

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

MANOEL RIBEIRO RODRIGUES NETO

**APLICAÇÃO DE UM MODELO GEOESPACIAL DE FRAGILIDADE AMBIENTAL
A PROCESSOS EROSIVOS NO PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA
ESPERANÇA - PESBE - MG**

Alfenas/MG

2021

MANOEL RIBEIRO RODRIGUES NETO

APLICAÇÃO DE UM MODELO GEOESPACIAL DE FRAGILIDADE AMBIENTAL A
PROCESSOS EROSIVOS NO PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA -
PESBE - MG

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Análise Sócio-Espacial e Ambiental.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Marta Felícia Marujo Ferreira.

Coorientador: Dr. Cassiano Gustavo Messias

Alfenas/MG
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central – Campus Sede

Rodrigues Neto, Manoel Ribeiro

R696a Aplicação de um modelo geoespacial de fragilidade ambiental a processos erosivos no parque estadual serra da Boa Esperança - PESBE - MG / Manoel Rodrigues Neto– Alfenas, MG, 2021.
174 f.: il. –

Orientadora: Marta Felícia Marujo Ferreira.
Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alfenas, 2021.
Bibliografia.

1. Geomorfologia. 2. Paisagem. 3. Análise Integrada. 4. Teste de Kolmogorov - Smirnov. 5. Unidade de Conservação. I. Ferreira, Marta Felícia Marujo. II. Título.

CDD- 551.4

MANOEL RIBEIRO RODRIGUES NETO

**APLICAÇÃO DE UM MODELO GEOESPACIAL DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL A PROCESSOS EROSIVOS NO PARQUE
ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA, PESBE - MG**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Análise Sócio-Espacial e Ambiental.

Aprovada em: 10 de maio de 2021

Profa. Dra. Marta Felícia Marujo Ferreira (Orientadora)
Instituição: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG

Dr. Cassiano Gustavo Messias (Coorientador)
Instituição: INPE

Prof. Dr. Clibson Alves dos Santos
Instituição: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG

Prof. Dr. Danilo Trovo Garofalo
Instituição: EMBRAPA MEIO AMBIENTE



Documento assinado eletronicamente por **Clibson Alves dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 10/05/2021, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marta Felícia Marujo Ferreira, Usuário Externo**, em 10/05/2021, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danilo Francisco Trovo Garofalo, Usuário Externo**, em 13/05/2021, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0507649** e o código CRC **3F121FD6**.

*Dedico este trabalho aos meus pais,
pilares da minha formação como ser humano.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por acreditarem em meu potencial e me incentivarem a alcançar meus objetivos.

À professora doutora Marta Felícia Marujo Ferreira, pela orientação, confiança e por todos os ensinamentos ao longo de minha trajetória acadêmica.

Ao doutor Cassiano Gustavo Messias, pela coorientação e pelos conhecimentos e dicas transmitidos.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Clibson Alves dos Santos, da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL- MG e Dr. Danilo Francisco Trovo Garofalo, da EMBRAPA MEIO AMBIENTE, pela participação e contribuições.

Ao Prof. Dr. Flamarion Dutra Alves, pelo seu empenho na coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas - PPGeo UNIFAL-MG, e por todo o apoio e conhecimento transmito desde minha graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas – PPGeo-UNIFAL, por todas as oportunidades de aprendizado e de vida concedidas.

Ao professor doutor Marcos Cesar Ferreira, da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, pelas sugestões e conhecimentos que auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa.

Aos membros do Grupo de Pesquisa em Geodinâmica de Bacias Hidrográficas – GEOHIDRO, em especial ao professor dr. Marcelo de Oliveira Latuf, pelas contribuições a esta pesquisa.

Aos professores e colegas da graduação e da pós-graduação em Geografia, por todas as experiências e conhecimentos compartilhados.

Aos amigos de longa data e aos amigos que construí em Alfenas, especialmente ao Eduardo de Araújo da Silva, por toda a parceria durante os dois longos anos do mestrado.

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

RESUMO

A ocupação desordenada dos espaços pela sociedade causa o aumento de problemas ambientais e sociais, podendo-se citar dentre eles a erosão dos solos, que na atualidade por vezes se caracteriza como um problema irreversível. Diversos estudos visam subsidiar o combate à erosão, dentre eles os estudos de fragilidade ambiental, que tem por objetivo identificar as fragilidades e potencialidades dos ambientes com base na análise integrada da paisagem. Nesse sentido, o objetivo principal desse trabalho é aplicar uma metodologia de fragilidade ambiental no Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE), com a finalidade de mapear áreas com maior e menor grau de fragilidade, considerando-se as evidências de processos erosivos e movimentos de massa. Essa metodologia utiliza técnicas de análise geoespacial em SIG para o mapeamento da fragilidade ambiental, por meio da integração das variáveis Índice de Vegetação, Probabilidade de Ocorrência de Chuvas Intensas, Declividade, Densidade de Lineamentos Estruturais e Densidade de Vias de Circulação, sendo neste trabalho realizada uma adaptação metodológica, que consiste no acréscimo da variável Densidade de Drenagem. Para a obtenção da Fragilidade Ambiental, essas variáveis tiveram seus valores reescalados entre 0 e 1 pela lógica *Fuzzy*, sendo posteriormente integradas por meio de álgebra ponderada, sendo à cada uma atribuído um peso pelo teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, referente à sua relação com a evidência de formas erosivas no parque. Os resultados obtidos demonstram que as áreas que apresentam maior fragilidade se encontram no setor central do PESBE, estando majoritariamente inseridas no compartimento Morros com Encostas Suaves, relacionadas a uma cobertura vegetal pouco vigorosa e a altas densidades de drenagem e de vias de circulação.

Palavras-chave: Geomorfologia; Paisagem; Análise Integrada; Kolmogorov-Smirnov; Unidade de Conservação.

ABSTRACT

The disordered occupation of spaces by society causes an increase in environmental and social problems, including soil erosion, which at present is sometimes characterized as an irreversible problem. Several studies aim to subsidize the fight against erosion, among them the studies of environmental fragility, which aims to identify the fragilities and potentialities of the environments based on the integrated analysis of the landscape. In this sense, the main objective of this work is to apply an environmental fragility methodology in the Serra da Boa Esperança State Park (SBESP), with the purpose of mapping areas with greater and lesser degree of fragility, considering the evidence of erosive processes and movements of mass. This methodology uses geospatial analysis techniques in GIS to map the environmental fragility, through the integration of the variables Vegetation Index, Probability of Occurrence of Heavy Rains, Declivity, Density of Structural Lineaments and Density of Circulation Routes, being carried out in this work. a methodological adaptation, which consists of the addition of the Drainage Density variable. To obtain Environmental Fragility, these variables had their values rescheduled between 0 and 1 by the Fuzzy logic, being subsequently integrated through weighted algebra, with each one being assigned a weight by the Kolmogorov-Smirnov statistical test, regarding its relationship with the evidence of erosive forms in the park. The results obtained demonstrate that the areas that present greater fragility are found in the central sector of PESBE, being mostly inserted in the Hills with Smooth Hillsides compartment, related to a weak vegetation cover and high drainage densities and circulation routes.

Keywords: Geomorphology; Landscape; Integrated Analysis; Kolmogorov-Smirnov; Conservation Unit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	20
Figura 2 – Localização do PESBE no município de Boa Esperança e municípios vizinhos.....	21
Figura 3 – Setores censitários do município de Boa Esperança – MG.....	22
Figura 4 – Produto Interno Bruto (PIB) do município de Boa Esperança – MG.....	23
Figura 5 – Composição setorial do PIB de Boa Esperança – MG.....	23
Figura 6 – Reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas e localização do município de Boa Esperança e do Parque Estadual Serra da Boa Esperança – PESBE – MG.....	25
Figura 7 – Compartimentação Morfoestrutural das folhas Guapé e Alpinópolis - MG, escala 1:100.000.....	33
Figura 8 – Material cartográfico e de sensoriamento remoto utilizado na pesquisa.....	62
Figura 9 – Fluxograma do desenvolvimento metodológico da pesquisa.....	63
Figura 10 – Limite do PESBE e área de influência.....	64
Figura 11 – Rede hidrográfica do PESBE e da área de influência.....	66
Figura 12 – Sombreamento do relevo da área de estudo.....	68
Figura 13 – Modelo Digital de Elevação – MDE ALOS PALSAR RTC com aplicação de <i>zoom</i> para a visualização da sobreposição do limite da área de estudo ao modelo.....	69
Figura 14 – Chave de interpretação para os processos de escorregamentos e de erosão Laminar.....	71
Figura 15 – Chave de interpretação para os processos de erosão antrópica e de sulcos.....	71
Figura 16 – Chave de interpretação para os processos de ravinas e de voçorocas.....	72
Figura 17 – NDVI gerado com detalhe para a área de estudo e entorno.....	79
Figura 18 – Distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas na interpolação.....	84
Figura 19 – Lineamentos estruturais mapeados na área de estudo e na área de influência.....	86
Figura 20 – Vias de circulação mapeadas na área de estudo e na área de influência.....	88
Figura 21 – Validação do georreferenciamento do Google Earth Pro através de imagem OLI Landsat 8.....	90

Figura 22 – Variáveis geoambientais reescaladas através da lógica <i>Fuzzy</i>	102
Figura 23 – Gráficos de função de pertinência.....	103
Figura 24 – Quantificação das formas erosivas mapeadas na área de estudo.....	108
Figura 25 – Distribuição espacial das formas erosivas sobre o mapa hipsométrico da área de estudo.....	109
Figura 26 – Mapa de densidade de formas erosivas da área de estudo.....	112
Figura 27 – Área percentual ocupada pelos compartimentos geomorfológicos no PESBE.....	113
Figura 28 – Mapa Geomorfológico da área de estudo.....	115
Figura 29 – Mapa de declividade da área de estudo.....	119
Figura 30 – Perfil topográfico no sentido NE-SW entre as serras do Chapadão e da Boa Esperança.....	121
Figura 31 – Mapa de Índice de vegetação da Diferença Normalizada – NDVI da área de estudo.....	123
Figura 32 – Mapa da probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCI da região do PESBE.....	126
Figura 33 – Mapa de Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCI da área de estudo.....	128
Figura 34 – Mapa de densidade de drenagem da área de estudo.....	130
Figura 35 – Mapa de densidade de lineamentos estruturais – DLE da área de estudo.....	136
Figura 36 – Mapa de densidade de vias de circulação – DVC da área de estudo.....	139
Figura 37 – Processo de erosão antrópica apresentando sulco superficial, exposição e compactação do solo na área de estudo.....	141
Figura 38 – Erosões antrópicas na área de estudo.....	142
Figura 39 – Mapa da Fragilidade Ambiental (FA) da área de estudo.....	145
Figura 40 – Erosão antrópica identificada em área que apresenta alta FA na área de Estudo.....	152
Figura 41 – Mapa de Zonas de Fragilidade Ambiental (FA) da área de estudo.....	154
Figura 42 – Diagrama de dispersão demonstrando a relação entre FA e densidade de formas erosivas.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características morfométricas dos diferentes <i>tipos de relevo</i>	74
Tabela 2 – Estações pluviométricas utilizadas para aquisição de dados de precipitação....	80
Tabela 3 – Valores de chuva acumulada máxima em um dia e valores de chuva acumulada máxima em 24 h, para os meses de dezembro a março, da estação pluviométrica de Formiga.....	81
Tabela 4 – Parâmetros estatísticos da variável Declividade.....	94
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos da variável Índice de Vegetação.....	94
Tabela 6 – Parâmetros estatísticos da variável Densidade de Vias de Circulação.....	95
Tabela 7 – Parâmetros estatísticos da variável Densidade de Lineamentos Estruturais.....	95
Tabela 8 – Parâmetros estatísticos da variável Densidade de Drenagem.....	95
Tabela 9 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Declividade.....	97
Tabela 10 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Índice de Vegetação.....	97
Tabela 11 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Vias de Circulação.....	97
Tabela 12 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Lineamentos Estruturais.....	98
Tabela 13 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Drenagem.....	98
Tabela 14 – Valores de peso obtidos para as variáveis geoambientais influenciadoras.....	100
Tabela 15 – Estações pluviométricas e seus respectivos valores de Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCL.....	125

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.....	79
Equação 2 – Conversão de chuvas em um dia para chuvas em 24 horas.....	81
Equação 3 – Modelo de distribuição de Gumbel.....	83
Equação 4 – Método dos momentos <i>beta</i>	83
Equação 5 – Método dos momentos <i>alfa</i>	83
Equação 6 – Cálculo da Ocorrência Esperada.....	94
Equação 7 – Cálculo da diferença modular de <i>D</i>	96
Equação 8 – Cálculo do <i>D</i> crítico.....	96
Equação 9 – Normalização dos valores de peso.....	100
Equação 10 – Álgebra ponderada para obtenção da Fragilidade Ambiental.....	103
Equação 11 – Equação da distribuição <i>t de Student</i>	105

LISTA DE SIGLAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Área de Proteção Ambiental
ASF	Alaska Satellite Facility
Dd	Densidade de Drenagem
DEC	Declividade
DLE	Densidade de Lineamentos Estruturais
DVC	Densidade de Vias de Circulação
FA	Fragilidade Ambiental
GIS	Geographic Information System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE-SISEMA	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
ICMBIO	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IEF	Instituto Estadual de Florestas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
OLI	Operational Terra Imager
PALSAR	Phased Array type L- Band Synthetic Aperture Radar
PESBE	Parque Estadual Serra da Boa Esperança
RTC	Radiometric Terrain Correction
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topograph Mission
UC	Unidade de Conservação
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	GERAL.....	19
2.2	ESPECÍFICOS.....	19
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
3.1	LOCALIZAÇÃO.....	20
3.2	O MUNICÍPIO DE BOA ESPERANÇA.....	21
3.3	O PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA (PESBE).....	24
3.3.1	Contexto Histórico da Criação do PESBE – a Influência do Reservatório de Furnas.....	25
3.3.2	Aspectos da Implementação do PESBE: conflitos e problemas que envolvem a UC.....	27
3.3.3	Aspectos Físico-Geográficos do PESBE.....	31
4	EMBASAMENTO TEÓRICO CONCEITUAL.....	35
4.1	UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: CONCEITOS E CATEGORIAS.....	35
4.2	A PAISAGEM NO ÂMBITO DA CIÊNCIA GEOGRÁFICA.....	37
4.3	A IMPORTÂNCIA DA GEOMORFOLOGIA NOS ESTUDOS INTEGRADOS DA PAISAGEM.....	40
4.4	DINÂMICA E EVOLUÇÃO DA EROÇÃO DOS SOLOS E DOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	43
4.5	FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	48
4.5.1	Considerações teórico-conceituais a respeito de variáveis geoambientais relacionadas a fragilidade ambiental à processos morfogenéticos.....	53
4.6	O SENSORIAMENTO REMOTO E O GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTAS PARA A ANÁLISE GEOESPACIAL INTEGRADA.....	57
5	METODOLOGIA.....	60
5.1	PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS DO TRABALHO.....	60
5.2	MATERIAIS.....	61
5.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	63
5.3.1	Definição de Uma Área de Influência externa ao PESBE.....	63
5.3.2	Vetorização da rede hidrográfica com base em cartas topográficas.....	65

5.3.3	Obtenção do sombreamento do relevo a partir do MDE ALOS PALSAR RTC.....	66
5.3.4	Mapeamento da hipsometria com base no MDE ALOS PALSAR RTC.....	68
5.3.5	Mapeamento de formas erosivas.....	70
5.3.5.1	Mapeamento da densidade de formas erosivas.....	73
5.3.6	Elaboração do Mapa Geomorfológico.....	74
5.4	MAPEAMENTOS DAS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS RELACIONADAS A FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	75
5.4.1	Declividade – DEC.....	76
5.4.2	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI.....	77
5.4.2.1	Justificativa para a utilização de uma imagem que representa a tendência central da reflectância (mediana de bandas) na geração do NDVI.....	77
5.4.2.2	Álgebra de imagens Landsat para a geração de uma imagem mediana.....	78
5.4.2.3	Cálculo do NDVI.....	78
5.4.3	Probabilidade de Ocorrência de Chuvas Intensas – POCL.....	80
5.4.4	Densidade de Drenagem – DD.....	85
5.4.5	Extração dos Lineamentos Estruturais.....	85
5.4.5.1	Mapeamento da Densidade de Lineamentos Estruturais.....	86
5.4.6	Extração das Vias de Circulação.....	87
5.4.6.1	Mapeamento da Densidade de Vias de Circulação.....	90
5.5	ATRIBUIÇÃO DE PESOS ÀS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS POR MEIO DO TESTE ESTATÍSTICO KOLMOGOROV – SMIRNOV.....	91
5.5.1	Teste Estatístico Kolmogorov-Smirnov.....	91
5.5.2	Procedimentos metodológicos para a aplicação do teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS) na atribuição de pesos as variáveis geoambientais influenciadoras.....	92
5.5.3	Considerações acerca dos pesos obtidos.....	99
5.5.4	Normalização dos valores de $D_{máx}$ e geração de pesos.....	99
5.6	PADRONIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS UTILIZANDO A FUNÇÃO FUZZY.....	100
5.7	ÁLGEBRA DE MAPAS PARA OBTENÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	103
5.8	PROCEDIMENTOS TÉCNICOS PARA A ANÁLISE DA CORRELAÇÃO	

	ESPAÇAL ENTRE O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL E A OCORRÊNCIA DE FORMAS EROSIVAS NO PESBE.....	104
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
6.1	ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA DO PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA (PESBE): EROÇÃO, COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIPSOMETRIA.....	107
6.1.1	Erosão e Geomorfologia.....	107
6.1.2	Compartimentação Geomorfológica e Hipsometria.....	113
6.2	GEOMORFOLOGIA E CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS.....	117
6.2.1	Declividades.....	118
6.2.2	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI.....	121
6.2.3	Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCL.....	124
6.2.4	Densidade de drenagem.....	129
6.2.5	Densidade de Lineamentos Estruturais – DLE.....	134
6.2.6	Densidade de Vias de Circulação – DVC.....	137
6.3	ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	143
6.3.1	Análise da correlação espacial entre o mapeamento da Fragilidade Ambiental e a ocorrência de formas erosivas no PESBE.....	155
7	CONCLUSÃO.....	157
	REFERÊNCIAS.....	160

1 INTRODUÇÃO

As mudanças que a sociedade vem produzindo na natureza ao longo da história, tem sido alvo de diversos estudos ambientais. O que temos presenciado ao longo do tempo, são os espaços naturais se transformando em espaços produzidos e a natureza modificada, cede lugar às diferentes atividades econômicas. Para ROSS (2019), o homem como ser social interferindo nos ambientais naturais, cria novas situações ao construir e modificar os espaços físicos, sendo através dessas modificações capaz de alterar “o equilíbrio de uma natureza que não é estática, mas que apresenta quase sempre um dinamismo harmonioso em evolução estável e contínua, quando não afetada pelos homens” (ROSS, 2019, p. 12).

Nesse sentido, a ocupação desordenada dos espaços pela sociedade, causa o aumento dos problemas ambientais e sociais, a exemplo dos processos de erosão do solo, que ocasionam prejuízos em diversas esferas (BIGARELLA, 2007; GUERRA; MENDONÇA, 2020). Visando subsidiar o combate à erosão do solo, diversos estudos têm sido realizados nas últimas décadas, sejam identificando e mapeando processos erosivos, sejam apresentando metodologias para o controle da erosão e recuperação de áreas degradadas. E, no caso da presente pesquisa, faz-se necessário analisar a fragilidade ambiental de uma unidade de conservação (UC) de proteção integral, como é o caso do Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE), visando compreender sua dinâmica natural e antrópica frente à erosão, tendo em vista que o parque apresenta formas de relevo dissecadas, sobre as quais se desenvolvem algumas atividades conflitantes potencialmente favoráveis ao desenvolvimento de processos erosivos.

Os estudos sobre fragilidade ambiental “têm por finalidade identificar as fragilidades e potencialidades dos ambientes naturais e propor uma melhor forma de uso e ocupação do território, de acordo com as características de cada lugar” (ABRÃO; BACANI, 2018, p. 620). Segundo Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001), os estudos de fragilidade e vulnerabilidade ambiental fornecem importantes subsídios para a gestão territorial e para a elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). Sendo assim, por meio das metodologias de fragilidade ambiental, é possível identificar as áreas mais propensas ao desenvolvimento de processos erosivos com base em suas características naturais e antrópicas, e assim realizar um planejamento ambiental condizente com a dinâmica do sistema ambiental, propondo diferentes usos da terra conforme o grau de fragilidade apresentado pelo terreno.

De acordo com Messias e Ferreira (2017), as metodologias de fragilidade ambiental mais difundidas no Brasil são as de Ross (1994) e Crepani (2001), sendo que essas metodologias

precursoras ainda continuam norteando estudos de fragilidade ambiental (BATISTA; SILVA, 2013; CEREDA JUNIOR; ROHM, 2014; FOLHARINI; OLIVEIRA; FURTADO, 2017; FRANCO, HERNANDEZ, LIMA, 2013; KAWAKUBO *et al.*, 2005; MESSIAS *et al.*, 2012; SANTOS; MARCHIORO, 2020), que ora as utilizam integralmente, ora propõem adaptações metodológicas visando ajustá-las as tecnologias atuais.

