

## Avaliação da Vulnerabilidade Ecológica na Gestão de Riscos de Deslizamentos

Ellen Felizardo Batista

Discente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC - UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil, ellenfp@ifsp.edu.br

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Docente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC - UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, rinaldo@ufsm.br

Larissa de Brum Passini

Docente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC - UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil, larissapassini@ufpr.br

**RESUMO:** Os deslizamentos de terra representam um risco significativo para populações e ecossistemas, resultando em impactos ambientais expressivos. Este estudo propõe uma abordagem integrada para a avaliação do risco ecológico, considerando três dimensões fundamentais: suscetibilidade a deslizamentos, vulnerabilidade ecológica e exposição populacional. A vulnerabilidade ecológica foi analisada a partir dos valores ecológicos e do tempo necessário para a regeneração da vegetação. A metodologia foi aplicada no município de Barra do Turvo-SP, uma região montanhosa com histórico de deslizamentos, onde foi utilizado o sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica para analisar a vulnerabilidade ecológica na mensuração do risco de deslizamento. Os resultados indicaram que 45,55% do território apresentou baixa vulnerabilidade ecológica, enquanto 41,96% foi classificado como moderada. As classes alta, muito alta e muito baixa corresponderam, respectivamente, a 11,56%, 0,10% e 0,83% da área analisada. A mensuração do risco indicou que 25,55% da área apresenta risco baixo, 23,01% moderado e 20,15% alto, enquanto as classes de muito baixo e muito alto correspondem a 15,47% e 15,82%, respectivamente, evidenciando a importância da conservação ambiental na mitigação de riscos geológicos. Conclui-se que a metodologia empregada pode ser replicada em outros contextos geográficos, uma vez que se baseia em dados acessíveis, como imagens de satélite e informações geoespaciais públicas, e técnicas aplicáveis à gestão de desastres.

**PALAVRAS-CHAVE:** Valores ecológicos, Regeneração da vegetação, Geoprocessamento, Análise espacial.

**ABSTRACT:** Landslides represent a significant risk to populations and ecosystems, leading to substantial environmental impacts. This study proposes an integrated approach to ecological risk assessment, considering three fundamental dimensions: landslide susceptibility, ecological vulnerability, and exposure. Ecological vulnerability was analyzed based on ecological values and the time required for vegetation regeneration in impacted areas. The methodology was applied in the municipality of Barra do Turvo-SP, a mountainous region with a history of landslides, where remote sensing and Geographic Information Systems were used to analyze ecological vulnerability in the assessment of landslide risk. The results indicated that 45.55% of the territory exhibited low ecological vulnerability, while 41.96% was classified as moderate. The high, very high, and very low vulnerability classes accounted for 11.56%, 0.10%, and 0.83% of the analyzed area, respectively. The risk assessment showed that 25.55% of the area had low risk, 23.01% moderate risk, and 20.15% high risk, while the very low and very high-risk classes represented 15.47% and 15.82%, respectively, highlighting the importance of environmental conservation in mitigating geological hazards. It is concluded that the employed methodology can be replicated in other geographical contexts, as it is based on accessible data, such as satellite imagery and publicly available geospatial information, and on techniques applicable to disaster management.

**KEYWORDS:** Ecological values, Vegetation regeneration, Geoprocessing, Spatial analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

O risco ecológico associado a desastres geológicos pode ser compreendido como a interação entre perigo (susceptibilidade à ocorrência de eventos), vulnerabilidade ecológica (potencial de dano aos ecossistemas) e exposição (resposta dos elementos receptores aos riscos), conforme definido por Chen et al. (2013).

Embora a análise de riscos ecológicos venha ganhando espaço na literatura científica, a maior parte das pesquisas tem se concentrado em eventos como inundações, poluição e secas, sendo escassos os estudos que integram variáveis ecológicas na análise de deslizamentos de terra (Lin et al., 2021).

A vulnerabilidade ecológica é um conceito ainda em desenvolvimento, com definições diversas e aplicável a diferentes níveis do sistema ecológico, desde organismos até paisagens (He et al., 2018).

Dentre os desastres geológicos, os deslizamentos destacam-se por seu potencial destrutivo, comprometendo vidas humanas, infraestrutura e a integridade dos ecossistemas (CRED, 2015).

