XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

ANÁLISE MULTICRITÉRIO NO MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO GRANULAR DA BACIA CAUEIRA/ABAÍS (SE)

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

RESUMO – A suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas resulta da interação entre atributos físicos do meio, sendo potencializada em bacias costeiras por materiais permeáveis e relevo suavizado, que favorecem a recarga e ampliam a vulnerabilidade dos aquíferos à poluição. Assim, este estudo visou elaborar um mapa de suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica Caueira/Abaís, em Sergipe, integrando o Processo Analítico Hierárquico (AHP) a técnicas de geoprocessamento para hierarquizar os condicionantes geomorfométricos do terreno. A metodologia baseou-se na extração de variáveis morfométricas derivadas de Modelos Digitais de Elevação (MDE), como declividade, densidade de drenagem, formas do terreno e orientação das vertentes, com posterior atribuição de pesos para aplicação do AHP e integração dos critérios por álgebra de mapas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados evidenciaram predominância de áreas com alta e muito alta suscetibilidade associadas a baixas declividades, reduzida densidade de drenagem e formas de vertentes convergentes, as quais favorecem a infiltração e a recarga. Os produtos gerados oferecem suporte técnico ao planejamento ambiental, permitindo identificar áreas prioritárias para monitoramento e gestão, além de subsidiar estratégias preventivas de proteção dos aquíferos frente às pressões antrópicas e à salinização natural.

ABSTRACT– The susceptibility to groundwater contamination results from the interaction between physical attributes of the environment, potentiated in coastal basins by permeable materials and smooth relief, which favor recharge and increase aquifer vulnerability to pollution. Thus, this study aimed to develop a groundwater contamination susceptibility map in the Caueira/Abaís Hydrographic Basin, in Sergipe, integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) with geoprocessing techniques to hierarchize the geomorphometric constraints of the terrain. The methodology was based on the extraction of morphometric variables derived from Digital Elevation Models (DEMs), such as slope, drainage density, landforms, and slope orientation, with subsequent assignment of weights for the application of AHP and integration of the criteria by map algebra in a Geographic Information System (GIS) environment. The results showed a predominance of areas with high and very high susceptibility associated with low slopes, reduced drainage density, and convergent slope forms, which favor infiltration and recharge. The generated products support environmental planning by identifying priority areas for monitoring and management, while contributing to preventive strategies for aquifer protection against anthropogenic pressures and natural salinization.

Palavras-Chave – Água subterrânea. Parâmetro geomorfométrico. 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 água subterrânea constitui um recurso estratégico para o abastecimento humano, a produção agrícola e a manutenção de ecossistemas, especialmente em regiões onde a disponibilidade hídrica superficial é limitada ou apresenta elevada sazonalidade. Nesse contexto, a proteção da qualidade desse recurso torna-se fundamental, uma vez que a contaminação pode ocorrer de forma difusa e persistente, além de apresentar difícil remediação quando atinge o aquífero (Andrade; Nascimento, 2025). Assim, a identificação de áreas mais suscetíveis à contaminação representa uma etapa essencial para apoiar o planejamento ambiental e orientar ações preventivas de gestão e monitoramento.

A suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas depende diretamente da interação entre atributos do meio físico que controlam a infiltração, a percolação de solutos e a recarga (Feitosa *et al.*, 2008). Em bacias costeiras, por exemplo, a presença de materiais mais permeáveis e de relevo suavizado pode favorecer a recarga subterrânea e, simultaneamente, ampliar a vulnerabilidade do aquífero a fontes potenciais de poluição. Dessa forma, análises espaciais que integrem condicionantes geomorfológicos e hidrológicos permitem compreender melhor os padrões de maior ou menor suscetibilidade à contaminação, contribuindo para diagnósticos ambientais mais consistentes.

Para avaliar a suscetibilidade em ambientes controlados por múltiplos condicionantes, técnicas de análise multicritério têm se mostrado particularmente eficientes. Entre essas abordagens, destaca-se o Processo Analítico Hierárquico (AHP), proposto por Saaty (1980), por permitir quantificar a importância relativa entre variáveis ambientais a partir de comparações pareadas sistemáticas. O método estrutura uma matriz de julgamentos, na qual cada critério é comparado aos demais conforme sua influência no fenômeno analisado, resultando em pesos relativos e aplicando medidas de consistência que permitem verificar a coerência interna dos julgamentos efetuados.