No âmbito da proteção ambiental e do uso racional dos recursos naturais, as unidades de conservação (UCs) passaram a existir no Brasil, segundo Bruck *et al.* (1983), no ano de 1937, com a implantação do Parque Nacional do Itatiaia. Nas palavras do autor,

unidades de conservação são áreas protegidas, estabelecidas em ecossistemas significativos do território nacional, nesse caso pelo governo federal, bem como em cada uma das unidades da Federação pelos respectivos governos estaduais, e mesmo municipais em seu âmbito administrativo (BRUCK *et al.*, 1983, p. 21).

De acordo com Morais *et al.* (2014), um dos motivos para a criação do Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE), no ano de 2007, foi a intenção de frear a expansão agrícola em direção a Serra da Boa Esperança, visto que devido ao alagamento de setores do município de Boa Esperança pela represa de Furnas, áreas cultiváveis foram afetadas e novas áreas, inclusive que abrigavam vegetação nativa, foram utilizadas para a produção, principalmente do café. Porém infelizmente atividades que desrespeitam o equilíbrio ambiental, relacionadas aos interesses conflitantes que permeiam as terras do parque (preservação ambiental *vs* prática do motociclismo *Off Road*, por exemplo), ainda continuam atuando como propensas dinamizadoras de processos erosivos na referida Unidade de Conservação.

Sendo assim, a presente pesquisa tem como proposta a análise da fragilidade ambiental do Parque Estadual Serra da Boa Esperança à ocorrência de processos erosivos, visando avaliar quais zonas deste parque são mais propensas a ocorrências de tais processos (considerando as características do meio físico e a intervenção antrópica) e que merecem uma maior atenção no âmbito do planejamento ambiental.

A escolha deste recorte de estudo se justifica, por um lado, devido à forte relação existente entre o PESBE e o Reservatório de Furnas, uma vez que o parque está localizado em uma área muito próxima a um braço do referido reservatório, abrigando diversos canais fluviais que desaguam no mesmo. Sendo assim, o PESBE tem o potencial de fornecer sedimentos, resultantes da ação dos processos erosivos em suas formas de relevo, de maneira rápida ao importante lago artificial, podendo causar prejuízos econômicos e ambientais.

Justifica-se também pela carência de dados e informações geográficas referentes ao PESBE, bem como a ausência de pesquisas, tanto teóricas quanto aplicadas, no âmbito da Geomorfologia, e mais especificamente da Geomorfologia Ambiental, que tenham o parque como área de estudo. Sendo assim, os resultados obtidos neste trabalho se configuram como subsídio para a realização de novas pesquisas no arcabouço da Geografia Física para esta importante e relativamente recente Área de Proteção Integral.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Aplicar uma metodologia de fragilidade ambiental no Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE), com a finalidade de mapear áreas com maior e menor grau de fragilidade, considerando-se as evidências de processos erosivos.

2.2 ESPECÍFICOS

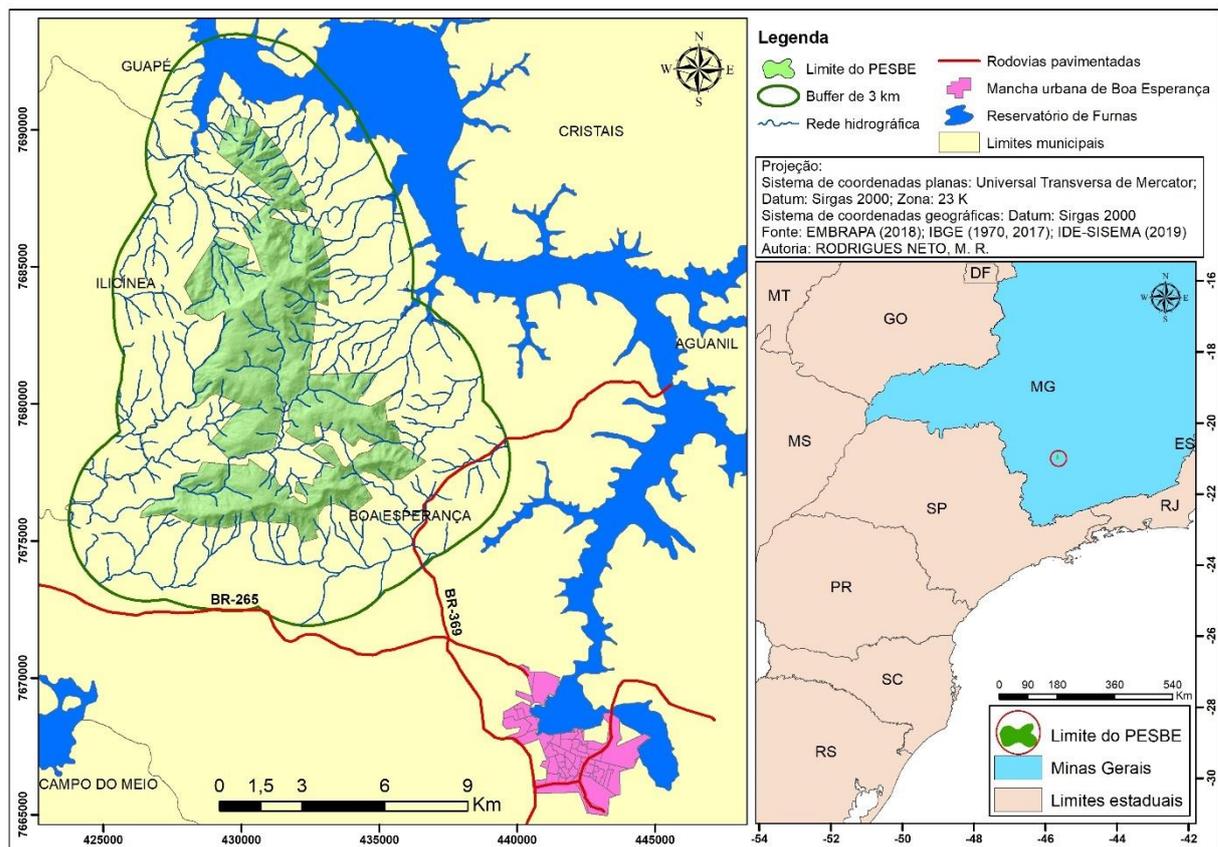
- a) Mapear as variáveis geoambientais que integram a metodologia de fragilidade ambiental, tais como: Declividade, Índice de Vegetação, Probabilidade de Ocorrência de Chuvas Intensas, Densidade de Drenagem, Densidade de Lineamentos Estruturais, Densidade de Vias de Circulação;
- b) Realizar o mapeamento dos processos erosivos, bem como o mapeamento da densidade destes processos;
- c) Identificar se as ocorrências de erosões mapeadas no parque estão majoritariamente associadas às áreas com maior fragilidade indicadas pelo mapa final;
- d) Analisar a relação entre localização das áreas que possuem os maiores índices de fragilidade e a compartimentação geomorfológica do PESBE;
- e) Sugerir medidas para evitar o surgimento e evolução de processos erosivos nas áreas detentoras de maior fragilidade ambiental, visando contribuir com o Planejamento Ambiental do PESBE.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo corresponde ao Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE) (Figura 1), caracterizada como uma Unidade de Conservação de proteção integral, situada no município de Boa Esperança, o qual se localiza na microrregião de Varginha e na mesorregião sul e sudoeste de Minas Gerais, apresentando as seguintes coordenadas geográficas, 21°5'39" de Latitude Sul e 45°34'29" de Longitude Oeste (IBGE, 1990; IEF, 2020; CIDADE-BRASIL, 2020).

Figura 1 – Localização da área de estudo

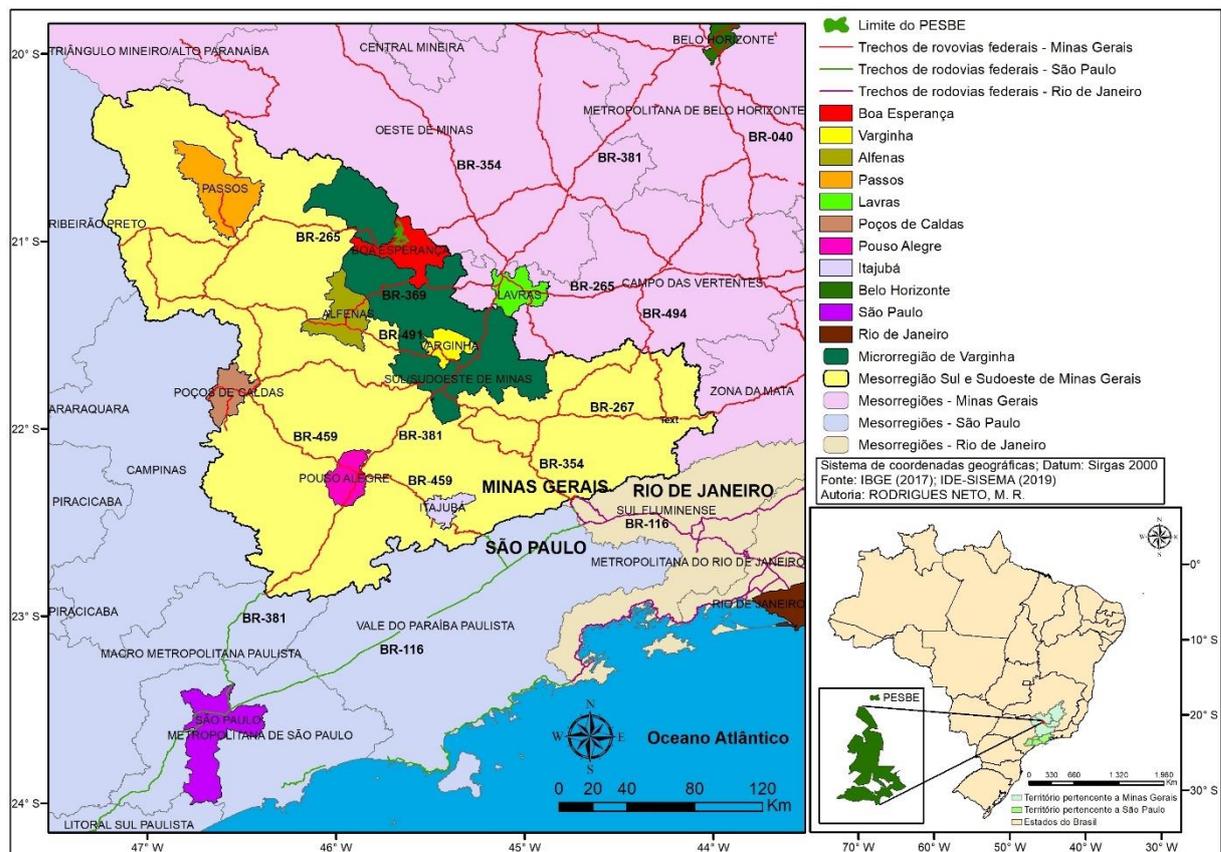


Elaboração: Do Autor (2021)

Próximo ao PESBE as principais rodovias são a BR-369, que liga o município de Boa Esperança ao município de Alfenas e a BR-265, que liga o município de Boa Esperança ao município de Passos. O mapa de localização regional do PESBE (Figura 2) apresenta sua localização espacial frente a alguns municípios médios, distantes a menos de 250 quilômetros

do parque, sendo eles Varginha, Passos, Lavras, Alfenas, Poços de Caldas, Pouso Alegre e Itajubá. As distâncias entre o PESBE e os municípios citados são: Varginha – 86,7 km; Passos – 124 km; Lavras – 99,8 km; Alfenas – 82,8 km; Poços de Caldas – 180 km; Pouso Alegre – 195 km e Itajubá – 231 km. O parque está localizado a aproximadamente 100 km da Rodovia Fernão Dias (BR-381), que liga Belo Horizonte à São Paulo, estando distante destas capitais, respectivamente, 270 e 391 quilômetros.

Figura 2 – Localização do PESBE no município de Boa Esperança e municípios vizinhos

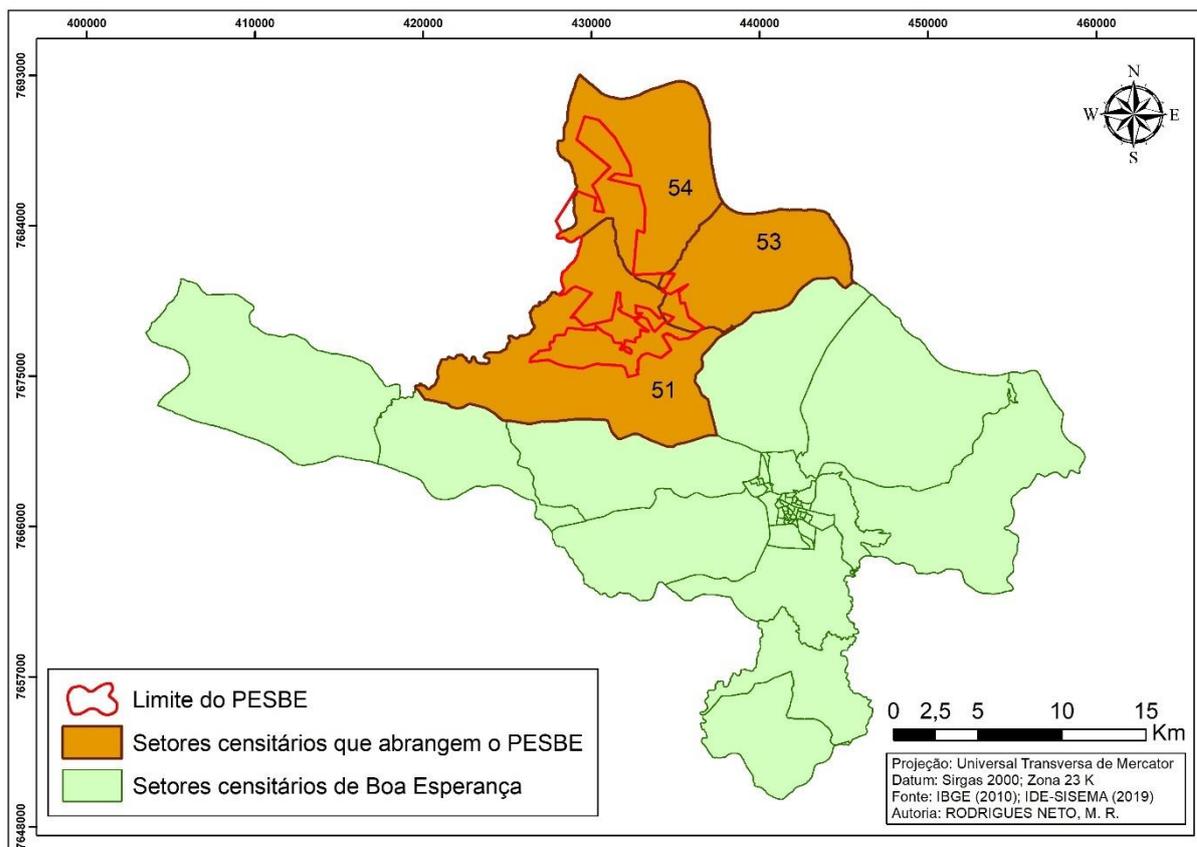


Elaboração: Do Autor (2021)

3.2 O MUNICÍPIO DE BOA ESPERANÇA

Boa Esperança é o município com maior extensão territorial na microrregião a qual pertence (Varginha), posicionando-se em 182º no Estado, possuindo uma área total de 860,669 km² (CIDADE-BRASIL, 2020; IBGE CIDADES, 2020). O município possui um distrito e cinquenta e quatro setores censitários, dispostos em quarenta e um setores urbanos e treze setores rurais, sendo que destes, três abrangem a área do PESBE (Figura 3).

Figura 3 – Setores Censitários do município de Boa Esperança – MG



Elaboração: Do Autor (2021)

No que tange aos aspectos demográficos, o município de Boa Esperança apresentava em 2010 uma população de 38.516 habitantes (0,2% da população do Estado) e uma densidade demográfica de 44,75 hab/km² (maior que a do Estado, que era de 33,41 hab/km²). Em 2020 a população estimada passa a ser de 40.219 habitantes, e densidade demográfica de 46,72 hab/km², denotando um acréscimo populacional absoluto de 1.703 habitantes, ou 4,42% e relativo de 1,97 hab/km² ou 4,4% na última década (IBGE, 2010; IBGE CIDADES, 2020).

Para o ano de 2010, analisando-se os aspectos demográficos dos três setores censitários do município de Boa Esperança que abrangem a área do PESBE (Figura 3), tem-se que o setor 53, que incorpora parte da porção sudeste do parque, é o que apresentava a maior população residente, contando com um total de 930 habitantes, ou 2,4% da população do município e uma densidade demográfica preliminar de 17,56 hab/km². O setor 51, que abarca as porções sul e central do parque era o segundo que apresentava a maior população entre os três setores em questão, contando com 601 habitantes (1,6% da população do município) e uma densidade demográfica preliminar de 5,81 hab/km². Por fim, o setor 54, que abrange as porções noroeste, nordeste e norte do PESBE, possuía uma população de 582 habitantes (1,5% da população do

município) e uma densidade demográfica preliminar de 7,91 hab/km². Sendo assim, os setores que abrangem a área do PESBE possuíam juntos, no ano de 2010, 2.113 habitantes, o que representava 5,48% da população do município (IBGE, 2010).

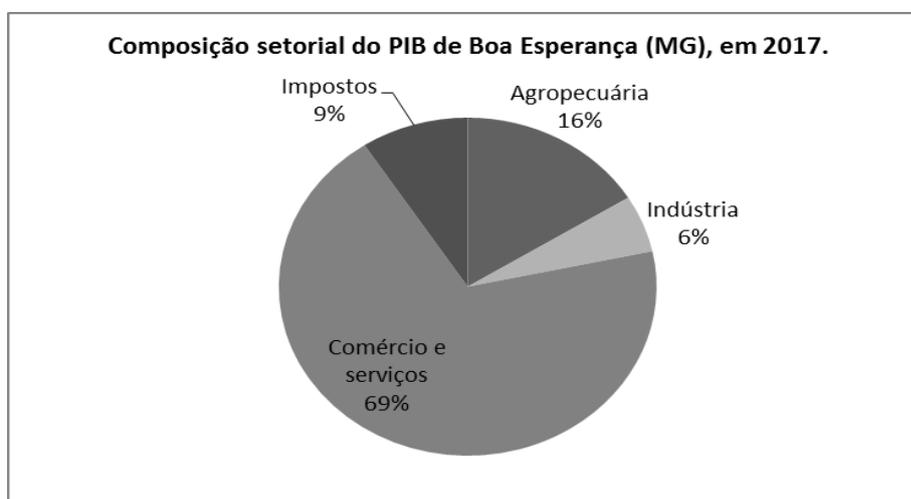
No tocante aos aspectos econômicos, Boa Esperança apresentava em 2017, um PIB (produto interno bruto) total de R\$ 833.110.819,00 bem como um PIB per capita de R\$ 20.555,41. O setor da economia representado pelo comércio e serviços se configura como o que apresenta a maior parcela de contribuição para o PIB total do município (69%), seguido do setor agropecuário, que compõe apenas 16% deste montante (IBGE, 2017; IBGE CIDADES, 2020). Os valores reais e percentuais da composição do PIB de Boa Esperança são demonstrados respectivamente no Quadro 1 e na Figura 4.

Figura 4 – Produto Interno Bruto (PIB) do município de Boa Esperança – MG

Produto Interno Bruto - PIB do município de Boa Esperança (MG), em 2017. (Preços correntes)	
Setor econômico	Valores
Agropecuária	R\$134.724.535,00
Indústria	R\$45.509.096,00
Comércio e serviços	R\$576.204.527,00
Impostos	R\$76.672.661,00
PIB total	R\$833.110.819,00

Fonte: IBGE (2017). Org.: Autor (2021)

Figura 5 – Composição setorial do PIB de Boa Esperança – MG



Fonte: IBGE (2017). Org.: Autor (2021)

Essa grande contribuição do setor de comércio e serviços para o PIB municipal, muito superior a contribuição atribuída ao setor agropecuário, bem como o fato de que em 2015 o percentual das receitas oriundas de fontes externas representava 70,5%, evidencia a importância do papel exercido pelo reservatório de Furnas na dinâmica econômica do município, uma vez que o reservatório propiciou o aumento exponencial do turismo e dos serviços em seu entorno em detrimento da produção agrícola, fato corroborado por Lemos Júnior (2010, p. 84), ao afirmar que “os municípios lindeiros ao Lago de Furnas, quando na época da construção da usina, possuíam basicamente vocação agropecuária, porém, com o alagamento das terras produtivas, buscaram diversificar as suas atividades”.

Além do próprio papel exercido pelo Lago de Furnas, Lemos Júnior (2010) atribui o potencial turístico do município de Boa Esperança aos atrativos naturais, principalmente aos que se referem às cachoeiras localizadas no interior e no entorno do Parque Estadual Serra da Boa Esperança; atrativos que combinados a beleza cênica da paisagem rural ao entorno do lago se tornam bastante proveitosos para a atividade turística.

O comércio também apresenta uma forte contribuição para o PIB do município, atendendo a população local bem como alguns municípios vizinhos. Neste comércio destacam-se os restaurantes, hotéis, bares, lojas, entre outros, que acabam por se beneficiar da própria atividade turística (LEMOS JÚNIOR, 2010).

Ao se fazer uma análise dos aspectos demográficos e econômicos de Boa Esperança, visando relacioná-los com o PESBE e suas áreas de entorno, pode-se dizer que a baixa população absoluta apresentada pelos setores censitários que abrangem o parque, bem como a pequena contribuição do setor agropecuário se comparado aos setores da economia que mais contribuem para o PIB municipal podem indicar que não haja uma grande pressão das atividades agropecuárias nas áreas de entorno da UC. Por outro lado, o papel de destaque do turismo na economia municipal pode se configurar como um problema em potencial atrelado ao aumento da visitação do PESBE, tendo em vista que a UC ainda não possui um Plano de Manejo, tampouco um Plano de Uso Público para orientar o gerenciamento dessa visitação, além de contar com número pequeno de funcionários, fato que pode dificultar o controle de atividades conflitantes que possam vir a ser desenvolvidas por frequentadores no interior do parque.

