

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMORFOLÓGICOS NA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LINEAR NO SEMIÁRIDO PARAIBANO

Elaine Farias Teixeira¹
Susana da Silva Pereira²
Rafael Albuquerque Xavier³
Bianca Carvalho Vieira⁴

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é um processo fundamental na evolução das paisagens e um dos principais agentes de degradação dos solos à escala global, com perdas expressivas de solo fértil, impactos diretos na segurança alimentar e alterações climáticas (Caldas et al., 2019; FAO, 2025). No semiárido paraibano, esse processo é intensificado pelo aumento da ocorrência de eventos extremos de precipitação, favorecendo o escoamento superficial em áreas com baixa cobertura vegetal e o desenvolvimento de feições erosivas, como sulcos, ravinas e voçorocas (Barbosa Neto et al., 2020; IPCC, 2022; Marengo et al. 2017).

Diante desse cenário, a aplicação de modelos estatísticos bivariados, como o Valor Informativo (VI) é uma abordagem amplamente utilizada em estudos de suscetibilidade ambiental, especialmente para escorregamentos (Bonini et al. 2022) ou pesquisas quantitativas para mensurar os principais parâmetros morfométricos para erosão hídrica na região Sudeste do Brasil (Daniel et al. 2021). Entretanto, devido à escassez de trabalhos sobre essa temática na região semiárida, o presente estudo teve como objetivo identificar a relação espacial entre os fatores geomorfológicos e a suscetibilidade à erosão linear numa bacia hidrográfica paraibana.

REFERENCIAL TEÓRICO

A seleção das variáveis ambientais utilizadas em modelos estatísticos de suscetibilidade exerce influência direta sobre os resultados obtidos, devendo considerar tanto a tipologia dos processos analisados quanto a disponibilidade e a escala dos dados (Soeters e Van Westen 1996; Reichenbach et al. 2018). Nesse contexto, a ampla disponibilidade de Modelos Digitais de Elevação (MDE) tem favorecido o uso de variáveis morfométricas como fatores condicionantes, especialmente parâmetros derivados do relevo, como declividade, curvatura e aspecto para investigar a suscetibilidade (Pereira et al. 2012).

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à bacia do Riacho Cachoeirinha (4 km²), tributário do Riacho Salgadinho, afluente do alto curso do Rio Paraíba, localizada no município de São Domingos do Cariri. A geologia regional é composta predominantemente por rochas cristalinas do Escudo Pré-Cambriano do Nordeste, formadas nos períodos Proterozoico e Arqueozoico, destacando-se quartzitos, gnaisses, migmatitos, micaxistos e granitoides. Geomorfologicamente, a área insere-se na Depressão Intraplanáltica Paraibana, caracterizada por extensas superfícies rebaixadas e suavizadas, além de planícies fluviais, colinas amplas dissecadas e morros isolados (Corrêa et al., 2010). O relevo da bacia apresenta predominância de superfícies aplainadas intercaladas por colinas suaves, com altitudes variando entre 376,6 e 453,1 m.

¹Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia Física na Universidade de São Paulo (PPGF-USP), Cidade Universitária, São Paulo - SP, elaineteixeira@usp.br;

²Professora Auxiliar do Departamento de Geografia da Universidade do Porto, (CEGOT – UPorto), Faculdade de Letras, Porto – Portugal, sspereira@letras.up.pt;

³Professor efetivo do Departamento de Geografia da Universidade Estadual da Paraíba (DG/CEDUC-PPGDR-UEPB, Campus I, Campina Grande – PB, rafaelxavier@servidor.uepb.edu.br;

⁴Professora Titular do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (DG/PPGF – USP), Cidade Universitária, São Paulo – SP, biancacv@usp.br;

Os solos predominantes incluem Luvisolos Crômicos e Háplicos, Neossolos Litólicos e Regolíticos e Cambissolos Flúvicos. Em geral, são solos rasos, eutróficos, com baixos teores de matéria orgânica e variação de moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos (Xavier et al., 2023). De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAs), a precipitação média anual em São Domingos do Cariri é de 444,6 mm, com maior concentração das chuvas no mês de março, que apresenta média de 104,4 mm.

