

MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL A PROCESSOS EROSIVOS NO PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA (MG), BRASIL

Manoel Ribeiro Rodrigues Neto¹

Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)
Alfenas, MG, Brasil

Marta Felícia Marujo Ferreira²

Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)
Alfenas, MG, Brasil

Cassiano Gustavo Messias³

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
São José dos Campos, SP, Brasil

Enviado em 3 set. 2021 | Aceito em 17 mai. 2023

Resumo: O Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE) é uma Unidade de Conservação (UC) criada para garantir a preservação do ecossistema serrano local, mas que sofre pressões antrópicas que podem culminar em problemas ambientais, como a degradação do solo. Nesse sentido, o objetivo deste artigo foi mapear e analisar a Fragilidade Ambiental (FA) à ocorrência de processos erosivos no parque, localizado no município de Boa Esperança, Minas Gerais, Brasil. A metodologia utilizada foi desenvolvida por Garofalo e Ferreira (2015) e emprega técnicas de análise geoespacial em sistema de informação geográfica (SIG). O mapa de FA foi gerado por meio da combinação de variáveis geoambientais, às quais se atribuíram pesos estimados a partir de sua associação com a ocorrência de processos erosivos. Esses pesos foram calculados por meio do teste estatístico *Kolmogorov-Smirnov*. Os resultados demonstraram que as áreas com maior FA estão localizadas nos níveis mais altos da Serra da Boa Esperança, no setor central do parque, onde também estão localizadas as nascentes do ribeirão Águas Verdes. Já os menores índices de FA foram identificados predominantemente no *front* da Serra da Boa Esperança na porção Sul da UC e na bacia do ribeirão Verde. Conclui-se que valores elevados de FA estão fortemente relacionados à baixa densidade de cobertura vegetal e à alta densidade de vias de circulação e, portanto, recomenda-se que sejam tomadas medidas para cessar as atividades conflitantes visando evitar a aceleração de processos erosivos.

Palavras-chave: Geografia Física; Modelo Geoespacial; Kolmogorov-Smirnov; Lógica Fuzzy; Erosão.

1. Graduado em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL – MG (2019) e Mestre em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas. Analista em SIG no Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-2594>. E-mail: manoelnt93@gmail.com. Telefone: (35) 99900-3068.

2. Graduada em Geografia pela Universidade Estadual Paulista – UNESP – Rio Claro (1987) e Doutora em Geociências pela Universidade Estadual Paulista (2001). Professora associada aposentada da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3614-9363>. E-mail: marta felicia@uol.com.br. Telefone: (35) 99177-0007.

3. Graduado em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL – MG (2012) e Doutor em Geografia, pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – SP (2018). Auditor no Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1497-1022>. E-mail: cassiano.messias@inpe.br. Telefone: (19) 98271-5020.

MAPPING OF ENVIRONMENTAL FRAGILITY TO EROSION PROCESSES IN THE SERRA DA BOA ESPERANÇA STATE PARK (MG), BRAZIL

Abstract: The *Serra da Boa Esperança* National Park (SBENP) is a Conservation Unit (CU) created to ensure the preservation of the local mountain range ecosystem, but which suffers from anthropic pressures that may lead to environmental problems, such as soil degradation. In this regard, the aim of this paper was to map and analyse Environmental Fragility (EF) to occurrence of erosive processes in that park, located in the city of *Boa Esperança*, *Minas Gerais* state, Brazil. The methodology applied in this paper was developed by Garofalo and Ferreira (2015) and employs geospatial analysis techniques in a geographic information system (GIS). The EF map was generated by the conjunction of geoenvironmental variables, of which weights were assigned and estimated based on their association with the occurrence of erosive processes. These weights were calculated using the *Kolmogorov-Smirnov* statistical teste. The results demonstrated that the areas of highest EF are located in the highest levels of the *Serra da Boa Esperança* in the central sector of the SBENP, where the sources of *Águas Verdes* river basin are also situated. As for the areas with lower EF value, they are placed in the front of the *Serra da Boa Esperança*, Southern portion of the SBENP, and in the *Verde* river basin. The highest values of EF in the SBENP are related to sparse vegetal cover and areas of high concentration of roads, therefore, we recommend that measures be taken to cease conflicting activities in order to avoid the acceleration of erosion processes.

Keywords: Physical Geography; Geospatial Model; Kolmogorov-Smirnov; Fuzzy logic; Erosion.

MAPEO DE LA FRAGILIDAD AMBIENTAL CON RELACIÓN A LOS PROCESOS EROSIVOS EN EL PARQUE ESTATAL SERRA DA BOA ESPERANÇA (MG), BRASIL

Resumen: El Parque Estatal *Serra da Boa Esperança* (PESBE) es una Unidad de Conservación (UC) creada para garantizar la preservación del ecosistema montañoso local, pero sufre con presiones antrópicas que pueden culminar en problemas ambientales, como la degradación del suelo. En este sentido, el objetivo de este artículo fue mapear y analizar la Fragilidad Ambiental (FA) con relación a la ocurrencia de procesos de erosión en el parque ubicado en el municipio de *Boa Esperança*, *Minas Gerais*, Brasil. La metodología utilizada fue desarrollada por Garofalo y Ferreira (2015) y emplea técnicas de análisis geoespacial en un sistema de información geográfica (SIG). El mapa de FA se generó a partir de la combinación de variables geoambientales, a las que se les atribuyó pesos estimados en función de su asociación con la ocurrencia de procesos erosivos. Estos se calcularon utilizando la prueba estadística *Kolmogorov-Smirnov*. Los resultados mostraron que las áreas con mayor FA están ubicadas en los niveles más altos de la *Serra da Boa Esperança* en el sector central del parque, donde también se encuentran las fuentes de agua del río *Águas Verdes*. Los índices más bajos de FA se identificaron predominantemente en *Serra da Boa Esperança* en la parte Sur de la UC y en la cuenca del río *Verde*. Se concluye que los niveles altos de FA están fuertemente relacionados con la baja densidad de cobertura vegetal y la alta densidad de vías de circulación, así que se recomienda tomar medidas para cesar las actividades conflictivas a fin de evitar la aceleración de los procesos erosivos.

Palabras clave: Geografía Física; Modelo Geoespacial; Kolmogorov-Smirnov; Lógica Fuzzy; Erosión.



Introdução

A erosão dos solos é um grave problema que, ocasionalmente, se torna irreversível. Nas regiões de clima tropical, com chuvas concentradas em certas estações do ano, os processos de erosão hídrica preocupam a gestão do uso do solo e da água, demandando estudos destinados ao seu controle e prevenção (GUERRA; MENDONÇA, 2020). A erosão é uma das principais ameaças que impulsionam a degradação do solo em todo o mundo, com impactos importantes no rendimento das culturas, na biota do solo, nos ciclos biogeoquímicos e na nutrição humana (GUERRA *et al.*, 2020). A maior parte dos solos no mundo se encontram em condições razoáveis ou ruins, sendo que práticas agrícolas e pecuárias inadequadas, assim como a remoção da vegetação nativa, são as principais causas antrópicas de sua erosão (BORRELLI *et al.*, 2020).

A erosão caracterizada como normal, ou seja, menos evidente, ocorre em condições naturais do ambiente (BIGARELLA, 2007); e a acelerada acontece quando há perda de uma grande quantidade de material em um curto período, sendo ocasionada por atividades antropogênicas (CALDAS; SILVA; SANTOS, 2019) e impulsionada pelas mudanças climáticas (HAIDARA *et al.*, 2019). Sendo assim, “os processos erosivos acelerados prejudicam e impactam o meio ambiente e a sociedade, tanto no local (*onsite*) onde os processos ocorrem, como em áreas próximas ou afastadas (*offsite*)” (GUERRA;

MENDONÇA, 2020, p. 233). Desse modo, a erosão diminui a fertilidade e a produtividade agrícola do solo, impacta a biota e os ciclos geoquímicos, eleva o assoreamento de corpos e massas d'água contribuindo para o aumento dos casos de enchentes (GUERRA; MENDONÇA, 2020; GUERRA *et al.*, 2020).

A fragilidade ambiental pode ser definida como a vulnerabilidade dos sistemas ambientais em sofrer qualquer tipo de impacto, estando relacionada a desequilíbrios de ordem natural e antropogênica (TAMANINI, 2008). O conceito de fragilidade ambiental, preconizado por Ross (1994), é baseado nas Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977) e na teoria sistêmica, tendo respaldo também na dinâmica climática que, em função da intensidade das chuvas, associada às variáveis solo, relevo e uso da terra, geram diferentes processos erosivos (ROSS, 1994).

Assim, diversos estudos ressaltam a necessidade de desenvolver modelos e métodos direcionados à mitigação da degradação dos solos, ou seja, métodos de fragilidade ambiental (FA) a erosão. No Brasil, três modelos principais de FA são utilizados por pesquisadores e gestores, sendo os dois primeiros propostos por Ross (1994) e o último proposto por Crepani *et al.* (1996). Nos últimos anos, diversos autores, aproveitando-se do avanço dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), buscaram aperfeiçoar os modelos de FA já consagrados ou, ainda, desenvolver novas metodologias para o mapeamento da fragilidade à ocorrência de processos erosivos (CEREDA JUNIOR; ROHM, 2014; COCHECI *et al.*, 2019; FOLHARINI; OLIVEIRA; FURTADO, 2017; GAROFALO; FERREIRA, 2015; MACEDO *et al.*, 2018).

Nos dois modelos de Ross (1994), a fragilidade dos ambientes é verificada a partir do cruzamento de mapas temáticos de variáveis do relevo (dissecação ou declividade), de solos, de cobertura vegetal e do clima. Os dois modelos se diferem quanto ao uso da variável do relevo, sendo que o autor indica o uso da dissecação do relevo para escalas médias e pequenas, e a declividade para escalas de maior detalhe. Essas variáveis são agrupadas em cinco classes, obedecendo uma hierarquia quanto à intensidade da fragilidade: muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5).

Já o modelo de Crepani *et al.* (1996) integra as variáveis rocha, relevo, solo, vegetação, uso da terra e clima, a fim de elaborar um mapa de Unidades Territoriais Básicas (UTBs), composto por unidades de paisagem natural e por polígonos de intervenção antrópica. Esse mapa é comparado a um banco de dados relacional, visando atribuir um valor de vulnerabilidade à perda de solo para cada variável. A essas UTBs são atribuídos valores entre 1 e 3, que correspondem ao grau de vulnerabilidade aos processos morfogenéticos.