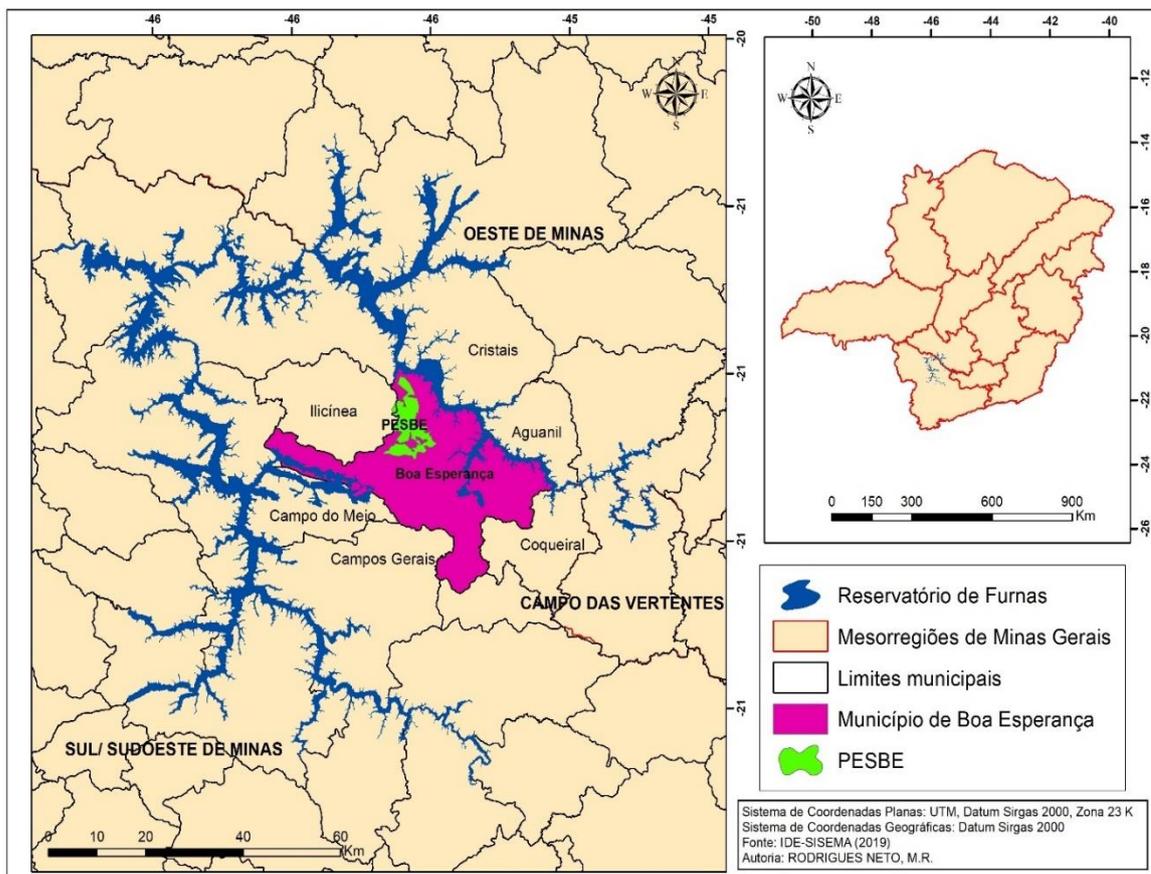
3.3 O PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA (PESBE)

3.3.1 Contexto Histórico da Criação do PESBE - a Influência do Reservatório de Furnas

A criação do PESBE na primeira década do presente século está ligada à um importante fato histórico ocorrido no estado de Minas Gerais no final da década de 1950 e início de 1960: a criação da hidrelétrica de Furnas e do seu reservatório. Este grande empreendimento alterou de maneira drástica a dinâmica socioeconômica e, por conseguinte, a ambiental, dos municípios nos quais se inseriu, como o caso do município de Boa Esperança (MARTINS, 2010; MORAIS *et al.*, 2014).

A Usina de Furnas, situada no sudoeste de Minas Gerais (Figura 5), é considerada como a primeira grande usina hidrelétrica brasileira. Foi criada a partir do decreto 41.066 de 1957, no governo de Juscelino Kubitschek e teve sua construção estendida entre os anos de 1958 a 1962, iniciando suas atividades no ano de 1963, em um contexto histórico nacional de avanço da industrialização e urbanização e consequente escassez de energia elétrica (MARTINS, 2010).

Figura 6 – Reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas e localização do município de Boa Esperança e do Parque Estadual Serra da Boa Esperança – PESBE - MG



Elaboração: Do Autor (2021)

O reservatório de Furnas, também conhecido como “Lago de Furnas”, ou ainda, “Mar de Minas”, foi formado pelo represamento do canal principal do Rio Grande, começando a ser preenchido no ano de 1963. Sua barragem está localizada no curso médio do referido rio, entre os municípios de São João da Barra e São João Batista do Glória (FURNAS, 2020). Este enorme lago artificial banha 34 municípios do sudoeste mineiro (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA ESPERANÇA, 2014), e possui “23 bilhões de metros cúbicos de água, superfície de 1.457 km², perímetro de 3,7 mil km (equivalente a quase metade da extensão da costa brasileira) e profundidade média de 13m” (MARTINS, 2010, p. 348). O processo de desapropriação para a formação do reservatório de Furnas teve início no ano de 1958, sendo desapropriadas as terras e casas abaixo da cota 769 a serem inundadas pela represa (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA ESPERANÇA, 2014). “O reservatório de Furnas desapropriou aproximadamente 5 mil propriedades e inundou cerca de 500 mil ha agricultáveis” (JORNAL DOS LAGOS, 2007, p. 2-3 *apud* MARTINS, 2010, p. 351).

Tomando como exemplo a bacia do rio Sapucaí, afluente do rio Verde, Martins (2010) salienta que a construção da represa de Furnas causou revolta e inquietação em grande parte dos afetados pelo empreendimento, devido a intensa desapropriação de terras e das indenizações pagas. O município de Boa Esperança, assim como os municípios de Campo do Meio, Fama e Guapé, perdeu área urbana e áreas rurais para o reservatório de Furnas.

Os afetados pelo enchimento do lago receberam apenas o valor venal das terras alagadas. E os que “entraram em demanda” tiveram depositado em juízo as indenizações calculadas pelas equipes do Departamento de Patrimônio de Furnas, corroídas pela inflação crescente” (MARTINS, 2010, p. 353).

O lago de Furnas ocasionou mudanças na sub-bacia do ribeirão Marimbondo, em Boa Esperança, cujas margens eram alagadas na estação chuvosa e, no período seco, formavam-se lagoas que se apresentavam como potenciais riscos sanitários à população. No intuito de resolver a questão sanitária das várzeas, bem como de alavancar o turismo e promover a beleza cênica da cidade, foi iniciada em 1975 e concluída em 1976 a construção da barragem nas proximidades da barra do rio Marimbondo com o ribeirão Cascavel e Maricota, visando a estabilização do nível das águas e a formação do Lago de Boa Esperança. Já em 1977 esta primeira barragem se rompeu, sendo reconstruída entre os anos de 1981 e 1982. O lago de Boa Esperança possui uma extensão aproximada de 8 km², sendo 3 km² em perímetro urbano e 5km² em áreas rurais (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA ESPERANÇA, 2014).

Segundo informações provenientes do site da prefeitura municipal de Boa Esperança (2014), a desapropriação das propriedades nos territórios do município que foram alagados pelo

reservatório de Furnas foi feita mediante indenização aos proprietários, porém esta indenização foi aquém dos reais valores das propriedades, fazendo com que a maioria dos desapropriados não conseguisse adquirir novas propriedades. Tal fato provocou um acentuado êxodo rural e fez com que a economia municipal fosse prejudicada, uma vez que as áreas rurais inundadas eram bastante produtivas.

Com a inundação de áreas agricultáveis nos relevos detentores de cotas altimétricas mais baixas, a disponibilidade de terras para a expansão da atividade agropecuária no município de Boa Esperança diminuiu, fato que levou os agricultores e pecuaristas a expandirem suas atividades em direção a Serra da Boa Esperança (IEF, 2020). De acordo com Moraes *et al.* (2014), o café possui papel de destaque nesse cenário devido a sua importância econômica para o município, fato que desencadeou na substituição de áreas de vegetação nativa por áreas de cultivo deste produto agrícola. Tal cenário foi crucial para que se iniciasse o processo de criação do Parque Estadual Serra da Boa Esperança (PESBE).

3.3.2 Aspectos da Implementação do PESBE: Conflitos e Problemas que Envolvem a UC

O PESBE foi criado por meio do Decreto Estadual 44.520, de 16 de maio de 2007, o qual “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” (MINAS GERAIS, 2007). Segundo o decreto 44.520, o parque se caracteriza como uma unidade de conservação integral, contando com uma área de 5.873,9 ha e perímetro de 87.010,51 m, estando sob responsabilidade administrativa do Instituto Estadual de Florestas-IEF (MINAS GERAIS, 2007).

O processo de criação do parque foi iniciado pela prefeitura de Boa Esperança e por lideranças locais, com intuito de frear a expansão agrícola em direção a Serra da Boa Esperança bem como preservar a área já prevista legalmente, considerando a grande riqueza hidrográfica apresentada por ela, fator que aumenta seu valor ecológico e potencial turístico, além de contribuir para o abastecimento de água das comunidades localizadas nas proximidades do parque (IEF, 2007; MORAIS *et al.*, 2014).

Contudo, apesar da relevância desta unidade de conservação, a mesma enfrenta desde sua criação, graves problemas relacionados a regularização fundiária insuficiente. Outros problemas vinculados ao PESBE podem ser destacados: a ausência de plano de manejo

(atualmente em fase de elaboração); as divergências em relação aos limites do parque e as atividades conflitantes com os objetivos da UC realizadas em seu território.

No que tange à regularização fundiária, Ambrósio (2014) salienta que no ano em questão o parque possuía apenas 355 hectares de terra regularizados, sendo tal regularização efetivada por meio da compensação social de reserva legal. Esta porcentagem de terras regularizadas somava apenas 6% do território do parque, havendo ainda no interior desta unidade de conservação 54 áreas em nomes de proprietários particulares. Tal cenário tem relação com o fato de que o parque ainda não possuía “cadastro validado junto ao Ministério do Meio Ambiente, impedindo o recebimento de benefícios dos recursos de compensação ambiental” (AMBRÓSIO, 2014, p. 109).

Já no ano de 2020 – de acordo com informações repassadas por meio de comunicação pessoal por Alan Vilhena, gestor do Parque Estadual Serra da Boa Esperança – o total de terras regularizadas na UC (através de compensação ambiental) é de 650,83 hectares, o que corresponde a 11% da área do parque. Apesar da área regularizada ter praticamente dobrado em um período de seis anos, esta área ainda corresponde a uma pequena porção do território do parque, fato que, de acordo com a gestão da UC, se deve à insuficiência de recursos destinados pelo Estado.

Outro problema enfrentado pelo parque desde sua criação é a ausência de plano de manejo, que se encontra em fase de elaboração, com previsão de conclusão ainda em 2021 (IEF, 2020). Salienta-se que foi realizada uma oficina para a discussão de questões referentes a elaboração do Plano de Manejo do PESBE no mês de fevereiro de 2021, sendo levantadas, dentre outras questões, as atividades conflitantes no parque, com destaque para o motociclismo *Off Road*.

Santos (2010) afirma que o plano de manejo é o documento mais importante de uma unidade de conservação, uma vez que este documento “estabelece o zoneamento, o diagnóstico e o manejo dos recursos naturais, além de normalizar as pesquisas, a utilização e visitação” (SANTOS, 2010, p. 238). Ainda segundo o autor, foi determinado pelo artigo 27 da lei do SNUC que todas as unidades de conservação devem dispor de um plano de manejo, e que na ausência deste documento são proibidas atividades que não sejam de conservação e fiscalização. Ainda assim o PESBE recebe visitantes, principalmente em suas cachoeiras, além de praticantes de motociclismo *Off Road*, fatos observados em campo e relatados pela gerência do parque.

O motociclismo *Off Road* se configura como uma atividade conflitante em unidades de conservação, causando diversos impactos ambientais, a exemplo da compactação e erosão do solo, do assoreamento de corpos hídricos e da alteração e destruição de vegetação; impactos estes que se agravam com o aumento do número de motos nas trilhas, especialmente no período de chuvas (SANTANA, 2011). No PESBE a atividade é tida como ilegal e desordenada, sendo desenvolvida de maneira intensa em formações savânicas de Cerrado Rupestre e de Campo Rupestre, além de também ser praticada em formações florestais com curso d'água. Ainda assim, tal prática é realizada de maneira deliberada, uma vez que seus praticantes já foram avisados pela equipe do parque sobre sua prática não ser permitida na UC (ALVES, 2019). Porém a equipe do PESBE não consegue impedir a realização desta atividade predatória, sendo que a deterioração nas trilhas existentes e na vegetação causados pela abertura de novas trilhas é “[...] evidente e de acordo com a equipe do parque vem piorando ao longo do tempo, fato que não parece importar aos seus praticantes. 58,33% dos locais com presença de influência antrópica são referentes a esta prática” (ALVES, 2019, p. 48).

A intensa visitação a alguns pontos do parque, como suas principais cachoeiras, também se caracteriza como uma atividade conflitante, pois provoca um grande fluxo de veículos (que muitas vezes desrespeitam os limites da estrada) e o acúmulo de lixo (ALVES, 2019). Ressalta-se também a ocorrência de fogueiras feitas por visitantes nas dependências do parque, apresentando um grande potencial para provocar incêndios, principalmente as fogueiras feitas nas áreas de topo e no período seco, levando-se em consideração que em altitudes elevadas o perigo de propagação do fogo é maior (MESSIAS, FERREIRA, 2019). Nesse sentido, destaca-se o incêndio ocorrido em 2015, sendo provocado por uma fogueira que não foi devidamente apagada.

Os incêndios já registrados no parque não foram apenas acidentais, relacionados a descuidos de visitantes, ocorrendo também incêndios criminosos, que ocasionaram grande impacto ao PESBE, como um incêndio florestal provocado em fevereiro de 2010 em uma área de 567 hectares de mata nativa; e um incêndio provocado em agosto de 2014, ocorrido no entorno do parque onde 200 hectares foram queimados, tendo como possível causa, queimadas de um produtor rural nas proximidades da mata (MORAIS *et al.*, 2014).

No tocante a problemática do limite do PESBE, podem ser feitos dois apontamentos, o primeiro se tratando da incongruência existente na delimitação vetorial da UC; e o segundo referindo-se a questão levantada por Rangel (2017) a respeito da delimitação do parque sem a devida atenção as características de uso e ocupação da terra. No que tange ao primeiro

apontamento, o problema se consiste na existência de mais de um arquivo vetorial de limite (que foram disponibilizados de forma oficial, em períodos distintos), que não são compatíveis entre si, fato que pode comprometer a elaboração de pesquisas e de produtos cartográficos da área, por exemplo.

Quanto ao segundo apontamento, Rangel (2017) salienta que

o Parque Estadual Serra da Boa Esperança, próximo a alguns dos seus limites, possui incorporadas à sua área algumas propriedades produtivas, principalmente nas atividades de cafeicultura e de bovinocultura de corte. Por outro lado, propriedades com expressivas áreas compostas por vegetação nativa não foram integradas à unidade de conservação (RANGEL, 2017, p. 18).

Considerando tais fatos, Rangel (2017) levanta a questão de que, ou os estudos técnicos necessários para a definição dos limites do parque não foram devidamente realizados ou não foram utilizados como subsídios de maneira correta, uma vez que áreas com expressiva vegetação nativa não foram incorporadas a UC ao passo que áreas produtivas foram. O autor citado salienta que tal fato se configura como obstáculo no que tange à regularização fundiária do parque, uma vez que as áreas produtivas são mais difíceis de serem desapropriadas e adquiridas pelo Estado por possuírem maior valor agregado.

Somados a estes problemas incluem-se a presença de animais domésticos, como cães e bovinos nas dependências do parque; a fragmentação do uso da terra em áreas de limite do parque e conseqüente baixa conectividade dos fragmentos florestais existentes (ALVES, 2019); a inexistência de uma zona de amortecimento e a carência de informações geográficas e dados georreferenciados sobre o parque. Os animais domésticos podem causar uma série de problemas tanto de caráter biológico como geofísicos ao parque, como a transmissão de doenças à fauna silvestre, por parte dos cães e a compactação do solo, devido ao pisoteio dos bovinos.

Já o problema da fragmentação do uso da terra, principalmente nos limites do parque onde áreas de vegetação nativa fazem divisa com cultivos agrícolas e pastagens, acaba por auxiliar na fragmentação dos habitats e conseqüentemente prejudicar o deslocamento das espécies, fato que é agravado devido a paisagem fora dos limites da UC também ser fragmentada (ALVES, 2019). Este problema poderia ser minimizado se o parque contasse com uma zona de amortecimento, uma vez que nesta área as atividades antrópicas são restritas com objetivo de minimizar os impactos negativos sobre a UC (MMA, 2020), o que leva a crer que as atividades agropecuárias limítrofes ao parque e aos fragmentos florestais seriam interrompidas.

Por fim, pode-se atribuir a carência de informações geográficas e dados georreferenciados sobre o PESBE à baixa quantidade de estudos técnicos e científicos com base na ciência geográfica na região, à idade relativamente curta da UC, a insuficiência de investimentos do governo estadual, além da ausência do plano de manejo, em fase de elaboração e discussão que, quando finalizado, além de orientar ações e medidas que visem a preservação do parque, apresentará uma caracterização de seus aspectos físicos, biológicos e antrópicos.

3.3.3 Aspectos Físico-Geográficos do PESBE

O PESBE está totalmente inserido no bioma Cerrado, porém em uma região de transição entre Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2019). De acordo com Rangel (2017), no parque predomina a fitofisionomia Campo de Altitude, com significativa ocorrência de fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual.

O grau de conservação da vegetação nativa na região onde o Parque Estadual Serra da Boa Esperança está inserido apresenta-se predominantemente como muito baixa, salvo ocorrências em alguns locais onde o grau varia de baixo a muito alto, conforme o Zoneamento Ecológico e Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG) (RANGEL, 2017, p. 14).

O PESBE apresenta grande importância ecológica (IEF, 2007). Alves (2019) em seu estudo sobre os mamíferos de médio e grande porte do parque identificou diversas espécies, como o Lobo-guará, a Onça parda, a Jaguatirica, o Tamanduá-bandeira, o Cachorro-do-mato, a Paca e a Irara. A UC também abriga uma grande diversidade de aves, com espécies comuns e raras, a exemplo do Tico-tico, do Gavião carcará, do Bico de veludo e da Noivinha branca (COUTINHO; ANDRADE, 2016).

No que se refere aos aspectos climáticos, tem-se que o clima da região onde o PESBE está inserido é do tipo tropical de altitude (Cwa), apresentando temperaturas amenas, possuindo médias anuais que variam entre 21 e 23 ° C, com chuvas torrenciais concentradas no verão enquanto o inverno é caracterizado como o período seco (PDRH FURNAS, 2013).

Informações geológicas da área foram baseadas nos mapeamentos geológicos em escala 1:100.000 da folha Guapé (contrato CPRM-UERJ), desenvolvido por Valeriano *et al.* (2007) e da folha Alfenas (contrato CPRM-UFRJ) desenvolvido por RIBEIRO *et al.* (2020). As folhas abrangem respectivamente as cartas topográficas 1:50.000 (IBGE, 1970) de Alpinópolis e Guapé e; Alfenas, Boa Esperança, Três Pontas e Campos Gerais; além das pesquisas desenvolvidas por Valeriano (1992).