A aplicação do AHP em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilita integrar critérios físicos do terreno em um modelo espacial contínuo, no qual os fatores são padronizados, ponderados e combinados para gerar um índice final de suscetibilidade. Estudos indicam que a integração de variáveis morfométricas, como declividade, densidade de drenagem, orientação das vertentes e formas de terreno, apresenta elevada capacidade de representar padrões relacionados ao escoamento superficial, à infiltração e à recarga, com potencial para discriminar zonas mais vulneráveis em bacias costeiras e ambientes sedimentares (Arulbalaji *et al.*, 2019).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo elaborar um mapa de suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica Caueira/Abaís, em Sergipe, a partir da integração do método AHP com técnicas de geoprocessamento, incorporando critérios físico-

territoriais associados à dinâmica do relevo e da drenagem, de modo a subsidiar análises ambientais, bem como apoiar a definição de áreas prioritárias para gestão e monitoramento.

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, situando-se na Mesorregião do Leste Sergipano e na Microrregião de Estância. A bacia localiza-se entre as coordenadas geográficas 11º07'52'' e 11º25'51'' S e 37º10'59'' e 37º21'09'' W. O acesso à região pode ser realizado a partir de Aracaju, pela BR-101, percorrendo aproximadamente 70 km até o limite da bacia.

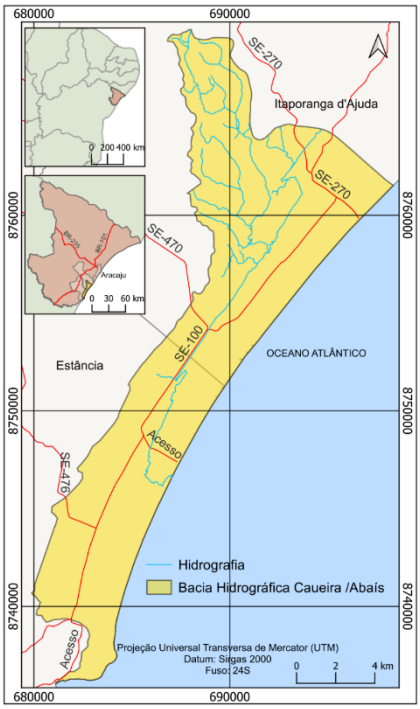


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Adaptado de SEMAC (2023).

A Bacia Hidrográfica Caueira/Abaís é formada por aquíferos granulares de alta permeabilidade, o que favorece o armazenamento de água subterrânea. Contudo, essas mesmas características aumentam a vulnerabilidade à contaminação por atividades urbanas, industriais e agropecuárias (Andrade *et al.*, 2021). A geologia é composta pelos arenitos do Grupo Barreiras e pelos Depósitos Litorâneos Holocênicos (Santos *et al.*, 1998), ambos constituídos por sedimentos arenosos inconsolidados ou pouco consolidados. Os principais tipos de solos desenvolvidos nesse ambiente geomorfológico de planícies fluviomarinhas são os argissolos, espodossolos, gleissolos e neossolos, os quais possuem taxas de infiltração de média a baixa, de acordo com Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005).

A análise da suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica Caueira/Abaís foi desenvolvida por meio da integração entre técnicas de geoprocessamento e o Processo Analítico Hierárquico (AHP). O procedimento iniciou-se com a obtenção das variáveis morfométricas derivadas de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Para a elaboração do mapa de densidade de drenagem, utilizaram-se os dados matriciais do MDE-PALSAR. As demais variáveis, como declividade, formas de terreno e orientação das vertentes, foram obtidas a partir do MDE do projeto Topodata. Esses critérios foram selecionados devido ao papel reconhecido que exercem nos processos de infiltração, redistribuição da água no solo e controle geomorfológico do fluxo superficial, aspectos amplamente discutidos em estudos espaciais aplicados à avaliação da vulnerabilidade hidroambiental em ambientes de sedimentos arenosos (Valeriano; Carvalho Júnior, 2003; Arulbalaji *et al.*, 2019).

A hierarquia dos critérios no AHP foi definida a partir da influência hidrológica e geomorfológica de cada variável sobre a infiltração. A declividade recebeu o maior peso por controlar o escoamento superficial e o tempo de permanência da água no solo, sendo um dos principais fatores associados à recarga. A densidade de drenagem foi o segundo critério mais importante por refletir o grau de dissecação da bacia e a eficiência do escoamento, influenciando diretamente o potencial de infiltração. As formas de terreno foram posicionadas em terceiro lugar por indicarem padrões de curvaturas horizontais e verticais das encostas, que influenciam diretamente o escoamento superficial e a infiltração da água. A orientação das vertentes recebeu o menor peso por afetar a infiltração de forma indireta, em função das diferenças de insolação e umidade.