Uma limitação em relação às metodologias citadas é a atribuição de pesos idênticos ou de forma subjetiva às variáveis geoambientais, devido à complexidade em se verificar a influência de cada variável na FA (MESSIAS; FERREIRA, 2017). Nesse sentido, Garofalo e Ferreira (2015) propuseram um modelo de FA que utiliza técnicas de análise geoespacial em SIG. O método visa a aplicação do teste estatístico *Kolmogorov-Smirnov* (KS) para avaliar o grau de influência de variáveis geoambientais na evolução de processos erosivos, além da integração de mapas temáticos dessas variáveis por meio de ferramentas disponíveis em softwares de SIG.

O modelo de FA de Garofalo e Ferreira (2015) se destaca também por empregar mapas em escala *Fuzzy*, o que permite gerar representações cartográficas mais próximas da realidade terrestre. Além disso, uma vantagem da utilização do teste KS é que ele permite avaliar a dependência espacial entre processos erosivos e quaisquer variáveis geoambientais que possam ser representadas em escala *Fuzzy*. Os autores citados aplicaram o modelo de fragilidade na Área de Proteção Ambiental Fernão Dias e, posteriormente, Messias e Ferreira (2017), o empregaram no Parque Nacional da Serra da Canastra.

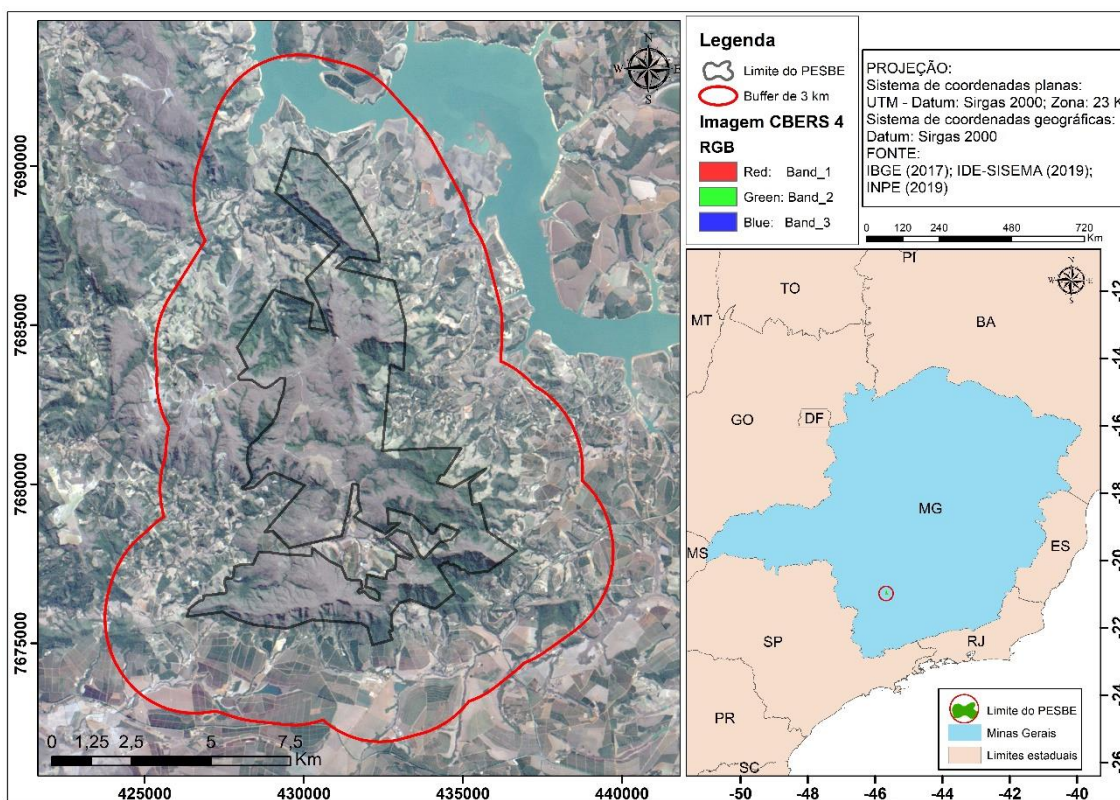
Partindo desses pressupostos, o objetivo deste artigo é realizar uma análise da FA a processos erosivos do Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE) utilizando a metodologia de Garofalo e Ferreira (2015). O estudo visa avaliar quais áreas desta Unidade de Conservação (UC) são mais propensas a desenvolverem tais processos e, portanto, demandam maior atenção no âmbito do planejamento ambiental.

Material e Métodos

Área de Estudo

O PESBE está localizado no município de Boa Esperança (Figura 1), situado na microrregião de Varginha e na mesorregião Sul e Sudoeste de Minas Gerais (IBGE, 1990; IEF, 2021). Trata-se de uma Unidade de Conservação de Proteção Integral criada em 2007 por meio do Decreto Estadual 44.520, com área de 5.873,9 ha, estando sob a responsabilidade administrativa do Instituto Estadual de Florestas (IEF) (MINAS GERAIS, 2007). Sua criação está relacionada com a construção da hidrelétrica de Furnas, um importante fato histórico que ocorreu no final da década de 1950 e início de 1960 (RODRIGUES NETO; FERREIRA; MESSIAS, 2021). Esse grande empreendimento alterou a dinâmica socioeconômica e ambiental de municípios lindeiros, através, por exemplo, da inundação de áreas agricultáveis, como ocorreu em Boa Esperança (MARTINS, 2010).

Figura 1 - Localização do Parque Estadual Serra da Boa Esperança, MG, Brasil



Fonte: Dos autores (2023).

Com o avanço do reservatório sobre as áreas agricultáveis nos relevos mais rebaixados do município de Boa Esperança, agricultores e pecuaristas começaram a expandir suas atividades

produtivas em direção à Serra da Boa Esperança. Esse fato motivou lideranças locais, aliadas à prefeitura municipal, a iniciar o processo de criação da UC, objetivando cessar a expansão agrícola e preservar a área já prevista legalmente (IEF, 2021; MORAIS *et al.*, 2014).

O parque possui grande importância ecológica (IEF, 2021), estando, do ponto de vista local, inserido no bioma Cerrado e, no âmbito regional, localizado na transição entre os domínios do Cerrado e da Mata Atlântica (IBGE, 2021). Apresenta um relevo predominantemente serrano, sobre o qual se desenvolve vegetação formada por campos de altitude, existindo secundariamente, presença de fragmentos de floresta estacional semidecidual (RANGEL, 2017).

A área de estudo abriga uma grande diversidade de espécies da fauna, como o lobo-guará, o tamanduá-bandeira, a onça-parda e a jaguatirica (ALVES, 2019), além de aves como o gavião carcará, o bico de veludo e a noivinha branca (COUTINHO; ANDRADE, 2016). Além da riqueza biológica, o parque possui recursos hídricos abundantes, representados por uma complexa rede de drenagem formada por cachoeiras e corredeiras, que contribuem para seu potencial turístico, além de diversos afluentes do rio Grande e do reservatório de Furnas, que abastecem a população do entorno (IEF, 2021).

Contudo, apesar de sua relevância socioambiental, a UC enfrenta diversos problemas como: lentidão na regularização fundiária, episódios de incêndios criminosos, desenvolvimento de atividades conflitantes (como o motociclismo *off-road*), além da visitação não regulamentada a alguns pontos turísticos (ALVES, 2019; AMBRÓSIO, 2014; MORAIS *et al.*, 2014).

Material

Os materiais cartográficos e de sensoriamento remoto utilizados para a realização da pesquisa são descritos no Quadro 1. Esses materiais foram adquiridos nas seguintes fontes de dados: *Alaska Satellite Facility* (ASF, 2020), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020) e *United States Geological Survey* (USGS, 2019). O processamento de dados e a produção dos mapas temáticos foram realizados nos softwares *ArcMap 10.5* (ESRI, 2016) e *Google Earth Pro* (GOOGLE, 2020), disponíveis no Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal de Alfenas.