O arcabouço litológico é formado por rochas pré-cambrianas metamorfisadas, datando do Arqueano e Proterozóico (Paleoproterozóico ao Neoproterozóico). Foram metamorfisadas durante vários episódios orogênicos, e são provenientes tanto de rochas sedimentares como magmáticas (VALERIANO *et al.*, 2007). Seguindo a sequência geocronológica, as unidades lito-estratigráficas que ocorrem na área são: Granitos e Ortognaisses; Xisto Costas; Sequência Serra da Boa Esperança 1; Sequência Serra da Boa Esperança 2 e Formação Samburá. Com base em Valeriano *et al.* (2007), a ocorrência e distribuição dos litotipos são descritas a seguir:

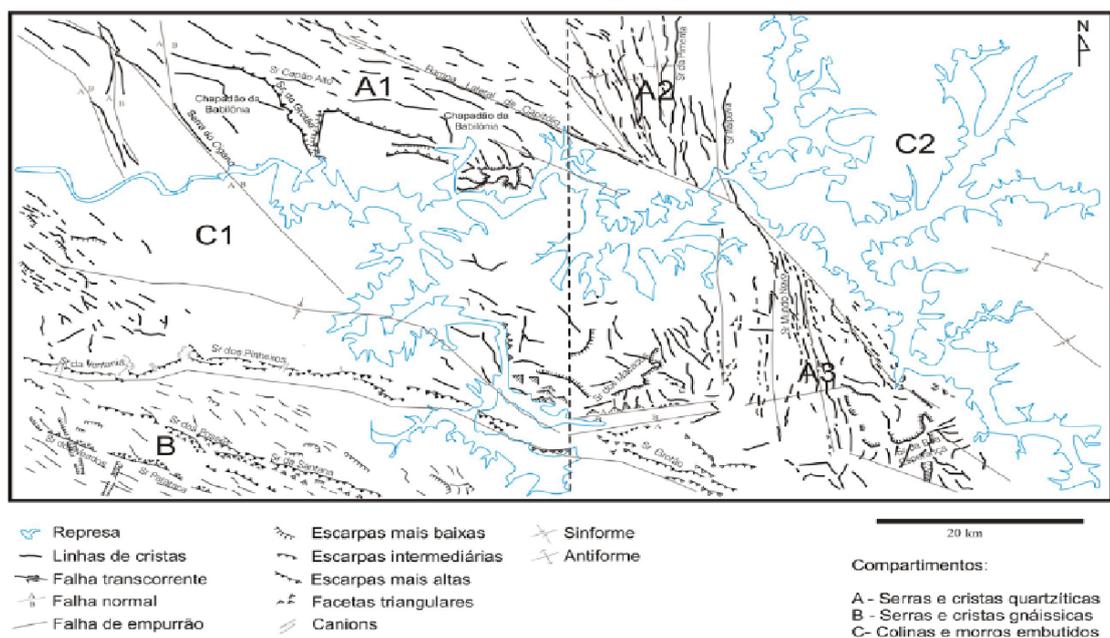
- a) Granitos e Ortognaisses - aparecem milonitizados e/ou filonitizados. Estes têm ocorrência restrita ao sul do PESBE, na face norte da Serra da Boa Esperança, abrangendo um trecho a montante da bacia do ribeirão Águas Verdes.
- b) Xisto Costas - formados por epidoto-muscovita e xisto feldspático vulcanoclástico, ocorrem de maneira localizada, nos limites do parque, ao longo dos setores sudeste, leste e nordeste do PESBE.
- c) Sequência Serra da Boa Esperança 1 - apresenta unidade metapelítica; filitos sericíticos cinzentos ou esverdeados; metarrimito arenoso. Têm distribuição restrita na área, especialmente em alguns trechos na média vertente e no sopé da Serra da Boa Esperança, ocorrendo a leste, nordeste, norte e noroeste da serra, circunscrita a faixas altimétricas entre 783 a 1.143m.
- d) Sequência Serra da Boa Esperança 2 – unidade quartzítica constituída por metarenitos ortoquartzíticos; filitos sericíticos subordinados; lentes de metaconglomerados quartzíticos. Esta é a unidade com ampla distribuição no PESBE, ocorrendo ao sul do parque, na face sul da Serra da Boa Esperança e nas faixas altimétricas mais elevadas entre 1.143 a 1.395m se distribuindo nas áreas de topos tabulares e cristas da Serra da Boa Esperança.
- e) Formação Samburá – metapelito maciço ou laminado. Tem pouca ocorrência se restringindo a poucos trechos no noroeste e sul do parque.

No contexto geomorfológico regional, segundo o mapa geomorfológico do IBGE (2019), produzido na escala 1:250.000, o PESBE está inserido no domínio geomorfológico Cinturões Móveis Neoproterozóicos, na região dos Planaltos da Canastra e mais especificamente na unidade Serra da Canastra. Gatto *et al.* (1983), ressaltam que a área integra o Domínio Morfoestrutural dos Remanescentes de Cadeias Dobradas, composto pelos subdomínios Região dos Planaltos da Canastra e Região dos Planaltos do Rio Grande. Para Ross (1985) a área se insere nos Planaltos em Cinturões Orogênicos, pertencentes aos Planaltos

e Serras do Atlântico Leste-Sudeste, enquanto Saadi (1991) propõe uma subdivisão morfoestrutural para a região sul de Minas Gerais, onde o setor sudoeste se insere no Compartimento Morfoestrutural Corredor Campo do Meio, pertencente à compartimentação morfoestrutural da Bacia do Alto Rio Grande.

O mapa de Compartimentos Morfoestruturais proposto por Valeriano *et al.* (2007) das folhas Guapé e Alpinópolis (Figura 6) mostra a presença de forte influência das características litológicas nos compartimentos de relevo. São eles: A – Compartimento de Serras e Cristas Quartzíticas, subdividido em segmentos A1, A2 e A3; B – Compartimento de Serras e Cristas Gnáissicas; C – Compartimento de Colinas e Morros Embutidos. A área de estudo se insere na folha Guapé e no segmento A3, conforme a figura 6. Este segmento é caracterizado pela presença de linhas de cristas do tipo *hogbacks* com direções NNW e N-S. Os vales fluviais se encaixam paralelamente às cristas, como é o caso das bacias do ribeirão Verde e do ribeirão Águas Verdes, principais sistemas hidrográficos do PESBE. A serra da Boa Esperança, ao sul do segmento A3, integra juntamente com a serra Mundo Novo ao norte, um sistema montanhoso de direção NNW – ENE. As linhas de cristas e escarpas no PESBE, apresentam forte dissecação remontante das escarpas, promovendo a geração de pequenas depressões e vales embutidos junto às cabeceiras de drenagem. É importante destacar que as frentes de erosão mostram nítido controle da litologia e da estruturação geológica.

Figura 7 – Compartimentação Morfoestrutural das folhas Guapé e Alpinópolis - MG, escala 1:100.000



Fonte: Valeriano *et al.* (2007)

Com base na análise visual de imagens do Google Earth (GOOGLE, 2020) e de cartas topográficas (IBGE, 1970), constata-se que o PESBE apresenta um relevo serrano, sendo a Serra da Boa Esperança uma feição geomorfológica que percorre todo o setor sul do parque com cristas de direção E-W, infletindo à noroeste com cristas remanescentes e tomando a direção NW-SE com topos mais largos e tabulares, até interceptar a Serra do Chapadão no setor centro-oeste, seguindo então na direção norte até as proximidades do limite do parque. O front das escarpas formadas na Serra da Boa Esperança, ao sul do parque, exhibe vertentes íngremes, formando anfiteatros de erosão marcados por canais de 1ª. e 2ª. ordens. As faces íngremes à oeste e noroeste do PESBE mostram fortes escarpamentos se configurando como escarpas de linha de falha, que seguem recuadas em função das pequenas bacias de drenagem constituídas por canais de 1ª. e 2ª. ordens.

Já o setor norte do parque apresenta um relevo formado por pequenas serras com direção E-W que se conectam a crista da Serra da Boa Esperança, intercaladas por vales que apresentam um certo grau de simetria e que abrigam canais fluviais que fluem em direção ao reservatório de Furnas.

No que concerne a hidrografia, o PESBE apresenta recursos hídricos abundantes. As cachoeiras e corredeiras encontradas no parque contribuem para sua grande beleza cênica e potencial turístico e seus diversos cursos d'água tributários do Rio Grande e do Lago de Furnas abastecem propriedades e comunidades localizadas no sopé da Serra da Boa Esperança. (IEF, 2007). Os rios de maior hierarquia considerando apenas o limite do parque são o Ribeirão Águas Verdes, que nasce no reverso da Serra do Chapadão e percorre na direção sudoeste até cruzar o limite do parque, buscando o reservatório de Furnas como nível de base; e o Ribeirão Verde, cujas nascentes se encontram no *front* da Serra do Chapadão, percorrendo em seguida na direção noroeste por cerca de 2.200 metros até cruzar o limite do PESBE, desaguando mais a norte em um braço do reservatório de Furnas, próximo ao limite norte do parque (IBGE, 1970).

Quanto a pedologia, de acordo com o mapeamento de solos de Minas Gerais em escala 1:500.000 produzido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM em parceria com a Universidade Federal de Viçosa – UFV, os solos predominantes no PESBE são os cambissolos háplicos Tb distróficos, sendo encontrados em toda extensão do parque com exceção de áreas nos setores norte, sul, sudoeste e noroeste. Estas áreas apresentam argissolos vermelho-amarélos eutróficos, encontrados no setor sul e argissolos vermelhos distróficos localizados nos setores norte e noroeste e em áreas menores nos setores sul e sudoeste.

4 EMBASAMENTO TEÓRICO CONCEITUAL

4.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: CONCEITOS E CATEGORIAS

As unidades de conservação são áreas protegidas pelo poder público e/ou pela iniciativa privada, destinadas à conservação da biodiversidade (MMA, 2019).

A criação das unidades de conservação no mundo atual vem se constituindo numa das principais formas de intervenção governamental, visando reduzir as perdas da biodiversidade face à degradação ambiental imposta pela sociedade (desterritorialização das espécies da flora e fauna). Entretanto, esse processo tem sido acompanhado por conflitos e impactos decorrentes da desterritorialização de grupamentos sociais (tradicionalistas ou não) em várias partes do mundo. (VALLEJO, 2002, p. 57).

Conforme o ministério do meio ambiente, (MMA, 2019), as unidades de conservação são divididas em duas categorias, de um lado as unidades de proteção integral e de outro as unidades de uso sustentável. As unidades de proteção integral são aquelas em que a proteção da natureza se configura como objetivo principal, sendo assim, o conjunto de normas que estão atreladas a ela são mais restritivas, sendo permitido apenas o uso indireto dos recursos naturais, como turismo ecológico e pesquisa científica. Este grupo de unidades possui cinco categorias: Reservas Biológicas, Parque, Monumento Natural, Estação Ecológica e Refúgio da Vida Silvestre.

Por outro lado, as unidades de uso sustentável são criadas com a perspectiva de uso sustentável dos recursos naturais, conciliando a dinâmica entre proteção do meio ambiente e o desenvolvimento de atividades antrópicas de forma sustentável. Nestas unidades, as atividades que envolvem o manejo e coleta dos recursos naturais são permitidas desde que a apropriação desses recursos seja coerente com a dinâmica dos recursos ambientais e dos processos ecológicos. As unidades de uso sustentável são divididas em sete categorias, sendo elas: Reserva de Fauna, Reserva de Desenvolvimento Sustentável, Reserva Extrativista, Área de Relevante Interesse Ecológico, Reserva Particular do Patrimônio Natural e Área de Proteção Ambiental (MMA, 2019).

Atualmente o Brasil possui 18,62% de sua área continental e 26,47% de sua área marinha protegida por unidades de conservação (sem considerar as sobreposições), o que resulta em um total de 2376 unidades. Dentre esse número, 761 unidades pertencem ao tipo proteção integral, ou 32,03% do número total de UCs e 1615 pertencem ao tipo uso sustentável, representando 67,97% do total de unidades de conservação (MMA, 2019).

Somado ao fato de as unidades de conservação de proteção integral representarem um número bem inferior em relação as unidades da categoria uso sustentável, Salmona, Ribeiro e Matricardi (2014, p. 296) afirmam que efetivamente não se sabe qual área de proteção integral está de fato “protegida para fins de preservação da natureza, admitindo apenas usos indiretos. Isso porque grande parte das Unidades de Conservação de Proteção Integral não foi completamente instituída”. Nesse sentido, a maioria destas unidades não possuem plano de manejo (63,3%) ou conselho gestor (54,3%) (MMA, 2019), fatores que aliados aos problemas referentes a regularização fundiária, falta de funcionários e de infraestrutura básica encontrados em Ucs brasileiras, principalmente devido à falta de investimentos (MEDEIROS *et al.*, 2011) se tornam ainda mais preocupantes.

Um grave problema encontrado em unidades de conservação de proteção integral diz respeito aos conflitos socioambientais. Segundo Laschefski, Dutra e Doula (2012), a legislação ambiental, ao colocar em cena distintas representações sociais no tocante a utilização dos recursos naturais de uma área acaba por gerar conflitos. Esses conflitos têm forte relação com a questão fundiária, uma vez que ao não admitir o uso direto dos recursos naturais (MMA, 2019), as UCs da categoria proteção integral não permitem a moradia ou desenvolvimento de atividades econômicas em suas áreas, fato que muitas vezes provoca revolta nas populações locais.

Os Parques são unidades de conservação de proteção integral destinadas a preservação dos ecossistemas naturais e sítios de beleza cênica, onde é permitido a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades recreativas e educativas, o que promove uma maior interação entre o visitante e a natureza, se comparado a estação ecológica, por exemplo (MMA, 2019).

Segundo Salmona, Ribeiro e Matricardi (2014) os parques, tanto nacionais, estaduais ou municipais tem um conjunto de regras a serem mantidas para que seus objetivos de preservação sejam efetivamente cumpridos, a exemplo do fato de serem permitidos em seus limites apenas o uso indireto dos recursos naturais e de suas áreas se constituírem como de domínio público, sendo que as áreas particulares são incluídas em suas terras através da desapropriação. Porém os autores explicitam que apesar dessas diretrizes, os parques brasileiros sofrem sérias limitações no tocante ao seu estabelecimento, sendo que muitos são estabelecidos com sérias pendências fundiárias, que se acumulam e inclusive se tornam mais graves com o passar do tempo.

Quanto a situação fundiária dos parques estaduais de Minas Gerais, Ambrósio (2014) salienta que apenas dois dos 38 parques presentes no Estado encontram-se totalmente regularizados, sendo eles o Parque Estadual do Ibitipoca e o Parque Estadual dos Campos Altos. A autora complementa afirmando que 44,74% do total de parques do Estado (17 parques) encontram-se parcialmente regularizados, podendo se compreender “parcialmente regularizados” desde os parques com 1% de áreas regularizadas até os que detêm 99% de suas terras já regularizadas, 15 parques (39,47 %) não apresentam informações sobre suas situações fundiárias e quatro parques (10,53 %) encontram-se não regularizados.

4.2 A PAISAGEM NO ÂMBITO DA CIÊNCIA GEOGRÁFICA

A “visão totalizadora das interações da natureza com a sociedade iniciou-se no final do século XVIII e nos princípios do século XIX, com os trabalhos de Emmanuel Kant (1724-1804), Alexander Von Humboldt (1769-1859) e Karl Ritter (1779-1859)” (MELO; FURLAN, 2017, p. 652). Porém, segundo Moreira e Silva (2012), as discussões referentes ao conceito de paisagem se iniciaram apenas no século XIX, possuindo um caráter multidisciplinar, uma vez que foram levantadas por diversas áreas do conhecimento, inclusive a Geografia. As autoras salientam que a visão totalizadora a respeito da paisagem iniciada ainda no século XVIII é também, de certa maneira, adotada pela Escola da Geografia Tradicional, iniciada na segunda metade do século XIX, que trata a paisagem a partir de uma visão integrada dos fatores físicos, biológicos e culturais, porém este último fator se limita às transformações causadas pela ação antrópica ao ambiente (MOREIRA; SILVA, 2012).

Esta relação de integração entre os elementos da paisagem natural e a ação antrópica volta a ganhar força com o advento da Teoria Geral dos Sistemas, que segundo Gomes (2009), passou a repercutir na Geografia, através de modelos matemáticos, a partir da década de 1950, com a Geografia Teorética.

Para Suertegaray (2017) o conceito de paisagem é utilizado na Geografia Física a partir da abordagem da natureza como categoria analítica. Para esta análise, a autora considera o conceito de paisagem, “como articulador de elementos. Estes podem ser de ordem física ou humana. A utilização desse conceito permite compreender uma das dimensões do espaço geográfico, ou seja, a expressão material” (SUERTEGARAY, 2017, p. 125).

Ao definir o conceito de paisagem de uma maneira mais ampla com base em princípios da teoria sistêmica, Bertrand (2004) mostra uma diferença epistemológica para com a Geografia

Tradicional, uma vez que ele considera relações bilaterais entre os componentes da paisagem, não tratando, portanto, a “paisagem física” apenas como um componente passivo. Para o autor, a paisagem não é apenas natural, mas total, incluindo a participação humana. Nessa direção, define paisagem como uma

determinada porção do espaço, o resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução. (BERTRAND, 2004, p. 141).

Guerra e Marçal (2018, p. 14) compactuam com a ideia de paisagem integrada, ao afirmarem que

a paisagem é a natureza integrada e deve ser compreendida como síntese dos aspectos físicos e sociais, sendo importante seu conhecimento, no sentido de serem desenvolvidas pesquisas aplicadas que possam levar a metodologias que colaborem com o manejo adequado e sustentável dos recursos naturais, relevantes para a sociedade como um todo.

Melo e Furlan (2017, p. 652), salientam que a paisagem pode ser entendida como “produto visual de interações entre elementos naturais e sociais que, por ocupar um espaço, pode ser cartografada em diferentes escalas e classificada de acordo com um método ou elemento que a compõe”.

Por sua vez, Emídio (2006) também considera a paisagem a partir de uma visão integrada de seus componentes, porém discorda da conotação de “produto visual” atribuída ao conceito por Melo e Furlan (2017), argumentando que a paisagem vai além da composição visual, sendo composta de elementos bióticos e abióticos, em contínua mutação, e formada a partir de processos físicos, químicos e biológicos, que estão ativos interagindo, reagindo e se alternando.

Porém, o conceito de paisagem é um tanto mais plural. A paisagem é vista a partir de diferentes ópticas, por autores advindos de escolas diversas, em distintos períodos históricos. Santos (2010) ao dialogar sobre a variedade conceitual existente na Geografia acerca do termo paisagem salienta que esta é “ora considerada como objeto de estudo, ora como uma categoria de análise, ora como sinônimo de Espaço, Natureza, de Superfície Terrestre ou, até mesmo, de Cultura” (SANTOS, 2010, p. 160).

Bertrand (2004) tece uma crítica a respeito dessa pluralidade em torno do conceito paisagem, que por vezes chega a se tornar até uma “confusão conceitual”, enfatizando a falsa atribuição do termo “meio” como sinônimo de paisagem, sendo que, para ele, o “meio” possui

uma finalidade ecológica, que por si só não se enquadra na palavra paisagem. “O problema é de ordem epistemológica.” (BERTRAND, 2004, p. 141).

Nessa perspectiva da pluralidade conceitual acerca de paisagem, ela também é abordada através de um viés social, com base em princípios das escolas da Geografia Humana. Em uma visão atrelada a princípios da Geografia Crítica, Serpa (2013), refere-se a paisagem como sendo resultante de “um processo de acumulação, mas é, ao mesmo tempo, contínua no espaço e no tempo, é uma sem ser totalizante, é compósita, pois resulta sempre de uma mistura, um mosaico de tempos e objetos datados” (SERPA, 2013, p. 170). O autor, utilizando-se das palavras de Santos (1994), agrega ainda diversos termos recorrentes na escola da Geografia Crítica, afirmando que

a paisagem pressupõe também um conjunto de formas e funções em constante transformação, seus aspectos “visíveis”, mas, por outro lado, as formas e as funções indicam a estrutura espacial, que é, em princípio, “invisível” e resulta sempre do “casamento” da paisagem com a sociedade (SANTOS, 1994, n.p. *apud* SERPA, 2013, p. 170).

Abordando elementos da Geografia Crítica, como a apropriação e produção do espaço, atrelados a elementos da Geografia Humanística, como à consideração da realidade do indivíduo, Santos (2010), aborda a paisagem como “uma imagem da essência do espaço apropriado e produzido como existência”, ou ainda como sendo “a forma visível mais comum e a qual mais se aproxima da realidade do indivíduo em todos seus aspectos cognitivos sensoriais”. (SANTOS, 2010, p. 152-153). Nesse mesmo sentido, a paisagem é abordada por Paes (2017) como uma ordem socioespacial, se configurando como um arranjo concreto e simbólico. “A paisagem impõe uma visão estética e também uma intenção, um poder” (PAES, 2017, p. 669).

Por sua vez, Andreotti (2010) aborda a paisagem sob uma perspectiva humanística ao tratar da relação da paisagem com a percepção do indivíduo. A autora salienta que o conceito de paisagem na Geografia refere-se a um espaço capturado pelos cinco sentidos, havendo ainda geógrafos que consideram a captação intuitiva do espaço, que se configura em um tipo de sexto sentido. Esse pensamento vai de acordo com a afirmação de Emídio (2006), para quem a paisagem e seus componentes se configuram como objeto apreendido por meio dos sentidos, tendo o sentido externo da visão e os sentidos internos da memória e da fantasia, participação especial nesse processo.

Através das diversas concepções acerca do conceito de paisagem, fica evidenciado a importância deste para a ciência geográfica, ao mesmo tempo em que surge uma preocupação

para com sua utilização que, por ser muito abrangente, pode acabar deflagrando uma abstração demasiada, prejudicial a Geografia.

4.3 A IMPORTÂNCIA DA GEOMORFOLOGIA NOS ESTUDOS INTEGRADOS DA PAISAGEM

Ao longo do tempo histórico, os ambientes naturais em equilíbrio experimentaram modificações em função das intervenções humanas. Para Ross (2006) o relevo como parte integrante dos ambientes naturais, deve ser analisado no processo de produção do espaço a partir de duas perspectivas: “as potencialidades dos recursos naturais, diante das novas necessidades impostas pelas sociedades humanas; e as fragilidades dos ambientes naturais em função das interferências tecnológicas cada vez mais desenvolvidas” (ROSS, 2006, p. 60).

Como mais um dos vários componentes da natureza, o relevo é entendido como recurso natural onde a ocupação humana exercida sobre ele, muitas vezes ocorre sem a compreensão da dinâmica e evolução dos processos e das formas e sem o entendimento de suas características genéticas.