Este estudo teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade ecológica a deslizamentos no município de Barra do Turvo-SP, uma região montanhosa marcada por recorrentes eventos dessa natureza. A análise foi desenvolvida por meio da construção de um modelo tridimensional que incorpora i) a susceptibilidade a deslizamentos, ii) a vulnerabilidade ecológica da paisagem juntamente com o atraso na regeneração ecológica e iii) a exposição populacional. Essa abordagem contribui para o entendimento da distribuição espacial do risco ecológico e oferece subsídios para ações de planejamento e gestão ambiental mais eficazes, sendo aplicável a outras regiões com características similares.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O município de Barra do Turvo-SP, localizado no sudeste do Brasil (Figura 1), possui uma área de 1.007,684 km<sup>2</sup> e está inserido nas escarpas da Serra do Mar e Paranapiacaba (IBGE, 2006). Apresenta relevo acidentado, com altitudes variando de 100 m a 1.200 m, predominando entre 700 e 900 m (Ross, 2002).

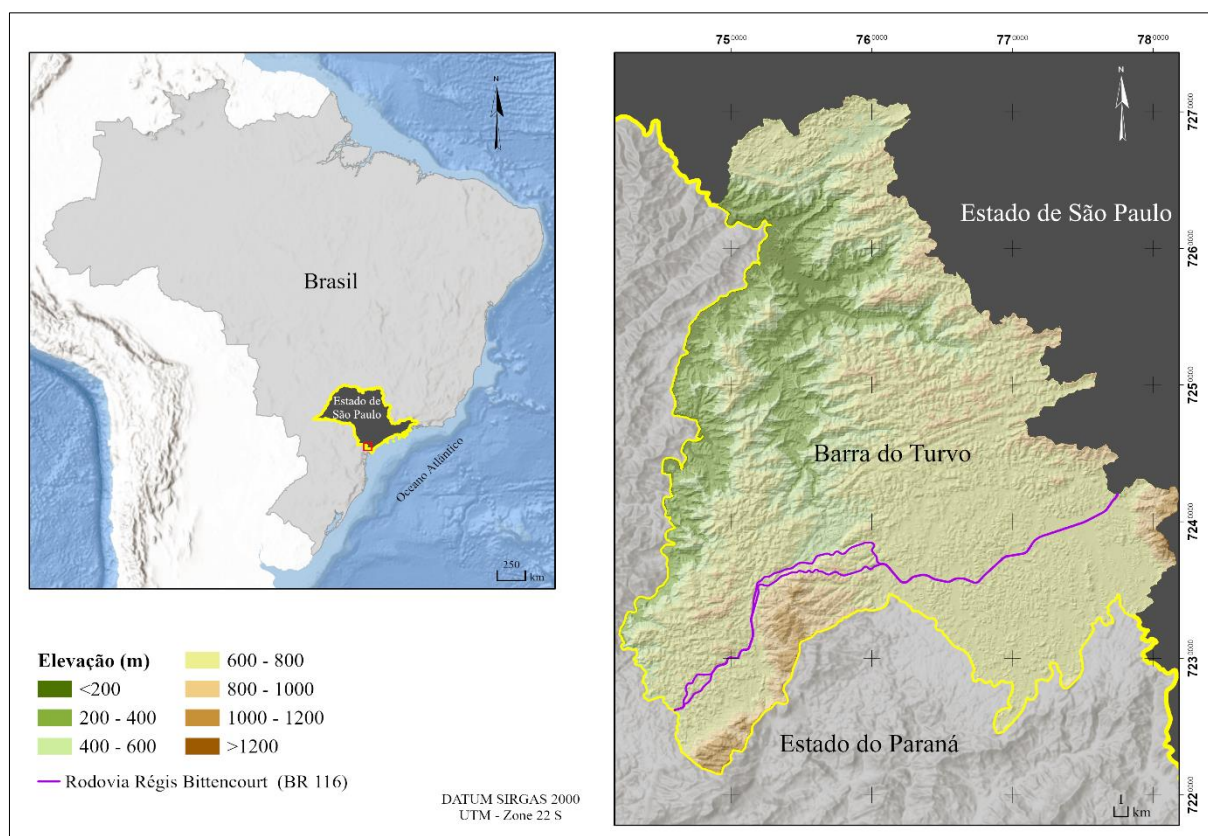


Figura 1. Localização do município de Barra do Turvo - SP, Brasil.



A geomorfologia complexa, aliada à diversidade geológica e tipos de solo como Cambissolo distrófico e Podzólico vermelho-amarelo (Faleiros & Pavan, 2013), conferem elevada fragilidade ecológica à região. A combinação desses fatores contribui para a recorrência de deslizamentos, especialmente do tipo translacional raso (Riedel, 2010), com 93 ocorrências registradas entre 2010 e 2018 ao longo da rodovia BR-116, segundo dados da concessionária Arteris (APRB, 2019).