Após a definição dos critérios, cada variável foi reclassificada em classes de suscetibilidade conforme seu comportamento hidrológico, sendo então definidos os pesos das variáveis (Tabela 1). Áreas de baixa declividade foram associadas às maiores classes por favorecerem maior infiltração. Nas formas do terreno, superfícies divergentes foram vinculadas à menor suscetibilidade, enquanto formas convergentes e côncavas, que direcionam e concentram o fluxo, receberam valores mais altos. A densidade de drenagem foi classificada de forma inversa, atribuindo-se maior suscetibilidade às áreas com baixa densidade, por favorecerem maior recarga. Para a orientação das vertentes, considerou-se a distribuição da insolação no hemisfério sul, de modo que vertentes voltadas para oeste foram associadas às classes de maior suscetibilidade, em decorrência da maior incidência de raios solares. Com a exposição prolongada a altas temperaturas, o solo perde umidade, enquanto a concentração de sais solúveis aumenta (Silva; Nascimento, 2024).

Em seguida, aplicou-se o AHP para definir a importância relativa de cada critério. A matriz de comparação par a par foi estruturada com base na relevância de cada variável para os processos de

infiltração e recarga em bacias hidrográficas (Tabela 2). O índice de consistência permaneceu dentro dos limites recomendados por Saaty, confirmando a consistência interna das comparações realizadas.

Tabela 1. Atribuição dos pesos às variáveis Declividade (Dec), Densidade de Drenagem (DD), Formas de Terreno (FT) e Orientação das Vertentes.

Dec (%)	P	DD	P	FT	P	Orientação	P
0-3	9	Muito Baixa	9	Convergente Côncavo	9	Norte	1
3-8	7	Baixa	7	Convergente Retilíneo	8	Nordeste	2
8-20	5	Média	5	Convergente Convexo	7	Leste	3
20-30	3	Alta	3	Planar Côncavo	6	Sudeste	4
>30	1	Muito Alta	1	Planar Retilíneo	5	Sul	5
				Planar Convexo	4	Sudoeste	6
				Divergente Côncavo	3	Oeste	7
				Divergente Retilíneo	2	Noroeste	8
				Divergente Convexo	1		

Fonte: Adaptado de Nascimento; Dinísio Júnior (2025), Silva; Nascimento (2024).

Tabela 2: Matriz de comparação par a par.

Critérios	Dec	DD	FT	Orientação	Autovetor
Declividade	1	2	3	5	0,4380
Densidade de Drenagem	0,5	1	2	4	0,2986
Formas de Terreno	0,3333	0,5	1	3	0,1924
Orientação das Vertentes	0,2	0,25	0,3333	1	0,0710

Fonte: Autores (2026).

Após a ponderação, os mapas temáticos reclassificados foram integrados por meio de álgebra de mapas, gerando um mapa contínuo de suscetibilidade. Em seguida, os valores foram agrupados em cinco classes finais (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta). Esse procedimento metodológico possibilitou combinar informações topográficas e hidrológicas de maneira sistemática, resultando em um modelo espacial coerente com os padrões descritos em estudos de suscetibilidade e vulnerabilidade de aquíferos em regiões costeiras com características similares (Arulbalaji *et al.*, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de declividade (Figura 2a) evidencia que grande parte da bacia apresenta relevo com inclinações entre 0% e 8%, configurando superfícies planas ou suavemente onduladas, condição que favorece maior tempo de residência da água no solo e, consequentemente, maior infiltração. Declividades reduzidas aumentam o potencial de infiltração, enquanto maiores inclinações aceleram o escoamento superficial e diminuem a recarga. As áreas com declividades superiores a 20% são

pouco representativas e concentram-se na porção norte e noroeste da bacia. A distribuição das declividades reforça a predominância de superfícies propícias à recarga, fator que atua como condicionante primário da elevada suscetibilidade à contaminação.

