



Geoprocessamento Aplicado à Análise Espacial das Áreas de Fragilidade Ambiental na Bacia do Nipiode na província da Zambézia, Moçambique

Isac Mussama¹, Zambujal Ossulande¹

RESUMO: Este estudo avaliou a fragilidade ambiental da bacia do Nipiode na província da Zambézia, Moçambique com base em cinco fatores físicos: tipo de solo, uso e cobertura da terra, precipitação, altimetria e declividade. Os dados foram obtidos de fontes como CENACARTA, imagens Sentinel-2 e o Modelo Digital de Elevação (TOPODATA), sendo processados e integrados no programa ArcGIS 10.3. Aplicou-se o método Processo de Hierarquia Analítica (AHP) para hierarquizar os fatores e atribuir pesos relativos, permitindo classificar as áreas em cinco níveis de fragilidade ambiental: baixa, moderada, forte, muito forte e urbana. Os resultados mostraram que 50,01% da área apresenta fragilidade baixa, enquanto 30,97% apresentam fragilidade forte.

Palavras-chave: Fragilidade ambiental; Uso do solo; Planejamento ambiental; Preservação.

Geoprocessing Applied to Spatial Analysis of Areas of Environmental Fragility in the Nipiode Basin provincial da Zambezia, Mozambique

ABSTRACT: This study assessed the environmental fragility of the Nipiode basin in Zambezia province, Mozambique, based on five physical factors: soil type, land use and cover, rainfall, altimetry and slope. The data was obtained from sources such as CENACARTA, Sentinel-2 images and the Digital Elevation Model (TOPODATA), and was processed and integrated into the ArcGIS 10.3 program. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied to rank the factors and assign relative weights, allowing the areas to be classified into five levels of environmental fragility: low, moderate, strong, very strong and urban. The results showed that 50.01% of the area has low fragility, while 30.97% has strong fragility.

Keywords: Environmental Fragility; Land Use; Environmental Planning; Preservation.

INTRODUÇÃO

O conceito de fragilidade ambiental é fundamentado por Tricart (1977), Ross (1994), Sporl e Ross (2004) e Amorim *et al.* (2012), que compreendem a fragilidade como resultado das características ambientais naturais, combinadas com os impactos das atividades humanas, que alteram o equilíbrio dinâmico dos processos ambientais. O mapa de fragilidade ambiental é uma ferramenta essencial para o planejamento territorial, permitindo avaliar as potencialidades e limitações do ambiente (Kawakubo *et al.*, 2005). A metodologia de fragilidade empírica proposta por Ross (1994) baseia-se na interação entre os componentes físicos e bióticos da natureza, e envolve a análise de dados como relevo, solo, geologia, clima, uso da terra e vegetação.

Um tema central na disponibilidade de recursos hídricos é o planejamento e gestão adequados. Nesse sentido, um desafio atual é integrar a gestão da demanda e o desenvolvimento socioeconômico de acordo com a vocação e fragilidade ambiental (Sporl 2001; Silva e Santos 2004; Manfre *et al.* 2013; Bacani *et al.* 2015; Cunha e Bacani 2016; Almeida *et al.*, 2016). Spoerl e Ross (2004) afirmaram que qualquer mudança nos diferentes componentes da natureza, por exemplo, relevo, cobertura vegetal, exposição do solo, recursos hídricos e clima, pode comprometer a

funcionalidade do sistema, interrompendo seu estado de equilíbrio dinâmico (Montano e de Souza, 2016).

O recente avanço das geotecnologias, incluindo técnicas de sensoriamento remoto e análise espacial usando Sistemas de Informação Geográfica (SIG), avaliações morfométricas, características físicas do terreno e mapeamento de usos e coberturas do solo, foi simplificado. Vários autores realizaram pesquisas nessa direção e apontaram a efetividade e otimização de tempo, recursos humanos e financeiros em estudos que contribuem para a gestão de bacias hidrográficas especialmente para conservação do solo e da água (Ali & Ikbali, 2015; Kandus *et al.*, 2018; Asfaw *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020).