O clima é classificado como subtropical úmido, com variações altitudinais (Cfb e Cfa), precipitações entre 1.500 e 2.000 mm/ano e temperatura média de 21,5 °C (SSE, 2010). Hidrograficamente, integra a bacia do Ribeira de Iguape e pertence ao bioma Mata Atlântica, com mais de 70% do território protegido por unidades de conservação (Bim & Furlan, 2013). A população de 6.875 habitantes (IBGE, 2022) é majoritariamente rural, com atividades econômicas voltadas à agricultura, pecuária e extrativismo (França, 2005), mas enfrenta altos níveis de pobreza e baixa qualidade de vida (Aguirra, 2020). Dadas essas características naturais e sociais, a região é altamente propensa a deslizamentos, justificando estudos voltados à mitigação de riscos.

## 2.2 Metodologia de avaliação de risco ecológico

A metodologia empregada para avaliação do risco ecológico associado a deslizamentos de terra foi baseada em um modelo tridimensional, que integra três componentes principais: o perigo, a vulnerabilidade ecológica e a exposição (Chuvieco et al., 2014; Zong et al., 2023). O processo metodológico foi desenvolvido com o apoio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dados de acesso aberto.

O componente de perigo foi representado pela suscetibilidade a deslizamentos de terra, baseada em estudo anterior de Dalmas (2013). O mapa utilizado foi elaborado a partir de análise multicritério integrando dados litológicos, geomorfológicos, pedológicos e de cobertura vegetal, utilizando o método de Combinação Linear Ponderada no software IDRISI Andes (Eastman, 2006), com validação de campo.

A vulnerabilidade ecológica foi avaliada a partir de dois eixos: os valores ecológicos da paisagem e o atraso na regeneração ecológica, conforme modelo adaptado de Arroigante-Funes et al. (2021). Os valores ecológicos foram determinados por meio de três indicadores: i) a biodiversidade, medida pela Produtividade Primária Líquida (NPP), ii) o estado de conservação, avaliado pelas Áreas Protegidas (APs) e o Índice de Naturalidade (IN), e iii) a fragmentação do habitat, obtida a partir da Análise Morfológica de Padrões Espaciais (MSPA).

A NPP foi derivada do produto MOD17A3HGF, fornecido pela NASA, com base em dados do sensor MODIS. Este produto estima a produtividade vegetal considerando variáveis como radiação fotossinteticamente ativa e características dos biomas (Running e Zhao, 2021). Já o estado de conservação foi obtido a partir da sobreposição entre os dados do *World Database on Protected Areas* (UNEP-WCMC, 2023) e os valores do IN, calculado a partir de Mosaicos de Paisagem (MP) gerados com base no *WorldCover 2021* da ESA (Zanaga et al., 2022). A fragmentação do habitat foi avaliada pela classificação das manchas de vegetação em categorias morfológicas como núcleo (*core*), borda (*edge*), ponte (*bridge*), entre outras, conforme metodologia de Soille e Vogt (2009), com atribuição de pesos segundo o potencial de conservação ecológica (Opdam et al., 2006).

Todos os dados foram processados no *software ArcGIS* e *GuidosToolbox* e padronizados em escala de 0 a 1, conforme procedimento detalhado por Batista & Passini (2025).

O atraso na regeneração ecológica foi calculado com base em quatro fatores: i) declividade (obtida do Modelo Digital de Elevação FABDEM V1-0), ii) nível de proteção (relativo às APs), iii) índice de erosividade da chuva (GloREDa, segundo Panagos et al., 2023) e iv) índice de erodibilidade do solo (EMBRAPA, 2020). Esses fatores foram integrados por meio de tabulação cruzada, gerando um índice final que representa a capacidade de recuperação do ecossistema após a perturbação causada por deslizamentos. A classificação considerou que áreas com alta declividade, baixa proteção e alta erodibilidade e erosividade apresentam maior atraso regenerativo e, portanto, maior vulnerabilidade ecológica.

A exposição populacional foi representada pela população residente na área de estudo, considerada o principal receptor de impacto em caso de ocorrência de desastres geológicos. Utilizaram-se dados censitários do IBGE (2022), os quais foram espacializados em pontos, sendo que cada ponto correspondeu a 50 habitantes, conforme metodologia adaptada de Guillard-Gonçalves et al. (2014).