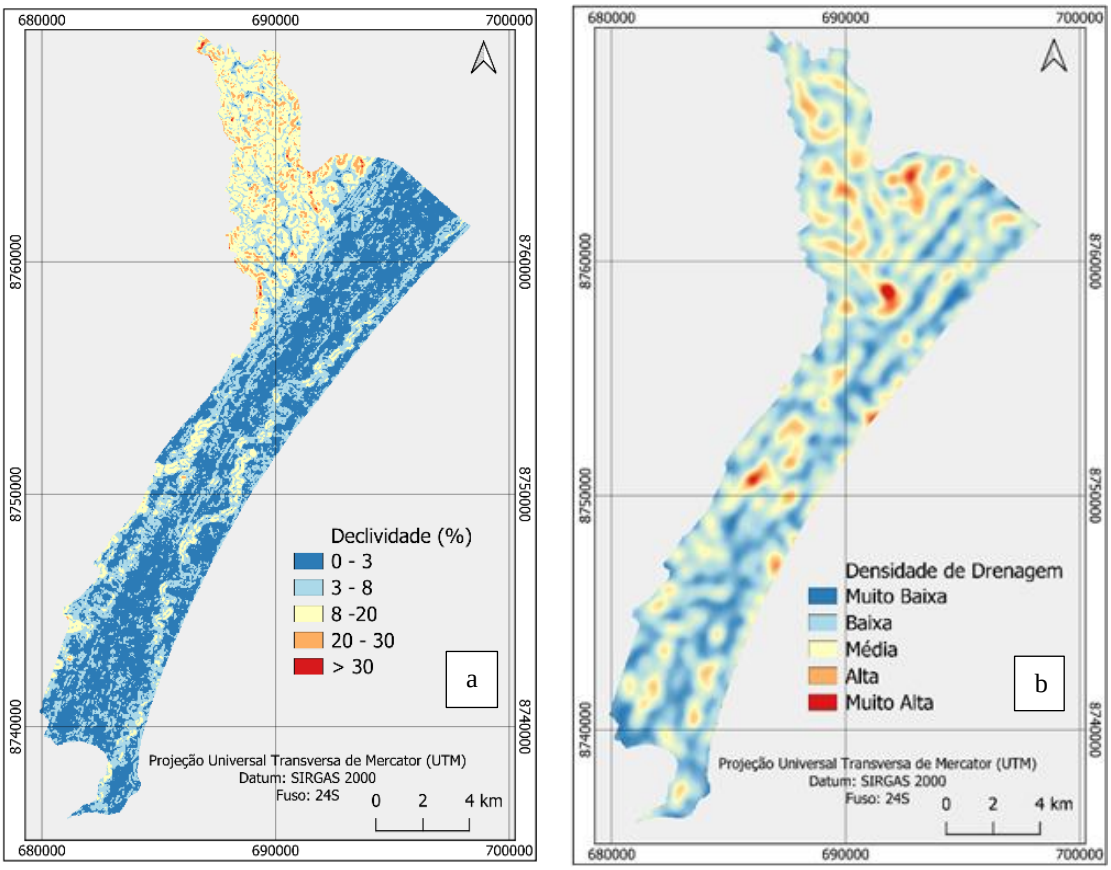


Figura 2. Mapas de classes de declividade (a) e densidade de drenagem (b)

A densidade de drenagem (Figura 2b) apresenta padrões que refletem a dissecação suave do relevo. Áreas com baixa densidade dominam grande parte da bacia, especialmente nos setores de relevo suavemente ondulado, favorecendo a infiltração e elevando a suscetibilidade à contaminação. Bacias com drenagem pouco desenvolvida apresentam maior potencial de recarga direta devido ao aumento do tempo de permanência da água na superfície e à menor eficiência do escoamento superficial. Menores densidades estão associadas à menor dissecação do relevo e à maior retenção hídrica em ambientes de sedimentos arenosos pouco consolidados. Assim, as áreas de baixa densidade identificadas no mapa configuram zonas preferenciais de infiltração, coerentes com as classes mais altas de suscetibilidade à contaminação.

As formas do terreno (Figura 3a) referem-se ao caráter divergente/convergente e convexo/concâvo do fluxo d'água sobre o terreno (escoamento e infiltração) em projeção horizontal e vertical, respectivamente. Na área de estudo, estas formas estão distribuídas de maneira fragmentada em toda a bacia, sem formação de padrões espaciais concentrados. As classes convergentes e

côncavas aparecem pontualmente associadas a talvegues e depressões locais, favorecendo maior infiltração, enquanto as classes divergentes e convexas ocorrem em pequenas elevações e cristas suaves, reduzindo a retenção hídrica.

A orientação das vertentes é um parâmetro geomorfométrico derivado do relevo, utilizado para avaliar a exposição das encostas à radiação solar, influenciando a distribuição da insolação, da umidade do solo, da infiltração e do escoamento superficial, além de afetar a evaporação da água no solo. Na área de estudo (Figura 3b) apresenta distribuição equilibrada entre as direções, sem concentração espacial que indique um padrão específico na bacia. Em regiões do Hemisfério Sul, vertentes voltadas para o norte e oeste tendem a receber maior carga de radiação solar acumulada, o que intensifica as perdas por evaporação, diminuindo o tempo de residência da água.