A análise de mapas temáticos ambientais individuais forneceu informações cruciais para compreender as peculiaridades dos principais vetores de processos erosivos ao longo da área de estudo.

O objetivo do tema “Geoprocessamento Aplicado à Análise Espacial das Áreas de Fragilidade Ambiental na Bacia do Nipiode” é empregar instrumentos de geoprocessamento para identificar e examinar as regiões de fragilidade ambiental na bacia hidrográfica de Nipiode. O estudo tem como objetivo determinar as áreas mais suscetíveis a processos de deterioração ambiental na Bacia do Nipiode.

MATERIAIS E MÉTODOS

Local de estudo

A Bacia de Nipiode está localizada nas coordenadas 16°29'26.57" S e 37°40'20.05" L, no distrito de Ile, na província da Zambézia, em Moçambique. A área da bacia abrange 4.317 km² e está limitada a norte e nordeste pelo distrito de Alto

Molócue, a noroeste pelo distrito de Gurué, a oeste pelos distritos de Namarroi e Lugela, a sul pelos distritos de Mocuba e Mulevala, e a leste pelo distrito de Gilé. Segundo os dados do INE (2023), o distrito de Ile, possuía uma superfície total de 2.933,6 km² e uma população de 214.027 habitantes. A densidade populacional é de 72,96 habitantes por km².