Quadro 1 - Material cartográfico e de sensoriamento remoto utilizado

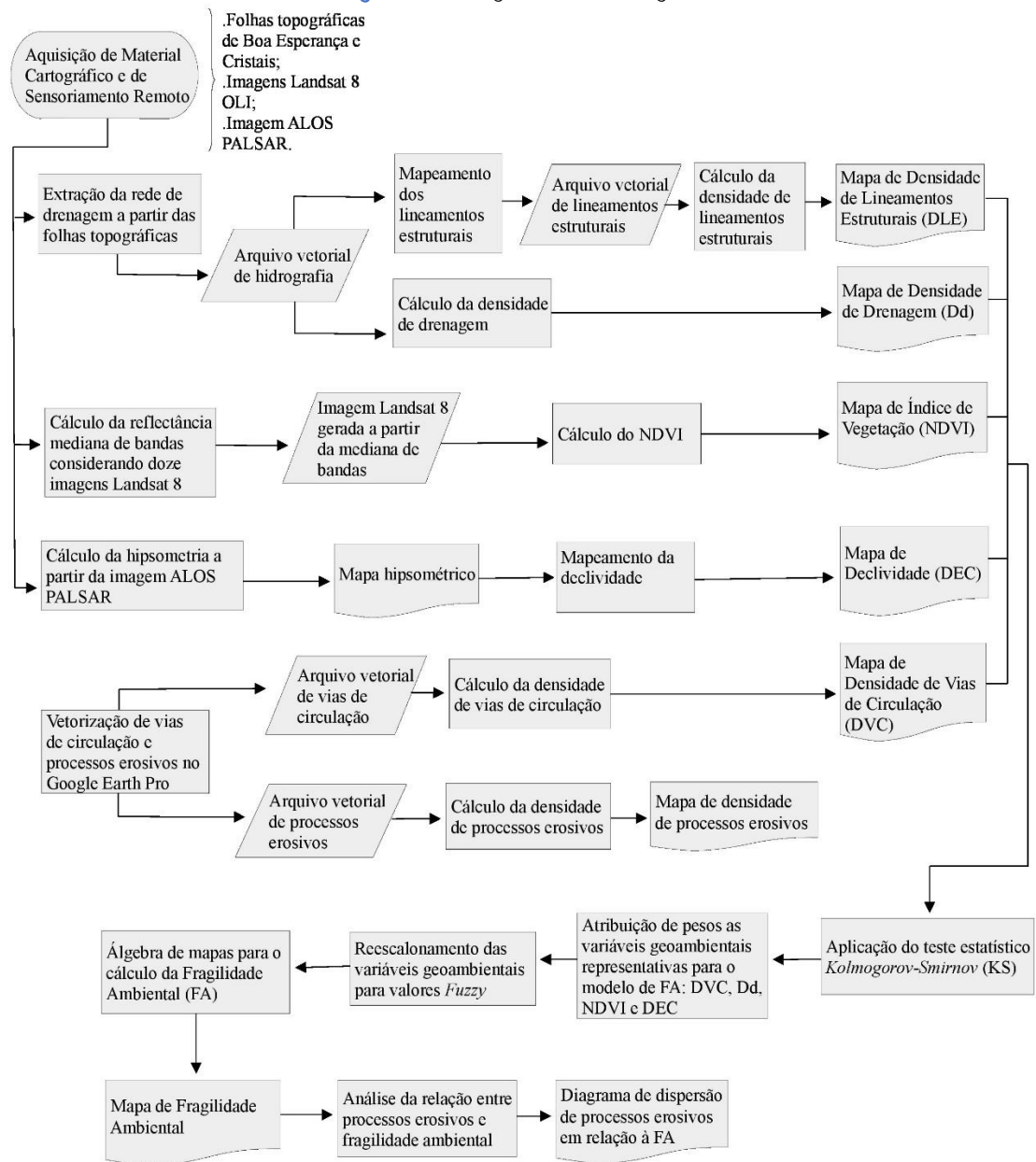
MATERIAL CARTOGRÁFICO E DE SENSORIAMENTO REMOTO	ARTICULAÇÃO/CENA	ESCALA/RESOLUÇÃO ESPACIAL	FONTE
Carta topográfica de Boa Esperança	SF-23-I-I-2	1:50.000	IBGE (2020)
Carta topográfica de Cristais	SF-23-C-III-4	1:50.000	IBGE (2020)
Imagens OLI Landsat 8 em 19/09/2019	219/074	30 m	USGS (2019)
Modelo Digital de Elevação – ALOS PALSAR RTC	8489	12,5 m	ASF (2020)

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos realizados nesta pesquisa são apresentados no fluxograma metodológico (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma metodológico.



Fonte: Dos autores (2023).

Mapeamento das erosões

No mapeamento de processos erosivos foram consideradas as seguintes tipologias de erosão: erosão laminar, sulco, ravina, voçoroca, escorregamentos (no parque aparecem como cicatrizes antigas e atuais) e erosão antrópica. No presente estudo considerou-se como erosão antrópica as ranhuras ou sulcos superficiais no terreno, com exposição e compactação do solo, causadas pela ação mecânica dos pneus das motocicletas utilizadas na prática do motociclismo *off-road*.

O mapeamento da distribuição espacial da erosão foi realizado diretamente no software *Google Earth Pro* (GOOGLE, 2020), que disponibiliza imagens orbitais gratuitas e com resolução espacial

condizente com tal objetivo (GAROFALO; FERREIRA, 2015; MESSIAS; FERREIRA, 2017). A identificação dos processos erosivos foi realizada visualmente com imagens orbitais de setembro de 2019, utilizando-se uma altitude do ponto de visão de 1,7 km. Para auxiliar na identificação dos processos erosivos e tornar o mapeamento mais uniforme, foram criadas chaves de interpretação contendo exemplos de imagens e as principais características de cada processo erosivo (Quadro 2).

Quadro 2 - Chave de interpretação dos processos erosivos mapeados no PESBE

TIPO DE PROCESSO EROSIVO	ELEMENTOS DE INTERPRETAÇÃO	FEIÇÕES OBSERVADAS NO GOOGLE EARTH PRO
Erosão laminar	<ul style="list-style-type: none"> - Não forma canais definidos; - Remoção da camada superficial do solo; - Associada a terrenos de baixa amplitude e declividade. 	
Erosão antrópica	<ul style="list-style-type: none"> - Forma linear; - Incisões superficiais e exposição do solo; - Feições próximas entre si, com direções variadas; - Associadas a trilhas. 	
Sulco	<ul style="list-style-type: none"> - Forma linear; - Profundidade de até 0,5 m; - Direção perpendicular às curvas de nível. 	
Ravina	<ul style="list-style-type: none"> - Forma retilínea, alongada e estreita; - Profundidade maior que 0,5 m. 	
Voçoroca	<ul style="list-style-type: none"> - Ravinamentos acelerados, chegando a atingir o nível freático (dimensões variadas); - Apresentam paredes abruptas e cabeceira íngreme; - Perfil transversal em forma de "U" ou manjedoura. 	
Escorregamento	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamento; - Ruptura plana ou curva; - Pequenos ou grandes volumes de material; - Geometria e materiais variáveis. 	

Fonte: Organizado pelos autores (2021).

No centro de cada processo erosivo identificado foi adicionado um marcador. Finalizado o mapeamento, os marcadores foram exportados e, por meio do *ArcMap* 10.5, foram convertidos em um arquivo vetorial de pontos. Esse arquivo foi reprojetoado para o sistema de coordenadas planas Universal Transversa de Mercator (UTM), *Datum* SIRGAS 2000 e zona 23K.

Foi realizado um trabalho de campo para o reconhecimento da área de estudo e a checagem dos processos erosivos mapeados. Houve necessidade de uma revisão no mapeamento e, com base nos processos validados *in loco*, realizou-se nova análise visual dos processos erosivos anteriormente mapeados, através do *Google Earth Pro*. Nesta etapa, os pontos de erosão considerados duvidosos foram excluídos.

Por fim, foi estimada a densidade dos processos erosivos por meio do estimador Kernel, no *ArcMap* 10.5. O raio de abrangência empregado para o estimador foi o de 1 km e o arquivo matricial gerado foi recortado para a área de estudo, apresentando valores de densidade em pontos/km².

Mapeamento das variáveis geoambientais

A metodologia de Garofalo e Ferreira (2015) propõe a combinação de mapas temáticos que representam variáveis geoambientais que condicionam a ocorrência de processos erosivos. Por ser flexível em relação à utilização dessas variáveis, além da Declividade (DEC), do Índice de Vegetação (NDVI), da Densidade de Vias de Circulação (DVC) e da Densidade de Lineamentos Estruturais (DLE), empregadas pelos autores, em nossa pesquisa também foi inserida a Densidade de Drenagem (Dd). No Quadro 3 pode ser observada a descrição da metodologia empregada no mapeamento de tais variáveis. Foram atribuídos intervalos de classes por meio da técnica de quantil, gerando quatro classes distribuídas com áreas semelhantes (FERREIRA, 2014).

Quadro 3 - Variáveis utilizadas no modelo, justificativa para sua escolha e metodologia utilizada para o mapeamento

VARIÁVEL	JUSTIFICATIVA PARA ESCOLHA	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS
Declividade (DEC)	A declividade é o ângulo formado entre qualquer parte da superfície terrestre e um <i>datum</i> horizontal (THOMAS, 2016). Quanto maior a declividade, maior volume e velocidade do escoamento superficial, e maior capacidade de desagregação e transporte de partículas de solo pela enxurrada (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003).	O mapa de declividade foi elaborado através da ferramenta <i>Slope</i> , do <i>ArcMap</i> 10.5. Foi utilizado, como arquivo de entrada, o MDE ALOS PALSAR RTC, e os valores de declividade foram obtidos em graus.
Índice de vegetação da diferença normalizada – (NDVI)	O NDVI é um indicador quantitativo do teor de biomassa da cobertura vegetal, determinando a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011). É uma ferramenta útil para se inferir informações sobre os diferentes graus de proteção do solo, pois a vegetação reduz o fluxo superficial e a ação erosiva (BIGARELLA, 2007). Quanto maior o valor do NDVI, maior o grau de proteção do solo pela vegetação (MESSIAS; FERREIRA, 2017).	Devido à sazonalidade da vegetação no decorrer do ano, especialmente as herbáceas, foram selecionadas doze imagens do sensor <i>Operational Land Imager</i> (OLI), <i>Landsat</i> 8, entre 2014 e 2019, sendo duas de cada ano e de períodos diferentes. Por meio destas imagens, foi calculada a reflectância mediana em cada banda (MESSIAS; FERREIRA, 2019), através da ferramenta <i>Cell Statistics</i> , do <i>ArcMap</i> 10.5. A imagem obtida foi empregada no cálculo do NDVI, gerado a partir da razão entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (VER) e a soma das reflectâncias de IVP e VER (ROUSE, <i>et al.</i> , 1973), através da calculadora raster.

