



USO DO MÉTODO AHP EM AMBIENTE SIG PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS NA CHAPADA DO ARARIPE, NORDESTE DO BRASIL¹

Carlos de Oliveira Bispo²

Fabrizio de Luiz Rosito Listo³

Bárbara Gabrielly Silva Barbosa⁴

RESUMO

A Chapada do Araripe, por sua relevância ecológica e função estratégica como zona de recarga hídrica no semiárido nordestino, exige atenção especial diante dos riscos ambientais, como os escorregamentos. Nesse contexto, a integração entre Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o método Analytic Hierarchy Process (AHP) apresenta-se como uma abordagem eficaz para a análise espacial e a ponderação de variáveis geoambientais. Este artigo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe, por meio da aplicação do modelo AHP em ambiente SIG. Nos procedimentos metodológicos foram integrados quatro parâmetros: ângulo da encosta, geologia, solos e pluviosidade, os quais foram submetidos à categorização de suas classes, à ponderação das variáveis por meio do AHP e ao cruzamento geoespacial, por meio de álgebra de mapas em ambiente SIG. Como resultado, foram gerados dois cenários de suscetibilidade (B1 e B2), validados com base em um inventário de cicatrizes de escorregamentos, utilizando-se o índice de Concentração de Cicatrizes (CC) e a Curva ROC. O cenário B1 apresentou maior acurácia, indicando como áreas mais críticas aquelas localizadas em encostas íngremes, especialmente na escarpa. Conclui-se que a metodologia adotada demonstrou eficiência na identificação de áreas suscetíveis, contribuindo significativamente para a compreensão da dinâmica geomorfológica local.

Palavras-chave: Geomorfologia, Álgebra de mapas, Mapeamento de risco.

INTRODUÇÃO

Escorregamentos podem ter origem atual e pretérita, e sua ocorrência deixa evidências marcadas na paisagem (Guzzetti, *et al.*, 2012). Entende-se, assim, que os processos de evolução da paisagem variam de acordo com as características ambientais de cada região, bem como em função das diferentes formas de uso e ocupação da terra.

¹ Trabalho proveniente de pesquisa desenvolvida no decorrer do Doutorado do primeiro autor, no Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEO/UFPE).

² Professor do Departamento de Geografia de Itabaiana, Universidade Federal de Sergipe, carlosbispo@academico.ufs.br.

³ Professor do Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, fabrizio.listo@ufpe.br

⁴ Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco - PPGEO/UFPE, barbosgbarbara@gmail.com.



De acordo com Schumm e Lichty (1965) nas diversas abordagens geomorfológicas, a escala de tempo pode ser dividida em três intervalos: geológico (10^5 anos), moderno (10^2 anos) e recente. A compreensão desses intervalos é essencial para a análise dos processos geomorfológicos, especialmente na investigação da dinâmica atual de escorregamentos.