A integração dos dados foi realizada por meio de cruzamento entre os mapas de vulnerabilidade ecológica e de suscetibilidade, gerando o mapa final de risco ecológico. A matriz de combinação considerou



pesos iguais para ambos os componentes, conforme metodologia já aplicada em estudos semelhantes (Guillard-Gonçalves et al., 2014; Lacerda et al., 2014). O resultado classificou as áreas em cinco níveis de risco (de muito baixo a muito alto), destacando regiões prioritárias para ações de prevenção e conservação.

Essa abordagem metodológica permitiu a avaliação espacial integrada do risco ecológico, com potencial de replicação em outras áreas montanhosas e ambientalmente sensíveis, além de oferecer suporte técnico para o planejamento territorial e a gestão ambiental sustentável.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos valores ecológicos indicou que aproximadamente 85% do território de Barra do Turvo apresenta elevada produtividade primária líquida (NPP), associada à densa cobertura da Mata Atlântica, o que eleva os indicadores de biodiversidade (Figura 2-A). Áreas de pastagem e zonas urbanas, representando cerca de 15%, exibiram os menores valores de NPP. No que se refere ao estado de conservação, 67% do território encontra-se sob proteção ambiental (Figura 2-B), e o Índice de Naturalidade apontou que 86,4% da área possui características de paisagens naturais (Figura 2-C). A análise da fragmentação revelou predominância de habitats classificados como *core* cobrindo 94,98% da área, indicando baixa fragmentação (Figura 2-D). A integração dos indicadores demonstrou que 56,23% do município apresenta valores ecológicos muito altos e apenas 1,7% valores baixos (Figura 2-E), o que reforça a importância ecológica da região e a necessidade de preservação.

