ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAIA (SE)

Kaique Lima Pinto [1]; Paulo Sérgio de Rezende Nascimento [2]

RESUMO – O artigo analisa a qualidade da água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaia, em Sergipe, enfatizando a distribuição espacial de parâmetros hidrogeoquímicos e os condicionantes naturais que controlam a composição iônica da água. Para isso, integra dados físicos e químicos referentes a cálcio, magnésio, bicarbonato, sódio, pH, amônia e sólidos dissolvidos totais (SDT). Os resultados evidenciam um padrão costeiro bem definido, com maiores concentrações de sódio, magnésio e SDT na faixa litorânea, associadas à influência marinha e à maior suscetibilidade à salinização dos aquíferos. Em contraste, cálcio e bicarbonato apresentam distribuição mais difusa e predominam em áreas interiores, indicando a atuação de processos de intemperismo químico, lixiviação e interação entre a água subterrânea e as rochas ou sedimentos relacionados ao Grupo Barreiras e aos Sedimentos Costeiros. A análise integrada do relevo, da geologia e dos solos mostra que áreas mais planas, com baixa dissecação do terreno e maior tempo de residência da água, tendem a ser mais vulneráveis à intrusão salina. O estudo destaca a relevância do SIG para diagnósticos ambientais e para a gestão hídrica em aquíferos costeiros, especialmente no planejamento de ações preventivas, no monitoramento hidroquímico contínuo e na definição de áreas prioritárias para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos locais.

ABSTRACT– This article analyzes groundwater quality in the Sapucaia River Basin in Sergipe, Brazil, emphasizing the spatial distribution of hydrogeochemical parameters and the natural factors that control the ionic composition of the water. To this end, it integrates physical and chemical data related to calcium, magnesium, bicarbonate, sodium, pH, ammonia, and total dissolved solids (TDS). The results show a well-defined coastal pattern, with higher concentrations of sodium, magnesium, and TDS in the coastal strip, associated with marine influence and greater susceptibility to aquifer salinization. In contrast, calcium and bicarbonate have a more diffuse distribution and predominate in inland areas, indicating the action of chemical weathering processes, leaching, and interaction between groundwater and rocks or sediments related to the Barreiras Group and Coastal Sediments. The integrated analysis of relief, geology, and soils shows that flatter areas, with low terrain dissection and longer water residence time, tend to be more vulnerable to saline intrusion. The study highlights the relevance of GIS for environmental diagnostics and water management in coastal aquifers, especially in planning preventive actions, continuous hydrochemical monitoring, and defining priority areas for the protection of local groundwater resources.

Palavras-Chave – Hidrogeoquímica. Intrusão salina. Qualidade da água.

[1]) Graduando do Departamento de Engenharia Ambiental – DEAM/UFS, São Cristóvão, Sergipe. E-mail –. E-mail: kaiquepinto@academico.ufs.br
[2]) Professor do Departamento de Engenharia Ambiental e Programa de Pós-graduação em Geociências e Análise de Bacia - UFS. E-mail: psrn.geologia@gmail.com

INTRODUÇÃO

A água subterrânea constitui um recurso natural estratégico, contribuindo de forma expressiva para a segurança hídrica e para o desenvolvimento socioeconômico. Nesse contexto, a avaliação da qualidade da água subterrânea torna-se fundamental, considerando sua relevância para o consumo humano, a dessedentação animal, a manutenção do equilíbrio ecológico e o desenvolvimento socioeconômico regional. Adicionalmente, a análise da vulnerabilidade dos aquíferos possibilita a identificação de áreas prioritárias para o monitoramento e a gestão das águas subterrâneas, fornecendo subsídios técnicos e científicos essenciais para a proteção ambiental e o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos (Jang *et al*., 2017).

No Brasil, as águas subterrâneas representam aproximadamente 30% da água doce disponível para uso humano, constituindo uma fonte estratégica para o abastecimento urbano, rural e industrial, sobretudo em regiões semiáridas e costeiras (Nascimento *et al*., 2023). Todavia, o aumento da demanda, associado à exploração inadequada e à insuficiência de monitoramento sistemático, pode comprometer a qualidade e a disponibilidade desse recurso hídrico. Além disso, a poluição difusa decorrente de atividades agrícolas, industriais e urbanas, somada à carência de dados hidrogeológicos atualizados, intensifica o risco de contaminação dos aquíferos, evidenciando a necessidade de implementação de sistemas integrados de monitoramento e de políticas eficazes de gestão das águas subterrâneas (Nascimento *et al.*, 2023).

