. (2011) [36] e Sadati-Noori et al. (2014) [37].

Neste trabalho (Figura 3f), se observou que apenas os poços relacionados ao domínio cárstico (com exceção do poço P04), e o poço P06 do domínio fissural, estiveram acima do limite da legislação (300 mg L^{-1}), nos dois períodos. Valores discretamente mais altos no período seco do ano sugerem que a interação com o substrato carbonático é o principal responsável pelo enriquecimento em cálcio, magnésio e bicarbonato que favorecem a ocorrência de águas duras.

A ocorrência natural de sulfato pode ser resultado da dissolução de gesso, pirita e anidrita, ou ainda ser derivado de poluentes atmosféricos, fertilizantes e efluentes domésticos, como já documentado por Tiwari et al. (2018) [38] e Farooqi et al. (2007) [39]. De modo semelhante aos demais parâmetros, todos os poços do domínio cárstico (P01 a P05), e o poço P06 do domínio fissural, estiveram acima do limite estabelecido pela legislação brasileira (Figura 3d). Valores do período chuvoso foram discretamente mais elevados quando comparados ao período mais seco do ano, coerente com a presença de gesso em ambiente carbonático e uma das principais áreas de produção agrícola dentro da bacia.

O parâmetro de sólidos totais dissolvidos (STD) traz uma resposta direta à concentração dos diversos componentes presentes nas amostras de água, incluindo sais, minerais e íons, como relatado em Boudellah et al. (2023) [27] e Mahmood et al. (2016) [40]. Ismail et al. (2021) [28] demonstraram em seu estudo, na província de Punjab no Paquistão, que a maior parte da região apresenta águas subterrâneas com $\text{STD} > 500 \text{ mg L}^{-1}$ trazendo restrições para uso de consumo humano, influenciado por processos geogênicos e por águas residuais urbanas e agrícolas. Este cenário é semelhante às condições observadas aqui, no qual os valores mais altos foram registrados nos poços P01 a P06, inseridos num contexto de ambiente cárstico, justificando um enriquecimento geogênico, e por áreas importantes na produção agrícola e existência de fossas sépticas que podem contribuir para aumento no STD. Por fim, conclui-se que o STD acompanha o comportamento dos demais parâmetros avaliados, e não foram registradas diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso.

4. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, a avaliação da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí evidenciou variações significativas na qualidade da água subterrânea entre os períodos analisados, com destaque para o período chuvoso de 2022. A concentração de nitrato, segundo os limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, apresentou variações relacionadas à atividade agrícola e ao domínio hidrogeológico no qual os poços estão inseridos.

Os dados revelaram que a influência do domínio hidrogeológico é um fator determinante na qualidade das águas subterrâneas. No domínio cárstico, a dissolução de rochas carbonáticas contribuiu para o aumento das concentrações de sódio, cloreto e sulfato. Já no domínio fissural, os teores elevados de nitrato indicam possível contaminação por lixiviação de fertilizantes agrícolas. Esses resultados reforçam a importância de considerar as características geológicas da bacia tanto na avaliação da potabilidade quanto na identificação de impactos antrópicos.

Este estudo contribuiu para o entendimento do papel dos diferentes domínios hidrogeológicos (Cárstico, Fissural e Granular) sobre as águas subterrâneas da Bacia Hidrográfica do rio Piauí assim como efeitos sazonais e antrópicos. Dessa forma, destaca-se a necessidade de maior controle e fiscalização da qualidade da água subterrânea, especialmente em áreas com uso intensivo para abastecimento humano e com presença de atividades agrícolas. O monitoramento contínuo, aliado à adoção de práticas de manejo sustentável, é fundamental para garantir a preservação dos recursos hídricos subterrâneos e a mitigação de impactos ambientais negativos. Além disso, é essencial que sejam implementadas estratégias práticas de manejo sustentável, como a implantação de sistemas de saneamento adequados, bem como políticas públicas voltadas