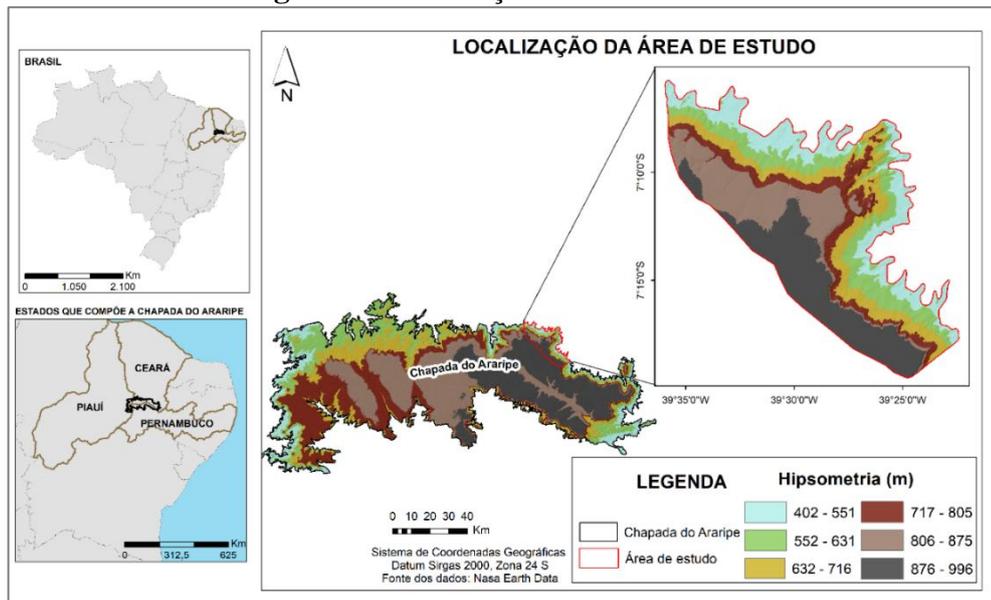
Para isso, diversos modelos vêm sendo utilizados, entre eles os determinísticos e os heurísticos, voltados à previsão da suscetibilidade das encostas. Dentre os métodos heurísticos, destaca-se o modelo AHP de Saaty (1991). Inicialmente concebido para auxiliar na resolução de problemas de decisão em ambientes corporativos, passou a ser amplamente adotado, a partir do início do século XXI, em estudos aplicados às ciências ambientais, sobretudo na análise de suscetibilidade a escorregamentos. Diversas pesquisas evidenciam sua eficácia (Barredo *et al.*, 2000; Ayalew *et al.*, 2005; Reis *et al.*, 2012; Vanacôr e Rolim, 2012; Kumar *et al.*, 2015; Nunes *et al.*, 2016; Moragues *et al.*, 2021).

O modelo AHP realiza uma análise multicritério, organizando e avaliando, com base em uma estrutura matemática, a importância relativa e hierarquizada de fatores condicionantes, ao mesmo tempo em que verifica a consistência dos pesos atribuídos. Quando associado a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o AHP torna-se ainda mais poderoso para a análise ambiental. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe, utilizando a aplicação e a comparação de dois modelos baseados no método AHP em ambiente SIG.

Apesar de inserida no semiárido nordestino, a Chapada do Araripe apresenta características excepcionais, como elevada altitude média (cerca de 900 m) e significativa pluviosidade nas faces voltadas a barlavento, com registros superiores a 1000 mm anuais (Morales; Assine, 2015). Essas condições favorecem o desenvolvimento de solos espessos e depósitos coluvionares mais instáveis nas encostas. Tais aspectos geomorfológicos e climáticos, associados à influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), contribuem para a ocorrência de escorregamentos mesmo em um contexto semiárido.

Assim, a área foi selecionada como recorte escalar para este estudo (Figura 1), considerando a recorrência de escorregamentos, bem como a importância estratégica de suas encostas voltadas para o município do Crato-CE, um dos mais relevantes economicamente do sul do Ceará.

Figura 1- Localização da área de estudo



Fonte: Base de dados Nasa Earth Data.

Material e Métodos

Além da consulta a referências bibliográficas, a pesquisa foi conduzida em ambiente SIG. A modelagem da suscetibilidade a escorregamentos baseou-se na seleção de fatores condicionantes relevantes para a área de estudo, a saber: declividade, geologia, tipos de solos e pluviosidade. A Tabela 1 apresenta os metadados utilizados na elaboração dos dois cenários de suscetibilidade a escorregamentos (B1 e B2) na face oriental da Chapada do Araripe, especificando as fontes de dados, escalas ou resoluções e os métodos de processamento.