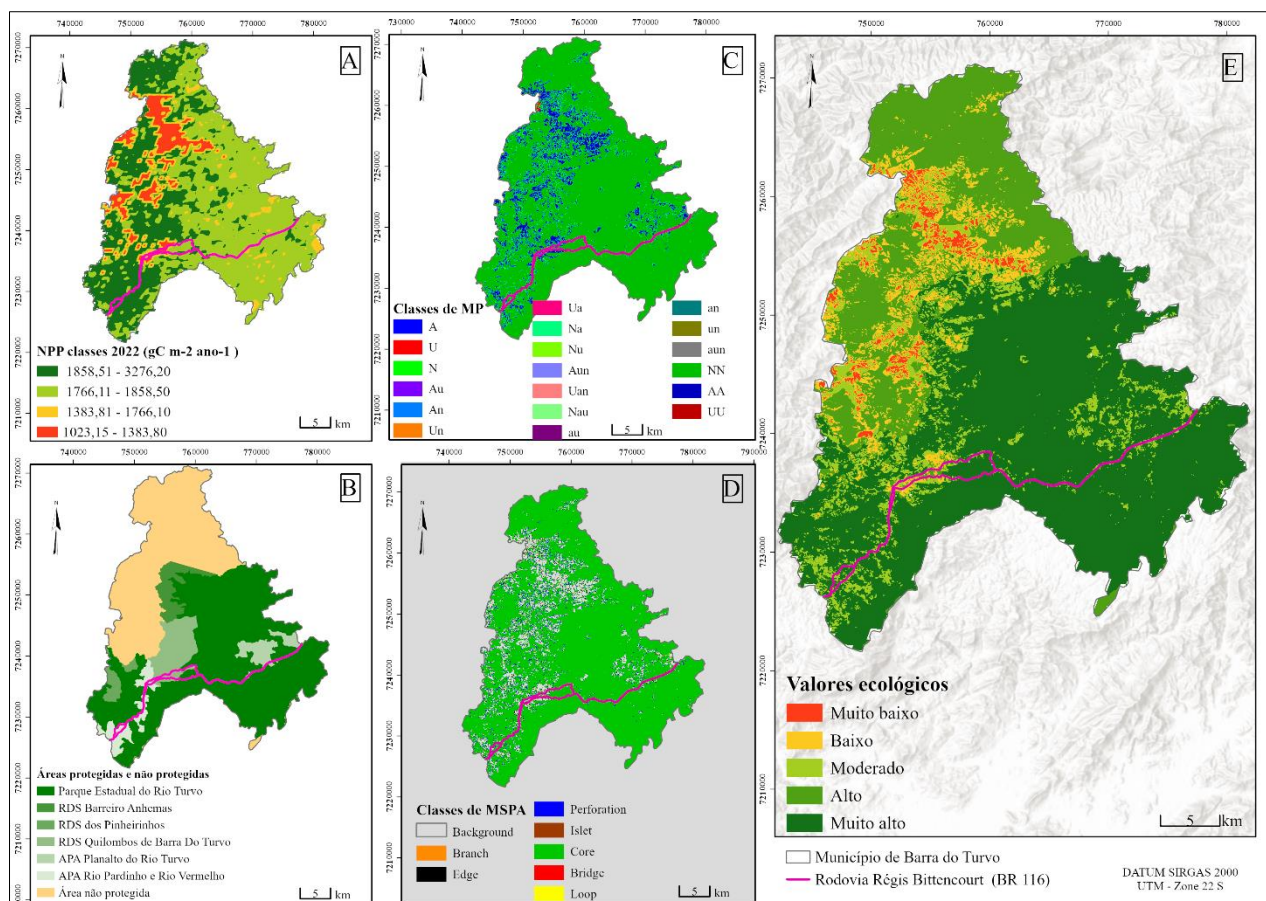


Figura 2. Distribuição espacial dos indicadores das avaliações dos valores ecológicos da área de estudo.

Na análise do atraso na regeneração ecológica, destacaram-se áreas com relevo forte ondulado e montanhoso, somando mais de 66% da superfície (Figura 3-A). A maioria do território apresentou índices altos ou muito altos de erosividade da chuva (Figura 3-B) e níveis significativos de erodibilidade do solo (Figura 3-C). A combinação desses fatores resultou em 47,25% da área com atraso moderado na regeneração e 38,07%

com atraso alto, refletindo fragilidade ecológica e alta susceptibilidade à degradação pós-eventos extremos (Figura 3-D).