MATERIAL E MÉTODOS

O inventário de cicatrizes de formas de erosão lineares foi elaborado com base na interpretação de um ortomosaico com resolução espacial de 13 cm, gerado por meio de aerolevantamento realizado com Veículo Aéreo Não Tripulável (VANT) em 01/07/2025. Foram vetorizadas 1072 cicatrizes erosivas (ravinas e voçorocas) na bacia do Cachoeirinha. Posteriormente, as cicatrizes inventariadas foram divididas aleatoriamente em dois grupos, cada um com 50% da amostra (536). O primeiro grupo foi utilizado na elaboração do modelo estatístico e na quantificação do seu desempenho (Grupo Modelação), enquanto o segundo foi destinado à validação do mapa de suscetibilidade e à avaliação da capacidade preditiva do modelo (Grupo Validação).

Para a análise da suscetibilidade na bacia semiárida, foram utilizados parâmetros morfométricos derivados do Modelo Digital do Terreno (MDT) reclassificados com resolução espacial de 2 m, incluindo declividade, orientação de vertentes (aspecto), curvatura, unidades de relevo (geomorphons), Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index – TWI*) e Índice de Posição Topográfica (*Topographic Position Index – TPI*).

A partir dessas variáveis, aplicou-se o método estatístico bivariado do Valor Informativo (VI), proposto por Yin e Yan (1988), o qual estabelece relações entre variáveis independentes, representadas pelos parâmetros morfométricos, e a variável dependente, correspondente às cicatrizes erosivas. Quando VI é negativo, sugere-se estabilidade das vertentes, enquanto o valor é positivo, indica uma maior propensão para a ocorrência de cicatrizes erosivas.

O desempenho e a capacidade preditiva da susceptibilidade foram validados estatisticamente a partir da Área Abaixo da Curva (AAC) ROC (*Receiver Operating Characteristic*), sendo esta uma medida geral da qualidade do modelo. A Taxa de Sucesso foi quantificada com o Grupo Modelação e a Taxa de Predição com o Grupo de Validação. Valores de ACC acima de 70% indicam uma performance confiável do modelo (Fressard et al. 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As classes com maior ocorrência de cicatrizes erosivas estiveram associadas às declividades entre 6 e 15% (58,4%), às vertentes (39,2%) e vales (25,3%), à curvatura côncava (37,3%), às orientações Leste (18,4%) e Sudeste (17,2%), além de áreas classificadas como vales no TPI (55,6%) e TWI de 7,5 (36,6%). Em relação ao Valor Informativo, os maiores índices positivos foram registrados para as depressões fechadas (1,71) e vales (1,55), seguidos pelo TWI > 13,5 (1,32), curvatura convexa (1,28), TPI em vales (0,73) e declividades entre 40,1 e 60% (0,51).

O VI indicou declividades entre 40,1 e 60% como mais suscetíveis a erosão linear, contudo, quando compara-se a porcentagem da área total da bacia (0,7%) com a área erodida (1,1%), nota-se que declividades moderadas (6,1 – 10% e 10,1 – 15%) apresentaram maior associação com erosão (28,7 e 29,7%), sendo assim, a ocorrência de VI positivos (0,10 e 0,07) em declividades moderadas sugerem que a suscetibilidade na bacia semiárida parece estar mais relacionada a concentração do fluxo e permanência de escoamento superficial do que propriamente a maiores gradientes topográficos.