No contexto sergipano, a relevância das águas subterrâneas se intensifica em função da variabilidade climática e das restrições de disponibilidade hídrica em parte do estado, bem como da demanda por usos como abastecimento público, irrigação e uso industrial. Estudos de consolidação de dados hidroquímicos, com integração de análises físico-químicas de poços profundos em bases georreferenciadas, indicam que a sistematização dessas informações é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, sobretudo em cenários marcados pela fragmentação de dados (Resende *et al*., 2009).

Além disso, avaliações da vulnerabilidade natural dos aquíferos em escala estadual evidenciam contrastes espaciais relevantes, com maior vulnerabilidade no Leste do estado e na Região Metropolitana de Aracaju, o que reforça a necessidade de estratégias preventivas de uso do solo e de monitoramento direcionado (Linhares, 2018). Em áreas urbanas, essa atenção é ainda mais crítica, pois estudos em poços rasos do aquífero livre do Leste Sergipano apontam alterações recorrentes na qualidade da água, associadas a pressões antrópicas, indicando risco à potabilidade e a necessidade de ações integradas de saneamento, monitoramento e gestão ambiental (Oliveira; Garcia, 2016).

Nesse sentido, a análise integrada da qualidade da água subterrânea, baseada na avaliação hidrogeoquímica e na aplicação de índices de qualidade, configura-se como uma ferramenta fundamental para a identificação de áreas suscetíveis à contaminação. Essa abordagem subsidia a definição de ações de controle e mitigação e apoia o planejamento e a gestão dos aquíferos, contribuindo para a conservação e o uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos (Coutinho *et al*., 2013).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Sapucaia, em Sergipe, por meio da integração de dados de cálcio, sódio, amônia, bicarbonato, magnésio, pH e sólidos dissolvidos totais (SDT). Busca-se identificar os principais condicionantes naturais associados à variação desses parâmetros, bem como fornecer subsídios técnicos à gestão ambiental e hídrica da região.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica do Sapucaia está inserida no estado de Sergipe, abrangendo porções dos municípios de Pirambu e Japaratuba. Esse recorte espacial apresenta área de aproximadamente 118 km² e inclui a rede de drenagem associada aos rios Sapucaia e Aningas, cujos limites geográficos situam-se aproximadamente entre as coordenadas 730.000 m e 740.000 m no eixo Este e 8.790.500 m e 8.801.500 m no eixo Norte.

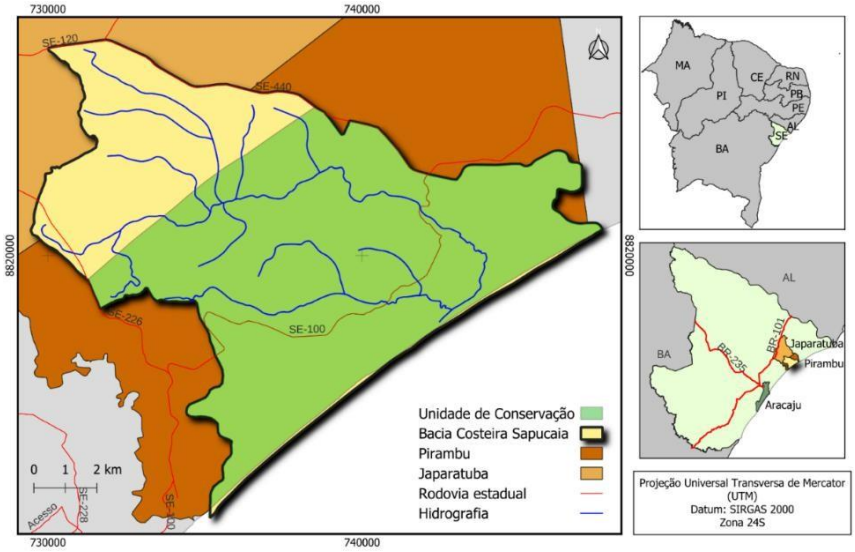


Figura 1 – Mapa de localização e de acesso da Bacia Hidrográfica do Sapucaia. Fonte: Autores (2026).