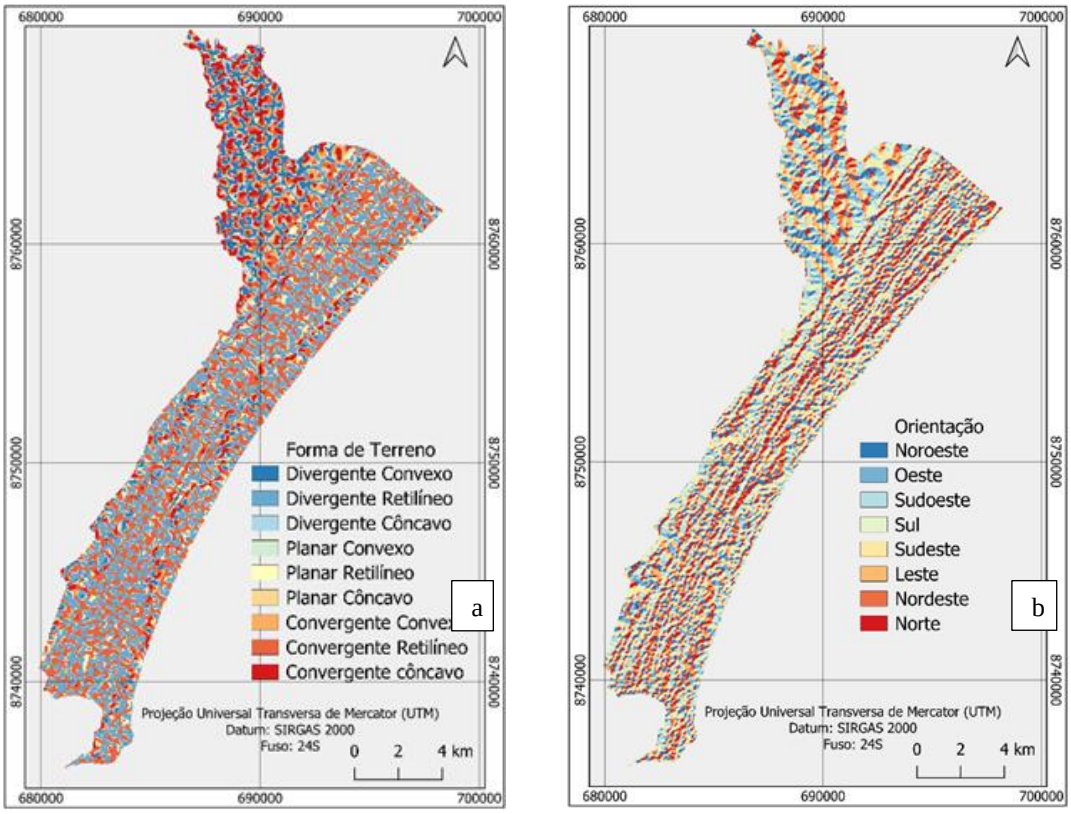


Figura 3. Mapas de formas do terreno (a) e orientação das vertentes (b)

A integração dos critérios por meio do método AHP resultou em um mapa final (Figura 4), que sintetiza a influência conjunta dos quatro fatores analisados. As áreas classificadas como alta e muito alta suscetibilidade ocorrem em pontos onde coincidem baixa declividade, baixa densidade de drenagem e formas do terreno convergentes e côncavas. As áreas de média suscetibilidade funcionam como zonas de transição, ocorrendo principalmente no centro da bacia, onde há variações suaves no relevo e na drenagem, sem, contudo, apresentar o nível de convergência morfológica observado no setor leste.

As zonas classificadas como baixa e muito baixa suscetibilidade localizam-se predominantemente nos setores norte e noroeste, onde o relevo é mais inclinado e a densidade de drenagem é maior. Esses fatores contribuem para o aumento da velocidade do escoamento superficial, reduzindo o tempo de permanência da água e, portanto, a infiltração. Ao analisar o conjunto, verifica-se que a suscetibilidade elevada não é homogênea, mas responde a padrões ambientais integrados, evidenciando o forte controle geomorfológico da área nos processos de infiltração e recarga.