<p>Densidade de drenagem (Dd)</p>	<p>A densidade de drenagem é um parâmetro morfométrico que indica o comprimento médio dos canais fluviais por unidade de área (HORTON, 1945). Altas densidades de drenagem estão associadas a terrenos mais impermeáveis, onde a infiltração é dificultada e o escoamento superficial é favorecido, contribuindo para a evolução de processos erosivos (BIGARELLA, 2007; CHRISTOFOLETTI, 1980).</p>	<p>A rede de drenagem do PESBE e de sua área de influência foi vetorizada manualmente sobre cartas topográficas do IBGE. O arquivo vetorial gerado foi utilizado para calcular a densidade de drenagem, por meio do estimador Kernel, no <i>ArcMap</i> 10.5, e com o emprego do raio de 1 km. O arquivo matricial obtido foi recortado para a área de estudo e apresenta valores de densidade em km de drenagem/km².</p>
<p>Densidade de lineamentos estruturais (DLE)</p>	<p>Os lineamentos estruturais são elementos de drenagem que podem ser retilíneos ou em arco. Refletem as orientações da estrutura geológica, sendo por ela condicionados (HOWARD, 1967; SOARES; FIORI, 1978). Os lineamentos estruturais estão localizados em zonas de fraturamento, onde os processos meteóricos e erosivos atuam com maior facilidade, tornando-as "zonas de desenvolvimento preferencial de linhas de drenagem retilíneas" (SOARES; FIORI, 1978, p. 48).</p>	<p>Os lineamentos estruturais foram identificados visualmente sobre a rede de drenagem do PESBE e da sua área de influência, além do sombreamento do relevo como camada auxiliar, com base na metodologia de Soares e Fiori (1978). Os lineamentos foram vetorizados através de ferramentas de edição do <i>ArcMap</i> 10.5, e sua densidade foi calculada por meio do estimador Kernel e usando um raio de 1 km. O produto foi recortado para a área de estudo e apresenta valores de densidade em km de lineamentos/km².</p>
<p>Densidade de vias de circulação (DVC)</p>	<p>As vias de circulação são elementos antrópicos que alteram a dinâmica natural de bacias hidrográficas. Podem transformar o escoamento subsuperficial em escoamento hortoniano, redirecionando-o e fazendo com que alcance o leito de canais fluviais de forma mais rápida, contribuindo na dissecação do solo e da vertente (CUNHA; THOMAZ, 2017). Áreas com alta densidade de vias desenvolvem maior quantidade de erosões (MESSIAS; FERREIRA, 2017).</p>	<p>As vias de circulação no PESBE e em sua área de influência foram mapeadas através do <i>GoogleEarth Pro</i>. Foram traçadas linhas sobre as estradas rurais e trilhas, a uma altitude do ponto de visão de 1,9 km, por meio da função "Adicionar Caminho". Após salvas, as linhas foram importadas no <i>ArcMap</i> 10.5 e foram utilizadas como feição de entrada para a estimativa da densidade, gerada pelo estimador Kernel, com o emprego do raio de 1 km. O mapa é dado em densidade em km de vias/km².</p>

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Atribuição de pesos às variáveis

A atribuição de pesos às variáveis geoambientais foi realizada por meio do teste KS, baseada nos procedimentos metodológicos propostos por Taylor (1977), que utilizou o teste para comprovar a existência de relação entre a localização de cultivos de horticulturas e classes de solo e a distância com o mercado de consumo. Tais procedimentos metodológicos foram adaptados por Garofalo e Ferreira (2015) para a realização de estudos de fragilidade ambiental. A adaptação propôs empregar o teste KS para avaliar a dependência espacial entre a ocorrência de processos erosivos e as variáveis geoambientais, além de aplicar pesos a essas variáveis. Messias e Ferreira (2019) aplicaram um modelo semelhante para especializar o perigo de fogo, utilizando também o teste KS para atribuição de pesos a variáveis geoambientais, empregando mapas em escala *Fuzzy*; esse estudo realizou uma validação que comprovou estatisticamente que a adaptação à proposta metodológica de Taylor (1977), para estudos ambientais, é satisfatória.

O teste KS exige que uma amostra empírica (n) seja definida, a qual, nessa pesquisa, corresponde aos processos erosivos mapeados ($n = 177$). O KS foi empregado para avaliar a normalidade da distribuição de processos erosivos mapeados (n) em cada variável geoambiental.

Esse procedimento foi feito por meio da comparação de uma função de distribuição cumulativa empírica e outra hipotética, baseando-se em duas hipóteses:

- 1) H_0 : Não há diferença entre as frequências esperadas e observadas das categorias da variável ($F_o(x) = S_n(x)$);
- 2) H_1 : Há diferença entre as frequências esperadas e observadas, ($F_o(x) \neq S_n(x)$) ou ($F_o(x) > S_n(x)$) ou ($F_o(x) < S_n(x)$).

Inicialmente, os mapas das variáveis geoambientais com intervalos de classes em quantis foram convertidos para o formato vetorial. Foram calculados os valores de área para cada uma das classes, as quais têm valores semelhantes devido à atribuição por quantis e, na sequência, os de ocorrência observada (O_o) e ocorrência esperada (O_E).

A O_o corresponde à distribuição dos processos erosivos, por meio da amostra empírica, ao longo das classes de cada variável geoambiental, ou seja, visa quantificar os processos erosivos mapeados, no interior de cada classe. Já a O_E corresponde à distribuição da amostra n proporcionalmente à área de cada classe de uma variável; os valores são hipotéticos e simulam uma distribuição normal esperada, como se todas as classes exercessem influência semelhante na ocorrência de processos erosivos, sem o efeito de fatores locais.

Após obtidos os valores de O_o e de O_E , foi realizada a conversão para frequências observada (F_o) e esperada (F_E). O teste KS exige o emprego de valores cumulativos e, por isso, foram calculados os valores de frequência acumulada observada (F_{AO}) e acumulada esperada (F_{AE}). Na sequência, foram calculadas as diferenças modulares (D) $|F_{AO} - F_{AE}|$ para cada classe, sendo que o maior valor de D é considerado como a diferença máxima ($D_{máx}$). Quanto maior for a concentração de processos erosivos dentro de uma classe (F_o), maior será a diferença em relação à F_E nessa mesma classe. Desse modo, os valores obtidos de $D_{máx}$ e a influência da variável serão maiores, o que foi demonstrado por Garofalo e Ferreira (2015) e Messias e Ferreira (2017). Os valores dos parâmetros estatísticos, obtidos pela aplicação do teste KS, são demonstrados nas Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 1 - Resultado da aplicação do teste KS para a variável DEC

Parâmetros estatísticos	Classes de Declividade (DEC)			
	0 - 11,38	11,39 - 16,77	16,78 - 23,07	23,08 - 76,40
Área da classe (Km ²)	14,06	14,71	15,27	14,72
Área da classe (%)	23,92	25,02	25,97	25,05
Ocorrência observada de processos	42	47	51	37
Ocorrência esperada de processos	42,33	44,29	45,98	44,33
Frequência observada	0,2372	0,2655	0,2881	0,209
Frequência esperada	0,2392	0,2502	0,2597	0,2505
Frequência acumulada observada	0,2372	0,5028	0,7909	1
Frequência acumulada esperada	0,2392	0,4894	0,7492	1
Diferença $F_{AO} - F_{AE}$	0,0019	0,013	0,0417	0
Hipótese H_0 (nula)	ACEITA			

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Tabela 2 - Resultado da aplicação do teste KS para a variável NDVI.

Parâmetros estatísticos	Classes de Índice de Vegetação (NDVI)			
	0,23 - 0,551	0,552 - 0,653	0,654 - 0,768	0,769 - 0,896
Área da classe (Km ²)	14,7	14,86	14,47	14,67
Área da classe (%)	25	25,28	24,62	24,96
Ocorrência observada de processos	87	63	23	4
Ocorrência esperada de processos	44,26	44,74	43,58	44,18
Frequência observada	0,4915	0,3559	0,1299	0,0225
Frequência esperada	0,25	0,2528	0,2462	0,2496
Frequência acumulada observada	0,4915	0,8474	0,9774	1
Frequência acumulada esperada	0,25	0,5028	0,7491	1
Diferença F AO - F AE 	0,2414	0,3445	0,2282	0
Hipótese H_0 (nula)	REJEITADA			

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Tabela 3 - Resultado da aplicação do teste KS para a variável DVC

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Vias de Circulação (DVC)			
	0 - 1,052	1,053 - 1,908	1,909 - 2,985	2,986 - 6,240
Área da classe (Km ²)	14,6	14,71	14,67	14,75
Área da classe (%)	24,85	25,02	24,97	25,09
Ocorrência observada de processos	20	30	45	82
Ocorrência esperada de processos	43,98	44,29	44,19	44,41
Frequência observada	0,1129	0,1694	0,2542	0,4632
Frequência esperada	0,2485	0,2502	0,2497	0,2509
Frequência acumulada observada	0,1129	0,2824	0,5367	1
Frequência acumulada esperada	0,2485	0,4987	0,7484	1
Diferença F AO - F AE 	0,1355	0,2162	0,2117	0
Hipótese H_0 (nula)	REJEITADA			

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Tabela 4 - Resultado da aplicação do teste KS para a variável DLE

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Lineamentos Estruturais (DLE)			
	0 - 0,313	0,314 - 0,542	0,543 - 0,865	0,866 - 2,163
Área da classe (Km ²)	14,08	15,26	14,8	14,57
Área da classe (%)	23,96	25,96	25,18	24,78
Ocorrência observada de processos	44	54	46	33
Ocorrência esperada de processos	42,42	45,95	44,57	43,87
Frequência observada	0,2485	0,305	0,2598	0,1864
Frequência esperada	0,2396	0,2596	0,2518	0,2478
Frequência acumulada observada	0,2485	0,5536	0,8135	1
Frequência acumulada esperada	0,2396	0,4992	0,7511	1
Diferença F AO - F AE 	0,0089	0,0543	0,0624	0
Hipótese H_0 (nula)	ACEITA			

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

Tabela 5 - Resultado da aplicação do teste KS para a variável Dd

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Drenagem (Dd)			
	0,091 - 0,996	0,997 - 1,402	1,403- 1,865	1,866 - 3,048
Área da classe (Km ²)	14,65	14,86	14,49	14,72
Área da classe (%)	24,92	25,27	24,65	25,04
Ocorrência observada de processos	40	40	29	68
Ocorrência esperada de processos	44,11	44,74	43,64	44,33
Frequência observada	0,2259	0,2259	0,1638	0,3841
Frequência esperada	0,2492	0,2527	0,2465	0,2504
Frequência acumulada observada	0,2259	0,4519	0,6158	1
Frequência acumulada esperada	0,2492	0,502	0,7486	1
Diferença F AO - F AE	0,0232	0,05	0,1327	0
Hipótese H_0 (nula)	REJEITADA			

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

O teste KS avalia a aderência entre as distribuições empírica e a hipotética. Seguindo os procedimentos demonstrados por Taylor (1977), a aderência entre as distribuições pode ser avaliada por meio da comparação do valor de $D_{máx}$ de cada variável e o valor crítico de D (D_{cr}), a um certo nível de significância. Os valores críticos de D podem ser consultados em Taylor (*op cit.*) ou, considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$, D_{cr} pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$D_{cr} (\alpha = 0,05) = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Em que: D_{cr} ($\alpha = 0,05$): D crítico a um nível de significância de $\alpha = 0,05$; n : total de indivíduos amostrais. Após a equação ser aplicada e, considerando $n = 177$, foi obtido o $D_{cr} = 0,1022$. Ao comparar os valores de $D_{máx}$ com o D_{cr} de uma variável, é possível inferir que:

1) Se $D_{máx} \geq D_{cr}$ rejeita-se a hipótese H_0 (nula) e, portanto, os dados não seguem uma distribuição normal. Nesse caso, a distribuição das erosões ocorre de maneira assimétrica dentro das classes da variável testada, concentrando-se em algumas delas e ocorrendo de forma mais dispersa em outras. Isso indica que existe relação espacial entre a distribuição de processos erosivos e a variável geoambiental que está sendo testada sendo assim, a aplicação do teste KS comprova que a variável exerce influência considerável na ocorrência de erosão.