à proteção dos aquíferos, assegurando sua conservação frente às pressões antrópicas e às mudanças climáticas.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio institucional por meio da concessão da bolsa vinculada ao Projeto nº 14463-2024, fundamental para a execução e o desenvolvimento deste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hirata R, Conicelli BP. Água subterrânea e sua importância. São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo; 2019.
2. Brasil. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm.
3. Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual 2024. Brasília (DF): ANA; 2024.
4. Almeida FF, Silva AAP, Assunção F, Oliveira RB. Monitoramento e avaliação do risco de contaminação por pesticidas em água superficial e subterrânea na região de Guaíra. *Rev Bras Recur Hídricos*. 2015;20(2):486-96. doi: 10.21168/rbrh.v20n2.p486-496
5. Onwuka OS, Ezugwu CK, Ifediegwu SI. Assessment of the impact of onsite sanitary sewage system and agricultural wastes on groundwater quality in Ikem and its environs, south-eastern Nigeria. *Geol Ecol Landsc*. 2019;3(1):65-81. doi: 10.1080/24749508.2018.149363
6. Brasil. Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 2008. Disponível em: <https://share.google/Y3yYZOArvjInBCvQr>.
7. Brasil. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html.
8. Arcanjo Alves EF, Nunes BB, Silva TR, Costa MDP, Santos JS. Educação ambiental e gestão das águas: um diálogo com a comunidade. *Rev Acolh Alf Países Língua Port*. 2021;4(2):402-20.
9. Silva JM, Rocha PE, Santos DC, Jesus JB, Garcia CAB, Costa SSL. Avaliação e espacialização de parâmetros físico-químicos em águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Piauí, nordeste, Brasil. *Sci Plena*. 2024;20(9):097201. doi: 10.14808/sci.plena.2024.097201
10. Macedo DN. A importância da qualidade da água para seu uso na irrigação. *Bol Tempo Presente*. 2020;9(1):70-92.
11. Du D, Li Y, Gong H. A DFN-based framework for probabilistic assessment of fractured rock aquifer vulnerability and health risk. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023;37(10):1975-90. doi: 10.1007/s00477-023-02413-1
12. Hamza SM. GIS-based FRATIC model for pollution vulnerability assessment of fractured-rock aquifer systems. *Int J Hydrol Sci Technol*. 2017;7(1):49-63. doi: 10.1504/IJHST.2017.084064
13. Yenilmez F, Wani AML, Abunada Z, Muhammetoglu A, Muhammetoglu H. Comparative assessment of hydrochemical characterization and groundwater quality for irrigation in an autochthonous karst aquifer with the support of GIS: case study of Altinova, Turkey. *Environ Sci Pollut Res*. 2024;31(2):1607-23. doi: 10.1007/s11356-024-32305-1
14. Gargouri-Ellouze E, Slama F, Kriaa S, Benhmid A, Taupin JD, Bouhlila R. Comprehensive assessment of the Jebel Zaghouan karst aquifer (northeastern Tunisia): availability, quality and vulnerability in the context of overexploitation and global changes. *Environ Earth Sci*. 2025;83(4):151. doi: 10.1007/s12665-024-11548-8
15. Yasser M, Ismail N, Ines K. Groundwater quality assessment of the karst aquifer of Cherea, Tebessa (northeastern Algeria). *Int J Hydrol Sci Technol*. 2021;11(3):301-18. doi: 10.1504/IJHST.2021.114552
16. Abduljaleel Y, Amiri M, Amen EM, Salem A, Ali ZF, Awd A, et al. Enhancing groundwater vulnerability assessment for improved environmental management: addressing a critical environmental concern. *Environ Sci Pollut Res*. 2024;31(8):9530-51. doi: 10.1007/s11356-023-29881-3
17. Bomfim LFC, Costa IVG, Benvenuti SMP. Projeto Cadastro da Infra-Estrutura Hídrica do Nordeste: Estado de Sergipe. Aracaju (SE): CPRM; 2002.