Tabela 1 – Metadados utilizados na elaboração dos cenários B1 e B2 de suscetibilidade a escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe

| Fator condicionante | Fonte de dados | Escala / Resolução | Método de processamento |
|---------------------|---|--------------------|--|
| Declividade | SAR ALOS PALSAR - JAXA | 12,5 metros | Rotina automatizada no software ArcGIS, via <i>ArcToolbox</i> ; classificação em seis classes (IPT, 2012). |
| Geologia | Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2014) | 1:100.000 | Compilação de dados geológicos da área de estudo, em ambiente SIG. |
| Solos | Funceme (2012) | 1:100.000 | Vetorização dos dados para aplicação em ambiente SIG. |
| Pluviosidade | Funceme (2012) Séries históricas (1974–2019) | 1:100.000 | Interpolação espacial por IDW (<i>Inverse Distance Weighting</i>), utilizando ferramentas do ArcMap. |

Fonte: Elaborado pelos autores. Com base em: Funceme (2012), IPT (2012), CPRM (2014).



Grau de Suscetibilidade

Previamente à hierarquização dos pesos, foram estabelecidos três níveis de suscetibilidade para cada fator condicionante. Essa etapa exigiu a reclassificação dos atributos dos mapas no *software* ArcGIS via ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify*. A reclassificação foi realizada por meio de uma coluna denominada “notas”, que atribuiu os seguintes valores para cada classe: 1 (baixo), 2 (médio) e 3 (alto) grau de suscetibilidade. A definição desses níveis baseou-se em análises previamente conduzidas na área de estudo, incluindo mapeamentos e atividades de campo realizadas em 2018 e 2021, bem como em estudos realizados em ambientes com características semelhantes, como visto em Souza e Oliveira (2006), Peulvast, Bétard e Magalhães (2011), e Guerra, Souza e Silva (2020).

Definição dos pesos para modelagem dos cenários B1 e B2

Após a atribuição dos graus de suscetibilidade para cada classe dos quatro fatores condicionantes, os mapas temáticos foram convertidos para o formato raster no ambiente do ArcGIS. Para a definição dos pesos relativos de cada um dos fatores, foi utilizada a técnica de comparação pareada, que consiste em avaliar a relevância relativa entre os elementos de um determinado nível hierárquico em relação ao critério do nível superior. Os valores atribuídos seguiram a Escala Fundamental proposta por Saaty (1991), que varia de 1 a 9, expressando diferentes intensidades de importância entre os fatores analisados.

Então foi elaborada uma matriz quadrada de comparação pareada, esse procedimento permitiu a atribuição de pesos relativos a cada fator condicionante. Após a elaboração da matriz de comparação, realizou-se a etapa de normalização, na qual cada valor atribuído foi dividido pelo somatório dos valores da respectiva coluna, assegurando a proporcionalidade dos julgamentos. Em seguida, o peso final (W_i) de cada critério foi obtido a partir da média aritmética dos valores normalizados em cada linha da matriz, ou seja, pelo quociente entre o somatório da linha (ΣL) e o número total de critérios avaliados. Na Tabela 2 são apresentados os pesos dos critérios utilizados na modelagem da suscetibilidade a escorregamentos nos cenários B1 e B2.

Tabela 2 - Pesos do cenário B1 e B2 por ordem de importância (hierarquização).

| CENÁRIO B1 | | CENÁRIO B2 | |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Critérios | Pesos (W_i) | Critérios | Pesos (W_i) |
| Declividade | 0,36 | Geologia | 0,37 |
| Solos | 0,31 | Pluviosidade | 0,28 |
| Geologia | 0,18 | Solos | 0,20 |
| Pluviosidade | 0,15 | Declividade | 0,15 |

Fonte: Organizado pelos autores.



No cenário B1, atribuiu-se maior influência à declividade, enquanto no B2, à geologia. As razões de consistência obtidas foram de 0,07 (B1) e 0,03 (B2), valores inferiores ao limite de 0,10 recomendado por Saaty (1991), o que confirma a consistência dos julgamentos e valida a aplicação. Os cenários de suscetibilidade a escorregamentos B1 e B2 foram produzidos em ambiente SIG por meio das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$SE = D * 0,36 + S * 0,31 + G * 0,18 + P * 0,15 \quad \text{Equação 1}$$

$$SE = G * 0,37 + P * 0,28 + S * 0,20 + D * 0,15 \quad \text{Equação 2}$$

Onde: SE=Suscetibilidade; D= Declividade; S= Solos; G= Geologia; P= Pluviosidade.