2) Se $D_{máx} < D_{cr}$ aceita-se a hipótese H_0 , ou seja, os dados seguem uma distribuição normal. Tal resultado evidencia que a distribuição das erosões ocorre de maneira semelhante entre as classes da variável testada, verificando-se baixo efeito de fatores locais. Portanto, tal variável exerce uma baixa influência na ocorrência dos processos.

Quanto maior for o $D_{máx}$ de uma variável maior será o grau de influência exercida por ela na distribuição espacial de processos erosivos (GAROFALO; FERREIRA, 2015). Desse modo, os valores de $D_{máx}$ podem ser empregados para ponderar as variáveis geoambientais (MESSIAS; FERREIRA, 2017). As variáveis NDVI, DVC e Dd apresentaram valores superiores a 0,1022, portanto, $D_{máx} > D_{cr}$, o que comprova que tais variáveis têm forte influência para a ocorrência de processos erosivos na área de estudo. Ao contrário, para as variáveis DEC e DLE, que tiveram $D_{máx} < D_{cr}$, a influência é baixa.

A variável DEC, embora tenha uma influência fraca, foi empregada no modelo. Por outro lado, a DLE foi descartada, pois a aplicação do KS mostrou que a maior parte das erosões no PESBE ocorrem nas duas classes de menor densidade. A metodologia empregada esperava, na verdade, que a maior quantidade de erosões estivesse concentrada nas classes de maior densidade de lineamentos, conforme demonstraram os estudos de Garofalo e Ferreira (2015) e Messias e Ferreira (2017).

Na sequência, as variáveis selecionadas tiveram seus valores de $D_{máx}$ normalizados para uma escala entre 0 e 1, para serem empregados como pesos (P) na álgebra de mapas (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores de pesos obtidos para as variáveis geoambientais influenciadoras

Valores de ponderação das variáveis	Variáveis geoambientais influenciadoras			
	NDVI	Densidade de vias	Densidade de drenagem	Declividade
Máximos de D	0,3445	0,2162	0,1327	0,0417
Pesos normalizados	0,4685	0,2941	0,1805	0,0567

Fonte: Organizado pelos autores (2023).

O modelo requer a inserção de variáveis geoambientais em escala *Fuzzy*. A conversão foi feita por meio do *ArcMap* 10.5, adotando-se a função de pertinência linear (GAROFALO; FERREIRA, 2015). Para as variáveis DVC, Dd e DEC, os valores mínimo e máximo no mapa original foram reescalados, respectivamente, para 0 e 1. No NDVI, como a maior proteção à ocorrência de processos erosivos advém das áreas com os maiores índices, o valor máximo foi reescalado para 0 e o mínimo para 1.

O mapa de fragilidade ambiental (FA) foi gerado através da álgebra dos mapas das variáveis geoambientais influenciadoras em escala *Fuzzy*. Foi aplicada a seguinte média ponderada, com o auxílio da calculadora raster:

$$FA = (NDVI \times 0,4685) + (DVC \times 0,2941) + (Dd \times 0,1805) + (DEC \times 0,0567) \quad (2)$$

Análise da relação entre processos erosivos e fragilidade ambiental

Foi realizada uma análise para avaliar a relação entre o mapa de fragilidade ambiental e as erosões empiricamente mapeadas no PESBE. Para isso, o mapa de FA foi fatiado em 10 classes, por meio da técnica de intervalos iguais, e a área e o valor médio de fragilidade para cada classe foram calculados. Como as classes da FA geradas possuem áreas distintas, calculou-se a densidade de processos erosivos em cada classe. Por meio do *BrOffice Calc* foi gerado um diagrama de dispersão, considerando os valores médios das classes de FA como variável X e a densidade de processos erosivos em cada classe de FA como variável Y (MESSIAS; FERREIRA, 2019).

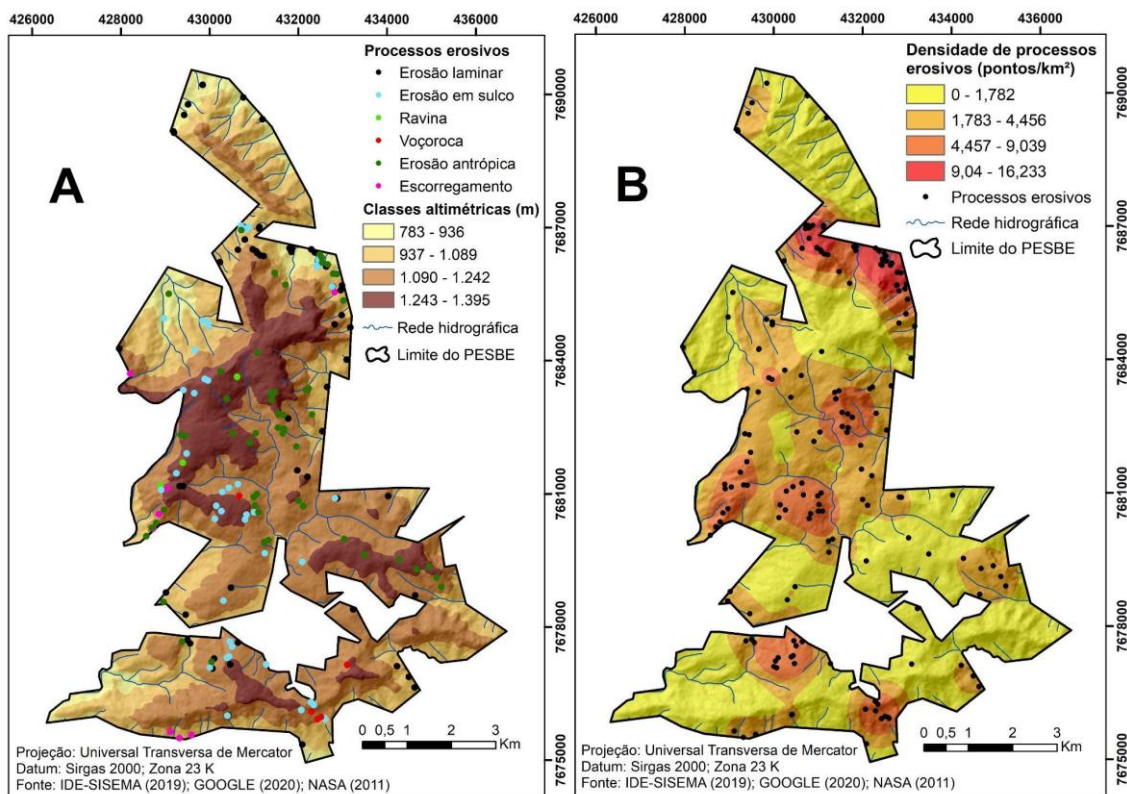
Resultados e Discussão

Nesse artigo constatou-se que os terrenos mais elevados da área de estudo têm como principal unidade geomorfológica a Serra da Boa Esperança, composta por cristas, topos tabulares e escarpas declivosas que incluem as classes altimétricas mais altas, de 1.090 a 1.395m, e vertentes que compreendem as principais bacias hidrográficas do parque, o ribeirão Águas Verdes e o ribeirão Verde, cujas classes altimétricas intermediárias e baixas variam de 783 a 1.089m. Os processos erosivos mapeados somam 177 unidades, sendo 60 erosões laminares, 53 erosões antrópicas (desencadeadas pelo motociclismo *off-road*), 48 sulcos erosivos, 8 escorregamentos, 5 voçorocas e 3 ravinas (Figura 3A).

Os menores valores de densidade de processos erosivos, (0 a 1,782 pontos/km²) foram observados nos setores sul, sudeste, noroeste e norte do parque, e estão condicionados pela presença de fragmentos de vegetação que exercem proteção ao solo da erosão pluvial. Os valores mais altos (9,04 a 16,233 pontos/km²) foram identificados nos setores nordeste, sul e central. A alta densidade no setor nordeste está associada à erosão antrópica, seguida da erosão laminar e de

sulcos. Esses processos erosivos foram verificados nos limites da UC, atribuindo-se a isso o efeito de borda dos usos agrícolas nas propriedades rurais próximas a ela. O setor central, onde se desenvolve a bacia do ribeirão Águas Verdes, as vertentes e cabeceiras de drenagem, apresenta sulcos e erosão laminar, condicionados aos baixos índices de vegetação. A relação entre o relevo e a vegetação indica que, apesar de íngremes, as vertentes encontram-se estabilizadas pela vegetação densa, o que é corroborado pela baixa densidade de processos erosivos (0 a 1,782 pontos/km²) (Figura 3B).