O estudo foi estruturado a partir de uma abordagem integrada hidrogeoquímica–geoespacial, tendo como recorte a Bacia Costeira Sapucaia, unidade de planejamento reconhecida na divisão hidrográfica estadual e utilizada neste trabalho como base para a organização e a interpretação dos dados. A construção do banco de dados considerou duas frentes complementares: dados

hidrogeoquímicos de água subterrânea e camadas temáticas do meio físico (geologia, geomorfologia e pedologia) utilizadas para contextualização e interpretação espacial dos padrões observados.

Os dados hidrogeoquímicos selecionados foram os parâmetros físico-químicos cálcio, amônia, bicarbonato, magnésio, pH, sólidos dissolvidos totais (SDT) e sódio, por serem indicadores relevantes para a caracterização hidrogeoquímica e para a avaliação de tendências de salinização em ambientes costeiros. O tratamento e a análise foram realizados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Inicialmente, os dados hidrogeoquímicos foram organizados em formato georreferenciado e relacionados ao recorte espacial da bacia, de modo a garantir que apenas os registros associados à área de estudo subsidiassem as análises. Em seguida, procedeu-se à espacialização dos parâmetros, com a elaboração de mapas temáticos individuais (um para cada variável), permitindo analisar a distribuição espacial e comparar padrões entre os parâmetros.

Na etapa interpretativa, os resultados hidrogeoquímicos foram analisados de forma integrada às características do meio físico. Essa integração subsidiou a identificação de padrões hidrogeoquímicos e de setores com maior suscetibilidade à alteração da qualidade da água subterrânea, especialmente em função de controles naturais típicos de sistemas costeiros, como a proximidade do oceano, o relevo pouco dissecado e solos arenosos de elevada permeabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 a 7 apresentam a distribuição espacial dos principais parâmetros hidrogeoquímicos na Bacia Hidrográfica do Sapucaia. Observa-se, inicialmente, que o bicarbonato (HCO_3^-) (Figura 2a) exibe valores relativamente homogêneos em grande parte da bacia, com incrementos localizados, indicando a atuação de processos de tamponamento e de interação água–rocha, típicos de sistemas nos quais a alcalinidade exerce controle sobre a evolução do pH. Em seguida, o magnésio (Mg^{2+}) (Figura 2b) apresenta aumento mais expressivo em setores específicos, sobretudo em áreas mais rebaixadas e próximas à faixa costeira, comportamento compatível com o enriquecimento iônico associado à influência marinha em aquíferos costeiros e à maior suscetibilidade à salinização nessas porções.

O pH (Figura 3a) varia de condições ácidas a levemente alcalinas, acompanhando o padrão de distribuição do bicarbonato, o que reforça o papel da alcalinidade na regulação da acidez, conforme observado em avaliações integradas da qualidade das águas subterrâneas em bacias costeiras do Nordeste.