Validação dos cenários de suscetibilidade

A validação da carta de suscetibilidade foi realizada por meio da sobreposição de um inventário de cicatrizes de escorregamentos, elaborado no ArcGIS com base na interpretação de imagens do *Google Earth Pro*, referentes ao período de 2003 a 2020. Para avaliar a correspondência entre as cicatrizes e as classes de suscetibilidade, foram aplicados os índices de Concentração de Cicatrizes (CC) e Frequência de Distribuição (FD), conforme propostos por Gao (1993) e descritos na Equação 3 e 4, respectivamente.

$$CC = \frac{\text{nº de células de cada classe}}{\text{Área Atingida Total}} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

$$FD = \frac{\text{nº de células de cada classe}}{\text{Total de células}} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Complementarmente, utilizou-se a *Receiver Operating Characteristic* (Curva ROC) para avaliar a acurácia preditiva do modelo, por meio do cálculo da Área sob a Curva (AUC), no módulo *GIS Analysis do software Idrisi*, considerando os cenários de suscetibilidade e o inventário de cicatrizes como dados de entrada, conforme Equação 5. A AUC, conforme Fawcett (2006), varia entre 0,5 (aleatório) e 1 (perfeito), sendo valores entre 0,7 e 1 considerados satisfatórios (Listo; Santos, 2023).

$$AUC = \frac{\sum_{i=1}^n 1}{FP+VN} \left[(Lsi - Li) \cdot \frac{ai+bi}{2} \right] \quad \text{Equação 5}$$

Onde: $Ls_i - L_i$ = amplitude de cada classe; a_i = valor da ordenada correspondente a L_i ; b_i = valor da ordenada correspondente a Ls_i .

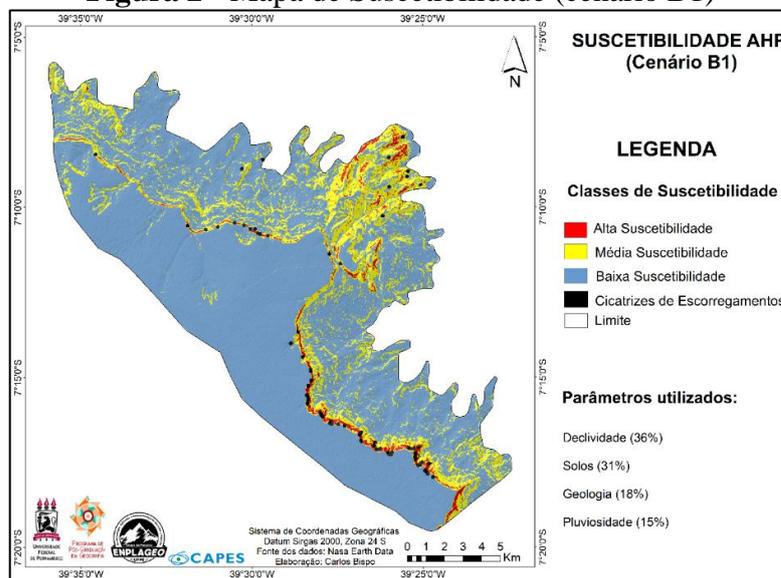
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cenário B1 e validações

O cenário B1 (Figura 2), teve como principais gatilhos para os escorregamentos, a declividade e solos, assim as áreas mais instáveis, localizaram-se, predominantemente, nas encostas mais declivosas, principalmente na região da escarpa, recoberta por neossolos litólicos.

