# AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA CAUEIRA/ABAÍS (SE)

*Thayane Ferreira de Souza Bizerra [1]; Paulo Sérgio de Rezende Nascimento [2]*

**RESUMO** – A Bacia Hidrográfica Costeira Caueira/Abaís, em Sergipe, apresenta dinâmica ambiental condicionada pela interação entre fatores hidrogeoquímicos, pedológicos e intervenção antrópica. Assim, este estudo analisou a distribuição espacial de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas, como sólidos dissolvidos totais, cálcio, condutividade elétrica, bicarbonato, amônia e nível estático, e a relação com a pedologia e Índice de Transformação Antrópica (ITA). Os procedimentos de espacialização e confecção de mapas foram realizadas no *software* QGIS. O ITA foi calculado a partir da área ocupada por cada classe de uso da terra e seus respectivos pesos de antropização. Os resultados indicaram predominância de usos antrópicos ligados à pastagem e ao mosaico agropecuário, evidenciando significativa transformação da paisagem e maior vulnerabilidade dos aquíferos costeiros. O ITA encontrado foi maior que 5, considerado de alta transformação antrópica. As tipologias pedológicas condicionam os padrões de infiltração, escoamento superficial e recarga aquífera, refletindo-se nos valores observados de condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e concentrações iônicas. A integração entre hidrogeoquímica, pedologia e ITA mostraram-se eficiente para compreender a dinâmica ambiental e subsidiar a gestão sustentável das águas subterrâneas.

**ABSTRACT**– The Caueira/Abaís Coastal Hydrographic Basin in Sergipe, Brazil, presents environmental dynamics conditioned by the interaction between hydrogeochemical, pedological, and anthropogenic factors. Therefore, this study analyzed the spatial distribution of physicochemical parameters of groundwater, such as total dissolved solids, calcium, electrical conductivity, bicarbonate, ammonia, and static level, and their relationship with pedology and the Anthropogenic Transformation Index (ITA). Spatialization and map creation procedures were performed using QGIS software. The ITA was calculated from the area occupied by each land use class and its respective anthropogenic weights. The results indicated a predominance of anthropogenic uses related to pasture and the agricultural mosaic, evidencing significant landscape transformation and greater vulnerability of coastal aquifers. The ITA found was greater than 5, considered to indicate high anthropogenic transformation. Soil types influence infiltration patterns, surface runoff, and aquifer recharge, which are reflected in observed values of electrical conductivity, total dissolved solids, and ionic concentrations. The integration of hydrogeochemistry, soil science, and ITA (Technological Innovation Area) has proven efficient in understanding environmental dynamics and supporting the sustainable management of groundwater.

**Palavras-Chave** – Água subterrânea. Parâmetros físico-químicos. Vulnerabilidade hidrogeológica.

[1]) Graduanda do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Sergipe, Avenida Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, CEP: 49100-000, (79) 999935147, thayy.sobiz@gmail.com
[2]) Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análises de Bacias e Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Sergipe, Avenida Marechal Cândido Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, CEP 49100-000, (79) 32437121, psrn.geologia@gmail.com

## INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica Costeira Caueira/Abaís, em Sergipe, configura-se como um sistema ambiental dinâmico, cuja estrutura resulta da interação entre elementos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos. Nesse contexto, a dissecação do relevo constitui um elemento fundamental, por expressar o grau de entalhamento das vertentes e refletir a relação entre o escoamento superficial e o fluxo de águas subterrâneas. Compreender essas interações é essencial para subsidiar estratégias sustentáveis de planejamento e gestão ambiental (Vargas et al., 2022).

A qualidade da água subterrânea constitui indicador relevante das interações entre os componentes físicos e antrópicos da bacia. Seus parâmetros físico-químicos são influenciados pelas características geológicas, tipo de solo, profundidade do aquífero e intensidade da ação humana, exigindo uma abordagem ambiental integrada. Em bacias costeiras com aquíferos granulares rasos e sedimentos inconsolidados permeáveis, a cobertura do solo exerce papel determinante, pois a substituição da vegetação natural por pastagens altera a infiltração e intensifica cargas difusas percolantes. Nesse contexto, o Índice de Transformação Antrópica (ITA) destaca-se como ferramenta quantitativa capaz de mensurar o grau de alteração da paisagem (Cruz et al., 1998), subsidiando a análise da vulnerabilidade hidrogeoquímica e o planejamento sustentável dos recursos hídricos.