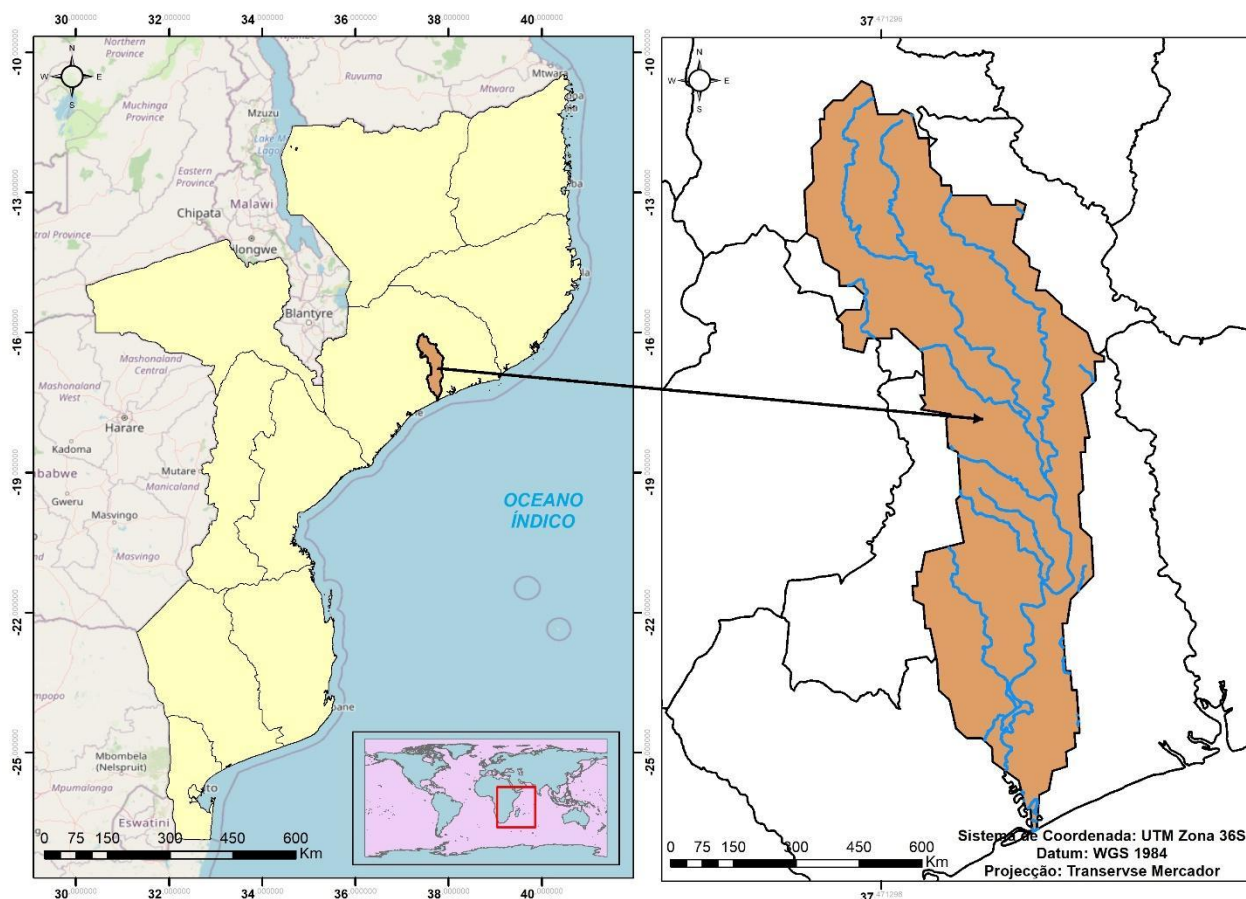


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica de Nipiode, distrito do Ile. Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

De acordo com os dados do INE (2012), o distrito do Ile, onde se localiza a bacia hidrográfica do Nipiode, apresenta uma temperatura mínima absoluta de 12,0°C, máxima absoluta de 41,7°C e temperatura média anual de 24,8°C. A umidade relativa média do ar é de 73,4%. No que se refere à pluviosidade, os dados da CENACARTA indicam que o total anual varia entre 1.000 mm e 1.400 mm, com maior concentração de chuvas nos meses de novembro a março, caracterizando um clima tropical úmido com estação seca bem definida. As paredes das casas no distrito são predominantemente de bloco de adobe (87,7%). Outros materiais incluem paus maticados (5,3%) e bloco de cimento (0,3%). Quanto à cobertura, 97,9% das casas utilizam capim/colmo/palmeira, enquanto outras opções incluem chapa de zinco (1,4%) e chapa de lusalite (0,2%). O pavimento mais comum é o adobe, presente

em 78,4% das residências, seguido por 19,6% que não possuem pavimento. Outras opções incluem mosaico/tijoleira (0,2%) e madeira/parquet (0,1%). Em relação ao saneamento básico, 81,5% dos agregados familiares não possuem latrina. As latrinas tradicionais não melhoradas são usadas por 16,9% das residências, e 1,3% têm latrinas tradicionais melhoradas. Latrinas melhoradas e sistemas com fossa séptica representam apenas 0,1% e 0,2%, respectivamente. Outros tipos de serviços sanitários correspondem a 0,6% (INE, 2013). A geologia determina a disponibilidade e qualidade da água, a estabilidade do terreno e a presença de minerais. Na Bacia de Nipiode, rochas do Pré-Câmbrio (cristalinas, metamórficas e ígneas) e formações sedimentares recentes ditam a drenagem, infiltração e composição química da água e do solo. Estruturas geológicas como falhas e fraturas influenciam o fluxo

de água subterrânea e superficial, impactando a recarga de aquíferos e o regime dos rios. Os tipos de solos predominantes, que variam em textura (argilosos, arenosos, siltosos), estrutura, profundidade e fertilidade, são cruciais para a hidrologia, agricultura e biodiversidade. Solos argilosos retêm mais água e favorecem o escoamento, enquanto os arenosos são mais permeáveis e permitem maior infiltração. A aptidão agrícola e a suscetibilidade à erosão são determinadas por essas características, sendo fundamentais para o uso sustentável da terra e a prevenção da degradação ambiental.

Quanto às fontes de energia, a lenha é utilizada por 69,9% dos agregados familiares, enquanto o uso de petróleo, parafina ou querosene representa 19,7%. A eletricidade é utilizada por 1,1%, e outras fontes, como gás, gerador ou placa solar, têm participação mínima. O uso de vela é de 6,9%, e as baterias são empregadas por 0,2% (INE, 2013).