A Geomorfologia, área de investigação que exige a compreensão do relevo é concebida segundo Guerra e Marçal (2018, p. 17) como “o estudo das formas de relevo, levando-se em conta a sua natureza, origem, desenvolvimento de processos e a composição dos materiais envolvidos”. De acordo com Vitte (2020), a ciência geomorfológica possui uma postura epistemológica e metodológica baseada na formulação e teste de hipóteses, postura esta que apresenta raízes filosóficas na tradição pragmática. O autor salienta que o pragmatismo “surtiu nos Estados Unidos e contrastava nitidamente com a metafísica, pois propunha que o conhecimento fosse originado pela atividade prática, a partir de experimentos e da experiência científica” (VITTE, 2020, p. 24).

Segundo Guerra & Marçal (2018, p. 19), o termo Geomorfologia “foi desenvolvido por geólogos, provavelmente McGee e Powell, nos Estados Unidos, na década de 1880”. Segundo os autores, a Geomorfologia durante o final do século XIX e início do século XX se empenhou em compreender a formação de diferentes paisagens, através do entendimento da sequência de eventos que culminaram nestas paisagens.

A respeito da forte relação existente entre Geomorfologia e Paisagem, Ross (2019, p. 12) argumenta que

o entendimento do relevo passa, portanto, pela compreensão de uma coisa muito maior que é a paisagem como um todo. Não se pode entender a gênese

e a dinâmica das formas do relevo sem que se entenda os mecanismos motores de sua geração, sem que se perceba as diferentes interferências dos demais componentes em uma determinada Unidade de Paisagem.

Partindo do pressuposto de integração de elementos da paisagem para compreensão do relevo, surge a Geomorfologia Ambiental “a partir do reconhecimento do papel da ação do homem nos processos geomorfológicos e na evolução das formas de relevo, ou seja, o homem agindo como um agente geomorfológico” (GUERRA; MARÇAL, 2018, p. 21).

No tocante ao papel exercido pela Geomorfologia aos estudos ambientais, afirma-se que a ciência geomorfológica, por meio de seu objetivo específico, fornece subsídios importantes para a análise ambiental, na medida em que, para se compreender a dinâmica ambiental é necessário a compreensão do todo que compõe o Estrato Geográfico, incluindo obrigatoriamente o relevo, pois é no relevo que as forças de interação mais se manifestam (ALMEIDA, 1986; ROSS, 2019).

Ross (2019) argumenta que a Geomorfologia assume uma posição privilegiada e ao mesmo tempo frágil no tocante aos estudos ambientais. Segundo o autor, sua posição privilegiada se dá pelo conhecimento pluralista exigido do pesquisador por esta ciência, na medida em que, para se entender a dinâmica e a gênese do relevo é necessário a compreensão dos “fatores bioclimáticos, pedológicos, geológicos e mesmo antrópicos que interferem no dinamismo e, portanto, em sua evolução” (ROSS, 2019, p. 18). Sendo assim, em tese o pesquisador geomorfólogo conta com um arsenal robusto de conhecimentos em diversas áreas, o que é de grande valia nos estudos de cunho ambiental. Por outro lado, ao se referir a posição fragilizada da Geomorfologia nos estudos ambientais, Ross (2019) destaca a dificuldade desta ciência de demonstrar sua existência e aplicabilidade, devido ao seu caráter de certa maneira abstrato quanto à matéria. Sendo assim, a Geomorfologia costuma ser contestada e criticada por profissionais de áreas afins, por julgarem que seus espaços estão sendo invadidos (ROSS, 2019), fato que possivelmente ocorre devido a não compreensão por parte destes profissionais do caráter multidisciplinar desta ciência.

Guerra e Marçal (2018, p. 24) afirmam que

a Geomorfologia Ambiental procura entender a superfície terrestre, levando em conta uma abordagem integradora, onde o ambiente (natural e transformado pelo homem) seja o ponto de partida, bem como o objeto desse ramo de conhecimento.

Nesse sentido, a Geomorfologia Ambiental pode contribuir para solucionar diversos problemas relacionados ao meio físico, enfrentados pelas sociedades contemporâneas, uma vez

que ela abrange temas como: exploração de recursos naturais; mudanças físicas nos ecossistemas terrestres e aquáticos, provocadas ou não por ação antrópica; diagnósticos de danos ambientais causados por ação antrópica; prognóstico de catástrofes; utilização da água e produção de energia elétrica; conservação dos recursos naturais e recuperação de áreas degradadas (GUERRA; MARÇAL, 2018).

De acordo com Xavier da Silva (2000), através da ligação entre o conhecimento geomorfológico organizado (que permite a identificação das entidades que compõem o relevo terrestre), a análise sistêmica e o geoprocessamento, que possibilita a análise integrada dos dados geomorfológicos, a Geomorfologia adquire uma aplicabilidade que não possuía até pouco tempo atrás, quando seus estudos eram produzidos praticamente fora do contexto ambiental. O autor complementa afirmando que “um dos mais fortes embasamentos para a realização de eficientes análises ambientais consiste no uso judicioso dos conhecimentos geomorfológicos existentes sobre a área a ser estudada” (XAVIER DA SILVA, 2000, p. 49).

Sendo assim, pode-se dizer que a Geomorfologia aliada a Cartografia e ao Geoprocessamento possibilitam que sejam feitas análises sólidas da paisagem, gerando produtos de grande valia para o planejamento ambiental. Guerra e Marçal (2018, p. 14-15) salientam que

o conhecimento geomorfológico tem sido cada vez mais relevante no que diz respeito aos aspectos relacionados à questão ambiental, particularmente em trabalhos que se relacionam à elaboração de relatórios, diagnósticos e inventários que levam à contribuição para o planejamento das paisagens.

Assim sendo, com base nos temas compreendidos pela Geomorfologia Ambiental apresentados pelos autores supracitados (2018), afirma-se que alguns dos estudos que envolvem mapeamentos calcados na Geomorfologia, visando contribuir para a solução de problemas atuais e para o planejamento ambiental, dizem respeito a: fragilidade ambiental (GARÓFALO; FERREIRA, 2015; KAWAKUBO *et al.*, 2005; ROSS, 1994); vulnerabilidade ambiental (CAVALCANTE *et al.*, 2010; CREPANI *et al.*, 2001); risco geomorfológico (OLIVEIRA, 2004; RECKZIEGEL; ROBAINA; OLIVEIRA, 2005); mapeamento de processos erosivos e/ou relação de variáveis geoambientais com o desenvolvimento de erosões (DIAS; THOMAZ, 2011; GARÓFALO *et al.*, 2012; PANACHUKI *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2014).

A respeito dos trabalhos desenvolvidos no ramo da ciência geomorfológica atual, destacam-se os que abordam a erosão dos solos, uma vez que, pelo fato da erosão se configurar como um grave problema para as sociedades atuais (LEITE; ROSA, 2012), encontra-se um grande número de pesquisas à cerca desta temática tanto na literatura brasileira quanto na

internacional, porém poucos estudos dão ênfase à relação da erosão com a questão ambiental (GUERRA; MENDONÇA, 2020).

No tocante aos estudos que atrelam erosão à questão ambiental, pode-se citar os trabalhos que visam analisar a fragilidade ambiental de áreas à ocorrência de processos erosivos, a partir da integração de elementos da paisagem, como os realizados por Kawakubo *et al.* (2005), Garófalo e Ferreira (2012) e Messias e Ferreira (2017).

4.4 DINÂMICA E EVOLUÇÃO DA EROSIÃO DOS SOLOS E DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Estudos clássicos sobre a dinâmica das vertentes, entre eles Parsons (1988); Selby (1993) e Goudie (1995, *apud* Guerra *et al.*, 2017), apontam que estas evoluem sob diversos processos. Parsons (1988 *apud* Guerra *et al.*, 2017), ressalta os efeitos produzidos pelo escoamento superficial como fluxo contínuo e gradativo que remove partículas transportadas encosta abaixo. Selby (1993 *apud* Guerra *et al.*, 2017), um clássico da literatura no estudo das vertentes, aponta a água como agente que desloca partículas de solos através de diversos processos erosivos como, erosão laminar (*wash*), ravina (*rill*) e voçoroca (*gully*). Goudie (1995 *apud* Guerra *et al.*, 2017), lembra que a erosão dos solos em vertentes depende da erodibilidade dos solos, da erosividade das chuvas, das características das vertentes e da natureza da cobertura vegetal. Assim, para o autor citado, a erosão se inicia por meio do salpicamento (*rainsplash*), escoamento superficial (*surface wash*) e ravinamento (*rill erosion*).

Guerra e Mendonça (2020) argumentam que na atualidade a erosão se caracteriza como um problema que por vezes pode ser irreversível, sendo necessários estudos direcionados ao seu controle e contenção. Nesse sentido, a erosão hídrica, ou erosão decorrente da ação pluvial, tem sido motivo de preocupação no que tange a gestão do uso do solo e da água, principalmente nas regiões de clima tropical, que presenciam um grande volume de chuvas, concentradas em certas estações do ano (GUERRA, 1999; SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010). Por outro lado, Panachuki *et al.* (2006, p. 262) afirmam que “a erosão hídrica é o processo de degradação do solo que mais tem afetado a capacidade produtiva dos solos”.

Os quatro fatores básicos que afetam as taxas de erosão hídrica são: a topografia, ou mais especificamente o comprimento de rampa e percentual de declividade; o clima, principalmente as chuvas; os tipos e características dos solos e a cobertura da terra (PANAGOS *et al.*, 2015; SMITH, 1957).

Nesse sentido, Santos, Griebeler e Oliveira (2010) explicitam que as chuvas de maior intensidade e com elevada frequência aumentam o risco de erosão, especialmente quando estas características pluviométricas estão relacionadas a um relevo movimentado, que apresenta um solo com características físico-hídricas adversas utilizado ou manejado de maneira inadequada.

Estudos relacionados a erosão dos solos desenvolvidos por Katz *et al.* (2013) em áreas montanhosas no Pikes Peak (Colorado-EUA), comprovaram que a implantação de estradas em terrenos de topografias íngremes alterou a hidrologia de superfície, resultando na concentração dos escoamentos e na modificação do sistema de drenagem natural. As estradas em ziguezague sem planejamento e controle encontradas na área, desestabilizaram grande parte das vertentes declivosas, ocasionando escoamentos concentrados que evoluíram para ravinas severas.

A erosão hídrica é caracterizada por três eventos que ocorrem em sequência, sendo eles, respectivamente, o desprendimento, o arraste e a deposição de partículas do solo. O *desprendimento* é o estágio inicial dos processos de erosão hídrica, ocorrendo em decorrência do efeito do impacto das gotas de chuva em adição ao efeito cisalhante do escoamento superficial. Já o *arraste* é propriamente o transporte do solo, realizado pela ação do vento e principalmente do escoamento superficial; e a *deposição* se consiste no estágio final do processo erosivo, destinando as partículas de solo transportadas pelo arraste normalmente aos corpos d'água, o que pode causar o assoreamento dos rios (PANACHUKI *et al.*, 2006).

Para Christofolletti (1980) os primeiros sinais da erosão hídrica se dão com o impacto das gotas das chuvas que provoca a movimentação das partículas de solo. Dentro da erosão hídrica, existem diferentes processos erosivos, que se relacionam ao escoamento laminar ou difuso e ao escoamento concentrado. Inicialmente durante as precipitações, quando o volume de chuva excede a capacidade de infiltração do solo, a água passa a se deslocar vertente abaixo na forma de lençol, caracterizando o escoamento laminar. Esse tipo de escoamento ocasiona a erosão laminar, caracterizada pela remoção progressiva de finas lâminas das camadas mais superficiais do solo, afetando sobretudo as partículas mais finas. (BIGARELLA, 2007).

Christofolletti (1980, p. 30) elucida que

o impacto da chuva engendra a primeira fase da morfogênese pluvial, mas essa influência direta é efêmera. O processo de transporte mais importante é o escoamento pluvial, que começa a aparecer quando a quantidade de água precipitada é maior que a velocidade de infiltração. Os minúsculos filetes de água que então se formam, devido às asperezas da superfície e a existência da cobertura vegetal, são incessantemente freados e desviados de seu curso, mas vão se engrossando à medida que descem a encosta, e quando se concentram formam as enxurradas.

Os filetes de água, perpendiculares as curvas de nível, tem a capacidade de provocar uma ação erosiva com incisões no solo, inicialmente removendo e transportando partículas pouco maiores que as movidas pelo escoamento laminar, formando ranhuras no terreno, porém podendo ter sua velocidade aumentada e conseqüentemente remover um maior número de partículas do solo, acarretando no desenvolvimento de sulcos, que podem evoluir para ravinas e em casos extremos, até voçorocas (BIGARELLA, 2007).

Araujo (2011), em estudo recente, considera sulcos como cortes no terreno, provocados pelo escoamento concentrado, que apresentam pequenas dimensões, possuindo largura e profundidade que não ultrapassam 0,5 metros. Já as ravinas são processos erosivos mais intensos que os sulcos, possuindo dimensões maiores que 0,5 metros e se caracterizando como canais preferenciais do escoamento superficial, possuindo uma seção transversal em forma de V (ARAUJO, 2011; BIGARELLA, 2007, GUERRA, 2020). Thomas (2016) acrescenta que as ravinas possuem laterais íngremes, sendo talhadas em rocha inconsolidada, sedimento ou solo intemperizado.

Para Selby (1993 *apud* Guerra *et al.*, 2017) a erosão por voçorocamento tem origem no aumento do *runoff* que pode deflagrar uma ravina, a qual se aprofunda e alarga seu canal podendo evoluir para uma voçoroca. Esse processo é favorecido pela retirada da vegetação, do aumento das terras cultivadas, do superpastoreio e das queimadas. Bigarella (2007), elucida que as voçorocas são ravinamentos acelerados, apresentando-se como feições mais estreitas na porção inferior e mais largas à montante. Apresentam paredes abruptas, abrigo em seu interior fluxos efêmeros ou, eventualmente, pequenos, e terminando em cabeceiras íngremes e escarpadas. Possuem perfis transversais em forma de U ou de manjedoura, podendo apresentar dezenas de metros de largura. “Resultam normalmente num sistema erosivo ramificado, distribuído numa área de contorno elipsoidal abrangendo extensões consideráveis, de centenas de hectares” (BIGARELLA, 2007, p. 929). Machado *et al.* (2006) salienta que as voçorocas possuem causas naturais, ligadas a topografia, regime de chuvas e características do solo, porém a ação antrópica pode acelerar o processo de maneira considerável.

Segundo Machado *et al.* (2006), as voçorocas são as formas de erosão que causam conseqüências mais graves a população, acarretando perdas de áreas utilizáveis, assoreamento de corpos d’água e até mortes de animais, provocadas por acidentes.

Além dos processos erosivos lineares, existem também os movimentos de massa, que se constituem “no transporte coletivo de material rochoso e/ou de solo, onde a ação da gravidade tem papel preponderante, podendo ser potencializado, ou não, pela ação da água” (GUERRA;

MARÇAL, 2018). Os movimentos de massa podem ser lentos, caracterizando os processos de rastejamento e de solifluxão; e rápidos, divididos em três tipos fundamentais: a) corridas de terra e de lama; b) escorregamento (*slump*), deslizamento (*glide*) e desmoronamento (*slide*); c) queda de blocos (BIGARELLA, 2007).

Para Bateira e Soares (1997), os fatores responsáveis pela ocorrência de movimentos de massa são de ordem hidroclimática, relacionados a intensidade e prolongamento das chuvas, sendo estas muitas vezes o fator de ignição para o início dos processos. Para o fator geológico, os aspectos estruturais (litológicos e/ou tectônicos) podem condicionar os tipos e dimensões dos movimentos e a evolução da área afetada; para a geomorfologia, o declive e a forma da vertente, influenciam de forma decisiva no escoamento criando condições favoráveis ao desenvolvimento dos movimentos de massa. Para o fator antrópico, intervenções do homem sobre o meio podem alterar as condições naturais de ocorrência de processos geomorfológicos, desencadeando e/ou agravando os movimentos de massa.

Como exposto anteriormente, os processos erosivos podem ser causados por diversos fatores, tanto naturais quanto antrópicos, podendo ser dinamizados pela ação do homem. Nesse sentido, Bigarella (2007) expõe que a erosão pode ser normal, configurando-se como processos menos evidentes que ocorrem dentro das condições naturais do sistema ambiental; ou acelerada, que implica na remoção de grande quantidade de material em um curto período de tempo, estando relacionada a interferência antrópica e/ou a mudanças climáticas.

Levando-se em consideração a influência da ação antrópica sobre o desenvolvimento de processos erosivos, Ab'Sáber (2003, p. 17) salienta que “o domínio dos mares de morros tem mostrado ser o meio físico, ecológico e paisagístico mais complexo e difícil do país em relação as ações antrópicas”. Segundo o autor, em todo território brasileiro, este domínio se mostra muito vulnerável à ocorrência dos processos erosivos e movimentos coletivos de solo.

Spörl (2001) esclarece que a presença antrópica introduzida predatoriamente na dinâmica ambiental natural tem a capacidade de alterar o equilíbrio natural do ambiente no tocante aos solos, vegetação, condições hidrológicas, nas intensificações de processos erosivos ativos, proporcionando desequilíbrio ambiental, colapso ou novas configurações que modificarão a funcionalidade do sistema.

Dias e Thomaz (2011) ressaltam que no cenário atual, devido a expansão das áreas dedicadas as atividades agropecuárias, os impactos ambientais relacionados a degradação dos solos são cada vez mais expressivos, uma vez que as atividades agrícolas e pecuárias exercem influência direta nos processos erosivos e na morfologia da paisagem. Panachuki *et al.* (2006)

vão nesta mesma linha de raciocínio, ao afirmarem que nos dias atuais a degradação dos solos figura entre os mais importantes problemas ambientais, sendo causada por práticas de manejo agrícola inadequadas.

Além das atividades relacionadas a agropecuária, outras atividades antrópicas desenvolvidas nas encostas, como a ocupação desordenada, a concentração de águas pluviais e servidas em ambiente urbanizado, a extração mineral, a construção de vias, edificações, represas, terraços e taludes artificiais, a retirada da cobertura vegetal e a impermeabilização dos solos (BATEIRA; SOARES, 1997; CASSETI, 1991; GUERRA; MARÇAL, 2018; GUERRA; MENDONÇA, 2020) exercem influência sobre o desenvolvimento de processos erosivos, acarretando a erosão acelerada.

No tocante aos efeitos oriundos do processo erosivo, Guerra e Mendonça (2020, p. 233) elucidam que “os processos erosivos acelerados causam prejuízos ao meio ambiente e à sociedade, tanto no local (*onsite*) onde os processos ocorrem como em áreas próximas ou afastadas (*offsite*)”. Dentre estes prejuízos ambientais e sociais, destaca-se a diminuição da produtividade agrícola e até, dependendo da gravidade do processo erosivo, o encerramento das atividades agrícolas, o que compromete a qualidade e quantidade da produção de alimentos; a diminuição da fertilidade do solo; à influência sobre a ocorrência de enchentes; o assoreamento e a contaminação de corpos e massas d’água, como rios, lagos e reservatórios, etc. (GUERRA; MENDONÇA, 2020; MACHADO *et al.*, 2006;).

Levando em consideração os danos ambientais e potencialmente econômicos causados pela erosão acelerada, é válido destacar algumas sugestões para a minimização de impactos ambientais apresentadas por Casseti (1991), ao analisar uma área rural fortemente transformada geologicamente pela ação antrópica no estado de Goiás, sendo elas: a preservação dos remanescentes de cobertura vegetal existentes, principalmente nas vertentes que apresentam altos declives, nas cabeceiras de drenagem e ao longo dos cursos d’água; o reflorestamento principalmente nos pontos que apresentam instabilidade generalizada, bem como outras práticas que visem evitar a progressão de erosões lineares; os tratos culturais que visam o conservacionismo associado a outras práticas de manejo e a “incrementação” da educação ambiental no ensino médio, visando criar uma consciência crítica no tocante as preocupações ambientais e conservacionistas.

Já ao se referir especificamente ao controle de processos erosivos, Casseti (1991, p. 80) expõe que

o controle de erosão depende fundamentalmente da redução do impacto direto das gotas de chuva, diminuição da desagregação mecânica das partículas do

solo, aumento da infiltração da água e redução da velocidade de escoamento da água excedente. Tais objetivos são atingidos pela adoção conjunta de práticas mecânicas e culturais.

Cassetti (1991) salienta que, em meio rural, a utilização de práticas culturais se configura como a opção mais correta no tocante ao controle dos processos erosivos, a exemplo da prática de rotação de culturas, que busca evitar o esgotamento químico do solo, melhorando suas características.

4.5 FRAGILIDADE AMBIENTAL

Na Geografia, o conceito de fragilidade ambiental está fundamentado na análise sistêmica. Tricart (1977) por meio do conceito de Unidades Ecodinâmicas, traz a luz uma perspectiva sistêmica para as dinâmicas naturais, destacando que o estudo da fragilidade dos ambientes naturais deve ser direcionado para a aplicação no planejamento físico-territorial. Sendo assim, o ambiente deve ser analisado sob o respaldo da teoria dos sistemas, onde as trocas de energia e matéria acontecem em equilíbrio dinâmico, podendo este ser rompido devido a ação antrópica.

Tricart (1977) propõe três tipos morfodinâmicos classificando-os em meios estáveis, instáveis e intermediários. Ambientes estáveis são aqueles com lentidão dos processos morfogenéticos, onde a pedogênese mais ativa mantém o equilíbrio na troca de energia e matéria; ambientes instáveis como os que apresentam alterações neste equilíbrio, onde os processos morfogenéticos são intensos, causados por eventos naturais ou associados a ação antrópica; e os intermediários, marcados por uma situação transitória, onde os processos morfogenéticos e pedogenéticos podem ocorrer concomitantes.