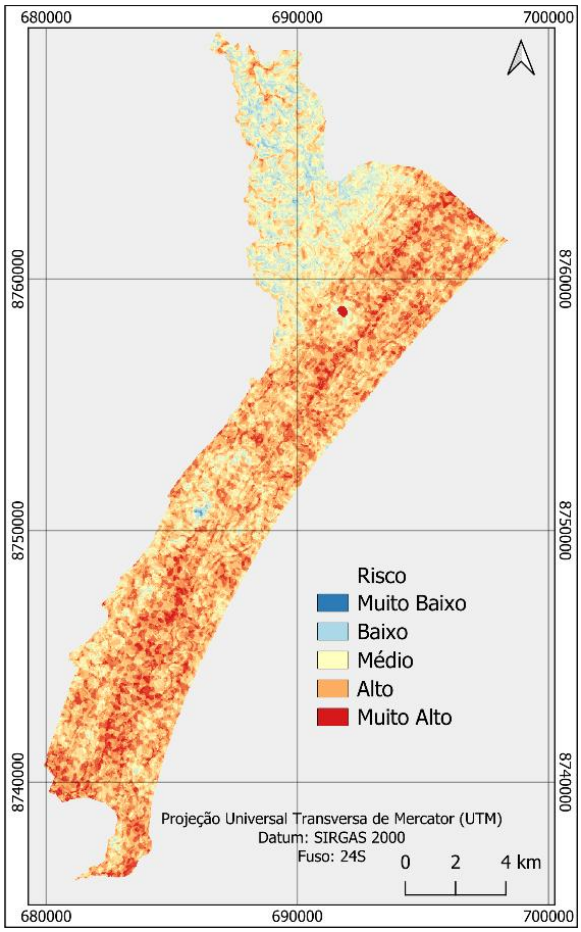


Figura 4 – Mapa de suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas.

CONCLUSÕES

A integração entre AHP e geoprocessamento permitiu representar, de forma sistemática, a distribuição da suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica Caueira/Abaís, em Sergipe. A predominância de superfícies planas, drenagem pouco desenvolvida e formas convergentes e côncavas explica a expressiva presença de áreas de alta e muito alta suscetibilidade, especialmente pela combinação entre baixa declividade, reduzida densidade de drenagem e presença de formas convergentes e côncavas, que favorecem a infiltração e a recarga. O modelo demonstrou alto grau de coerência espacial e confirmou a influência determinante da

geomorfologia local sobre os processos de recarga subterrânea e a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos granulares. Os produtos gerados constituem suporte técnico para o planejamento ambiental, permitindo a identificação de áreas prioritárias para monitoramento e gestão, além de contribuir para estratégias preventivas de proteção dos aquíferos frente às pressões antrópicas e aos processos naturais de salinização.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. O.; NASCIMENTO, P. S. R. (2025). *"Estimativa da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (SE)"*. Revista Internacional de Ciências 15(1), pp. 77–96.

ANDRADE, R. O.; SILVA, D. B. S.; NASCIMENTO, P. S. R. (2021). "*Análise da qualidade da água subterrânea para dessedentação animal"* in Anais do VI Congresso Baiano de Engenharia Ambiental e Sanitária, Salvador, BA.

ARULBALAJI, P.; PADMALAL, D.; SREELASH, K. (2019). "*GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern Western Ghats, India"*. Scientific reports 9(2082), pp. 1-17.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (2008). "Hidrogeologia: conceitos e aplicações". CPRM/LABHID Rio de Janeiro-RJ, 812p.

NASCIMENTO, P. S. R.; DINIZIO JUNIOR, L. S. (2025). "*Análise hierárquica aplicada a riscos geo-hidrológico: análise espaço-temporal de alagamento e inundação no município de Aracaju (SE)"*. Revista Mineira de Recursos Hídricos 6, pp. 1-29.

SAATY, T. L. (1980). "*The Analystic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation"*. New York: Mcgraw-hill, 287p.

SANTOS, R. A. D.; MARTINS, A. A.; NEVES, J. P. D.; LEAL, R. A. (1998). "*Geologia e recursos minerais do estado de Sergipe"*. CPRM/CODISE Rio de Janeiro-RJ, 208p.

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), p. 5-18.

SILVA A. T. L.; NASCIMENTO, P. S. R. (2024). "*Caracterização da vulnerabilidade à desertificação por geotecnologias no sul do estado de Sergipe."* Scientia Plena 20(8), pp. 1-12.

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. (2003). *"Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias."* Revista Brasileira de Geomorfologia 4(1), pp. 1-3.