Hidrogeologicamente, a Bacia Hidrográfica Caueira/Abaís é caracterizada pela ocorrência de aquíferos granulares de elevada permeabilidade, condição que favorece o armazenamento de água subterrânea. Entretanto, essas mesmas características tornam os aquíferos mais suscetíveis à contaminação por poluentes oriundos de atividades agropecuárias, urbanas e industriais, além de processos naturais, como a salinização associada à intrusão da cunha salina marinha.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea na Bacia Hidrográfica Costeira Caueira/Abaís, incluindo sólidos dissolvidos totais, cálcio, condutividade elétrica, bicarbonato, amônia e nível estático, relacionando-os com os tipos de solo e com o ITA em ambiente de SIG. Busca-se identificar os principais condicionantes naturais e antrópicos associados à variação desses parâmetros, e contribuir com subsídios técnicos para a gestão ambiental e hídrica da região.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende a Bacia Costeira Caueira/Abaís, localizada no litoral sul do estado de Sergipe, abrangendo parte dos territórios municipais de Itaporanga d'Ajuda e Estância, inserida na Mesorregião do Leste Sergipano e na Microrregião de Estância. Com área aproximada de 163 km², a bacia situa-se entre as coordenadas geográficas 11º07'52'' e 11º25'51'' S e 37º10'59'' e 37º21'09''

W (Figura 1). O acesso à região pode ser realizado a partir de Aracaju, pela BR-101, percorrendo-se aproximadamente 70 km até o limite da bacia.

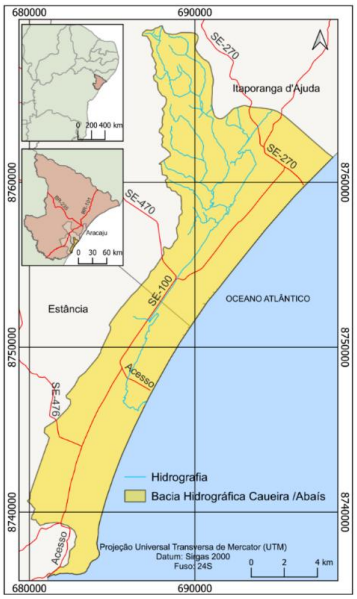


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Autores, 2023.

A análise espacial considerou os seguintes parâmetros: SDT, cálcio, condutividade elétrica, bicarbonato, amônia e nível estático, integrados aos mapas temáticos de pedologia, geologia, grau de dissecação do relevo e uso do solo. Essas informações foram importadas para um banco de dados no software QGIS, versão 3.40. O primeiro passo consistiu na compilação dos dados, incluindo a aquisição e a preparação dos mapas vetoriais dos parâmetros de qualidade da água subterrânea e das características ambientais da área de estudo. Em seguida, foi realizada a operacionalização dos dados, permitindo análises cruzadas entre os parâmetros físico-químicos e as características ambientais, com o objetivo de identificar relações com as classes de solo.

Assim, a classificação hidrológica dos solos, proposta pelo Soil Conservation Service (SCS), é amplamente utilizada em estudos hidrológicos por permitir a estimativa do comportamento do solo diante do escoamento superficial e da infiltração. Essa classificação organiza os solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D), conforme a taxa decrescente de infiltração, com base principalmente na textura, profundidade efetiva, permeabilidade dos horizontes e condições naturais de drenagem (Sartori et al., 2005).