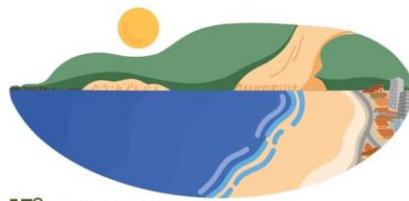
Houve aumento da instabilidade nas encostas, predominantemente, côncavas-convexas, contribuindo para maiores concentrações de fluxos, diante de áreas que recebem maior aporte pluviométrico. Em termos geológicos, o contato litoestratigráfico entre a Formação Santana e a Formação Exu aumentaram a instabilidade. Por sua vez, as áreas de maior estabilidade ocorreram, principalmente, nos setores de topo plano a inclinações suavemente onduladas, com concentrações de fluxos mais discretas, recobertas por latossolos, argissolo e neossolos flúvicos e, geologicamente ligada à Formação Missão Velha e às porções graníticas.

Figura 2 - Mapa de Suscetibilidade (cenário B1)



Fonte: Elaborado pelos autores.

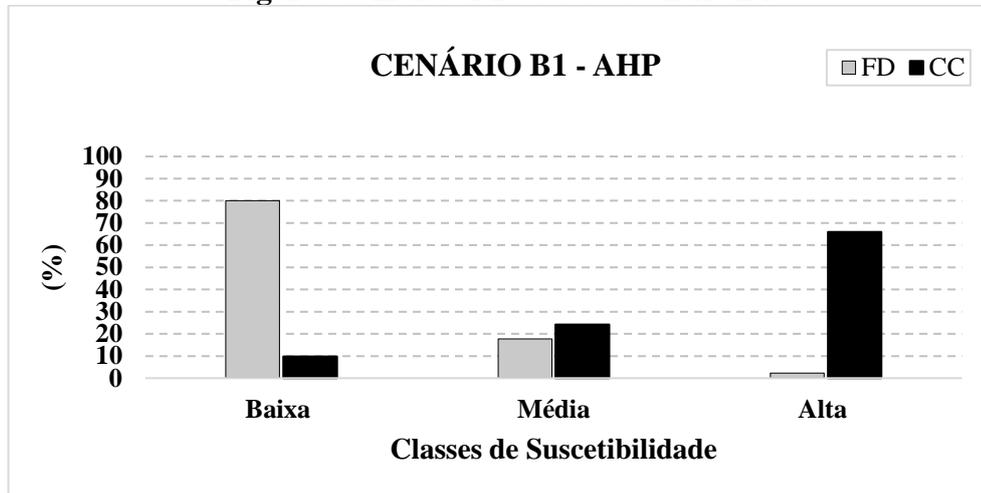
Em relação ao índice FD, as áreas do cenário analisado (Figura 3) foram distribuídas nas seguintes classes de suscetibilidade: baixa (80%), média (17,7%) e alta (2,3%). Ao se correlacionar essas classes com o inventário de cicatrizes de escorregamentos, observou-se que, embora a classe de alta suscetibilidade represente apenas 2,3% da área total, ela concentrou 66% das cicatrizes registradas (índice CC). A classe de suscetibilidade média



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

apresentou um índice CC de 24,2%. Por fim, a classe de menor suscetibilidade que abrange 80% da área total, concentrou apenas 9,8% das cicatrizes de escorregamento (Figura 3).