Variáveis de mapas temático

A fragilidade ambiental foi avaliada com base em cinco fatores físicos: tipo de solo, uso e cobertura da terra, precipitação, altimetria e declividade. Os dados de precipitação, fornecidos pela CENACARTA, abrangem o período de 2000 a 2019. Esses fatores foram escolhidos por refletirem as características geoambientais do relevo, essenciais para o planejamento e manejo da paisagem e recursos hídricos, abrangendo aspectos como escoamento,

infiltração, radiação, evapotranspiração, precipitação, temperatura e erosão hídrica.

Os mapas temáticos foram gerados a partir de diversas fontes e métodos (Figura 2):

Tipo de Solo: Dados do CENACARTA foram extraídos, convertidos (*Feature to Raster*) e reclassificados (*Reclassify*).

A classificação em 9 categorias de uso e ocupação do solo com base nas imagens do Sentinel-2, conforme mencionado (Esri, 2020), geralmente segue a legenda padrão da Land Cover Classification System (LCCS) adaptada pela Esri Land Cover ou por metodologias amplamente utilizadas em sistemas GIS. Embora a categorização exata possa variar ligeiramente de acordo com a adaptação feita no projeto, um modelo amplamente aceito — como o usado pela Esri Land Cover (2020) baseado em imagens Sentinel-2.

Precipitação: Informações do CENACARTA passaram por extração, conversão e reclassificação.

Altimetria e Declividade: Os dados do Modelo Digital de Elevação (DEM) da TOPODATA, com resolução espacial de 12,5 metros, foram corrigidos utilizando a ferramenta *Fill*, para eliminar depressões espúrias e garantir a continuidade do escoamento superficial. A declividade foi então calculada e classificada em cinco classes, definidas com base na metodologia proposta por Ross (1992), que considera critérios geomorfológicos amplamente utilizados em análises de aptidão física do terreno e planejamento ambiental. (Tabela 1).

Tabela 1. Classes de classificação de declividade e altimetria

Declividade (%)	Altimetria (m)	Classificação	Valores
0 – 3%	< 75	Baixa	1
4 – 5%	75 - 152	Moderada	2
6 – 8%	152 - 235	Forte	3
9 – 19%	235 - 324	Muito forte	4
20 – 43%	324 - 696	Urbana	5

Fonte: Adaptado pelos autores, (2024).

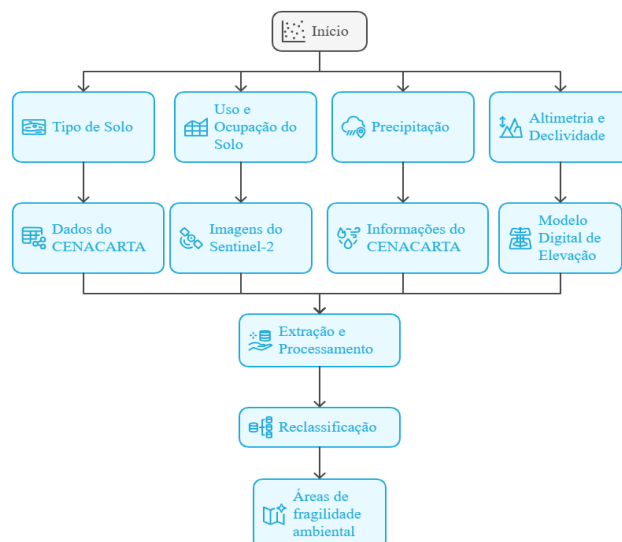


Figura 2: Fluxograma para a determinação das áreas de fragilidade ambiental. Fonte: Elaborado pelos autores, (2024)

A análise utilizou o método AHP (Processo de Hierarquia Analítica), que é amplamente aplicado em estudos ambientais por sua capacidade de estruturar problemas complexos em uma hierarquia de critérios. Os fatores foram organizados hierarquicamente e atribuídos pesos que refletem sua relevância na determinação da fragilidade ambiental. A definição desses pesos foi baseada em uma abordagem multicritério, considerando a influência relativa de cada variável na suscetibilidade ambiental (Tabela 2). A análise seguiu abordagem multicritério, associando

pesos a cada variável e classificando-as em graus de vulnerabilidade adaptados de ROSS (1994) e TRAFICANTE (2016), indo de grau 1 (Baixa) a grau 5 (Urbana). As ferramentas do programa e ArcGIS foram utilizadas para processamento e integração dos dados. Os pesos atribuídos aos fatores no método AHP refletem a importância relativa de cada critério na avaliação da fragilidade ambiental, conforme recomendado em estudos similares que aplicam o AHP para análise ambiental e territorial (Saaty, 1980; Malczewski, 1999).