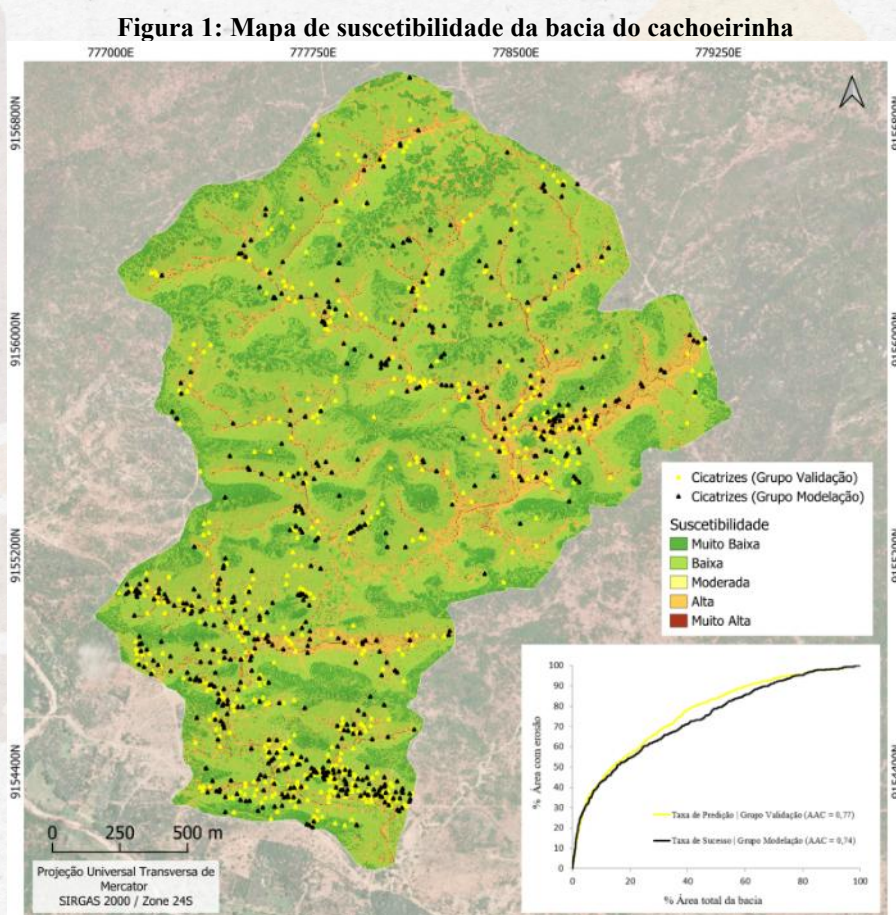
Diante do exposto, as vertentes orientadas para Sul e Sudoeste apresentaram maior concentração de cicatrizes erosivas, correspondendo a 18,4% e 17,2%, respectivamente. A orientação das vertentes exerce influência direta sobre variáveis microclimáticas, como evapotranspiração e disponibilidade de umidade, condicionando o desenvolvimento da cobertura vegetal e, consequentemente, interferindo na dinâmica e na velocidade do escoamento superficial (Bonini et al., 2022).

Além disso, a maior suscetibilidade observada em áreas de curvaturas côncavas indica que as cicatrizes erosivas (37,38%) estão associadas preferencialmente a setores de convergência

topográfica. Além das formas côncavas serem tradicionalmente apontadas como concentradoras de fluxo (Stabile e Vieira, 2009), a baixa capacidade de infiltração associada à geologia cristalina da bacia influencia significativamente na ocorrência de escoamento superficial do tipo hortoniano, intensificando os processos erosivos (Wadi et al., 2022).

Outro aspecto importante é que a curvatura côncava está simultaneamente articulada com classes elevadas de suscetibilidade de TWI ($VI > 13,5$) e TPI em vales e depressões, sugerindo, portanto, que a curvatura possivelmente contribui para a redistribuição do fluxo ao longo da vertente. O TWI representa áreas com maior potencial de concentração hídrica e conectividade hidrológica, favorecendo a intensificação da erosão linear (Canavesi et al. 2020). Diante do exposto, a evolução dos processos erosivos lineares depende da interação entre forma do relevo, convergência topográfica e conectividade hidrológica das vertentes (Daniel et al., 2021).

Para comparação dos padrões espaciais de suscetibilidade, o mapa foi classificado em cinco classes: ($VI < -1$ (muito baixa), $-1 < VI < 0$ (baixa), $0 < VI < 1$ (moderada), $1 < VI < 3$ (alta), $VI > 3$ (muito alta) (Figura 1).



Fonte: Acervo autoral, 2026.