Com a finalidade de identificar e quantificar as alterações ocorridas na paisagem em decorrência das ações antrópicas, procedeu-se ao cálculo do Índice de Transformação Antrópica (ITA), de acordo com a metodologia foi proposta por Lémechev (1982). O índice foi determinado a partir do mapa classificado de uso e cobertura da terra, considerando a área correspondente a cada classe e os pesos atribuídos conforme o grau de antropização, possibilitando a análise do nível de

transformação da paisagem. O Índice de Transformação Antrópica (ITA) foi obtido a partir do somatório dos percentuais de ocupação das diferentes classes, ponderados pelos respectivos pesos atribuídos a cada classe, os quais expressam o grau de transformação antrópica. O valor final do índice resulta da razão entre esse somatório e 100 (Equação 1).

$$ITA = \sum [\frac{\%USO * PESO}{100}] \quad (1)$$

Cruz et al. (1998) classificaram o ITA em: pouco degradada (0-2,5), regular (2,5-5), degradada (5-7,5) e muito degradada (7,5-10). Para os pesos atribuídos aos tipos de coberturas, seguem os valores da tabela abaixo.

Tabela 1 - Pesos do ITA. Fonte: Adaptado de Santos et al., 2024

| Tipos de Uso e Cobertura | Peso |
|---|---|
| Formação Florestal | 1,0 |
| Mangue | 1,0 |
| Campo Alagado e Área Pantanosa | 2,0 |
| Formação Campestre | 2,0 |
| Pastagem | 8,0 |
| Mosaico de Usos | 7,0 |
| Praia, Duna e Areal | 1,0 |
| Área Urbanizada | 9,5 |
| Outras Áreas não Vegetadas | 8,0 |
| Rio, Lago e Oceano | 1,0 |
| Restinga Arbórea | 2,0 |
| Restinga Herbácea | 2,0 |

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição da cobertura pedológica (Figura 2) demonstra a predominância de argissolos, espodossolos, gleissolos e neossolos. Os argissolos dominam a porção noroeste da área, correspondendo espacialmente aos Tabuleiros Costeiros do Grupo Barreiras. Esses solos, com horizonte B textural, apresentam acentuada variação textural entre a camada superficial, mais arenosa, e o subsolo, mais argiloso. Os espodossolos, apesar da tendência à elevada condutividade hidráulica, podem apresentar restrição ao movimento interno da água, em razão de sua ocorrência em regiões úmidas ou com nível freático superficial. Os gleissolos, formados em ambientes permanentemente ou periodicamente encharcados devido à influência do lençol freático, apresentam concreções de óxidos de ferro e manganês, os quais podem atingir a água subterrânea por meio do processo de lixiviação. Os neossolos, por sua vez, são solos pouco evoluídos, característicos de alteração recente das rochas ou de depósitos sedimentares atuais, geralmente de textura arenosa.

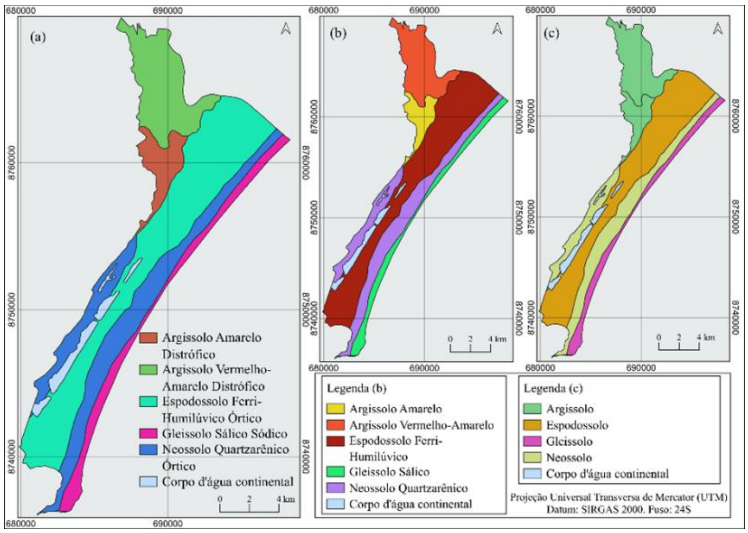


Figura 2 – Mapas simplificados de pedologia, organizados em Grande Grupo (a), Subordem (b), e Ordem (c). Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

De acordo com a classificação hidrológica dos solos proposta por Sartori et al. (2005), perfis de solo que apresentam características semelhantes, como espessura, textura, teor de matéria orgânica, estrutura e grau de expansão, tendem a responder de maneira similar a eventos de precipitação de longa duração e elevada intensidade (Quadro 1).