Figura 3 - Índices FD e CC do cenário B1

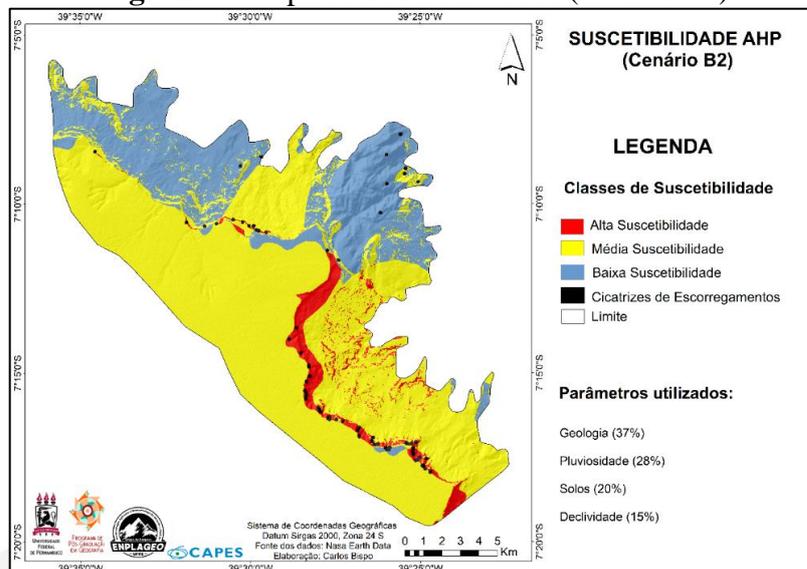


Fonte: Elaborado pelos autores

Cenário B2 e validações

O cenário B2 (Figura 4) manteve os parâmetros do cenário B1, mas reduziu a influência da declividade e dos solos, destacando geologia e pluviosidade como principais gatilhos. Como resultado, houve redução das áreas de baixa suscetibilidade e aumento das classes média e, em menor proporção, alta. Com isso, setores antes estáveis, como os topos planos da Chapada do Araripe e áreas suavemente onduladas, passaram a ser classificados como de suscetibilidade média.

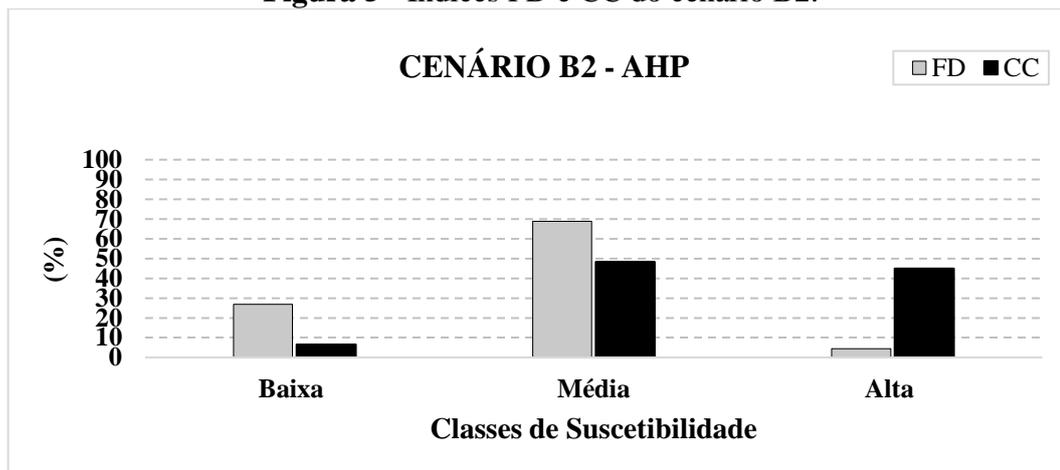
Figura 4 - Mapa de Suscetibilidade (cenário B2)



Fonte: Elaborado pelos autores.

No cenário B2, a maior FD foi observada na classe de suscetibilidade média (68,8%), seguida pelas classes baixa (26,8%) e alta (4,4%) (Figura 5). Quanto à CC, a maioria dos escorregamentos concentrou-se na classe média (48,4%), seguida da alta (45%) e, por último, da baixa (6,6%) (Figura 5).

Figura 5 - Índices FD e CC do cenário B2.