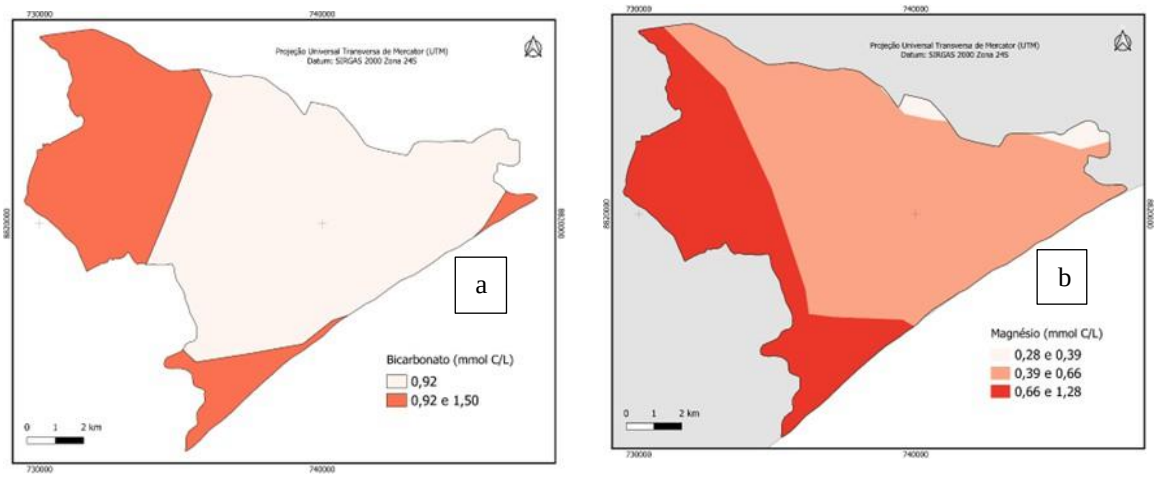


Figura 2. Espacialização do Bicarbonato (a) e do Magnésio (b). Fonte: Autores (2026).

Os SDT (Figura 3b) apresentam os maiores valores concentrados na faixa costeira e em setores do sudoeste, padrão que se repete para o sódio (Na^{+}) (Figura 4a) e, parcialmente, para o magnésio (Mg^{2+}) (Figura 2b). A coincidência espacial entre os SDT, o Na^{+} e o Mg^{2+} sugere incremento do grau de mineralização da água subterrânea e possível mistura com águas mais salinas em trechos próximos ao litoral. Esse processo é coerente com a dinâmica de aquíferos costeiros, os quais são sensíveis a variações do gradiente hidráulico e suscetíveis à intrusão marinha e à salinização, conforme discutido para ambientes costeiros no Brasil (Nascimento *et al.*, 2023) e para aquíferos costeiros do Nordeste, em estudos de vulnerabilidade à intrusão marinha (Araújo *et al.*, 2023).

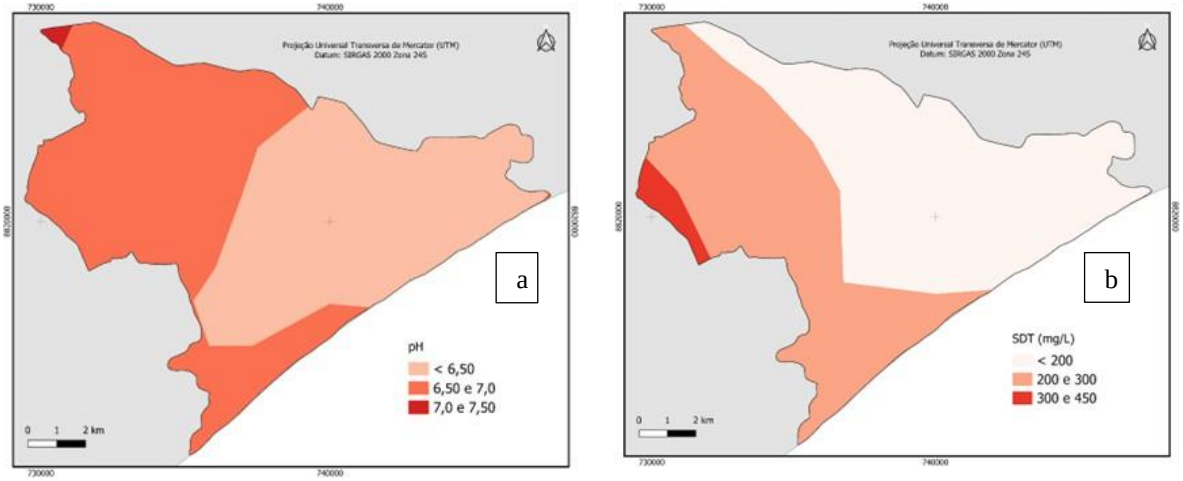


Figura 3. Espacialização do pH (a) e do SDT (b). Fonte: Autores (2026).