Quadro 1 – Classificação de solos de acordo com a infiltração. Fonte: Modificado de Sartori et al. (2005).

| Tipos de Solo e Grupo | Permeabilidade | Profundidade (cm) | Taxa de Infiltração (mm/h) | Índice de Erodibilidade | Resistência à Erosão |
|---|---|---|---|---|---|
| Argissolo Amarelo (C) | Moderada | 100 a 200 | 1, 27 a 3,81 | 0,9 a 1,1 | Moderada |
| Argissolo Vermelho-Amarelo (C) | Moderada | 100 a 200 | 1, 27 a 3,81 | 0,9 a 1,1 | Moderada |
| Espodossolo Ferri-Húmico \|(C) | Moderada | 100 a 200 | 1, 27 a 3,81 | 0,9 a 1,1 | Moderada |
| Gleissolo Sálico (D\|) | Baixa | < 50 | < 1,27 | 0,75 | Lenta |
| Neossolo Quartzarênico (D) | Baixa | < 50 | < 1,27 | 0,75 | Lenta |

Entre os solos presentes na área de estudo, Argissolos Amarelos distróficos, Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos e Espodossolos Ferri-humilúvicos Órticos, a classificação hidrológica predominante corresponde ao Grupo C. Esses solos apresentam camadas subsuperficiais que restringem o movimento vertical da água ou possuem textura moderadamente fina, resultando em menor capacidade de infiltração e maior tendência ao escoamento superficial (Sartori et al., 2005). De acordo com os autores, o Gleissolo Sálico Sódico e o Neossolo Quartzarênico Órtico enquadram-

se no Grupo Hidrológico D, composto por solos com elevado potencial de escoamento superficial, configurando ambientes com recarga limitada e drenagem interna fortemente restrita.

O uso e a cobertura do solo (Figura 3) abrangem diversas tipologias que exercem forte influência na dinâmica dos aquíferos costeiros, conferindo elevada vulnerabilidade hidrogeoquímica, sobretudo à salinização e à contaminação difusa. Na porção noroeste, predominam áreas de pastagens e mosaicos de uso agropecuário, desenvolvidos sobre os sedimentos pouco consolidados do Grupo Barreiras, subjacentes aos argissolos. As áreas urbanizadas representam zonas de risco para contaminação por efluentes domésticos e carga difusa, situação agravada pela remoção da cobertura vegetal e pela ausência de infraestrutura sanitária adequada. As formações florestais e a vegetação de restinga, ainda que pouco extensas, desempenham papel protetivo, contribuindo para a retenção de nutrientes e funcionando como barreira natural contra a contaminação das águas subterrâneas. Considerando que a cobertura vegetal influencia diretamente os mecanismos de transporte de água, sua presença é fundamental para a manutenção do potencial de recarga dos aquíferos e para a qualidade dos recursos hídricos.

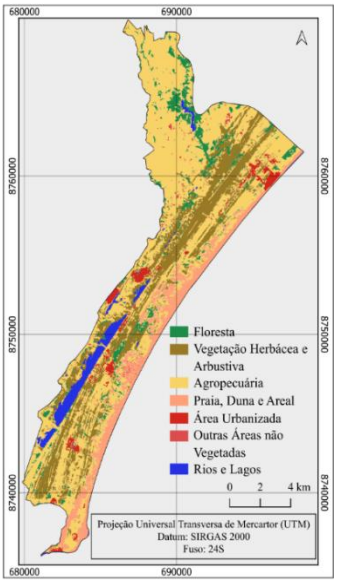



Figura 3 – Mapa de uso do solo. Fonte: Adaptado de Mapbiomas – Coleção 10 (2023).