Tabela 2. Atribuição de Pesos das Variáveis de Fragilidade Ambiental (AHP).

Fator	Peso médio	Peso (%)	Justificativa
Declividade	0.3871	37.35%	A declividade exerce influência direta no escoamento superficial, erosão hídrica e estabilidade do terreno, sendo o principal fator de instabilidade ambiental, sobretudo em áreas tropicais com uso intensivo do solo (Gomes et al., 2021).
Uso e cobertura do solo	0.2421	30.30%	Reflete a intervenção antrópica sobre o território. Coberturas naturais reduzem a fragilidade, enquanto usos agrícolas ou urbanos mal planejados a ampliam significativamente (Turner et al., 1995)..
Altimetria	0.2389	21.78%	Altitudes influenciam microclima, drenagem e potencial erosivo, afetando processos ecológicos e a vulnerabilidade de ecossistemas em áreas elevadas (Silva et al., 2021).
Tipos de solo	0.0851	6.49%	Solos mais erodíveis ou de baixa capacidade de infiltração contribuem para a fragilidade, mas sua influência é moderada quando comparada a fatores topográficos e de uso (Embrapa, 2018)
Precipitação	0.0467	4.07%	Embora relevante, a precipitação apresenta menor peso relativo, pois seu impacto na fragilidade depende fortemente da declividade, cobertura vegetal e uso do solo. Foi considerada como fator secundário por ser uma variável climática de maior escala e menor variabilidade local no período analisado.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Estudos como Malczewski (1999) e Mardani et al. (2017) recomendam a análise de sensibilidade para validar a robustez do modelo AHP. Simulações de variação dos pesos indicam que, apesar de algumas

mudanças locais, o modelo mantém a coerência geral da classificação da fragilidade ambiental, confirmando a estabilidade do sistema de pesos adotado

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Fragilidade Ambiental

Os resultados obtidos no mapa de fragilidade ambiental da bacia do Nipiode (Figura 3) e sua correlação significativa ($R^2 = 0,7276$) indicam que o método aplicado é adequado para identificar áreas

com diferentes níveis de vulnerabilidade ambiental. Essa caracterização detalhada pode ser uma ferramenta estratégica para a gestão territorial e o planejamento sustentável local.