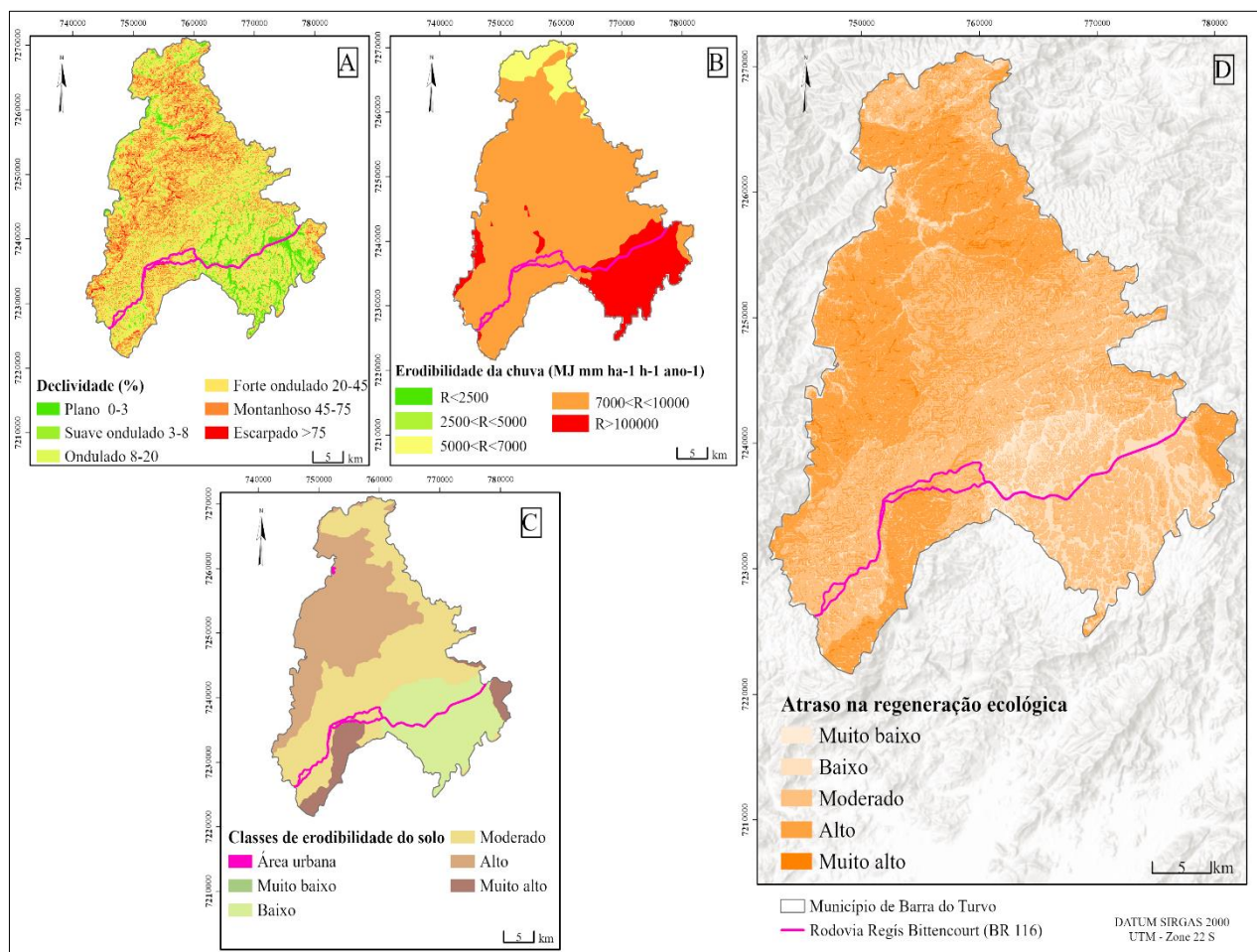


Figura 3. Distribuição espacial dos indicadores das avaliações dos valores ecológicos da área de estudo.

A vulnerabilidade ecológica, obtida pela integração entre os valores ecológicos e o atraso na regeneração, revelou que 45,55% do território apresenta baixa vulnerabilidade, 41,96% moderada, 11,56% alta, 0,10% muito alta e 0,83% muito baixa. As áreas mais vulneráveis concentram-se em regiões com maior fragmentação e uso intensivo do solo, enquanto as menos vulneráveis estão em áreas de cobertura florestal contínua e com menor intervenção humana (Figura 4-A).

O risco ecológico foi determinado a partir do cruzamento entre os mapas de vulnerabilidade e susceptibilidade (Figura 4-A e 4-B). A análise indicou que 40,71% da área é altamente suscetível a deslizamentos, com 35,87% do território classificado como de risco alto ou muito alto (Figura 4-C). As zonas de maior risco situam-se em áreas montanhosas, próximas a centros urbanos e à rodovia BR-116, onde há sobreposição de elevada vulnerabilidade e alta susceptibilidade. Por outro lado, regiões do sudoeste e sudeste apresentaram riscos consideravelmente menores. Casos em que a vulnerabilidade é alta, mas a susceptibilidade é baixa, revelam a influência de fatores locais mitigadores e destacam a complexidade das interações entre os componentes do risco. Essa avaliação integrada oferece uma base sólida para o direcionamento de ações de mitigação e políticas públicas voltadas à gestão ambiental e à redução de riscos ecológicos.