Por outro lado, o cálcio (Ca^{2+}) (Figura 4b), associado ao bicarbonato (Figura 2a), apresenta distribuição que se estende também às áreas interiores, indicando contribuição adicional de processos geoquímicos naturais, como a dissolução e o intemperismo de minerais. Esses processos podem elevar as concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^{-} independentemente da influência marinha, reforçando a

necessidade de interpretar a qualidade da água subterrânea de forma integrada, considerando o conjunto de parâmetros analisados e o contexto físico da bacia (Coutinho *et al*., 2013).

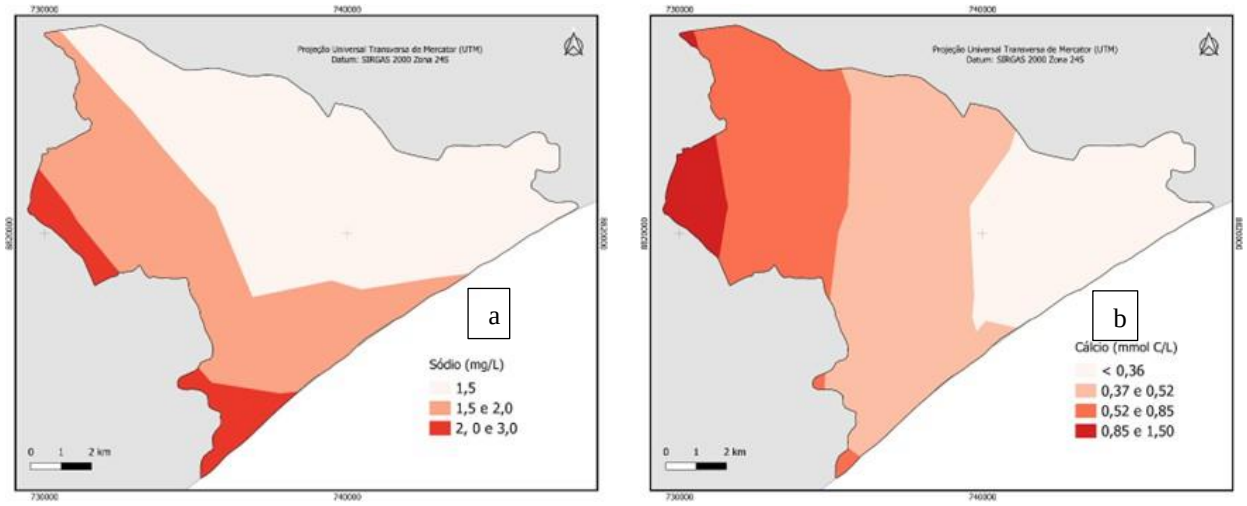


Figura 4 – Espacialização do Sódio (a) e do Cálcio (b). Fonte: Autores (2026).

A composição química das águas subterrâneas é controlada, predominantemente, pela geoquímica dos minerais e pelos processos de intemperismo químico. A dissolução de minerais silicáticos e carbonáticos promove o enriquecimento da água em cálcio, magnésio e sódio, cuja mobilidade é fortemente condicionada pelo pH. O potencial hidrogeniônico, expresso em escala logarítmica de 0 a 14, regula a solubilidade desses elementos e reflete a interação água–rocha. As ocorrências do pH e dos metais cálcio, magnésio e sódio na água superficial, no sedimento e no solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Geoquímica de água superficial, sedimento e solo. Fonte: Modificado de Viglio *et al*. (2024).

	Água superficial (mg/L)	Sedimento (%)	Solo (%)
Cálcio	17,5 a 68,6	0,19 a 0,48	0,04 a 0,17
Magnésio	16,02 a 84,31	0,09 a 0,23	0,02 a 0,06
Sódio	94 a 200	0,03 a 0,07	0,01 a 0,03
pH	5,30 a 7,04		

A distribuição de cálcio, magnésio e sódio em subsuperfície reflete os processos geoquímicos que controlam a composição da água subterrânea, associados à percolação da água meteórica e à intensificação das reações de dissolução e interação água–rocha, sendo o pH um fator determinante na solubilidade e mobilidade dos cátions alcalinos e alcalino-terrosos.