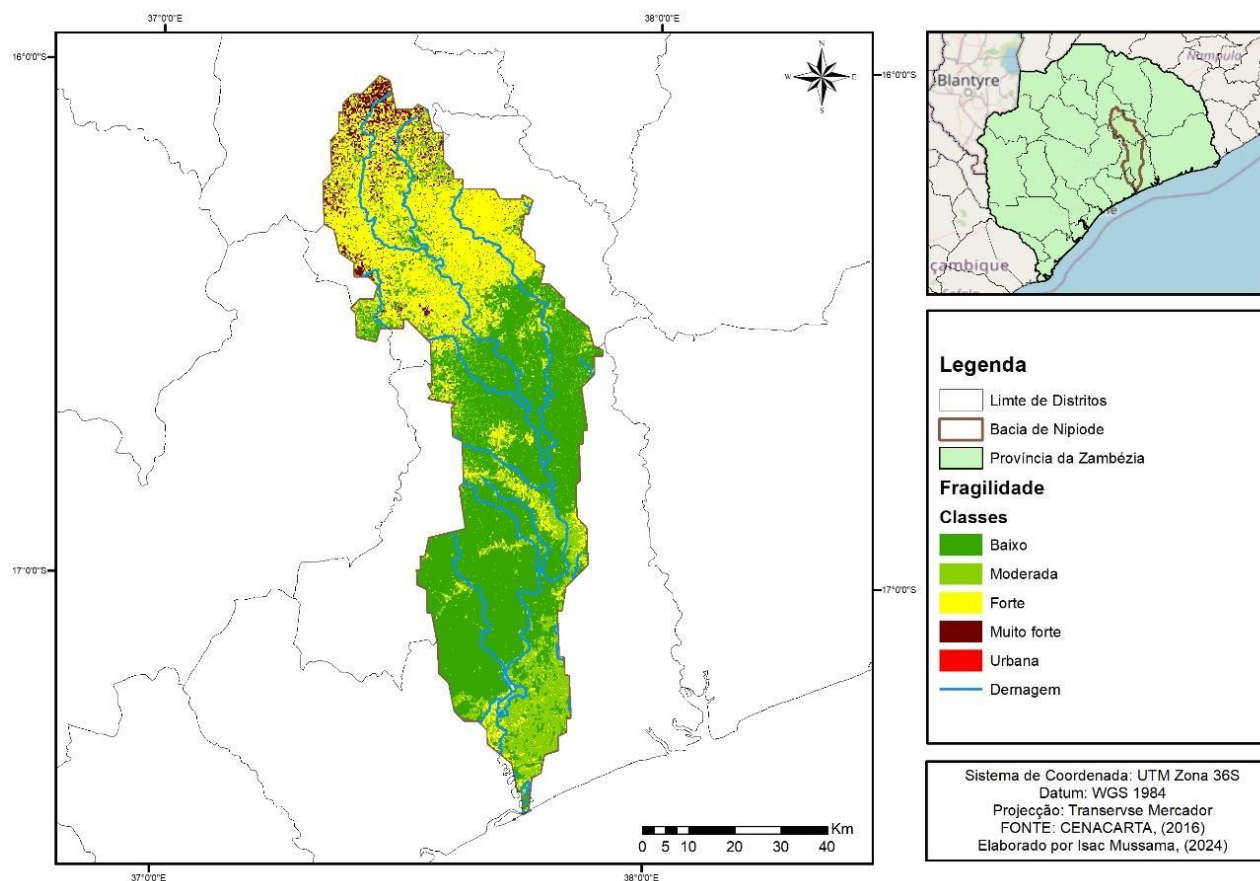


Figura 13. Mapa de fragilidade Ambiental para a bacia do Nipiode.
Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

A análise das áreas de fragilidade ambiental na bacia do Nipiode (Tabela 3), demonstra que metade do território, ou 50,01% (2.153,62 km²), apresenta fragilidade baixa, indicando uma maior estabilidade e menor vulnerabilidade ambiental. Áreas de fragilidade moderada ocupam 15,22% (655,42 km²), enquanto as zonas com fragilidade forte abrangem 30,97% (1.333,81 km²), evidenciando terrenos mais suscetíveis a impactos ambientais. Regiões classificadas como de fragilidade muito forte representam 3,77% (162,19 km²), sendo as mais vulneráveis. As áreas urbanas, com 0,03% (1,12 km²), têm proporção mínima na análise.

Segundo Fonsêca et al. (2017), os ambientes situados em regiões naturalmente vulneráveis, quando submetidos a perturbações humanas, não conseguem recuperar sua resiliência, uma vez que isso demandaria um período de tempo incompatível com a escala exigida pelo modelo de desenvolvimento vigente. Mathias e Nunes (2019) destacam principalmente a importância das nascentes de drenagem. Ao entrar em contato com áreas urbanas, elas se destacam pela existência de processos erosivos, que podem se transformar em ravinas e voçorocas. Para os autores, essa é uma fase de grande preocupação, principalmente por representar riscos diretos à estrutura urbana.

As áreas com fragilidade baixa (50,01% do território) apresentam maior estabilidade, podendo ser prioritárias para conservação e uso sustentável. Já as áreas com fragilidade moderada a muito forte demandam atenção especial para evitar processos de degradação ambiental e para implementar medidas de mitigação, como reflorestamento, manejo de solo e controle de uso do solo. A identificação de fragilidades nas áreas de nascentes e drenagens, apontada por Mathias e Nunes (2019), permite ações direcionadas para prevenir erosão, assoreamento e contaminação, protegendo a infraestrutura urbana e os recursos naturais essenciais. O mapeamento pode guiar políticas públicas para incentivar atividades econômicas compatíveis com a capacidade de suporte ambiental, promovendo segurança alimentar, geração de empregos verdes e qualidade de vida.