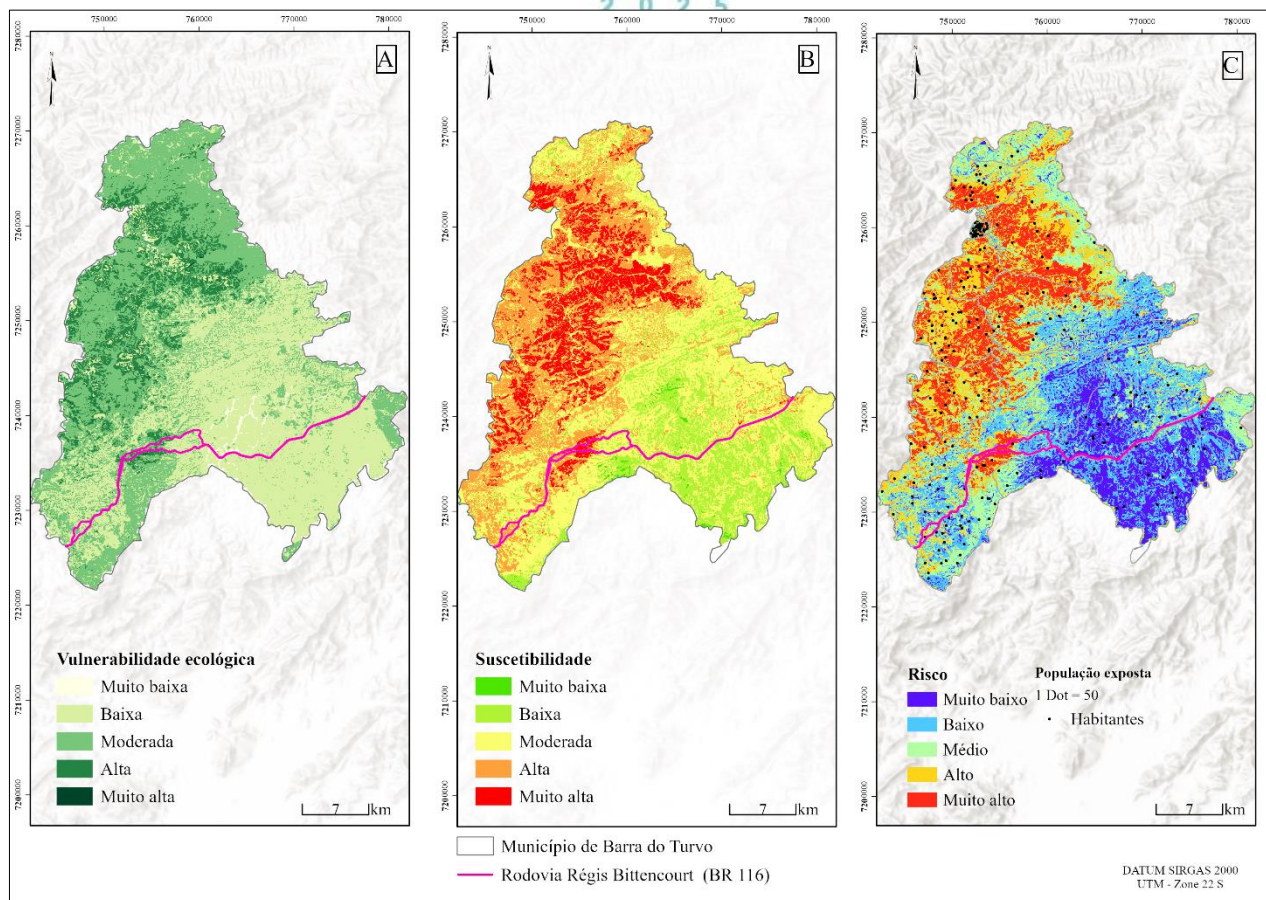


Figura 4. Distribuição espacial dos indicadores das avaliações dos valores ecológicos da área de estudo.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a vulnerabilidade ecológica do município de Barra do Turvo-SP e a aplicou em uma análise de risco ecológico, conforme os objetivos iniciais. A vulnerabilidade ecológica foi determinada por meio da integração dos valores ecológicos, representados por indicadores de biodiversidade, estado de conservação e fragmentação do habitat, com o atraso na regeneração ecológica, avaliado a partir de variáveis como declividade, nível de proteção, erosividade das chuvas e erodibilidade do solo.

Os resultados indicaram que 45,55% do território apresenta baixa vulnerabilidade ecológica, 41,96% vulnerabilidade moderada, 11,56% alta e 0,10% muito alta. Apenas 0,82% foi classificado como de vulnerabilidade muito baixa, evidenciando que a maior parte da área possui níveis moderados a baixos de vulnerabilidade ecológica, embora áreas mais sensíveis também estejam presentes.

Na análise de risco ecológico, foram integrados os mapas de suscetibilidade a deslizamentos, vulnerabilidade ecológica e exposição populacional. A metodologia adotada é pioneira na região, que já sofreu deslizamentos, mas carecia de estudos detalhados. A combinação de dados de acesso aberto com técnicas de Sensoriamento Remoto e SIG permitiu uma visão abrangente da paisagem, gerando um modelo replicável e de baixo custo operacional.

Destaca-se que parte significativa da população reside em áreas urbanas próximas a zonas de risco elevado, inclusive ao longo da rodovia e em regiões periféricas. A análise revelou que 35,87% do território está sujeito a risco alto ou muito alto. Embora a vulnerabilidade seja predominantemente baixa, o estudo reforça que mesmo essas áreas exigem conservação, já que ecossistemas saudáveis contribuem para a mitigação de riscos.