A Tabela 2 apresenta a distribuição percentual das classes e os respectivos valores ponderados que compõem o índice final de transformação antrópica. De acordo com a classificação proposta por Cruz et al. (1998), o valor final de 5,105 enquadra a bacia na categoria de alta transformação antrópica. Esse resultado reflete, sobretudo, a expressiva participação das pastagens e dos mosaicos agropecuários, que, juntos, representam mais da metade da área total, além da contribuição, ainda que percentualmente menor, das áreas urbanizadas, cuja elevada ponderação amplia significativamente o índice. Em um contexto hidrogeológico caracterizado por aquíferos rasos e sedimentos de elevada

permeabilidade, como ocorre em setores da bacia, essa condição favorece a infiltração de cargas difusas provenientes de atividades agropecuárias e de efluentes urbanos, potencializando riscos de contaminação e alterações na composição hidrogeoquímica das águas subterrâneas.

Tabela 2 – Valores do ITA. Fonte: Autor, 2025.

| Tipos de Uso e Cobertura | Área (%) | ITA |
|---|---|---|
| Formação Florestal | 3,6883 | 0,0368829 |
| Mangue | 0,0008 | 0,0000078 |
| Campo Alagado e Área Pantanosa | 0,1539 | 0,0030786 |
| Formação Campestre | 0,0133 | 0,0002656 |
| Pastagem | 38,2932 | 3,0634563 |
| Mosaico de Usos | 14,5973 | 1,0218144 |
| Praia, Duna e Areal | 9,9866 | 0,0998657 |
| Área Urbanizada | 2,8506 | 0,2708040 |
| Outras Áreas não Vegetadas | 0,6513 | 0,0521027 |
| Rio, Lago e Oceano | 3,8286 | 0,0382858 |
| Restinga Arbórea | 3,0395 | 0,0607905 |
| Restinga Herbácea | 22,8967 | 0,4579330 |
| **Total** | **100** | 5,1052872 |

Dessa forma, a análise integrada do uso do solo e do Índice de Transformação Antrópica (ITA) reforça a importância da vegetação natural remanescente, como formações florestais, manguezais e restingas, na proteção dos aquíferos, por favorecer a infiltração, reduzir o escoamento superficial e atuar como barreira natural contra processos de contaminação.

A distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos evidencia padrões consistentes de mineralização e de interação entre as águas subterrâneas e o substrato geológico na bacia estudada (Figura 5). Os sólidos dissolvidos totais (SDT) representam a soma de sais minerais dissolvidos na água, refletindo o grau de mineralização e sendo utilizados como indicador da qualidade e da potabilidade. Na bacia estudada, o parâmetro SDT (Figura 4a) apresenta valores mais baixos na região sudoeste, variando entre 200 e 300 mg/L, e aumenta gradualmente em direção ao nordeste, onde atinge classes superiores a 680 mg/L, com áreas acima de 1300 mg/L em trechos próximos a planícies e lagunas costeiras. Essa configuração espacial coincide com a ocorrência de Gleissolos e Espodossolos observada no mapa pedológico. Essa elevada mineralização pode estar associada a processos de intrusão marinha, à concentração de sais em ambientes mal drenados e à dissolução de

carbonatos em sedimentos lagunares, além do aporte difuso proveniente de áreas de pastagens e de zonas urbanizadas.

O padrão observado para o cálcio (Figura 4b) reforça essa interpretação, pois esse elemento está geralmente relacionado à dissolução de minerais carbonáticos decorrente da interação água-rocha. As concentrações mais elevadas localizam-se ao longo do corredor central e na faixa leste da bacia, atingindo valores entre 1,50 e 3,04 meq/L. A correspondência espacial com áreas de depósitos lagunares e planícies costeiras sugere que a principal fonte de $Ca^{2+}$ seja a dissolução de fragmentos carbonáticos presentes nos sedimentos. Em contraste, nas regiões dominadas por Argissolos sobre o Grupo Barreiras, os teores são consideravelmente mais baixos.