Batista e Silva (2013) destacam que as Unidades Ecodinâmicas, consideradas como sistemas ambientais, fazem parte da teoria Ecogeográfica desenvolvida por Tricart (1977), teoria essa que considera a paisagem de forma integrada e a Geomorfologia como elemento central de estudo.

As metodologias para o mapeamento da fragilidade ambiental mais utilizados no Brasil foram as desenvolvidas por Ross (1994) e por Crepani *et al.* (2001).

A metodologia de Ross (1994), intitulada “Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados”, visa estimar a instabilidade dos ambientes naturais, ou Unidades Ecodinâmicas de instabilidade potencial, e dos ambientes antropizados, caracterizados como Unidades Ecodinâmicas de instabilidade emergente, através do

cruzamento a priori entre as variáveis declividade ou dissecação do relevo (dependendo da escala de trabalho) e erodibilidade dos solos, gerando um produto intermediário contendo a relação relevo/solo, e posteriormente o cruzamento deste produto com o uso da terra, resultando na fragilidade ambiental. Antes de serem cruzadas, as variáveis têm suas características classificadas, entre valores de 1 a 5, quanto à contribuição que apresentam à fragilidade do ambiente, para que posteriormente estes valores sejam combinados por meio de uma média aritmética, gerando o resultado de fragilidade ambiental (ROSS, 1994).

Segundo Batista e Silva (2013), nesta metodologia o grau de fragilidade é classificado em duas variáveis: fragilidade potencial, que considera apenas os componentes físicos da paisagem; e fragilidade emergente, que considera os componentes físicos da paisagem juntamente com o uso e ocupação do solo.

Amaral e Ross (2009) ao abordarem os conceitos ligados aos ambientes naturais e antropizados definidos por Tricart (1977) e ampliados por Ross (1994) explanam que

as Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial (Estáveis) são as que estão em equilíbrio dinâmico em seu estado natural, porém, há uma instabilidade potencial contida nelas diante da possibilidade da intervenção antrópica. As Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Emergente (Instáveis) foram definidas como os ambientes naturais que foram modificados intensamente pelo homem com desmatamentos, agriculturas, industrialização e urbanização, portanto, denominados ambientes antropizados (AMARAL; ROSS, 2009, p. 62).

Por sua vez, a metodologia desenvolvida por Crepani *et al.* (2001) teve como finalidade gerar um mapeamento da vulnerabilidade natural a perda de solo, com o objetivo de subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia e de outras regiões do país. Foi fundamentada no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977) e da potencialidade apresentada por imagens de satélite para a realização de estudos integrados da paisagem.

Segundo os autores citados, esta metodologia é desenvolvida por meio de um SIG - Sistema de Informação Geográfica, visando analisar e integrar as informações referentes a geomorfologia, geologia, pedologia, vegetação, uso da terra e clima, afim de se elaborar um mapa de Unidades Territoriais Básicas, composto de unidades de paisagem natural e polígonos de intervenção antrópica. Em seguida, este mapa é associado a um banco de dados relacional para que seja atribuído um valor de vulnerabilidade à perda de solo a cada variável; sendo posteriormente realizada a classificação do grau de vulnerabilidade de cada unidade territorial relacionado aos processos de morfogênese e pedogênese, expressa pela atribuição de valores entre 1 a 3 (CREPANI *et al.*, 2001).

Com o avanço no uso dos sistemas de informação geográfica (SIG) diversos autores buscaram desenvolver metodologias para mapear áreas susceptíveis a erosão dos solos (MESSIAS; FERREIRA, 2017). Ainda assim, as metodologias de Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001) continuam sendo amplamente difundidas na literatura especializada desta última década, ora aplicadas integralmente, ora adaptadas, como ocorre nos trabalhos de Batista e Silva (2013), Cereda Junior e Rohm (2014) e de Folharini, Oliveira e Furtado (2017).

Batista e Silva (2013) e Cereda Junior e Rohm (2014) embasaram seus trabalhos na metodologia de Ross (1994) para realizar o mapeamento da fragilidade ambiental, porém os últimos adaptaram tal metodologia, propondo procedimentos alternativos. Batista e Silva (2013) mapearam a fragilidade ambiental da microbacia do riacho Cajazeiras, localizada no semiárido potiguar. Como resultado, os autores mostram que toda área analisada apresenta níveis de fragilidade ambiental médios e altos, fato fortemente relacionado as características de uso do solo utilizado para agricultura e urbanização.

Por outro lado, Cereda Junior e Rohm (2014) propuseram um paradigma que integra análise multicritério e modelo de lógica *Fuzzy*, para mapear a fragilidade ambiental da bacia do Córrego Monjolinho, em São Carlos-SP, visando com esta proposição reduzir o subjetivismo nos critérios de decisão inerentes as variáveis geoambientais consideradas em relação à fragilidade ambiental. Os resultados mostraram que os operadores multicritério possibilitaram a “reintegração da essência teórica e metodológica do mapeamento da fragilidade ambiental (conforme definido por Ross, 1994), além de produzir novos *insights* e perspectivas sobre o uso de sistemas computacionais” (CEREDA JUNIOR; ROHM, 2014, p. 36).

Já Folharini, Oliveira e Furtado (2017) realizaram uma adaptação da metodologia de Crepani *et al.* (2001), objetivando propor uma atribuição de pesos às classes das variáveis geoambientais mais compatível com a realidade, para realizar o mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba. Os autores ressaltam que existem duas áreas distintas quanto a vulnerabilidade à perda de solos em sua área de estudo: a planície costeira, que apresenta os maiores valores de vulnerabilidade e as áreas de colinas, que comportam menores índices de vulnerabilidade.

Ao avaliarem as metodologias de Ross (1994) e de Crepani *et al.* (2001), Spörl e Ross (2004) salientam que as metodologias citadas têm em comum a subjetividade na atribuição de pesos às variáveis utilizadas nos modelos, devido à complexidade de se verificar a influência de cada uma das variáveis na fragilidade ambiental (GARÓFALO; FERREIRA, 2015).

Sendo assim, Garófalo e Ferreira (2015) desenvolveram um procedimento metodológico alternativo que utiliza técnicas de análise geoespacial em SIG para o mapeamento da fragilidade ambiental. O estudo propõe a integração das variáveis geoambientais “Índice de Vegetação” (NDVI), “Probabilidade de Ocorrência de Chuvas Intensas” (POCI), “Declividade” (DEC), “Densidade de Lineamentos Estruturais” (DLE) e “Densidade de Vias de Circulação” (DVC). A integração das variáveis, realizada mediante o reescalonamento de seus valores através da função *Fuzzy*, considera os diferentes pesos apresentados por elas no tocante à fragilidade ambiental, os quais são atribuídos por meio do teste estatístico *Kolmogorov-Smirnov* (KS). Estudos empregando esta metodologia tiveram continuidade por Messias e Ferreira (2017) e por Rodrigues Neto e Ferreira (2020).

Garófalo e Ferreira (2015) aplicaram a metodologia citada na Área de Proteção Ambiental (APA) Fernão Dias, localizada no sul de Minas Gerais. Para isso, foi realizado o mapeamento temático das variáveis geoambientais e o mapeamento dos processos erosivos na área (escorregamentos e ravinas), sendo que este possibilitou a verificação da influência de cada variável na fragilidade do terreno ao desenvolvimento dos referidos processos, ou seja, seus valores de peso, por meio do teste KS. Como resultados, os autores obtiveram três mapas de fragilidade ambiental, o primeiro em relação à escorregamentos, o segundo em relação a ravinas e um terceiro que considera todos os processos, sendo que a variável Índice de vegetação obteve o maior peso nos três cenários.

No que se refere a fragilidade ambiental a escorregamentos, as áreas mais frágeis foram encontradas nos setores central, oeste e no corredor da rodovia Fernão Dias, onde foram observadas coberturas vegetais pouco vigorosas, alta probabilidade de ocorrência de chuvas intensas e altos valores de densidade de vias e de lineamentos estruturais. O mapa de fragilidade ambiental a ravinas demonstrou que as áreas mais frágeis estão associadas a vertentes íngremes, que comportam uma cobertura vegetal pouco densa e, por outro lado, altas densidades de vias de circulação e de lineamentos estruturais, além de uma alta probabilidade de ocorrência de chuvas intensas, encontrados nos setores norte e sudeste da APA. Por fim, o mapeamento da fragilidade considerando todos os processos erosivos evidenciou que os maiores valores de fragilidade estão situados na porção centro-leste da APA, em áreas que comportam uma combinação entre vegetações com baixo NDVI, alta probabilidade de chuvas intensas, altas densidades de vias e de lineamentos e vertentes íngremes (GARÓFALO; FERREIRA, 2015).

Messias e Ferreira (2017) aplicaram a referida metodologia para realizar o mapeamento da fragilidade ambiental à ocorrência de ravinas no Parque Nacional Serra da Canastra,

localizado no sudoeste de Minas Gerais. Os autores não utilizaram a variável POCI, pois seus resultados foram comprometidos por fatores como o baixo número de estações pluviométricas, o que resultou em um mapa generalizado e que não obteve a relação esperada quando comparado as ravinas mapeadas (MESSIAS, 2014). A variável que apresentou maior influência sobre a fragilidade dos terrenos do parque à ocorrência de ravinas foi a densidade de lineamentos estruturais (devido à forte estruturação do relevo), seguida das variáveis Índices de Vegetação, Densidade de Vias e Declividade (MESSIAS; FERREIRA, 2017).

Com a elaboração do mapa de fragilidade ambiental, Messias e Ferreira (2017) obtiveram como resultado que as áreas mais susceptíveis ao desenvolvimento de ravinas estão situadas principalmente nas porções central e noroeste do Chapadão da Babilônia, ao passo em que as áreas menos frágeis se localizam ao longo do Chapadão da Canastra, sendo também identificadas em alguns locais do Chapadão da Babilônia. Os autores salientam que no setor noroeste do Chapadão da Babilônia, valores mais elevados e médios de fragilidade são verificados em sub-bacias que apresentam altas densidades de ravinas e de lineamentos estruturais, bem como a elevados valores de amplitude e declividade do relevo, que se encontra recoberto por uma cobertura vegetal inexistente ou pouco densa (MESSIAS; FERREIRA, 2017).

Já Rodrigues Neto e Ferreira (2020) mapearam a fragilidade ambiental à ocorrência de processos erosivos lineares e movimentos de massa na APA da bacia hidrográfica do Rio Machado, localizada no sul de Minas. Para isso, os autores realizaram uma adaptação metodológica baseada no estudo de Garófalo e Ferreira (2015), a qual se consistiu na utilização apenas das variáveis Índice de Vegetação, Densidade de Lineamentos Estruturais, Densidade de Vias de Circulação e Declividade. Além disto, foram atribuídos os mesmos valores de peso referentes ao conjunto de todos os processos erosivos atribuídos por Garófalo e Ferreira (2015), reescalados para as quatro variáveis. A variável POCI não foi utilizada devido a distribuição insuficiente de estações pluviométricas na área de estudo e em suas proximidades. Quanto à atribuição de pesos pré-existentes às variáveis, os autores justificam em razão das similaridades físico-ambientais entre as duas Áreas de Proteção Ambiental, “[...] no que concerne a geologia (litologia), geomorfologia e uso e cobertura da terra, levando em consideração a proximidade geográfica entre ambas as unidades de conservação” (RODRIGUES NETO; FERREIRA, 2020, p. 258-259).

Como resultados, Rodrigues Neto e Ferreira (2020) obtiveram valores de fragilidade ambiental na APA do Rio Machado variando entre 0,086 a 0,807. Os menores valores foram

observados na média bacia do Rio Machado, mais precisamente nos municípios de Poço Fundo e Machado, e os maiores índices de fragilidade foram constatados predominantemente no trecho superior do Rio Machado (setor sul da APA) e na sub-bacia do Ribeirão do Machadinho, localizada no setor sudeste. As áreas menos frágeis, associadas à Morros e Montanhas, Morrotes e Morros com Encostas Suaves, embora apresentem vertentes mais declivosas, se acham preservadas por uma cobertura vegetal formada por fragmentos de mata nativa e cultivos de café; já os maiores índices de fragilidade observados no setor sul, estão atrelados à altas densidades de vias de circulação e de lineamentos, bem como a uma cobertura vegetal pouco vigorosa, relacionada a cultivos anuais, inseridos em um relevo suavizado (RODRIGUES NETO; FERREIRA, 2020).

As principais peculiaridades da metodologia de Fragilidade Ambiental desenvolvida por Garófalo e Ferreira (2015) se constituem: a) na atribuição de pesos as variáveis geoambientais através do teste estatístico *Kolmogorov-Smirnov*, o que responde ao problema da subjetividade na atribuição de pesos apresentada pelas metodologias “tradicionais”; b) na utilização da classificação contínua para representação dos valores de fragilidade ambiental, ao invés da classificação *booleana*, possibilitando assim uma representação mais fiel da complexidade natural de cada variável mapeada (FERREIRA, 2014); c) na possibilidade de aplicação da metodologia em áreas que demandem um mapeamento com médio grau de detalhamento, tendo em vista que não são utilizadas no modelo de fragilidade variáveis mapeadas em escalas pequenas, como a geologia e a pedologia.

4.5.1 Considerações teórico-conceituais a respeito de variáveis geoambientais relacionadas a fragilidade ambiental à processos morfogenéticos

Ao se considerar as variáveis geoambientais utilizadas nas metodologias de fragilidade ambiental mais difundidas no Brasil – Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001) – ficam evidentes duas principais similaridades entre estas metodologias: a primeira diz respeito a consideração em comum das variáveis geomorfologia, geologia, pedologia, clima, uso da terra e vegetação; já a segunda refere-se ao fato de que essas variáveis são analisadas a partir do aspecto qualitativo, ou seja, algumas são classificadas em diferentes categorias, como usos da terra ou tipos de solo (aspecto qualitativo) e outras são classificadas segundo a variação de índices morfométricos, como amplitude topográfica e declividade (aspecto quantitativo), para que posteriormente sejam atribuídas a elas diferentes valores de fragilidade/vulnerabilidade.

Sendo assim, uma das diferenças entre o modelo de fragilidade de Garófalo e Ferreira (2015) e os modelos mencionadas acima diz respeito a adoção de variáveis geoambientais consideradas unicamente a partir do viés quantitativo, e que se distribuem de maneira contínua no espaço. Desse modo a metodologia de Garófalo e Ferreira (2015) possibilita que novas pesquisas que a utilizem considerem tanto as variáveis apresentadas pelos autores de maneira integral (ou seja, declividade, índice de vegetação, probabilidade de ocorrência de chuvas intensas, densidade de vias de circulação e densidade de lineamentos estruturais), quanto de maneira parcial, permitindo que algumas sejam removidas, assim como outras sejam acrescentadas ao modelo, desde que se adequem ao mesmo, como o caso da variável densidade de drenagem, que possui uma forte relação com a morfogênese.

A declividade diz respeito ao ângulo formado entre qualquer parte da superfície da Terra e um datum horizontal (THOMAS, 2016), e “guarda relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética e, portanto, com a velocidade das massas de água em movimento responsáveis pelo “runoff”” (CREPANI *et al.*, 2001, p. 75).

Cassetti (1991) elucida que quanto maior a declividade do terreno, mais intenso será o componente paralelo (escoamento superficial) em detrimento do componente perpendicular (infiltração), ou seja, a tendência será a morfogênese prevalecer sobre a pedogênese. Nesse sentido, estudos sobre evolução das vertentes preconizados por Tricart (1977) consideram o “balanço morfogenético” como sendo as relações existentes entre dois componentes: perpendicular/infiltração, que promove a intemperização e a pedogênese e paralelo/escoamento, que acelera a erosão, o transporte de material e conseqüente desgaste das formas, ou seja, a morfogênese. Corroborando a relação entre declividade e morfogênese apresentada por Cassetti (1991), ressalta-se que a erosão por salpicamento, ou seja, fragmentação dos agregados do solo por ação das gotas de chuva (BIGARELLA 2007) “só pode ser efetivada em superfície inclinada, aumentando proporcionalmente com o ângulo do seu declive” (ELLINSON, 1947, n.p., *apud* BIGARELLA, 2007, p. 918).

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI possibilita “determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área” (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011, p. 525). Nessa direção, os índices de vegetação (como o próprio NDVI), “indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde” (JENSEN, 2011 *apud* GARÓFALO, 2013, p. 54).

Segundo Cassetti (1991), a cobertura vegetal possui um papel importante na estabilização das vertentes, auxiliando no predomínio do componente perpendicular

(infiltração) sobre o componente paralelo (escoamento superficial) e assim contribuindo para um balanço morfogenético negativo. A vegetação intercepta parte da precipitação antes que a água atinja o solo, o que “influencia a ação de processos limitando o fluxo superficial e a umidade do solo, bem como diminui a velocidade do escoamento e a capacidade de transporte de sedimentos, reduzindo de forma considerável a ação erosiva [...]” (BIGARELLA, 2007, p. 910).

No tocante as chuvas intensas, Garófalo e Ferreira (2012) salientam que a intensidade das chuvas possui uma relação direta com o volume de água precipitado e inversa com o intervalo de tempo em que ocorre a precipitação.

De acordo com Bigarella (2007), a chuva é um fator extremamente importante de erosão, uma vez que além causar a desagregação das partículas de solo, por meio da ação do impacto das gotas d’água, e o posterior deslocamento destas partículas, através do escoamento superficial, pode contribuir para compactar a superfície do solo através da selagem dos poros, o que irá favorecer o escoamento superficial e, conseqüentemente, o desenvolvimento de processos erosivos. “A causa fundamental da erosão hídrica, seja ela laminar, em sulcos ou ravinhas é a ação da chuva sobre o solo. A chuva é o agente ativo da erosão e o solo é o agente passivo” (CREPANI *et al.*, 2001, p. 82). Bigarella (2007) salienta que o impacto das gotas de chuva depende do tamanho das mesmas e da intensidade das precipitações, argumentando que “as chuvas torrenciais têm um poder destrutivo considerável, ao passo que as finas e lentas são pouco erosivas” (BIGARELLA, 2007, p. 917).

A respeito da densidade de lineamentos estruturais, afirma-se que esses lineamentos são “feições lineares de uma superfície, mapeável, simples ou composta, cujas partes encontram-se alinhadas de forma retilínea ou ligeiramente curva, que diferem das feições adjacentes e refletem provavelmente estruturas de subsuperfície” (O’ LEARY *et al.*, 1976 *apud* ROLDAN *et al.*, 2010, p. 62). A drenagem poder refletir as orientações da estrutura geológica (HOWARD, 1967) e, para isso, é necessário a extração dos lineamentos da rede de drenagem que estão associadas a estas orientações.

Os lineamentos estruturais relacionam-se a zonas de fraturamento, que de acordo com Soares e Fiori (1978, p. 48), “por serem mais facilmente atacadas pelos processos meteóricos e erosivos, constituem zonas de desenvolvimento preferencial de linhas de drenagem retilíneas”. Ainda segundo os autores (1978), estes elementos de drenagem são condicionados fortemente pela estrutura geológica, podendo se apresentar como retilíneos ou em arco, chamados de lineações de drenagem.

No tocante a densidade de vias de circulação, Cunha e Thomaz (2017) argumentam que as feições em questão são elementos antrópicos capazes de causar alterações na dinâmica dos ambientais naturais. Parte destas alterações ocorre devido ao fato de as vias promoverem a interceptação dos fluxos subsuperficiais, transformando-os em fluxos hortonianos e redirecionando-os de maneira mais acelerada para os rios; conseqüentemente causando alterações na dinâmica natural da bacia e contribuindo na dissecação do solo e da vertente (CUNHA; THOMAZ, 2017).

Fonseca Filho *et al.* (2019), estudando parques do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço Meridional, constataram que a erosão e compactação nestas áreas protegidas são decorrentes do uso desordenado de trilhas, meios de acesso aos principais atrativos. Segundo os autores, as trilhas “podem causar danos ambientais abióticos, como deslizamentos; e bióticos, como supressão de vegetação e de fauna” (FONSECA FILHO *et al.*, 2019, p. 835). Nesse sentido, Andrade (2003, p. 250) argumenta que os efeitos provocados pelas trilhas “ocorrem principalmente na superfície da trilha propriamente dita, mas a área afetada pode ser de um metro a partir de cada lado” (ANDRADE, 2003, p. 250).

Por fim, considerando os rios como elementos morfogenéticos ou agentes erosivos ativos da esculturação da paisagem, o mapeamento da densidade de drenagem auxilia no entendimento do comportamento hidrológico das rochas, pois em condições climáticas homogêneas, os processos de infiltração e escoamento podem variar em função do substrato rochoso. A infiltração quando dificultada, gera maior escoamento superficial e a dissecação comandada pelos canais permanentes provoca densidade de drenagem mais elevada (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Segundo Bigarella (2007), a drenagem de uma área sofre influência das seguintes variáveis: pluviosidade, na medida em que um maior volume de chuvas provoca o aumento do escoamento; topografia, pois esta irá influenciar no tempo de distribuição da água do escoamento e na velocidade do fluxo (que aumenta de acordo com o acréscimo da declividade); cobertura vegetal, uma vez que esta variável afeta de maneira direta a relação entre infiltração e escoamento; além do tipo de solo, litologia e estrutura geológica, pois estas variáveis irão influenciar na capacidade de infiltração (os materiais mais permeáveis favorecem a percolação da água para os lençóis freáticos, que conseqüentemente será descarregada nas correntes fluviais), no padrão de drenagem e na forma da bacia hidrográfica.