A interpretação desses padrões é fortalecida quando integrada às informações dos mapas simplificados de geomorfologia, geologia e pedologia apresentados na Figura 5. No mapa de geomorfologia (A), a planície fluviomarinha predomina no setor costeiro, indicando baixa altitude, relevo pouco dissecado e ambiente deposicional recente. Esse padrão é consistente com o mapa

geológico (B), no qual essa mesma faixa se associa a depósitos quaternários vinculados à dinâmica costeira. No mapa pedológico (C), a ampla ocorrência de Neossolos Quartzarênicos nessa zona sugere elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de solutos.

Em conjunto, essas condições favorecem maior conectividade entre a superfície, a zona não saturada e o aquífero raso e, quando associadas a gradientes hidráulicos favoráveis e à proximidade do oceano, ampliam a suscetibilidade à salinização. Essa interpretação é compatível com a predominância de SDT, Na^{+} e Mg^{2+} na faixa costeira, característica de áreas sob influência marinha em sistemas aquíferos costeiros (Araújo *et al.*, 2023; Nascimento *et al.*, 2023).

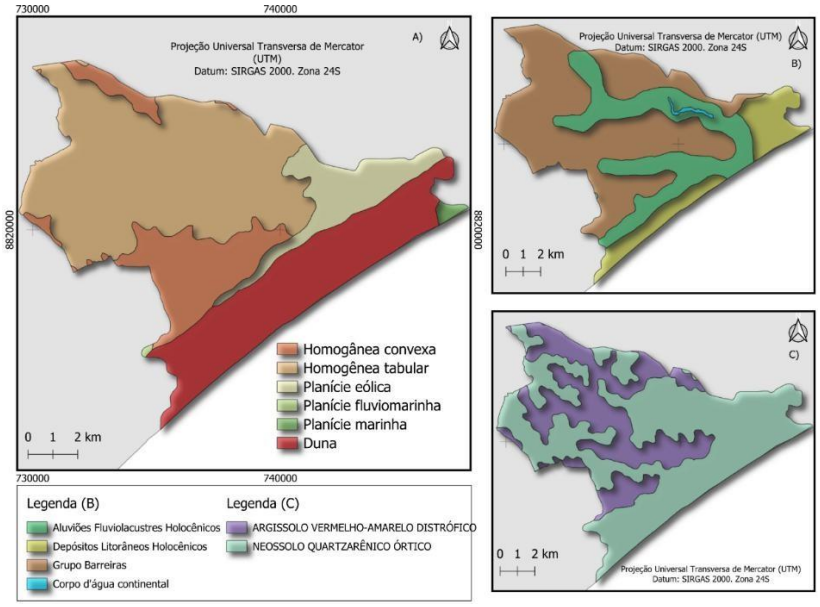


Figura 5 - Mapas simplificados de geomorfologia, geologia e pedologia. Fonte: Autores (2026).

Nas porções interiores, os Argissolos associados aos arenitos do Grupo Barreiras indicam que a elevação relativa de Ca^{2+} e HCO_3^{-} pode ser interpretada como resultado de processos geoquímicos naturais de interação água–rocha e de intemperismo químico, que tendem a aumentar a alcalinidade e contribuir para variações do pH e da composição iônica da água subterrânea. Esse comportamento é consistente com abordagens integradas aplicadas a bacias costeiras do Nordeste, nas quais a distribuição espacial dos parâmetros reflete a combinação entre controles geológicos e a influência marinha nas áreas topograficamente mais baixas (Coutinho *et al.*, 2013).

Assim, os padrões hidrogeoquímicos observados na bacia refletem a superposição de processos costeiros, com maior grau de mineralização e potencial de salinização na planície, e processos continentais de evolução geoquímica nas porções interiores. Essa interpretação é reforçada pela análise integrada dos resultados hidrogeoquímicos com o mapa de dissecação do relevo (Figura 6). As classes de muito alta e alta dissecação, representadas em tons de vermelho e laranja, concentram-se predominantemente nos compartimentos centrais e setentrionais, indicando maior entalhamento

do relevo e maior desenvolvimento da rede de drenagem. Nesses setores, a maior energia do relevo tende a intensificar o escoamento superficial e a reduzir a infiltração efetiva e, associada ao maior afastamento do litoral, essa condição é compatível com os menores teores de SDT, Na^{+} e Mg^{2+}, configurando uma assinatura hidrogeoquímica mais associada a processos continentais.