A manutenção dos níveis atuais de fragilidade depende da continuidade das pressões antrópicas e das políticas de conservação. Áreas de fragilidade baixa tendem a se manter estáveis se protegidas adequadamente, mas podem se degradar diante de expansão urbana descontrolada ou atividades agrícolas intensivas. Por outro lado, áreas com fragilidade alta podem sofrer agravamento, principalmente sob cenários de mudança climática e uso inadequado do solo.

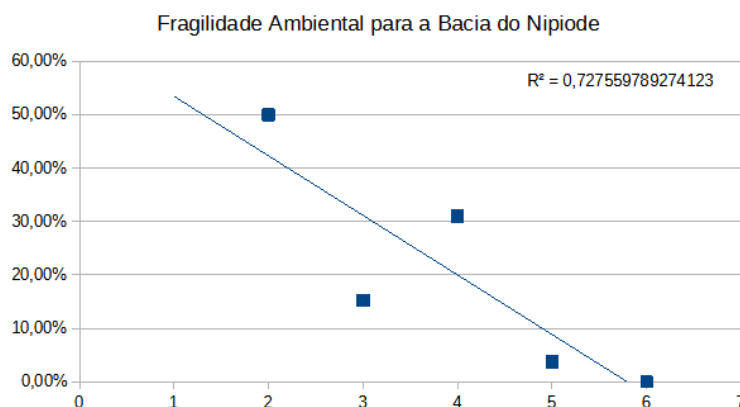


Figura 14. Distribuição de classes das áreas de fragilidade ambiental da Bacia de Nipiode. Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Tabela 3. Quantificação das classes das áreas de fragilidade ambiental da Bacia de Nipiode.

Fragilidade	Área ocupada	
	Área (km²)	%
Baixo	2.153,62	50,01%
Moderada	655,42	15,22%
Forte	1.333,81	30,97%
Muito forte	162,19	3,77%
Urbana	1,12	0,03%
Total	4.317,18	100,00%

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Estudos que usam análise multicritério combinada com geoprocessamento, como os de Silva et al. (2018) e Costa e Oliveira (2020), reforçam a eficácia do AHP para avaliação ambiental territorial. Comparativamente, métodos baseados exclusivamente em índices físicos ou modelos hidrológicos podem apresentar limitações na integração socioeconômica e ambiental. Assim, a adoção do método neste estudo se mostra robusta e adequada, embora seja recomendada a continuidade do aperfeiçoamento, incluindo análise de sensibilidade e validação com dados temporais para prever tendências futuras.]

CONCLUSÃO

A aplicação do método AHP foi eficaz na integração de variáveis ambientais, permitindo a geração de mapas temáticos precisos.

A análise indicou que 50,01% da bacia apresenta baixa fragilidade, enquanto 35% da área possui fragilidade forte e muito forte

REFERÊNCIAS

ALI, S. A.; IKBAL, J. Prioritization based on geomorphic characteristics of Ahar watershed, Udaipur district, Rajasthan, India using remote sensing and GIS. *Journal of Environmental Research and Development*, v. 10, n. 1, p. 187, 2015.

ASFAW, D.; GELLA, G. W.; ASFAW, M.. Modeling Landscape Dynamics, Erosion Risk, and Annual Sediment Yield in Guna-tana Watershed: A Contribution for Microwatershed Level Conservation Priority Area Identification. In: *Groundwater Resources Development and Planning in the Semi-Arid Region*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 73-91.

BACANI, V. M., SAKAMOTO, A. Y., LUCHIARI, A.; QUÉNOL, H. Sensoriamento remoto e SIG aplicados à avaliação da fragilidade ambiental de bacia hidrográfica. *Mercator (Fortaleza)*, 14(2), 119-135. 2015.

CUNHA, E. R.; BACANI, V. M. Morphometric characterization of a watershed through SRTM data and geoprocessing technique. *Journal of Geographic Information System*, 8(02), 238. 2016.