Por fim, ressalta-se a importância de medidas efetivas de conservação para garantir não apenas a segurança, mas também a sustentabilidade dos ecossistemas. O estudo evidencia a necessidade de aprofundar pesquisas que integrem suscetibilidade, vulnerabilidade e exposição populacional, gerando subsídios técnicos para a tomada de decisão por gestores públicos e o aprimoramento das estratégias de prevenção e gestão de desastres.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirra, I. C. R. (2020). *Modos de vida rurais no Vale do Ribeira: Diferenças no uso de recursos florestais e efeitos do Programa Bolsa Família nas práticas de subsistência e segurança alimentar*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Instituto de Energia e Ambiente/USP, 144 p.
- APRB - Autopista Régis Bittencourt. (2019). *Gestão da segurança dos taludes rodoviários da rodovia Régis Bittencourt, trecho da Serra do Mar PR-SP*. Curitiba.
- Arrogante-Funes, P., Bruzón, A. G., Arrogante-Funes, F., Ramos-Bernal, R. N., Vázquez-Jiménez, R. (2021). Integration of vulnerability and hazard factors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (22).
- Batista, E. F., Passini, L. de B. (2025). Ecological vulnerability in landslide risk measurement in the municipality of Barra do Turvo, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(4), p. 2621-2639.
- Bim, O. J. B., Furlan, S. A. (2013). Mosaico do Jacupiranga - Vale do Ribeira / SP: conservação, conflitos e soluções socioambientais. *Agrária (São Paulo. Online)*, 18, p. 4-36.
- Chen, S., Chen, B., Fath, B. D. (2013). Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models and future perspectives. *Ecological Modelling*, 250, p. 25-33.
- Chuvieco, E., Martínez, S., Román, M. V., Hantson, S., Pettinari, M. L. (2014). Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Global Ecology and Biogeography*, 23 (2), p. 245-258.
- CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disaster. (2015). *The Human Cost of Natural Disasters: A Global Perspective*. Brussels, Belgium.
- Dalmas, F. B. (2013). *Análise da evolução do uso e ocupação do solo na UGRHI-11*. Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrologia, Instituto de Geociências/USP, 165 p.
- Eastman, R. (2006). *Guide to GIS and Image Processing: IDRISI Andes Manual*. Clark University.
- EMBRAPA. (2020). Mapa da Erodibilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil. Disponível em: <[https://geoinfo.dados.embrapa.br/datasets/geoinfo\\_data:geonode:brasil\\_erodibilidade\\_solo/metadata\\_detail](https://geoinfo.dados.embrapa.br/datasets/geoinfo_data:geonode:brasil_erodibilidade_solo/metadata_detail)>. Acesso em: 27 maio 2025.
- Faleiros, F., Pavan, M. (2013). *Geologia e recursos minerais da folha Eldorado Paulista SG. 22-XB-VI*. CPRM.
- França, A. M. (2005). *Vale do Ribeira (SP): Proposições econômicas, sociais, políticas e ambientais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Estudos Pós-Graduados em Economia Política/PUC, 323 p.
- Guillard-Gonçalves, C., Cutter, S. L., Emrich, C. T., Zêzere, J. L. (2014). Application of Social Vulnerability Index (SoVI). *Journal of Risk Research*, 18(5), p. 651-674.
- He, L., Shen, J., Zhang, Y. (2018). Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management. *Journal of Environmental Management*, 206, p. 1115-1125.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2006). *Unidades de Relevo 1:5.000.000*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/15827-unidades-de-relevo.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 27 maio 2025.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Censo 2022*. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 27 maio 2025.
- Lacerda, W. A., Palmeira, E. M., Netto, A. L. C., Ehrlich, M. (Eds.). (2014). *Extreme rainfall induced landslides*. São Paulo: Oficina de Textos.



- Lin, J., Lin, M., Chen, W., Zhang, A., Qi, X., Hou, H. (2021). Ecological risks of geological disasters and the patterns of the urban agglomeration in the Fujian Delta region. *Ecological Indicators*, 125, 107475.
- Opdam, P., Steingróver, E., Rooij, S. Van. (2006). Ecological networks: A spatial concept. *Landscape and Urban Planning*, 75(3-4), p. 322-332.
- Panagos, P., Hengl, T., Wheeler, I., et al. (2023). *Global rainfall erosivity database (GloREDa)*. Data in Brief, 50, 109482.
- Riedel, P. S., Gomes, A. R., Ferreira, M. V., Sampaio Lopes, E. S., Sturaro, J. R. (2010). Identification of landslide scars in the region of the Serra do Mar, São Paulo State, Brazil. *GIScience & Remote Sensing*, 47, p. 498-513.
- Ross, J. L. S. (2002). A morfogênese da bacia do Ribeira do Iguape e os sistemas ambientais. *Geousp: Espaço e Tempo* (Online), 6(2), p. 21-46.
- Running, S. W., Zhao, M. (2021). *User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2H/A3H)*. NASA Earth Observing System.
- SSE. Secretaria de Saneamento e Energia. (2010). *Plano regional integrado de saneamento básico para UGRHI 11*. São Paulo, Brasil.
- Soille, P., Vogt, P. (2009). Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 30(4), p. 456-459.
- UNEP-WCMC. (2023). *Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA)*. United Nations Environment Programme - World Conservation Monitoring Centre.
- Zanaga, D., Van de Kerchove, R., Daems, D., et al. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*.
- Zong, L., Zhang, M., Chen, Z., Niu, X., Chen, G., Zhang, J., Liu, H. (2023). Ecological risk assessment of geological disasters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20 (5), 4428.