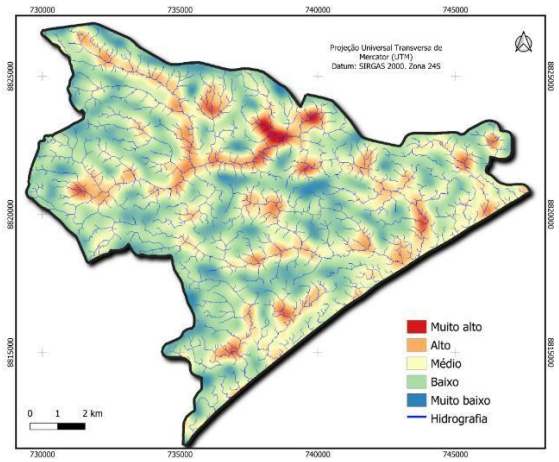


Figura 9: Mapa de dissecação do terreno. Fonte: Autoria própria (2026)

Por outro lado, as classes de baixa e muito baixa dissecação, representadas em tons de verde e azul, predominam na faixa costeira e coincidem com a planície fluviomarinha. Nessa configuração, o relevo suavizado e a maior conectividade entre a superfície e o aquífero raso favorecem maior infiltração e aumentam a suscetibilidade à salinização, o que contribui para explicar as concentrações mais elevadas de SDT e dos cátions dominantes na zona litorânea. Esse padrão é coerente com interpretações que apontam a influência marinha em ambientes costeiros, caracterizados por maior vulnerabilidade à salinização associada à intrusão marinha (Araújo *et al.*, 2023).

CONCLUSÕES

A análise espacial integrada dos parâmetros físico-químicos e das características do meio físico na Bacia Hidrográfica do Sapucaia permitiu identificar os principais condicionantes da qualidade da água subterrânea na região. Os resultados indicam que a hidrogeoquímica local é controlada, predominantemente, pela interação entre a dinâmica costeira e os processos de intemperismo químico.

Evidenciou-se a existência de uma compartimentação geoquímica bem definida. Na faixa costeira, associada à Planície Fluviomarinha e à predominância de Neossolos Quartzarênicos, registraram-se as maiores concentrações de sódio (Na^{+}), magnésio (Mg^{2+}) e sólidos dissolvidos totais (SDT). A elevada permeabilidade dos solos arenosos, somada ao relevo de baixa dissecação e à reduzida altitude, favorece a infiltração e o maior tempo de residência da água subterrânea, intensificando a vulnerabilidade do aquífero à mineralização e à intrusão salina.

Em contraste, nas porções interiores da bacia, a distribuição mais difusa de cálcio (Ca^{2+}) e bicarbonato (HCO_3^-), associada à variação do pH, reflete a predominância de processos naturais de interação água–rocha. Nessas áreas, vinculadas aos arenitos do Grupo Barreiras e a setores de maior dissecação do relevo, o escoamento superficial tende a prevalecer sobre a infiltração profunda, resultando em uma assinatura hidrogeoquímica mais dependente da dissolução de minerais continentais do que da influência marinha.

Conclui-se, portanto, que a vulnerabilidade natural da Bacia do Sapucaia é heterogênea, sendo significativamente mais elevada no setor litorâneo, em função da maior conectividade entre a superfície e o aquífero raso. Os resultados obtidos confirmam a eficácia do uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta de diagnóstico ambiental e reforçam a necessidade de estratégias contínuas de monitoramento e gestão integrada, fundamentais para mitigar o avanço da cunha salina, assegurar o abastecimento hídrico e prevenir a degradação qualitativa das águas subterrâneas frente às pressões naturais e antrópicas.

Portanto, conclui-se que a vulnerabilidade natural da Bacia do Sapucaia é heterogênea, sendo criticamente maior no setor litorâneo devido à facilidade de comunicação entre a superfície e o aquífero raso. Esses resultados validam a eficácia do uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) no diagnóstico ambiental e reforçam a necessidade de estratégias de monitoramento contínuo. A gestão sustentável desses recursos é imprescindível para conter o avanço da cunha salina e assegurar o abastecimento hídrico, prevenindo a degradação qualitativa das águas subterrâneas frente às pressões naturais e antrópicas.