EMBRAPA. Solos do Brasil: Características e Classificações. Rio de Janeiro: Embrapa, 2018.

Esri Esri Land Cover 2020, criado com base em dados Sentinel-2 e classificado com suporte de inteligência artificial, em conformidade com o sistema LCCS da FAO. Disponível na plataforma ArcGIS Living Atlas, 2020.

GOMES, D. J. C., DA SILVA, L. P., FERREIRA, N. S., DA COSTA LOBATO, R. R., DE OLIVEIRA SERRÃO, E. A.; DE LIMA, A. M. M. Impactos climáticos na erosão hídrica do solo para a Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 242-265, 2021.

- INE. Instituto Nacional de Estatística. Estatísticas e Indicadores Sociais, 2012 -2013. 2013.
- INE. Instituto Nacional de Estatística. Província da Zambézia - Anuário Estatístico. Moçambique, 2023.
- JACOMINE, P. K. T. (2008). A nova classificação brasileira de solos. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica*, 5, 161-179. 2008.
- KANDUS, P., MINOTTI, P. G., MORANDEIRA, N. S., GRIMSON, R., GONZÁLEZ TRILLA, G., GONZÁLEZ, E. B., GAYOL, M. P. Remote sensing of wetlands in South America: status and challenges. *International Journal of Remote Sensing*, 39(4), 993-1016. 2018.
- KAWAKUBO, F. S., MORATO, R. G., CAMPOS, K. C., LUCHIARI, A., ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12(16), 2203-2210. 2005.
- MALCZEWSKI, J. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & sons, 1999.
- MARDANI, A., ZAVADSKAS, E. K., KHALIFAH, Z., ZAKUAN, N., JUSOH, A., NOR, K. M., KHOSHNOUDI, M. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 216-256, 2017
- MATHIAS, D. T.; NUNES, J. O. R. A dinâmica geotecnogênica em áreas periurbanas: município de São Pedro (SP). *Geosul*, v. 34, n. 70, p. 484-498, 2019.
- MONTAÑO, M.; SOUZA, M. P. de. Integração entre planejamento do uso do solo e de recursos hídricos: a disponibilidade hídrica como critério para a localização de empreendimentos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, n. 03, p. 489-495, 2016.
- OLIVEIRA, L. N.; DE AQUINO, C. M. S. Dinâmica Temporal do uso e cobertura da terra na fronteira agrícola do MATOPIBA: Análise na sub-bacia hidrográfica do rio Gurguéia-Piauí. *Revista Equador*, v. 9, n. 1, p. 317-333, 2020.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. *Revista do departamento de geografia*, v. 8, p. 63-74, 1994.
- SILVA RIBEIRO, Lucas; DE SOUZA ROBAINA, Luís Eduardo; DE CRISTO, Sandro Sidnei Vargas. Análise e caracterização dos aspectos do relevo da bacia hidrográfica do Ribeirão Lajeado-Tocantins. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 5, p. 2851-2865, 2021.
- SPÖRL, Christiane; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *GEOUSP-Espaço e Tempo*, v. 15, p. 39-49, 2004.
- T
 RAFICANTE, D. P. Fragilidade ambiental da APA Corumbatai-Botucatu-Tejupá (perímetro Botucatu, SP, Brasil) na bacia hidrográfica do Rio Capivara. 2016.
- TURNER, B. L., SKOLE, D., SANDERSON, S., FISCHER, G., FRESCO, L., LEEMANS, R. Land-use and land-cover change: science/research plan. [No source information available], 1995.
- ZAIDEL'MAN, F. R., STEPANTSOVA, L. V., NIKIFOROVA, A. S., KRASIN, V. N., DAUTOKOV, I. M., & KRASINA, T. V. Light gray surface-gleyed loamy sandy soils of the northern part of Tambov plain: agroecology, properties, and diagnostics. *Eurasian Soil Science*, 51, 395-406. 2018.
- ZHAO, Z., LI, J., LUO, Z., LI, J., CHEN, C. Remote sensing image scene classification based on an enhanced attention module. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(11), 1926-1930. 2020.