Figura 3 - Processos erosivos sobrepostos ao mapa hipsométrico (A) e densidade de processos erosivos (B)



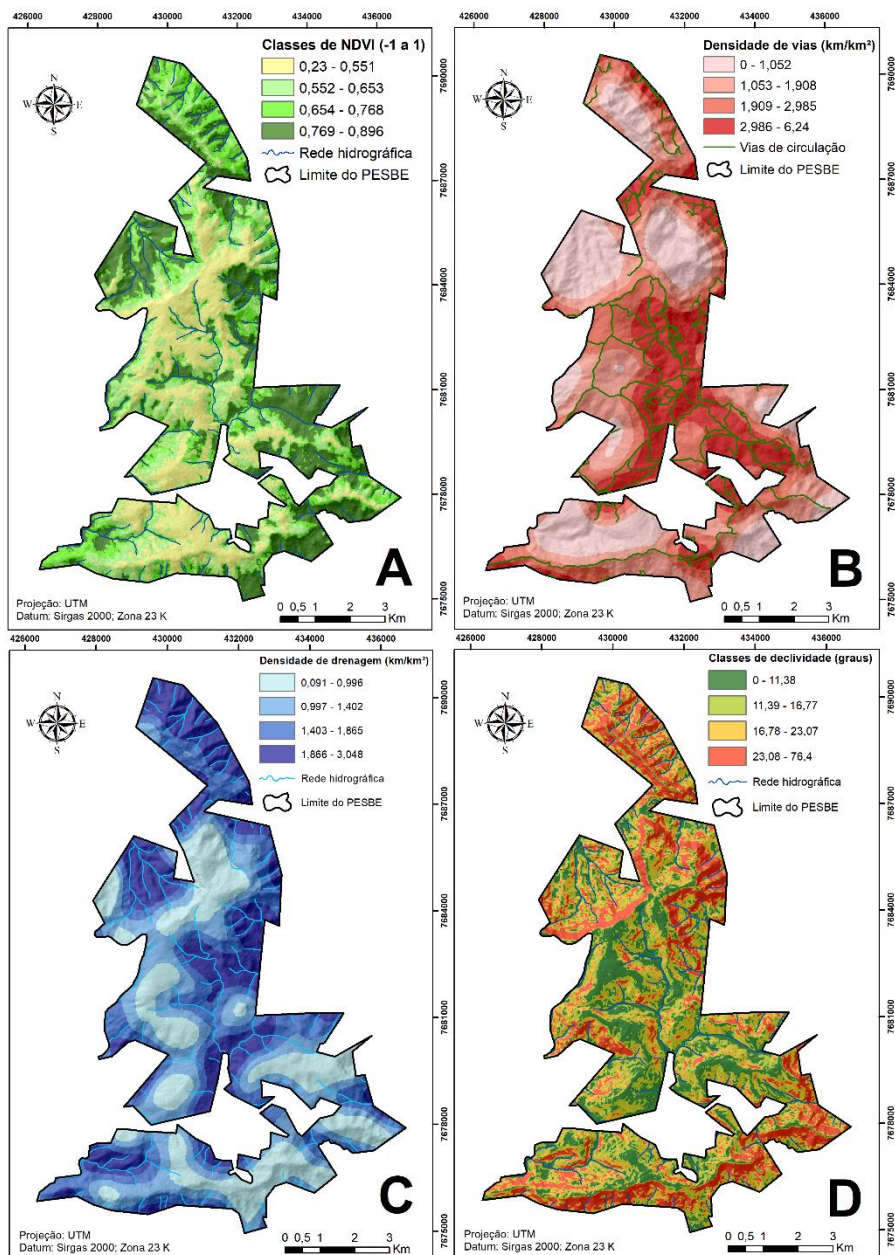
Fonte: Dos autores (2023).

Legenda: A) Tipos de erosões sobrepostas ao mapa hipsométrico.

B) Mapa de densidade de processos erosivos.

Os mapas das variáveis geoambientais como índice de vegetação (NDVI), densidade de vias de circulação (DVC), densidade de drenagem (Dd) e declividade (DEC) são apresentados nas Figuras 4A, 4B, 4C e 4D. O mapa da fragilidade ambiental aos processos erosivos é mostrado na Figura 5.

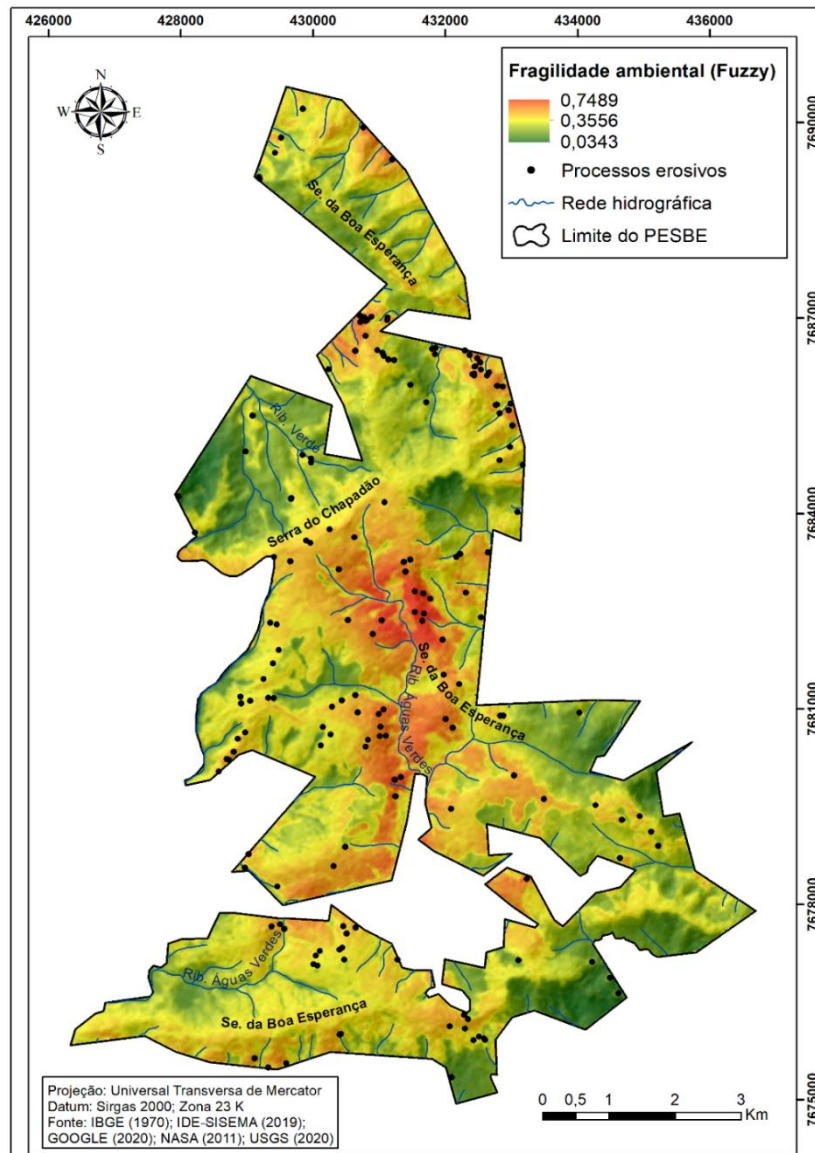
Figura 4 - Mapas das variáveis geoambientais: Índice de vegetação - NDVI (A), Densidade de vias de circulação - DVC (B), Densidade de drenagem - Dd (C) e Declividade - DEC (D)



Fonte: Dos autores (2023).

- Legenda: A) Mapa de índice de vegetação (NDVI) do PESBE.
B) Mapa de densidade de vias de circulação (DVC) do PESBE.
C) Mapa de densidade de drenagem (Dd) do PESBE.
D) Mapa de declividade (DEC) do PESBE.

Figura 5 - Mapa de Fragilidade Ambiental (FA)



Fonte: Dos autores (2023).

O mapa de fragilidade ambiental a processos erosivos apresenta valores na escala *Fuzzy* entre 0,0343 e 0,7489. As variáveis que exercem maior influência na fragilidade são, na seguinte ordem de importância, NDVI, DVC e Dd. A maior concentração de processos erosivos foi observada na classe de menor valor de NDVI (vegetação com menor biomassa), na qual a ocorrência observada de erosões é 96,5% maior que a esperada (Tabela 2). Os processos erosivos se concentram também na classe de maior adensamento de vias de circulação e de drenagem, sendo que nas áreas de DVC o valor de ocorrência observada é 84,6% maior que o da esperada (Tabela 3) e, na Dd, é 53,4% superior à esperada (Tabela 5). A relação entre a forte influência das variáveis mencionadas e a distribuição das erosões em suas classes é corroborada pela literatura especializada (BIGARELLA, 2007; CUNHA; THOMAZ, 2017; FONSECA FILHO; VARAJÃO; CASTRO, 2019).

Com relação a variável NDVI (Figura 4A), sua associação com a FA pode ser explicada pelo alto peso atribuído a essa variável (59% superior ao peso da variável DVC, por exemplo), resultante da

baixa quantidade de erosões identificadas em áreas cobertas pela vegetação densa. Esse número reduzido de processos erosivos se deve a capacidade da vegetação de proteger o solo do impacto direto das gotas de chuva (efeito *splash*), interceptando parte da precipitação e evitando o desenvolvimento da erosão (GUERRA, 2020). Nesse sentido, ressalta-se que as florestas sempre verdes (floresta estacional perenifólia) interceptam mais as chuvas do que as florestas decíduas e a vegetação herbácea (BIGARELLA, 2007), indicando que as coberturas com maior NDVI contribuem de forma mais significativa para a redução da ação erosiva.

As áreas que apresentam baixa FA (0,0343 e valores próximos) localizam-se nos setores sul, sudeste, noroeste e norte da UC. De maneira geral, o comportamento do NDVI nas áreas com baixos valores de FA no setor sudeste é similar ao que ocorre no *front* da Serra da Boa Esperança (setor sul), onde a vegetação também é composta por fragmentos florestais, com valores de NDVI entre 0,769 e 0,896. Nas áreas com baixos valores de FA existe a presença de poucas trilhas ou estradas rurais, fazendo com que a variável DVC também apresente índices pouco significativos, variando de 0,0 a 1,908 km/km² (Figura 4B). No que se refere à variável Dd, foi constatado que nas áreas com menor fragilidade aos processos erosivos flui um pequeno número de canais de primeira ordem, resultando em baixa densidade de drenagem, situada entre 0,091 e 0,996 km/km² (Figura 4C). A baixa FA no setor sul, especialmente no *front* da Serra da Boa Esperança, está relacionada ao relevo escarpado, com declives que variam de 23,08 a 76,4 ° (Figura 4D).