REFERÊNCIAS

ALVES, N.M.S. (2016*). "Caracterização morfodinâmica e usos na faixa praial da área do Grupo de Bacias Costeiras 01 do estado de Sergipe"*. Revista de Geociências do Nordeste 2, pp. 1289-1298.

ALVES, N.M.S.; SILVA, D.B.; SANTOS, L.M.; LEITE, L.S. (2023). *"Novas tendências na vulnerabilidade ambiental da bacia costeira do rio Sapucaia, Japaratuba-Pirambu, SE"* in Anais do XIV Simpósio Nacional de Geomorfologia, Corumbá-MS.

ANDRADE, J.P.; NASCIMENTO, T.R. (2025). *"Importância estratégica dos aquíferos no nordeste semiárido"*. Cadernos de Geografia 30(1), pp. 71-86.

ARAÚJO, K.V.; CAVALCANTE, I.N.; FREIRE, D.F.G.; OLIVEIRA, R.M.; MAIA, S.R.R.; SOUSA, J.P.; LIMA NETO, I.O. (2023). *"Vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha em aquífero costeiro do Estado do Ceará"*. Derbyana 44, pp. 1-18.

COUTINHO, J.V.; ALMEIDA, C.N.; GADELHA, C.L.M.; TARGINO, D.F.; LINHARES, F.M.; COELHO, V.H.R. (2013). *"Avaliação integrada da qualidade da água subterrânea em uma bacia*

hidrográfica representativa do litoral da região Nordeste do Brasil". Revista Brasileira de Recursos Hídricos 18(4), pp. 197-212.

JANG, W.S.; ENGEL, B.; HARBOR, J.; THELLER, L. (2017). "*Aquifer vulnerability assessment for sustainable groundwater management using DRASTIC"*. Water 9(10), pp. 1-20.

LINHARES, S.S. (2018). *"Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos no estado de Sergipe e município de Aracaju."* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE.

NASCIMENTO, E.A.; BARBOZA, E.G.; REGINATO, P.A.R.; ROSA, M.L.C.N.C.; BARILI, R. (2023). *"O fluxo da água subterrânea no sistema aquífero costeiro associado aos depósitos eólicos holocênicos na região do Cassino, RS"*. Águas Subterrâneas 37(3), pp. 1-19.

OLIVEIRA, N.K.N.; GARCIA, C.A.B. (2016). *"Diagnóstico ambiental do aquífero livre da zona norte do município de Aracaju-Sergipe através das concentrações de metais, íons e BTEX"* in Anais do XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Aracaju-SE.

RESENDE, R.S.; CRUZ, M.A.S.; AMORIM, J.R.A. (2009*). "Atlas de qualidade da água subterrânea no Estado de Sergipe."* Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju-SE, 86p.

SANTOS, G.R.; COELHO, A.S. (2020). *"Bacia hidrográfica e a confecção de recursos didáticos por alunos do ensino fundamental em Sergipe".* Geografia: Ensino e Pesquisa 24(12), pp. 1-23.

SANTOS, R.C.L.; COELHO, A.S.; MADI, R.R.; MARQUES, M.N.; MELO, C.M. (2016*). "Bacia hidrográfica costeira do Sapucaia, estado de Sergipe: uso e ocupação do solo"* in Anais do XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Aracaju-SE.

SANTOS, R.J.S.; MENDONÇA, L.A.R.; SILVA, F.J.A. (2022). "Geoquímica das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Cariri Cearense, Nordeste do Brasil". Geociências: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geociências 40(4), pp. 925-938.

VIGLIO, E.P.; INVERNIZZI, A.L.; SILVEIRA, M.C.M.; BRENNY, M.E.R. (2024). *"Atlas geoquímico do estado de Sergipe: projeto levantamento geoquímico de baixa densidade do estado de Sergipe."* SBG, Rio de Janeiro-RJ, 273 p.