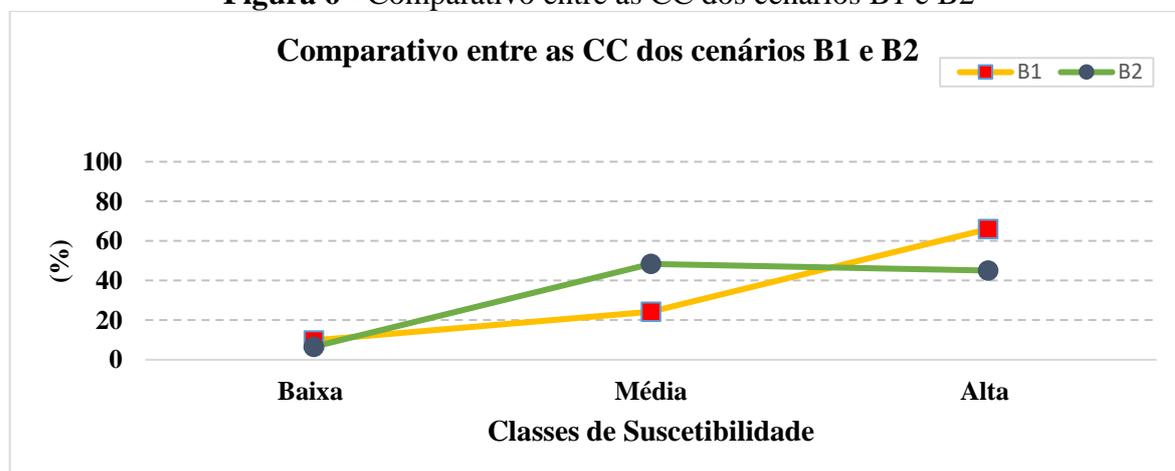


Fonte: Elaborado pelo autores.

Análise Comparativa entre os dois cenários

A comparação entre os cenários B1 e B2 revela que a alteração na influência dos fatores condicionantes gerou mudanças significativas na distribuição da suscetibilidade. No cenário B2, houve um aumento expressivo das áreas classificadas como de suscetibilidade média, onde se concentrou a maior parte dos escorregamentos. Já no cenário B1, a maior concentração (66%) ocorreu na classe de alta suscetibilidade, indicando maior precisão na identificação das áreas mais instáveis (Figura 6).

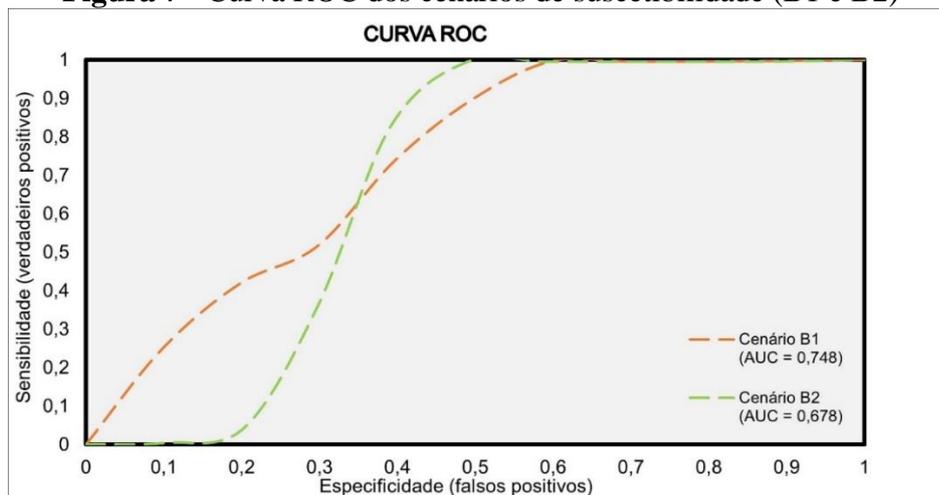
Figura 6 - Comparativo entre as CC dos cenários B1 e B2



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação às curvas ROC, essa validação mostrou que o cenário B1 também apresentou o melhor desempenho, com valor de área abaixo da curva, considerado exitoso e com boa capacidade de predição ($AUC=0,748$). Já o cenário B2 foi considerado insuficiente, com baixa acurácia ($AUC=0,678$) (Figura 7). Em síntese, a partir das validações realizadas, o cenário que apresentou maior capacidade preditiva foi o denominado B1.