18. Teixeira RL. Mapa geológico e de recursos minerais do Estado de Sergipe. Escala 1:250.000. Sergipe: MME/CPRM/CODISE; 2014
19. Santos KMS, Albuquerque TMA, Mendes LA. Análise da associação entre mapas do Monitor de Secas e dados climáticos de Sergipe. *Rev Bras Climatol.* 2021;28:636-51.
20. Chaves HML, Albuquerque ACL, Mattos I. Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas sobre a recarga da água subterrânea em bacias com dados escassos. *Águas Subterrâneas.* 2010;24(3):35-46.
21. Sergipe. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas (SEMACE). Atlas digital dos recursos hídricos do Estado de Sergipe [Internet]; [acesso em 01 dez 2025]. Disponível em: <https://serhidro.semace.se.gov>.
22. Feitosa FAC, Manoel Filho J, Feitosa EC, Demetrio JGA. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; 2008.
23. Ribeiro A, Wahnfried I, Fernandes Neto LA. Levantamento de contaminações geogênicas e antrópicas em águas subterrâneas na cidade de Novo Airão. *Rev Geonorte.* 2024;15(48):99-124. doi: 10.21170/geonorte.2024.V.15.N.48.99.124
24. Santos PHN, Barros GVP, Ferreira WS. Perfil climático e cobertura do solo: o cenário do estado de Sergipe. *Rev Bras Geogr Fís.* 2023;16(1):101-15.
25. Sharma MK, Kumar M, Malik DS, Singh S, Patre AK, Prasad B, et al. Assessment of groundwater quality and its controlling processes in Bemetara District of Chhattisgarh State, India. *Appl Water Sci.* 2022;12:102.
26. Satyam M, Mrityunjay SC, Suresh S. Assessing groundwater quality dynamics in Madhya Pradesh: Chemical contaminants and their temporal patterns. *Environm Res.* 2024;252(2):118887. doi: 10.1016/j.envres.2024.118887
27. Boudellah A, El Moustaine R, Chahlaoui A, Maliki A. Assessment and modeling of groundwater quality by using water quality index (WQI) and GIS technique in Meknes Aquifer (Morocco). *Geol Ecol Landscapes.* 2023;7(2):126-38. doi: 10.1080/24749508.2021.1944797
28. Ismail S, Ahmed MF. GIS-based spatio-temporal and geostatistical analysis of groundwater parameters of Lahore region Pakistan and their source characterization. *Environ Earth Sci.* 2021;80:719. doi: 10.1007/s12665-021-10034-9
29. Kaur L, Rishi MS, Siddiqui AU. Deterministic and probabilistic health risk assessment techniques to evaluate non-carcinogenic human health risk due to fluoride and nitrate in groundwater of Panipat, Haryana, India. *Environ Pollut.* 2020;259:113711. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113711
30. Zhang Y, Peng C, Guo Z, Xiao X, Xiao R. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of China: distribution, influencing factors, health risk and regression prediction. *Environ Pollut.* 2019;254(Pt A):112930. doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.098
31. Chen J, Wu H, Qian H, Gao Y. Assessing nitrate and fluoride contaminants in drinking water and their health risk of rural residents living in a semiarid region of Northwest China. *Expo Health.* 2017;9(3):183-95.
32. Majumdar D, Gupta N. Nitrate pollution of groundwater and associated human health disorders. *Indian J Environ Health.* 2000;42(1):28-39.
33. Bahir M, Carreira PM, Ouhamdouch S, Chamchati H. Recharge conceptual model and mineralization of groundwater in a semiarid region; Essaouira basin (Morocco). *Procedia Earth Planet Sci.* 2017;17:69-72. doi: 10.1016/j.proeps.2016.12.036
34. Adimalla N, Li P. Occurrence, health risks, and geochemical mechanisms of fluoride and nitrate in groundwater of the rock dominant semi-arid region, Telangana State, India. *Hum Ecol Risk Assess.* 2019;25(1-2):81-103. doi: 10.1080/10807039.2018.1480353
35. Egbi CD, Anornu GK, Ganyaglo SY, Appiah-Adjei EK, Li SL, Dampare SB. Nitrate contamination of groundwater in the Lower Volta River Basin of Ghana: sources and related human health risks. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020;191:110227. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110227
36. Ravikumar P, Somashekar RK, Angami M. Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the Markandeya River basin, Belgaum District, Karnataka State, India. *Environ Monit Assess.* 2011;173:459-87. doi: 10.1007/s10661-010-1399-2
37. Sadat-Noori SM, Ebrahimi K, Liaghat AM. Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environ Earth Sci.* 2014;71:3827-43. doi: 10.1007/s12665-013-2770-8
38. Tiwari AK, Singh AK, Mahato MK. Assessment of groundwater quality of Pratapgarh district in India for suitability of drinking purpose using water quality index (WQI) and GIS technique. *Sustain Water Resour Manag.* 2018;4:601-16. doi: 10.1007/s40899-017-0144-1
39. Farooqi A, Masuda H, Firdous N. Toxic fluoride and arsenic contaminated groundwater in the 3 Lahore and Kasur districts, Punjab, Pakistan and possible contaminant sources. *Environ Pollut.* 2007;145:839-49. doi: 10.1016/j.envpol.2006.05.007

40. Mahmood K, Ul-Haq Z, Batool SA, Rana AD, Tariq S. Application of temporal GIS to track areas of significant concern regarding groundwater contamination. *Environ Earth Sci.* 2016;75:1-11. doi: 10.1007/s12665-015-4844-2