Observa-se maior suscetibilidade associada à rede de drenagem principal e efêmera da bacia, acompanhando a distribuição das cicatrizes erosivas, concentradas principalmente nos setores sul e leste. A validação do modelo apresentou desempenho satisfatório, com AAC de 77% para a taxa de predição (Grupo de Validação) e 74% para a taxa de sucesso (Grupo de Modelação), demonstrando confiabilidade estatística dos resultados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A suscetibilidade erosiva na bacia está associada à interação entre declividades moderadas e altas, convergência topográfica e acúmulo de fluxo superficial. A associação entre TWI elevado, TPI relacionado a vales e compartimentos geomorfológicos convergentes evidencia que a organização

hidrológica do relevo constitui o principal fator controlador da erosão linear. O Grupo de Validação obteve o melhor desempenho preditivo com AAC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento concedido pelo PDSE (Processo: 88881.126523/2025-01) com pesquisa desenvolvida na unidade do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT) da Universidade do Porto, Portugal. Agradecemos a Caroá Topografia e Agrimensura em nome do Fernando da Silva Alexandre pela colaboração na etapa de aerolevantamento, bem como ao Inocêncio de Oliveira Borges Neto pela assistência nas coletas em campo.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA NETO, M.V.; ARAÚJO, M. S. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SAMÁIO, E. V. de S.; ALMEIDA, B. G. Rill and sheet soil erosion estimation in the area undergoing desertification in the Brazilian semi-arid region. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 7, p. 1183-119. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.020>
- BONINI, J. E.; VIEIRA, B.C.; ROSS, J. L. S.; BATEIRA, C. V. de M.; Martins, T. D. Análise de parâmetros geomorfológicos na suscetibilidade a escorregamentos no sudeste brasileiro. *Derbyana*, São Paulo, 43: e764, 2022. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.764>
- CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica Lagos-São João (2019). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, p. 1415-1430.
- CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A.; MONTEIRO, K. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; LIRA, D. R. Megageomorfologia e morfoestrutura do planalto da Borborema. *Revista do Instituto Geológico*, v. 31, p. 35-52, 2010.
- CANAVESI, V.; SEGONI, S.; ROSI, A.; TING, X.; NERY, T.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Different approaches to use morphometric attributes in landslide susceptibility mapping based on meso-scale spatial units: A case study in Rio de Janeiro (Brazil). *Remote Sensing*, 2(11): 1-24, 2020 <https://doi.org/10.3390/RS12111826>
- DANIEL, E.; VIEIRA, B.C.; MARTINS, T.D. Implicações do uso do solo na ocorrência de feições erosivas em São Pedro (SP). *Derbyana*, v. 42, p. [1-14], 2021. <https://doi.org/10.14295/derb.v42.751>
- FAO. The State of Food and Agriculture. 2025.
- FRESSARD, M.; THIERY, Y.; MAQUAIRE, O. Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale? Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3):569-588, 2014. <https://doi.org/10.5196/nhess-14-569-2014>
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge (2022)
- MARENGO, J. A.; TORRES, R.R.; ALVES, L. M (2017). Drought in Northeast Brazil-past, present and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, p. 1189-1200
- PEREIRA, S.; ZÉZERE, J.L.; BATEIRA, C. Nota Técnica: Avaliando a capacidade preditiva e a independência condicional de fatores predisponentes a deslizamentos de terra para modelos de suscetibilidade a deslizamentos rasos, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 979-988, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-979-2012>, 2012.
- REICHENBACH, P.; ROSSI, M.; MALAMUD, B.D.; MIHIR, M.; GUZZETTI, F.A. Review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Scienc. Reviews*, 180: 60-91. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. 1996. Slope instability recognition, analysis, and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers and Geosciences*, 35(6): 1125-1138. <https://doi.org/10.1016/j.cargo.2008.08.007>
- STABILE, R.A.; VIEIRA, B.C. O papel do ângulo da encosta e da forma das vertentes na distribuição das feições erosivas da bacia Água da Faca, Piratininga (SP). In: UFV, Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13, Viçosa (MG), Anais, 11, 2009.
- WADI, D.; WU, W.; MALIK, I.; FAUD, A.; THAW, M. M. Assessment and feasibility of the potential artificial groundwater recharge in semi-arid crystalline rocks context, Beteira district, Sudan. *Scientific African*, v. 17, e01298, 2022.
- XAVIER, R. A.; BORGES NETO, I. O.; SOUZA, J. J. L. L.; CARDOSO, P. V.; SOUSA, J. O.; SOUZA, B. I. Processos de voçorocamento no Planalto da Borborema, semiárido da Paraíba. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, e2359, 2023
- YIN, K. L.; YAN, T. Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: Bonnard (ed.) *International Symposium on Landslides*, 5, Lausanne, Anais, 1988.