Figura 7 - Curva ROC dos cenários de suscetibilidade (B1 e B2)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados desta pesquisa contrastam com estudos como o de Ayalew *et al.* (2005), Garcia *et al.* (2007), Kumar *et al.* 2015; Listo e Santos, 2023, os quais apotam que mapeamentos mais precisos tendem a restringir as áreas instáveis e estas são as que apresentam a maior concentração de cicatrizes de escorregamentos, resultando em melhores índices de acurácia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do modelo AHP, integrado ao SIG, mostrou-se eficaz na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe. Entre os dois cenários elaborados, o cenário B1 foi o que apresentou os melhores resultados, evidenciando a relevância da declividade e solos como principais fatores na deflagração dos escorregamentos.

A validação por meio da curva ROC reforça essa constatação, com o cenário B1 obtendo o melhor desempenho ($AUC = 0,748$), o que indica uma boa capacidade preditiva. Os setores de maior instabilidade foram identificados, principalmente, na escarpa da Chapada,



onde a combinação de encostas íngremes, solos rasos e características geológicas específicas favorece a ocorrência de movimentos de massa. Dessa forma, conclui-se que a metodologia adotada contribui de maneira significativa para o mapeamento de áreas suscetíveis e para a compreensão da dinâmica geomorfológica local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de doutorado do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- AYALEW, L., *et al.* Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. **Engineering Geology**, 81(4), 432–445, 2005.
- BARREDO, J., *et al.* Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 2, 2000, p. 9 – 23.
- FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**. V. 27, p. 861– 874, 2006.
- GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.18, p.579-591, 1993.
- GARCIA, R.A.C., *et al.* A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. In: **Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos**, Lisboa. Vol. V, p. 265-279, 2007.
- GUERRA, M. D. F., SOUZA, M. J., SILVA, E. V. Veredas da Chapada do Araripe: subespaços de exceção no semiárido do estado do Ceará, BR. **Ateliê geográfico**, v 14, p. 51 66, 2020.
- GUZZETTI, F. *et al.* Landslide inventory maps: New tools for an old problem. **Earth Science Reviews** 112: 42-66. 2012.
- KUMAR, K. M.; *et al.* Mapping of landslide susceptibility using Analytical Hierarchy Process at Kothagiri Taluk, Tamil Nadu, India. **IJAER**, v.10, n. 3, 2015.
- LISTO, F. L. R., SANTOS, E. M. Cenários de susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos usando o modelo shalstab. **Revista de Geografia**, v 40, 2023.
- MORAGUES, S. *et al.* Analytic hierarchy process applied to landslide susceptibility mapping of the North Branch of Argentino Lake, Argentina. **Natural Hazards**. 105:915–941, 2021.
- MORALES, N.; ASSINE, M. L. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C (Orgs.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer, 2015.



NUNES, D. M., *et al.* Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2016.

PEULVAST, J. BÉTARD, F.; MAGALHÃES, A. O. Scarp morphology and identification of large-scale mass movements in tropical tablelands: the eastern Araripe basin (Ceará, Brazil). **Geomorphologie**, v. 17, n. 1, p. 33-52, 2011.

REIS, S.; *et al.* Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy methods in Rize province (NE Turkey). **Environmental Earth Sciences**, v. 66, n. 7, p. 2063-2073, 2012.

SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. São Paulo: Mcgraw-hill, 1991.

SCHUMM, S. A.; LICHTY, R. W. Time, space and causality in Geomorphology. **American Journal of Science**, v. 263, p. 110-119, 1965.

SOUZA, M. J. N.; OLIVEIRA, V. P. V. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste brasileiro. **Mercator**, v.5, n.9, p. 85-102, Fortaleza, 2006.

VANACÔR R.N, ROLIM S.B.A. Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, v.13, 2012.