4.6 O SENSORIAMENTO REMOTO E O GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTAS PARA A ANÁLISE GEOESPACIAL INTEGRADA

De acordo com Ferreira (2014) uma primeira aproximação ao conceito de análise geoespacial foi realizada por Hägerstrand (1968), que se referiu ao conceito como sendo “um tipo de análise quantitativa recentemente incorporada à geografia, baseada em um estudo aprofundado dos padrões de pontos, linhas, áreas e superfícies, dispostos em mapas e definidos por coordenadas espaciais” (HAGERSTRAND, 1968, p. 69 *apud* FERREIRA, 2013, p. 48). Marques, Silva e Camargo (2017, p. 1858) afirmam que a análise (geo)espacial “permite representar os fenômenos ambientais e antrópicos, e assim, compreender suas interações nos processos de ocupação e transformação do espaço”.

Com o advento da tecnologia, o Geoprocessamento passou a ser cada vez mais incorporado na análise espacial, por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs). Segundo Mundim (2001), o Geoprocessamento diz respeito a um conjunto de ferramentas e técnicas utilizadas na compreensão do espaço em diferentes pontos de vista, podendo contribuir com informações relevantes nas análises ambientais, além de possibilitar a integração dos elementos da análise.

Para Hamada e Gonçalves (2007), o geoprocessamento tem sido amplamente empregado por órgãos ambientais e entidades privadas com objetivo principal de integrar dados espaciais e não espaciais, no tocante a projetos e estudos de caráter ambiental. De acordo com as autoras, a maioria das aplicações de geoprocessamento possui caráter multidisciplinar, porém pode-se destacar algumas de suas áreas de aplicação devido ao enfoque principal de cada uma delas, a exemplo do manejo e conservação de recursos naturais, da gestão das explorações agrícolas, do planejamento de área urbana, e da saúde pública.

Conforme Xavier da Silva (2000, p. 49), existe a necessidade de se

criar pontes entre o conhecimento geomorfológico organizado [...], a perspectiva sistêmica e o geoprocessamento de dados, que viabiliza o tratamento de dados geomorfológicos de forma integrada, colocando-os dentro do contexto ambiental, através dos modelos digitais do ambiente.

Segundo Luchiari (2001) os avanços da informática, principalmente no que concerne aos microcomputadores pessoais, contribuíram fortemente para a difusão dos Sistemas de Informação Geográfica e para a interpretação das imagens de sensoriamento remoto. Um Sistema de Informação Geográfica pode ser definido como

um poderoso conjunto de instrumentos para coletar, armazenar, recuperar e, posteriormente, transformar e representar dados referenciados da superfície terrestre para um conjunto de propósitos particulares. A sua principal operação de tratamento de dados georreferenciados reside na capacidade que tem de combinar mapas de maneira rápida e com um alto grau de precisão (BURROUGH, 1986, n.p. *apud* LUCHIARI, 2001, p. 49).

Já o sensoriamento remoto pode ser definido, de acordo com Liu (2015), como uma técnica de aquisição de informações sobre um objeto sem haver contato físico com ele, de maneira que os sensores instalados nos satélites captam a energia eletromagnéticas da superfície do planeta sem exercer contato físico com ela, ou seja, de maneira remota.

O Sensoriamento remoto está ligado a um conjunto tecnológico que nos dias atuais, é de extrema importância aos estudos ligados a mapeamentos e estudos ambientais, auxiliando em pesquisas de diversas áreas. Trata-se de um conjunto de ferramentas de aquisição de dados (objetos, fenômenos, feições e etc.) sem que haja o contato direto entre o sensor e o “alvo”. Os sensores, por sua vez, são equipamentos capazes de interagir com a superfície e coletar energia proveniente do objeto-alvo, convertendo-a em sinal passível de ser registrado e apresentado em forma adequada à extração de informações. Podem estar acoplados em aeronaves ou em sistemas orbitais (INPE, 2019).

Esta tecnologia vem sendo aplicada nas mais diversas esferas do conhecimento, a exemplo de trabalhos que envolvem mapeamento/estudos de fenômenos ambientais. Relaciona-se tal fato à grande quantidade de informações disponíveis para diversas partes do globo, ao baixo custo se comparado aos métodos tradicionais de amostragens de dados em campo, além de possibilidade de um panorama integrado da área de estudo, entre outras vantagens (NOVO, 1992).

Luchiari (2001, p. 49) salienta que o uso do computador no tratamento das imagens provenientes do sensoriamento remoto, mais especificamente através das técnicas de processamento digital de imagens, permite que sejam extraídas informações específicas sobre determinadas feições de interesse, o que resulta em uma perda de subjetividade em relação ao procedimento de interpretação visual, visto que neste procedimento o conhecimento do intérprete possui um papel relevante.

Messias *et al.* (2012), utilizaram-se do geoprocessamento e do sensoriamento remoto para analisar a fragilidade ambiental na área de influência da Hidrelétrica do Funil, em Minas Gerais, através da metodologia denominada Análise Empírica de Fragilidade Ambiental, desenvolvida por Ross (1994). Com o término da pesquisa, os autores constataram que a

implantação da Hidrelétrica do Funil tem provocado alterações significativas na área afetada, contribuindo para a fragilidade ambiental.

5 METODOLOGIA

5.1 PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS DO TRABALHO

A Teoria Geral dos Sistemas foi proposta pelo biólogo Ludwig Von Bertalanffy, se tratando de uma teoria que “visava tanto a investigação científica dos sistemas em várias ciências quanto sua aplicação tecnológica e, ainda, a própria filosofia dos sistemas, no sentido de promover a discussão desse novo paradigma científico” (RODRIGUES, 2001. p. 72).

Gregory (1992) salienta que os sistemas se consistem em conjuntos de elementos com características diversas, que mantêm relações entre si e com o meio ambiente. A análise desses sistemas pode ser voltada para a dimensão estrutural, para as trocas de energia, limites, ambientes ou parâmetros, bem como para o comportamento do sistema.

Segundo Forster *et al.* (1957) *apud* Sales (2004), de maneira geral existem três tipos de sistemas, considerados quanto ao grau de relação com o meio: os sistemas isolados, que não realizam trocas de matéria e energia com o ambiente em que estão inseridos; os sistemas fechados, que trocam apenas energia, e os sistemas abertos, que trocam matéria e energia com o meio à sua volta, como afirma Guerra e Mendonça (2020), exemplificando os solos e as paisagens de maneira geral.

A Teoria Geral dos Sistemas alcançou diversas áreas do conhecimento, devido a sua concepção integradora da realidade. Mais especificamente na geografia física, foram desenvolvidos vários modelos para se analisar a paisagem a partir da Teoria Geral dos Sistemas, como em Tricart (1977), Sothava (1977) e Bertrand (1972) (MAURO; VALADÃO, 2018); sendo a abordagem sistêmica adotada sucessivamente pela Biogeografia, Geografia dos solos, Climatologia e Geomorfologia, em um período de adoção que se estendeu por trinta e cinco anos, de 1935 a 1971 (GREGORY, 1992).

A abordagem sistêmica compreende um conjunto teórico-metodológico fundamentado na análise integrada dos elementos constituintes de um sistema, visando compreender suas relações entre si e com o meio ao redor (GREGORY, 1992). Sendo assim, os estudos sobre fragilidade ambiental que se consistem em “importantes instrumentos para se observar as condições de determinado ambiente de forma integrada e dinâmica” (SANTOS; OLIVEIRA, 2013, p. 3) claramente se norteiam por esta abordagem.

Nesse sentido, Ross (2000) argumenta que o conceito de fragilidade ambiental tem suas origens na proposta sistêmica. Segundo o autor, para o entendimento da fragilidade

ambiental é necessário a realização de uma análise integrada dos componentes de um sistema ambiental, uma vez que na natureza existe uma funcionalidade intrínseca entre os componentes físicos, bióticos e socioeconômicos. Na mesma direção, Spörl e Ross (2004) explicitam que os sistemas ambientais quando expostos as intervenções humanas apresentam diferentes níveis de fragilidade em função de suas características genéticas, uma vez que alterações nos componentes da natureza comprometem a funcionalidade do sistema, quebrando seu estado de equilíbrio dinâmico.

Tendo clara a relação entre Teoria Sistêmica e Fragilidade Ambiental, buscou-se realizar uma análise integrada (pautada na abordagem sistêmica) de variáveis geoambientais, afim se obter à fragilidade ambiental à processos erosivos, compreendendo o parque como um sistema aberto e dinâmico dotado de diversas funcionalidades.

Para isso, foi realizada uma adaptação na metodologia de fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial desenvolvida por Garófalo e Ferreira (2015). Essa adaptação consistiu na inserção de uma nova variável ao modelo, tratando-se da variável densidade de drenagem, e se justifica pelo fato de a metodologia em questão aceitar a inserção de quaisquer números de variáveis geoambientais, desde que estas possam ser representadas espacialmente em mapas de superfícies contínuas e estejam relacionadas ao tema da pesquisa, como é o caso da variável mencionada. Compreende-se que a inserção de uma nova variável possa enriquecer o modelo, fazendo como que o mesmo apresente resultados de fragilidade mais condizentes com a realidade terrestre.

Os materiais e procedimentos necessários para adoção da metodologia acima mencionada serão descritos nas etapas a seguir.

5.2 MATERIAIS

O levantamento e a revisão dos materiais bibliográficos, cartográficos e produtos de sensoriamento remoto se constituiu como a primeira etapa da pesquisa, sendo fundamental para que fossem realizadas as etapas posteriores. Os materiais bibliográficos referentes aos temas trabalhados, tais como artigos de periódicos científicos, livros, trabalhos em anais de eventos, monografias e teses que abordam fragilidade ambiental, erosão, unidades de conservação, entre outros temas, foram adquiridos fisicamente em bibliotecas e através de sites de pesquisa especializados em consulta de materiais acadêmicos, como o *Scientific Eletronic Library Online* (SCIELO) (SCIELO, 2019) e o Google Acadêmico (GOOGLE ACADÊMICO, 2019).

Já os materiais cartográficos e produtos de sensoriamento remoto (Quadro 2) foram adquiridos através dos sites do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2020), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (INPE, 2020) e do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (USGS, 2020).

Figura 8 – Material cartográfico e de sensoriamento remoto utilizado na pesquisa

Material Cartográfico e de Sensoriamento Remoto	Articulação/Cena	Escala/Resolução espacial	Órgão Executor
Carta topográfica de Boa Esperança	SF-23-I-I-2	1:50.000	IBGE
Carta topográfica de Cristais	SF-23-C-III-4	1:50.000	IBGE
Imagens Landsat 8 OLI	219/074	30 m	USGS
Modelo Digital de Elevação - ALOS PALSAR RTC	8489	12,5 m	ASF

Fonte: Organizado pelo autor (2021)

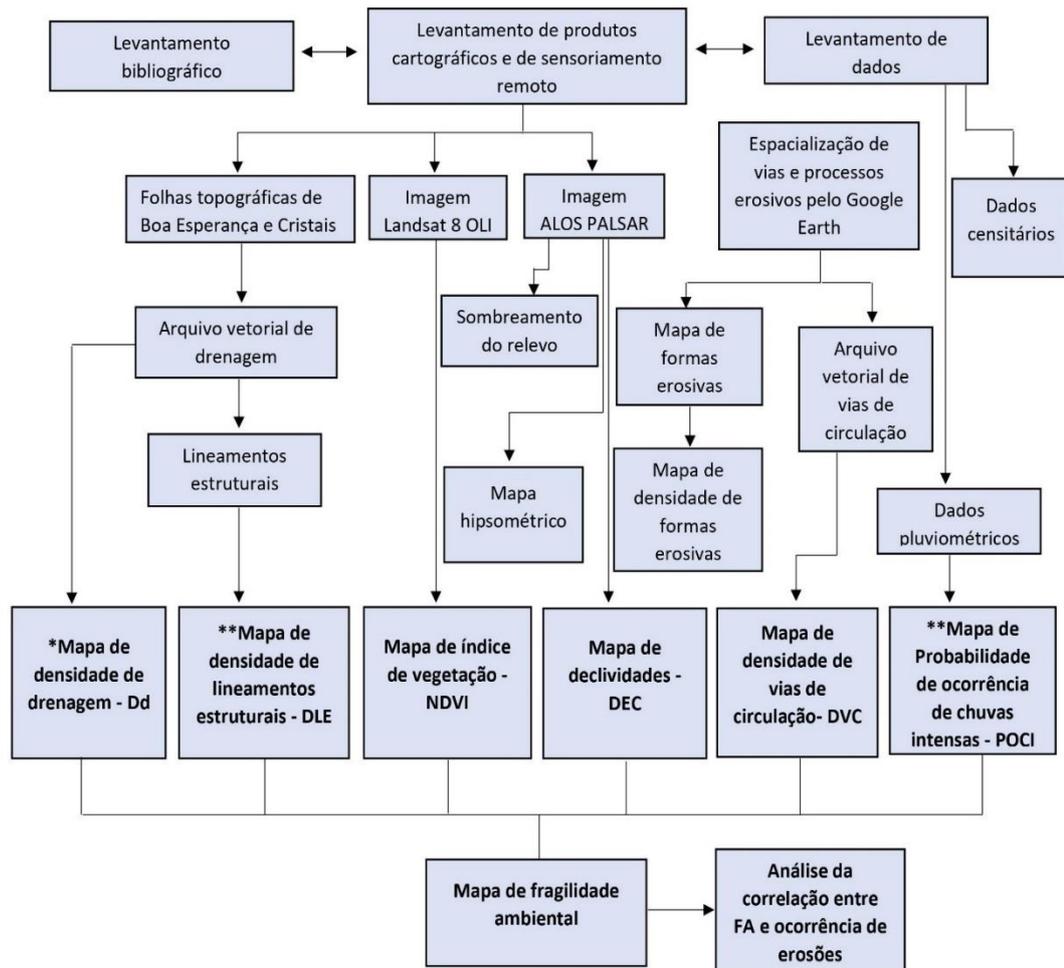
Ademais, foram adquiridos arquivos vetoriais referentes à limites administrativos, setores censitários, manchas urbanas, massas d'água, rodovias e ao limite da área de estudo, através do IBGE (IBGE, 2019) e da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos hídricos (IDE-SISEMA) (IDE-SISEMA, 2019); dados populacionais e econômicos oriundos do censo de 2010 e do censo agropecuário de 2017 realizados pelo IBGE e adquiridos no site do próprio instituto; além de séries históricas de dados pluviométricos adquiridos no site da Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2019).

Para o levantamento e processamento de dados bem como a produção dos mapas, foram utilizados os softwares ArcMap 10.5 (ESRI, 2016) e Google Earth Pro (GOOGLE, 2020), ambos disponíveis no laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG. Os mapas foram gerados na escala 1:50.000 e projetados no sistema de coordenadas planas Universal Transversa de Mercator (UTM) com o Datum Sirgas 2000.

5.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa estão sintetizados no fluxograma a seguir (Figura 7):

Figura 9 – Fluxograma do desenvolvimento metodológico da pesquisa.



Fonte: Do Autor (2021)

Notas: *Variável incluída no modelo de fragilidade

**Variável excluída do modelo de fragilidade

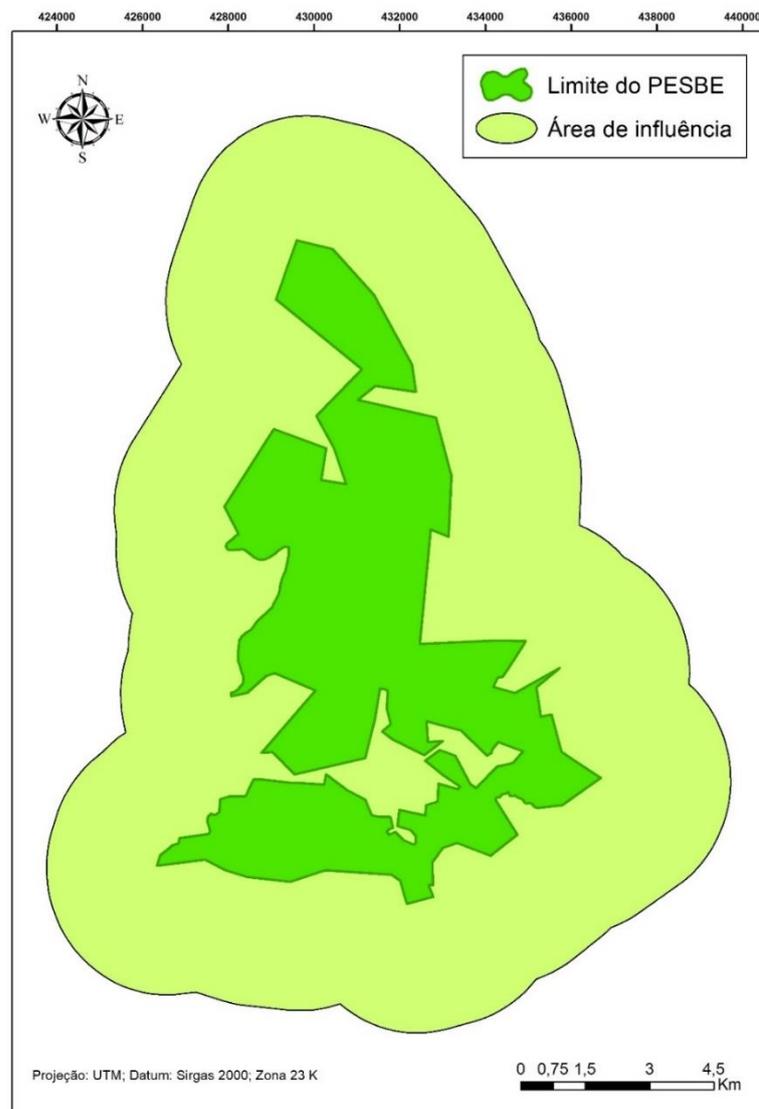
5.3.1 Definição de Uma Área de Influência externa ao PESBE

Em uma visão sistêmica, entende-se que tanto nos ambientes naturais quanto nos alterados pelo homem, “não se tem modificações bruscas de uma condição ambiental para outra” (ROSS, 2019, p. 12). Pode-se inferir então que variáveis geoambientais zonais não possuem um comportamento espacial rígido, sendo que exercem e sofrem influência de áreas

adjacentes. O limite de uma unidade de conservação é uma linha imaginária e, deste modo, não se configura como uma barreira para a influência externa das variáveis geoambientais zonais. Sendo assim, para estimarem as densidades de drenagem, de lineamentos estruturais e de vias de circulação, optou-se por expandir a delimitação da área de estudo, definindo-se uma área de influência externa ao PESBE.

O limite da área de influência externa, utilizado nesta pesquisa, está localizado paralelamente a uma distância de 3 km da linha imaginária do limite do parque (Figura 8). Essa área foi extraída de um arquivo vetorial que contém *buffers* ao redor dos limites de UCs do estado de Minas Gerais, com a distância mencionada, disponibilizado pela plataforma IDE-SISEMA (IDE-SISEMA, 2019).

Figura 10 – Limite do PESBE e área de influência



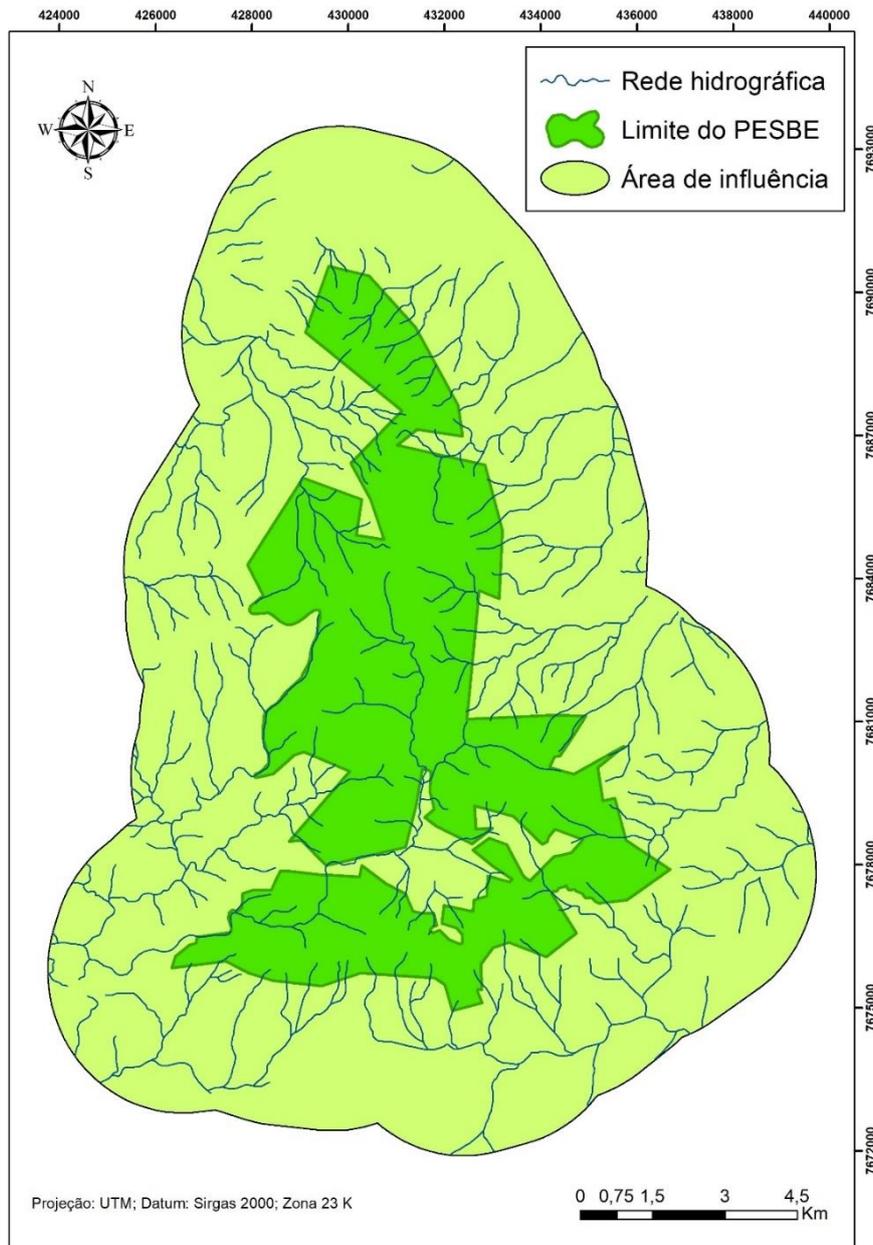
Fonte: Do Autor (2021)

5.3.2 Vetorização da rede hidrográfica com base em cartas topográficas

A rede hidrográfica que compreende a área de estudo e a área de influência foi vetorizada por meio de ferramentas disponíveis no ArcMap 10.5. Inicialmente, as cartas topográficas de Boa Esperança e Cristais foram projetadas para o sistema de coordenadas planas original das mesmas (Datum Córrego Alegre, Zona 23 K), através da ferramenta *Define Projection*, presente em *Data Management tools*. As cartas foram georreferenciadas através de funções da barra de ferramentas *Georeferencing*, empregando-se pontos de controle com pares de coordenadas X e Y, os quais foram adquiridos nas próprias cartas. Posteriormente, as cartas foram reprojctadas para o Datum Sirgas 2000, por meio da ferramenta *Project*, contida no *Data Management tools*.