O bicarbonato (Figura 4c) constitui um dos parâmetros mais importantes na avaliação da qualidade da água subterrânea, pois se origina principalmente da reação entre o gás carbônico do solo e a água, além da dissolução de minerais carbonáticos. Esse íon ocorre em maiores concentrações nas regiões costeiras e lagunares, onde o substrato contém sedimentos ricos em carbonatos. Em contrapartida, no interior da bacia, sobre o Grupo Barreiras, formado predominantemente por sedimentos arenosos silicáticos, os valores de $HCO_3^-$ são menores, refletindo a reduzida presença de minerais carbonáticos. Em áreas com Gleissolos mal drenados, o acúmulo de matéria orgânica e condições mais redutoras também influenciam o equilíbrio desse íon.

A condutividade elétrica (CE) segue o mesmo gradiente observado para SDT e cálcio (Figura 4d), apresentando valores mais baixos no setor sudoeste da bacia e aumentos acentuados em direção à costa. Em áreas com Gleissolos hidromórficos, a CE exibe picos localizados, refletindo a acumulação de sais solúveis em ambientes com drenagem deficiente e elevada evaporação. A elevação da CE nas zonas costeiras também pode indicar a intrusão marinha, representando risco de salinização progressiva dos aquíferos.

A concentração de amônia (Figura 4e) apresenta uma distribuição espacial distinta em relação aos demais parâmetros. Os valores mais elevados ocorrem em regiões próximas a lagoas e áreas de Gleissolos, além de incidirem sobre manchas de uso antrópico, como pastagens e zonas urbanizadas. Nessas condições, a amônia tende a se acumular em razão de processos redutores do solo, que favorecem a amonificação e inibem a nitrificação, além de aportes difusos de origem doméstica e agropecuária, especialmente em locais com ausência de saneamento adequado. A presença de amônia na água subterrânea constitui, portanto, um indicador de contaminação recente, reforçando a vulnerabilidade de aquíferos sob influência antrópica.

O nível estático (Figura 4f) do aquífero, que representa a profundidade da superfície freática, constitui um parâmetro importante para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas. O

comportamento do nível estático complementa a análise hidrogeoquímica. Níveis mais rasos, entre 1,9 e 2,9 m, concentram-se em áreas costeiras e planícies, enquanto níveis mais profundos, atingindo até 14 m, ocorrem nos Tabuleiros do Grupo Barreiras. Essa distribuição está intimamente associada à geomorfologia local: áreas planas e de baixa altitude apresentam recarga mais rápida, aquífero raso e maior suscetibilidade à contaminação e à mistura com água salobra. Em contrapartida, os tabuleiros, mais elevados e com solos argiloarenosos, apresentam aquífero mais profundo, com maior tempo de residência da água e menor vulnerabilidade.