O relevo no setor sudeste é constituído por morros com encostas suaves, apresentando declividade intermediária que varia de 11,39 a 23,07 °, já a drenagem possui densidade média-alta, entre 1,403 e 1,865 km/km². Quanto ao desenvolvimento de processos erosivos, foi identificada apenas uma erosão laminar, resultando em uma baixa densidade desses processos, entre 0 e 1,782 pontos/km². Já os menores valores de FA, observados na baixa e média bacia do ribeirão Verde (Figura 5), localizada ao noroeste, no *front* da Serra do Chapadão, estão relacionados a áreas com cobertura vegetal densa, formada por fragmentos florestais intercalados com campos naturais, cujos valores de NDVI variaram entre 0,654 e 0,896, e à ausência de vias de circulação, resultando em uma DVC muito baixa, de 0 a 1,052 km/km². Ressalta-se que a ausência de trilhas ou estradas pode ser explicada pela presença de vegetação densa e pela grande quantidade de canais fluviais na área, fatores que podem funcionar como barreiras naturais à prática da atividade de motociclismo do tipo *off-road*, impondo dificuldades à abertura de trilhas.

Apesar das formas de relevo na bacia do ribeirão Verde apresentarem declives variando de 0 a 23,07 ° e sua rede de drenagem ser densa (1,866 a 3,048 km/km²) — o que sugere maior valor de FA —, o fato das variáveis NDVI e DVC possuírem influência superior no cálculo da FA, quando comparadas às demais variáveis, faz com que esta bacia apresente baixos índices de fragilidade ambiental. Ademais, também foi identificada uma densidade de processos erosivos pouco expressiva, variando de 0 a 4,456 pontos/km².

Assim como ocorre na bacia do ribeirão Verde, os valores mais baixos de FA identificados na escarpa da Serra da Boa Esperança, no setor norte do PESBE (Figura 5), se dão em função do alto índice NDVI (0,769 a 0,896) e da baixa densidade de vias (DVC). Porém, nessa mesma área foi identificada uma trilha, resultando em uma DVC levemente superior, variando de 0 a 1,908 km/km². Como se trata de uma vertente escarpada a declividade é elevada, variando de 23,08 a 76,4°, já a densidade de drenagem apresenta valores intermediários, de 0,997 a 1,865 km/km². Não foram identificados processos erosivos nessa área.

As áreas de FA médias-baixa, com valores inferiores à média (0,3556) encontram-se no reverso da Serra da Boa Esperança (no trecho localizado no setor sul do parque), nos topos tabulares e encostas suaves do setor oeste, assim como a nordeste da Serra do Chapadão, no setor centro-

norte da UC (Figura 5). Nessas áreas, cujas altitudes estão entre intermediárias e elevadas (1.090-1.395m), predominam valores também medianos de declividade (11,39 a 23,07 °); porém, ressalta-se que, nas áreas de topo, o declive é menor (0 a 11,38°). A vegetação é formada por campos de altitude e apresenta valores de NDVI situados entre 0,23 e 0,653. Já a rede de drenagem é caracterizada como pouco densa (0,091 a 0,996 km/km²), pois as principais bacias do parque se desenvolvem nas áreas mais a jusante.

De maneira geral – mas com exceção da área localizada a nordeste da Serra do Chapadão, onde não foram identificadas vias de circulação – a DVC mostrou valores intermediários (1,053 a 2,985 km/km²), sendo que os maiores trechos de vias estão localizados no setor oeste. Apesar das características do meio físico não serem favoráveis ao desenvolvimento de processos erosivos nessa área, foi identificada uma densidade de processos erosivos entre 4,457 e 9,039 pontos/km². Considerando-se que as erosões ali presentes têm surgido e se desenvolvido às margens de uma estrada, é possível relacioná-las à capacidade das vias de modificar a dinâmica dos processos hidrossedimentológicos e geomorfológicos, podendo contribuir para o surgimento de erosões hídricas (CUNHA; THOMAZ, 2017).

Já a classe de fragilidade ambiental média-alta, cujos valores situam-se ligeiramente acima da média (0,3556), é encontrada no setor central da UC e em áreas mais periféricas da bacia do ribeirão Águas Verdes (Figura 5). Esses valores médio-altos de FA estão relacionados a um relevo pouco dissecado, formado por vertentes com rampas suaves, com declividades de 0 a 16,77° e que comportam uma rede de drenagem com média densidade (0,997 a 1,865 km/km²). Por outro lado, a intensa rede de trilhas nesse local resulta em uma DVC que varia de média a alta (1,909 a 6,24 km/km²). No tocante à cobertura vegetal, identificou-se o predomínio dos campos naturais, resultando em um índice de NDVI mais baixo (0,23 a 0,551). Entretanto, ocorre também a presença isolada de fragmentos de vegetação arbórea e matas ciliares, com altos valores de NDVI (0,769 a 0,896).

Salienta-se que em algumas áreas cobertas por vegetação com alta biomassa, localizadas no setor central, foi identificada uma FA média-alta, evidenciando que, apesar da cobertura vegetal possuir grande influência no modelo utilizado para o cálculo da FA, a associação das demais variáveis geoambientais nesses terrenos os tornam consideravelmente frágeis em relação à erosão. Tal constatação torna evidente que, caso a vegetação existente seja suprimida ou intensamente degradada, há um grande potencial para o início e evolução de processos erosivos.

As áreas mais suscetíveis ao desenvolvimento de processos erosivos no PESBE, com maiores índices de FA (0,7489 e valores próximos), localizam-se no setor central da UC, especialmente nas cristas e topos tabulares da Serra da Boa Esperança e nas vertentes adjacentes, bem como nos terrenos que integram a alta bacia do ribeirão Águas Verdes (Figura 5).

Nas áreas citadas anteriormente predomina uma cobertura vegetal pouco densa, cujos valores de NDVI variam de 0,23 a 0,551, associada a vertentes com rampas alongadas e áreas de acumulação, gerando valores de declividade baixos (0 a 11,38 °) e médios (11,39 a 23,07 °). Nesse relevo desenvolve-se uma ampla rede de drenagem, formada pelo ribeirão Águas Verdes e seus tributários e por canais de primeira e segunda ordem que nascem no *front* da Serra da Boa Esperança e que fluem para o reservatório de Furnas, gerando uma Dd que varia de 1,866 a 3,048 km/km². De maneira semelhante, as vias de circulação formam uma rede densa (2,986 a 6,24 km/km²), constituída principalmente por trilhas destinadas ao motociclismo *off-road*.

Grande parte das trilhas identificadas nas áreas com maiores índices de FA está situada nas vertentes da Serra da Boa Esperança, sendo utilizadas por praticantes de motociclismo *off-road* que percorrem tais vertentes recobertas por campos naturais para chegarem aos pontos mais altos, na

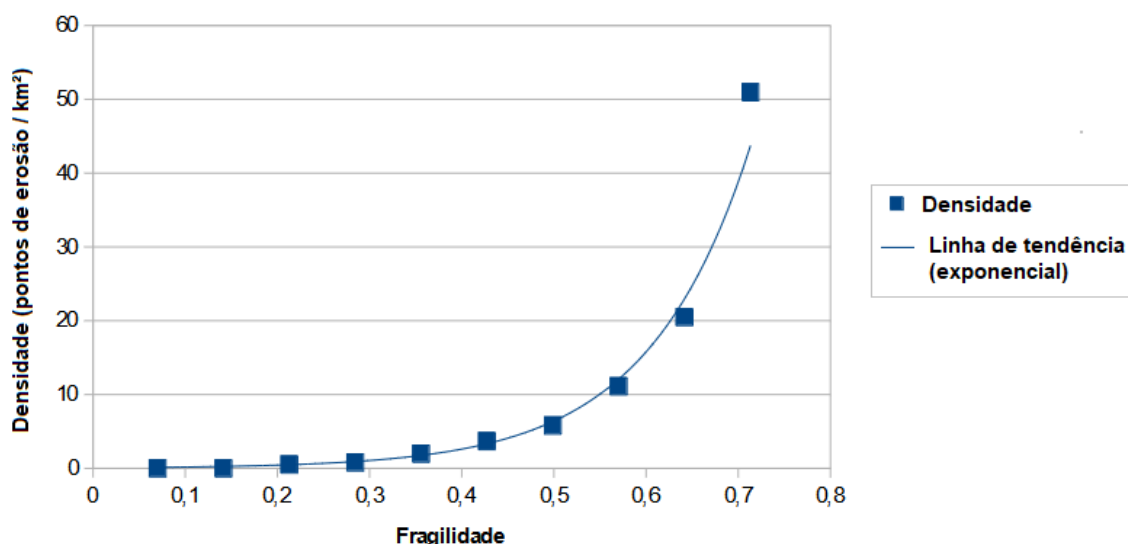
crista da serra. Ademais, essas trilhas localizam-se perto dos tributários do ribeirão Águas Verdes, o que é preocupante pois, as vias ampliam a conexão entre a vertente e o rio, incrementando o escoamento superficial e a produção de sedimentos (LUCE; WEMPLE, 2001), acelerando o processo de deposição das áreas de sopé e das áreas rebaixadas da bacia do ribeirão Águas Verdes.

A atividade de motociclismo *off-road*, evidenciada pela densa rede de trilhas utilizadas para sua prática no setor central do parque, está relacionada a uma alta concentração de erosões antrópicas, que contribuem com os valores expressivos de densidade de processos erosivos (4,457 a 9,039 pontos/km² na área). A relação entre FA, DVC e a ocorrência de erosões antrópicas indica que a prática da referida atividade, além de contribuir com o aumento da FA no parque – tendo em vista que a DVC exerce grande influência na FA – também causa o início de processos erosivos, pois as motocicletas são agentes ativos da erosão na área de estudo.

Os altos valores de DVC e de Dd e os baixos valores de NDVI, nas áreas mais frágeis da UC, indicam que a alta FA dessas áreas está relacionada à presença de diversas trilhas sobre uma cobertura vegetal que oferece baixa proteção ao solo e sobre um substrato possivelmente impermeável, considerando os altos valores de Dd. Garofalo e Ferreira (2015), na APA Fernão Dias, e Rodrigues Neto e Ferreira (2020), na APA do rio Machado, obtiveram resultados similares quanto a relação entre FA, cobertura vegetal e vias de circulação, pois os terrenos mais suscetíveis ao desenvolvimento de erosão em suas áreas de estudo apresentaram baixo NDVI e alta DVC. Messias e Ferreira (2017) também obtiveram uma relação significativa entre FA, NDVI e DVC no Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC), porém associada também a uma forte influência da variável DLI, o que não ocorreu no PESBE.