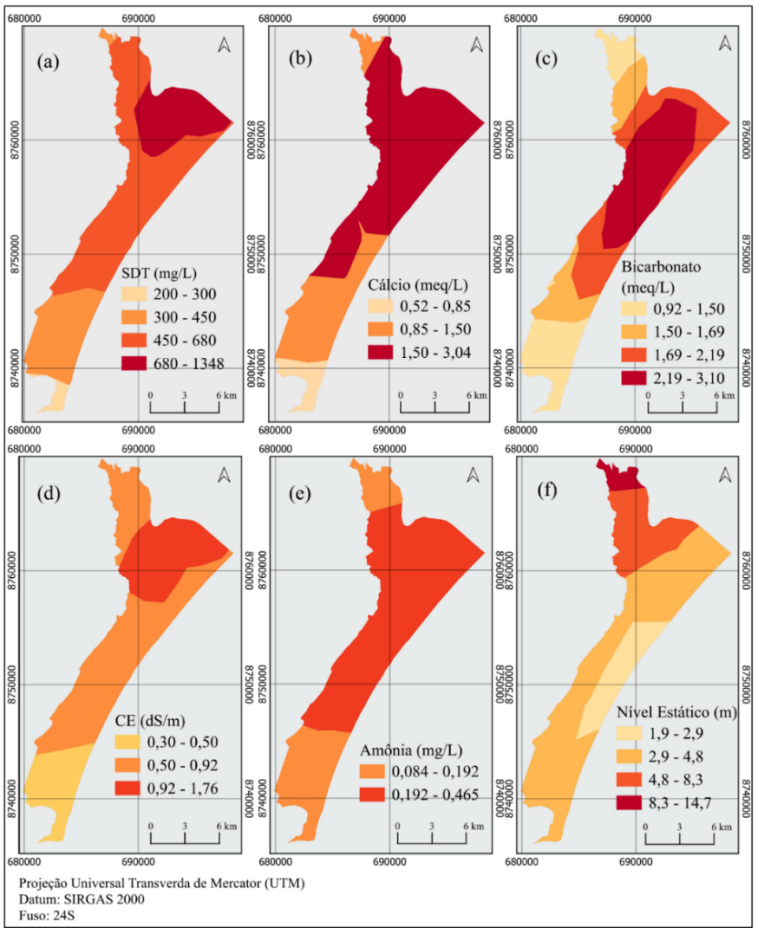



Figura 4 – Espacialização dos parâmetros físico-químicos. Fonte: Adaptado de Resende, Cruz e Amorim (2009).

Ressalta-se que os dados hidrogeoquímicos utilizados neste estudo são provenientes do Atlas de Qualidade da Água Subterrânea do Estado de Sergipe (Resende; Cruz; Amorim, 2009), que representa a base regional mais abrangente disponível para a área de estudo. Sua integração com o mapeamento de uso e cobertura da terra de 2023 permitiu analisar a correspondência espacial entre os parâmetros hidrogeoquímicos, as características ambientais e o atual grau de transformação antrópica da bacia, fornecendo subsídios para a interpretação integrada da vulnerabilidade hidroambiental.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que os padrões de SDT, cálcio, bicarbonato e condutividade elétrica refletem processos naturais associados à interação água-rocha, à presença de sedimentos carbonáticos, à dinâmica lagunar e à influência marinha, sobretudo nas áreas costeiras, onde se observam aquíferos mais rasos e maior grau de mineralização. Em contrapartida, os setores interiores, associados aos Tabuleiros do Grupo Barreiras, apresentam menores concentrações desses parâmetros, aquíferos mais profundos e menor suscetibilidade à salinização.

O Índice de Transformação Antrópica (ITA), com valor final de 5,105, classificou a bacia como de alta transformação antrópica, evidenciando a forte influência das pastagens, mosaicos agropecuários e áreas urbanizadas sobre a dinâmica ambiental. Esse cenário, associado à elevada permeabilidade dos sedimentos costeiros e à reduzida profundidade do nível freático em parte da bacia, amplia a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação e à alteração da composição hidrogeoquímica da água subterrânea.

## REFERÊNCIAS


CRUZ, C. B. M.; TEIXEIRA, A. D. A.; BARROS, R. D.; ARGENTO, M. S. F.; MAYR, L. M.; MENEZES, P. D. (1998). *"Carga antrópica da bacia hidrográfica da Baía de Guanabara."* In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 9, p. 99-109.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2018). "*Sistema Brasileiro de Classificação de Solos".* Embrapa Solos Rio de Janeiro-RJ, 356p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). "*Mapeamento topográfico sistemático terrestre do Brasil. Pedologia 1:250.000 [Internet]".* IBGE Rio de Janeiro-RJ. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html.

LÉMECHEV, T. (1982). "*On hydrological heterogeneity catchment morphology and catchment response".* Journal of Hydrology, 100, pp. 357-375.

RESENDE, R. S.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A. (2009). "*Atlas de qualidade da água subterrânea no Estado de Sergipe".* Embrapa Tabuleiro Costeiros Aracaju-SE, 52p.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (2005). "*Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação."* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 10(4), pp. 5-18.

VARGAS, T.; BELLADONA, R.; SGORLA, V.; SBABO, L. C. (2022). "*Vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea como alicerce na gestão do uso do solo em bacias de captação."* Revista Brasileira de Geografia Física, 15(2), pp. 710-720.