Em uma análise final, foi gerado um diagrama de dispersão (Figura 6), demonstrando a distribuição da densidade de processos erosivos ao longo de diferentes classes de FA.

Figura 6 - Diagrama de dispersão de processos erosivos em relação as classes de FA



Fonte: Dos autores (2023).

Observa-se crescimento exponencial da densidade de processos erosivos na medida que o grau de fragilidade aumenta, isto é, há baixa concentração de processos erosivos nas classes inferiores e forte adensamento nas classes de fragilidade mais elevadas. Essa constatação evidencia,

portanto, que o mapeamento da FA condiz com as evidências empíricas de processos erosivos no PESBE.

Conclusão

A aplicação da metodologia de Garofalo e Ferreira (2015) foi eficiente no mapeamento da fragilidade ambiental no Parque Estadual Serra da Boa Esperança. A utilização do método baseado em lógica *Fuzzy* possibilitou a representação dos diferentes graus de fragilidade com maior fidelidade espacial em relação à realidade terrestre, evitando-se o uso de intervalos de classe rígidos.

As áreas identificadas com maior fragilidade à ocorrência de processos erosivos estão localizadas no setor central da UC e nas superfícies mais elevadas da Serra da Boa Esperança. As variáveis geoambientais que exerceram maior influência na fragilidade ambiental foram o índice de vegetação e a densidade de vias de circulação. Além disso, prática do motociclismo *off-road* exerce grande contribuição para o início dos processos erosivos lineares, provocando ranhuras no terreno (erosões antrópicas).

Por outro lado, as áreas que apresentaram baixa fragilidade ambiental estão localizadas no *front* da Serra da Boa Esperança (setor sul), no setor sudeste e no setor norte do parque. A baixa fragilidade nessas áreas decorre da presença de fragmentos florestais com elevada densidade de biomassa vegetal (altos valores de NDVI) e da baixa densidade de vias de circulação.

O PESBE é uma UC de grande relevância, seja pela sua biodiversidade, beleza cênica e seu potencial turístico, como também pela abundância de recursos hídricos. Porém, desde sua criação vem enfrentando problemas persistentes, especialmente a lenta regularização fundiária e as atividades conflitantes. O mapa de fragilidade ambiental e os demais produtos cartográficos gerados nesse trabalho poderão servir como um recurso para a realização de outras pesquisas na área de estudo. Ademais, poderão contribuir com ações de planejamento e manejo que visam evitar que áreas mais frágeis em relação à erosão sejam perturbadas por atividades conflitantes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- ASF. Data Search Vertex. (2020). Disponível em: <<https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS>>. Acessado em: 14 jul. 2020.
- ALVES, C. S. (2019). *Levantamento de mamíferos de médio e grande porte do Parque Estadual Serra da Boa Esperança, Minas Gerais: contribuições para o plano de manejo*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências biológicas), Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- AMBRÓSIO, R. V. (2014). *Situação fundiária dos Parques Estaduais de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- BIGARELLA, J. J. (2007). *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC.
- BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BALLABIO, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *PNAS*, v. 117, n. 36, p. 21994-22001.
- CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C. (2019). Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos - São João, no Estado do Rio de Janeiro - Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 4, p. 1415-1430.
- CEREDA JUNIOR, A.; ROHM, S. A. (2014). Analysis of environmental fragility using multi-criteria analysis (MCE) for integrated landscape assessment. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v. 8, n. 1, p. 28-37.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1980). *Geomorfologia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- COCHECI, R-M.; I, I.; SÂRBU, C. N.; SORENSEN, A.; SAGHIN, I.; SECAREANU, G. (2019). Assessing environmental fragility in a mining área for specific spatial planning purposes. *Moravian Geographical Reports*, v. 27, n. 3, p. 169-182.
- COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. (2003). Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 4, p. 743-753.
- COUTINHO, C. B.; ANDRADE, D. P. (2016). Levantamento da avifauna no Parque Estadual Serra da Boa Esperança. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 14., Poços de Caldas. Anais [...]. Poços de Caldas, 2016. Disponível em: <<http://meioambientepocos.com.br/anais2016.html#>>. Acessado em: 27 ago. 2020.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. (1996). *Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico*. São José dos Campos: INPE.
- CUNHA, M. C.; THOMAZ, E. L. (2017). Fluxo subsuperficial interceptado por estrada rural: características e distribuição na paisagem. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 3, n. 3, p. 429-447.
- ESRI. (2016). ArcGIS Desktop 10.5. *Help*. Disponível em: <<https://resources.arcgis.com/en/help/>>. Acessado em: 23 mai. 2020.
- FERREIRA, M. C. (2014). *Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento*. Rio Claro: Ed. Unesp.
- FOLHARINI, S. O.; OLIVEIRA, R. C.; FURTADO, A. L. S. (2017). Vulnerabilidade à perda de solo no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba: contribuição para uma proposta de atribuição de peso. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 341-359.
- FONSECA FILHO, R. E.; VARAJÃO, A. F. D. C.; CASTRO, P. T. A. (2019). Compactação e erosão de trilhas geoturísticas de parques do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço Meridional. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 4, p. 825-839.
- GAROFALO, D. T.; FERREIRA, M. C. (2015). Mapeamento de fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial: uma aplicação na alta bacia dos rios Piracicaba e Sapucaí-Mirim, APA Fernão Dias, MG. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 29, p. 212-245.
- GOOGLE. (2020). Google Earth Pro. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/download/gep/agree.html>>. Acessado em: 22 mai. 2020.

- GUERRA, A. J. T. (2020). O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (orgs). *Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 17-50.
- GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. (2020). Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A. J. T. (orgs). *Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil*. 8. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 225-251.
- GUERRA, C. A.; ROSA, I. M. D.; VALENTINI, E.; WOLF, F.; FILIPPONI, F.; KARGER, D. N.; XUAN, A. N.; MATHIEU, J.; LAVELLE, P.; EISENHAUER, N. (2020). Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landscape Ecology*, v. 35, p. 823–842.
- HAIDARA, I.; TAHRI, M.; MAANAN, M.; HAKDAOUI, M. (2019). Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability. *Geoderma*, v. 354, n. 15, Article 113853.
- HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, v. 56, n. 3, p.275-370.
- HOWARD, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG Bulletin*, Virgínia-USA, v. 51, n. 11, p.2246-2259.
- IBGE. (1990). Biblioteca IBGE. *Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas*. (pdf). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv2269_1.pdf>. Acessado em: 20 jun. 2020.
- IBGE. (2020). Portal de Mapas. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php>>. Acessado em: 14 mai. 2020.
- IEF. (2021). *Parque Estadual Serra da Boa Esperança*. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/noticias/280?task=view>>. Acessado em: 15 fev. 2021.
- LUCE, C. H; WEMPLE, B. C. (2001). Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic effects of forest roads. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p.111-113.
- MACEDO, D. R.; HUGHES, R. M.; KAUFMANN, P. R.; CALLISTO, M. (2018). Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. *Science of The Total Environment*, v. 635, n. 1, p. 1267-1279.
- MARTINS, M. L. (2010). Olhares sobre o “Mar de Minas”: percepções dos moradores de Alfenas e Fama relativas ao Lago de Furnas (1963-1999). *Ambiente & Sociedade*, v. 13, n. 2, p. 347-363.
- MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. de. (2011). Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. *RA 'E GA*, Curitiba, v. 23, p. 520-533.
- MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. C. (2017). Aplicação do método de classificação contínua fuzzy para o mapeamento da fragilidade do terreno em relação à ocorrência de ravinas no Parque Nacional da Serra da Canastra. *RA 'E Ga*, Curitiba, v. 39, p. 111-127.
- MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. C. (2019). Modelo geoespacial para identificação de áreas com perigo de propagação de queimadas no Parque Nacional da Serra da Canastra. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 38, p. 154-168.
- MINAS GERAIS. (2007). Decreto nº 44.520, de 16 de maio de 2007. Cria o Parque Estadual Serra da Boa Esperança, e declara de utilidade pública, para desapropriação de pleno domínio, os imóveis a que se refere, no município de Boa Esperança. *Diário do Executivo*, Minas Gerais, 2007, p. 2.
- MORAIS, T. H. B.; MORAIS, W. L.; CAMARGO, A. S. O.; PIMENTA, A. P. (2014). Aspectos da historicidade e criação do Parque Estadual Serra da Boa Esperança, Boa Esperança, MG. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA E 3º SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO IF SUL DE MINAS, Pouso Alegre. Anais [...]. Pouso Alegre: IFSULDEMINAS, 2014, p. 1-7.
- RANGEL, M. S. (2017). *Situação fundiária do Parque Estadual Serra da Boa Esperança, Minas Gerais*. Monografia (Especialização MBA em Gestão Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- RODRIGUES NETO, M. R.; FERREIRA, M. F. M. (2020). Mapeamento da fragilidade ambiental a processos erosivos lineares e movimentos de massa na Área de Proteção Ambiental da bacia hidrográfica do Rio Machado-MG. *Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros Seção Três Lagoas*, Três Lagoas, v. 1, n. 32, p. 245-283.

- RODRIGUES NETO, M. R.; FERREIRA, M. F. M.; MESSIAS, C. G. (2021). Caracterização geoambiental do Parque Estadual Serra da Boa Esperança – Boa Esperança, MG. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, Rio Claro, v. 19, n. 2, p. 77-102.
- ROSS, J. L. S. (1994). Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 8, p. 63-74.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 3, Washington: NASA, v. 1, p.309-317.
- SOARES, P. C.; FIORI, A. P. (1978). Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. *Boletim Geográfico*, Rio de Janeiro, v. 36, p.35-59.
- TAMANINI, M. S. A. (2008). *Diagnóstico físico-ambiental para determinação da fragilidade potencial e emergente da Bacia do Baixo Curso do Rio Passaúna em Araucária - PR*. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- TAYLOR, P. J. (1977). *Quantitative methods in geography: Introduction to Spatial Analysis*. Boston: Houghton Mifflin.
- THOMAS, D. S. G. (2016). *The dictionary of physical geography*. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.
- TRICART, J. (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE/ SUPREN (Recursos Naturais e Meio Ambiente), 91 p.
- USGS. (2020). *Eros Science Processing Architecture on Demand Interface*. Disponível em < <https://espa.cr.usgs.gov/>>. Acessado em: 18 set. 2019.