Os rios situados no PESBE e na área de influência foram vetorizados em um arquivo no formato *shapefile* e em modo de implantação linear (Figura 9), por meio de funções da barra de ferramentas do *Editor*. Na discussão dos resultados as variáveis mapeadas serão apresentadas apenas no interior do PESBE e, por este motivo, foi realizado o recorte da rede de drenagem apenas para esta área, através da função *Clip*, contida na barra de ferramentas *Geoprocessing*.

Figura 11 – Rede hidrográfica do PESBE e da área de influência



Fonte: Do Autor (2021)

5.3.3 Obtenção do sombreamento do relevo a partir do MDE ALOS PALSAR RTC

O sombreamento do relevo, além de auxiliar na identificação de lineamentos estruturais, foi adicionado como plano de fundo em todos os mapas produzidos. Ele permite obter uma melhor interpretação visual do modelado, auxiliando na discussão conjunta do mesmo com as variáveis geoambientais, na medida em que, de acordo com Carvalho e Bayer (2008), realça o relevo, causando a impressão de concavidade e convexidade, além de permitir a identificação

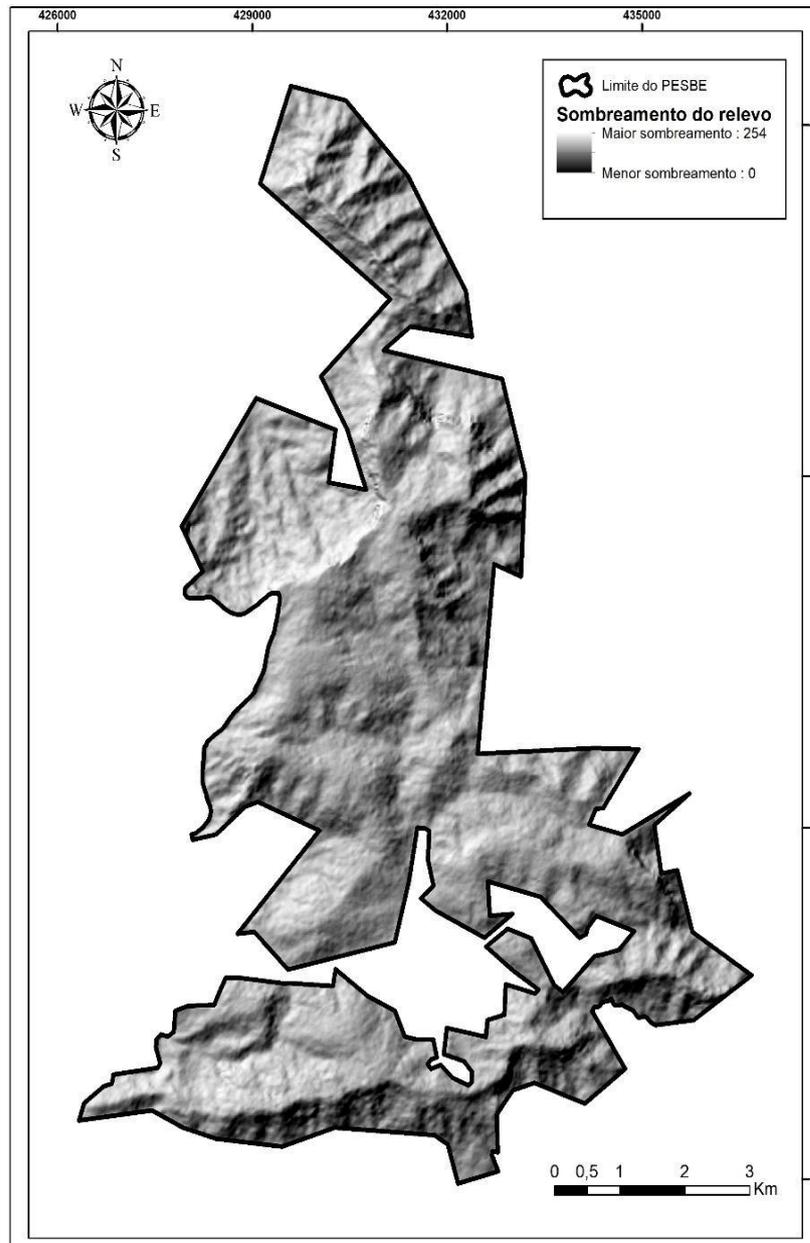
de feições estruturais, áreas de recuo erosivo, formas e feições do relevo e padrões de dissecação, por exemplo.

O sombreamento do relevo foi obtido a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE), resultante do projeto *ASF' Radiometric Terrain Correction Project* (ASF, 2020), que tem como finalidade corrigir geometria e radiometria de produtos provenientes de Radar de Abertura Sintética (SAR), para produzir um MDE de melhor qualidade, apresentado em formato GeoTIFF. A correção da geometria visa eliminar distorções geométricas que induzem a erros de geolocalização, movendo os pixels da imagem para uma relação espacial adequada entre si. Já a correção radiométrica envolve a remoção da influência enganosa da topografia nos valores de retroespalhamento. A qualidade de um produto ALOS PALSAR RTC está diretamente relacionada à qualidade do MDE usado no processo de correção radiométrica de terreno (RTC), sendo que para o território brasileiro o modelo usado é o SRTM, com resolução espacial de 30 m, podendo gerar um produto com resolução espacial também de 30 m, ou um MDE reamostrado para 12,5 m, como o utilizado nesta pesquisa (ASF, 2020).

Os MDEs são estruturas numéricas de dados que demonstram a distribuição espacial da altitude da superfície do relevo. Através deles, pode-se obter modelos que representam características morfológicas simples, como inclinação e orientação das vertentes; e modelos mais complexos, obtidos por meio da incorporação de informações auxiliares às informações do MDE, como modelos de avaliação do risco de incêndio e modelos de reflectância (FELICÍSIMO, 1994).

Para a obtenção do sombreamento do relevo foi utilizada a ferramenta *Hillshade*, contida em *Spatial Analyst Tools* do ArcMap 10.5. O azimute, que representa o ângulo de azimute do sol, e a altitude, caracterizada como o ângulo de altitude do sol acima do horizonte (ESRI, 2016) utilizados foram os valores padrões de, respectivamente, 315° e 45°. Em seguida, o arquivo matricial obtido foi recortado para a o PESBE e a área de influência, assim como apenas para o PESBE (Figura 10), através da ferramenta *Extract by mask*, presente em *Spatial analyst tools*.

Figura 12 – Sombreamento do relevo da área de estudo

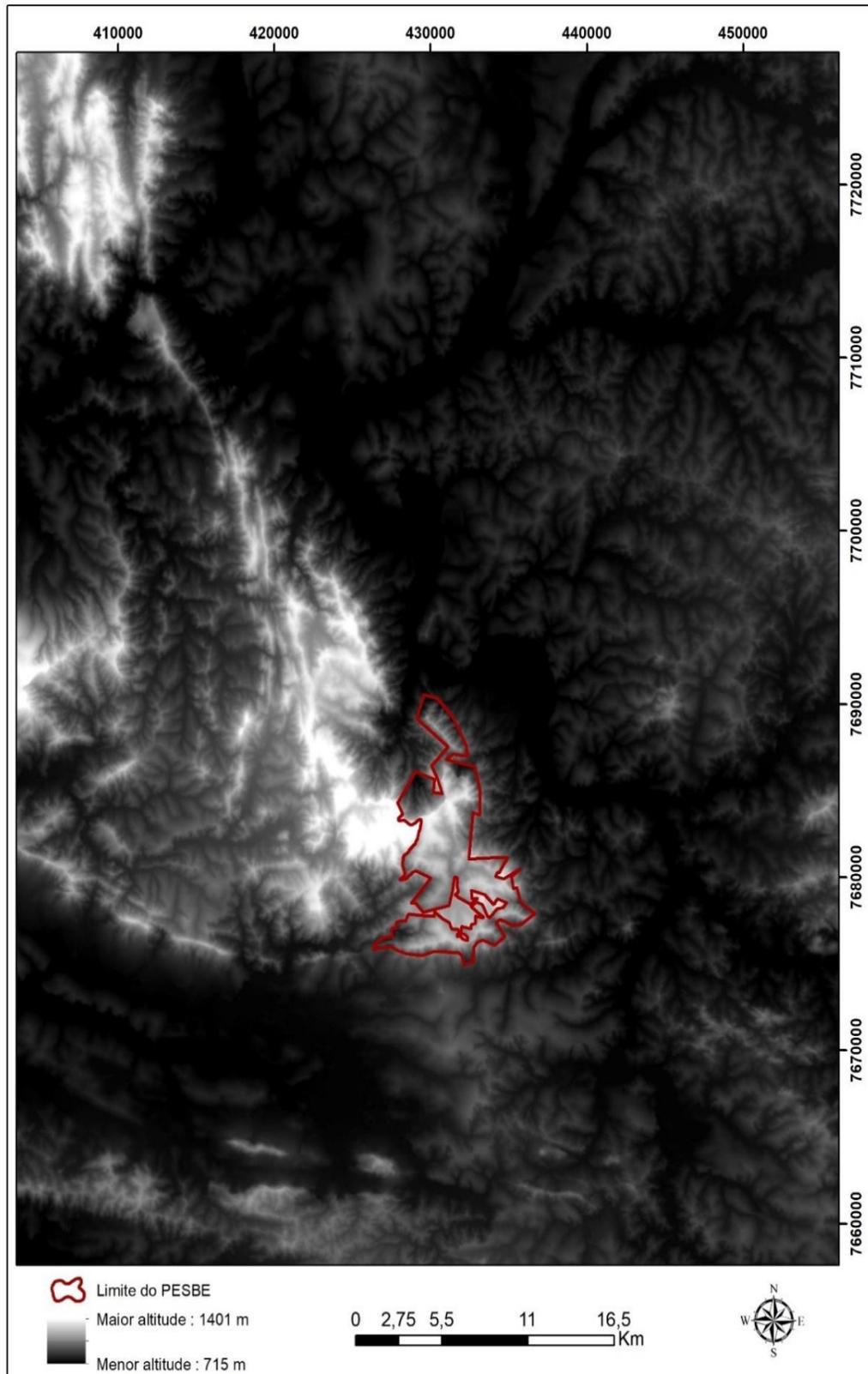


Fonte: Do Autor (2021)

5.3.4 Mapeamento da hipsometria com base no MDE ALOS PALSAR RTC

O mapa hipsométrico da área de estudo, assim como o sombreamento do relevo, foi produzido com base no MDE ALOS PALSAR RTC. Para sua elaboração, os valores de altitude contidos no MDE (Figura 11) foram agrupados em intervalos de 4 classes, por meio do classificador Intervalos Iguais, pois este possibilita uma melhor visualização das variações de altitude; sendo em seguida atribuída uma paleta de cores ao *raster*.

Figura 13 – Modelo Digital de Elevação – MDE ALOS PALSAR RTC com aplicação de *zoom* para a visualização da sobreposição do limite da área de estudo ao modelo.



Fonte: Do Autor (2021)

5.3.5 Mapeamento de formas erosivas

Segundo Guerra e Mendonça (2020, p. 225),

a erosão dos solos tem causas relacionadas a própria natureza, como a quantidade e distribuição das chuvas, a declividade, o comprimento e forma das encostas, as propriedades químicas e físicas dos solos, o tipo de cobertura vegetal, e também à ação do homem, como o uso e manejo da terra que, na maioria das vezes, tende a acelerar os processos erosivos.

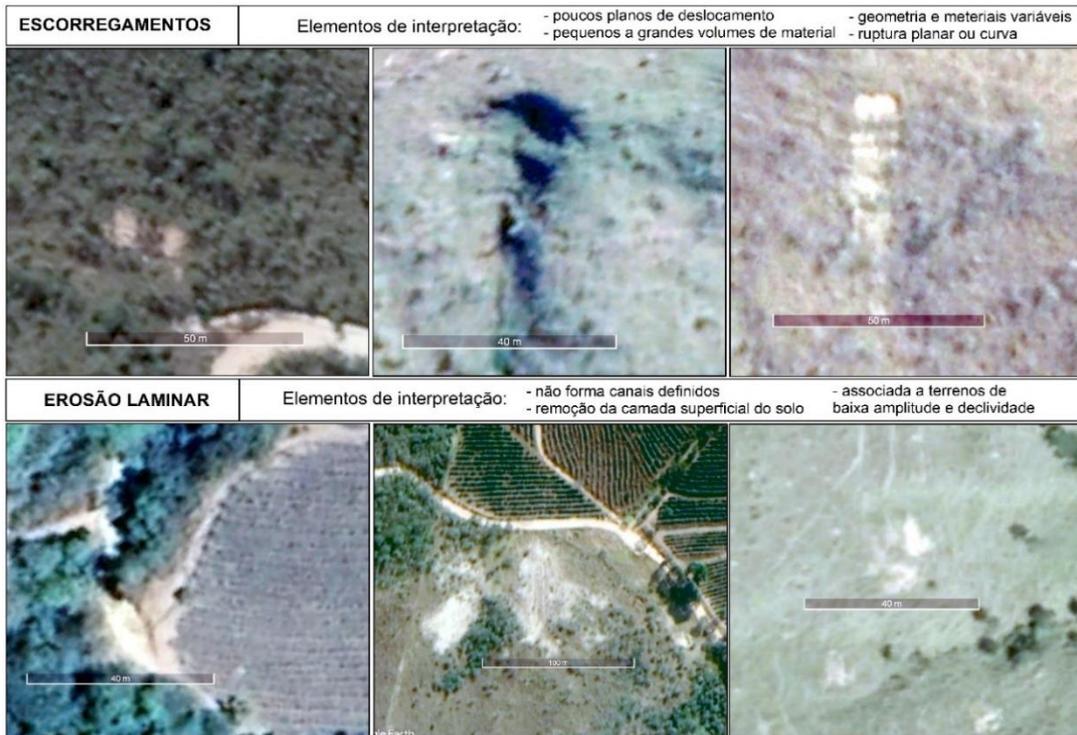
As erosões mapeadas no PESBE foram nomeadas como formas erosivas, considerando que as mesmas representam as cicatrizes deixadas pela ação dos processos erosivos no ambiente. Sendo assim, o mapeamento das formas erosivas no PESBE considerou as erosões ligadas ao papel da água que remove o solo das encostas, tais como erosões laminares, sulcos, ravinas e voçorocas; os movimentos de massa, especialmente os escorregamentos que se encontram na UC como cicatrizes antigas e atuais; e as erosões antrópicas, caracterizadas neste estudo como ranhuras no terreno causados pela prática do motociclismo *Off Road*. Essas erosões antrópicas apresentam incisões ou sulcos superficiais provocados pelo atrito dos pneus das motocicletas no terreno, além de demonstrarem exposição e compactação do solo, como constatado em campo.

O mapeamento foi realizado através do *software* Google Earth Pro (GOOGLE, 2020), o qual oferece imagens orbitais gratuitas e com resolução espacial condizente com tal objetivo (GAROFALO; FERREIRA, 2015; MESSIAS; FERREIRA, 2017).

Antes de se iniciar a identificação das formas erosivas, realizou-se a conversão do arquivo vetorial referente ao limite da área de estudo do formato *shapefile* para o formato *kml*, através da ferramenta *Layer to kml*, contida em *Conversion Tools* do ArcMap 10.5, para que fosse possível inserir o limite do PESBE no *Google Earth*.

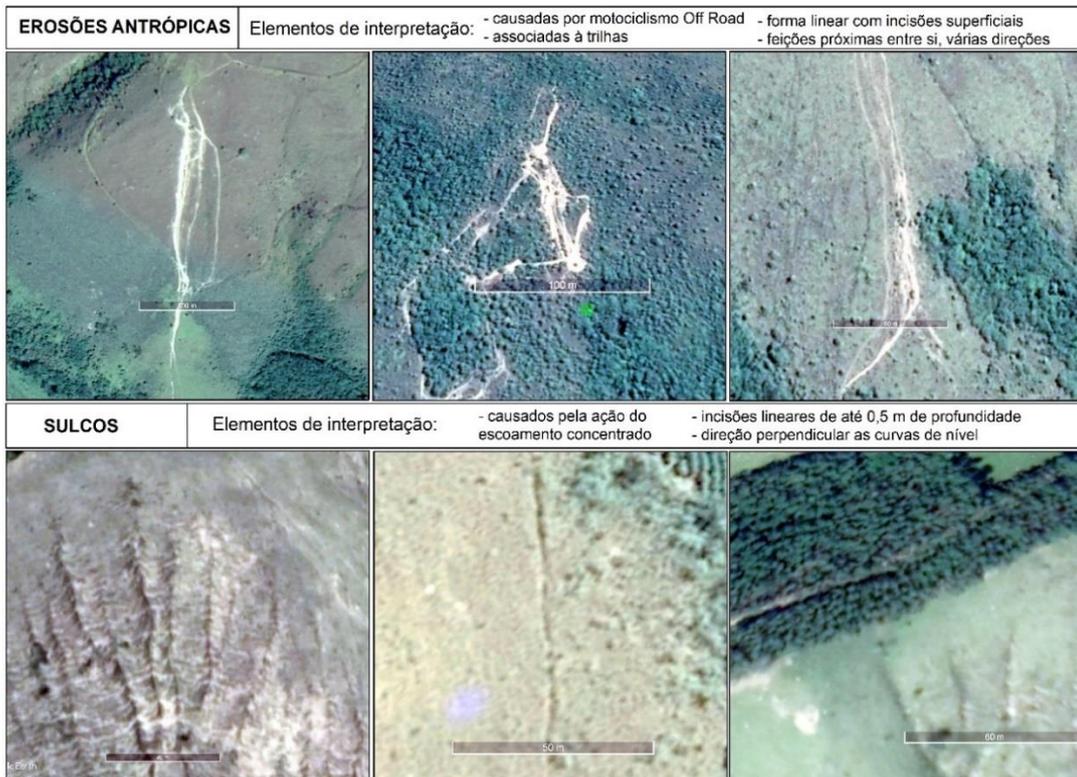
Após essa etapa, foi criada uma chave de interpretação para auxiliar na identificação dos elementos em análise, como demonstrado nas figuras 12, 13 e 14. Para isso, foram selecionadas feições de cada tipologia de erosão através de imagens do Google Earth Pro, visando levantar as principais características de cada forma erosiva observadas nas imagens, e assim tornar o mapeamento mais uniforme.

Figura 14 – Chave de interpretação para os processos de escorregamentos e de erosão laminar



Fonte: GOOGLE (2019) Org.: Autor (2021)

Figura 15 – Chave de interpretação para os processos de erosão antrópica e de sulcos



Fonte: GOOGLE (2019). Org.: Autor (2021)

Figura 16 – Chave de interpretação para os processos de ravinas e de voçorocas



Fonte: GOOGLE (2019). Org.: Autor (2021)

O mapeamento preliminar das erosões na área do PESBE foi realizado visualmente sobre imagens referentes a setembro de 2019, com base nas formas de relevo e na chave de interpretação criada, sendo utilizada uma altitude do ponto de visão no Google Earth Pro de aproximadamente 1.700 metros. Sobre cada feição identificada foi adicionado um marcador com a cor e a nomenclatura correspondentes ao tipo de processo, através da função *Adicionar Marcador*. Os marcadores representando as formas erosivas foram salvos em uma pasta em formato *kml*, e então através do ArcMap 10.5 foram convertidos em *layer*, através da ferramenta *Kml to layer*, presente em *Conversion Tools*. Ainda no ArcMap 10.5, os pontos referentes as formas erosivas foram exportados para um arquivo vetorial de pontos e reprojutados para o Datum Sirgas 2000, sendo posteriormente separados em novos arquivos *shapefile* por tipos de formas erosivas.

Após este levantamento preliminar das erosões, foi realizado um trabalho de campo no PESBE, que ocorreu em outubro de 2019. Nesta visita a campo foi realizada a checagem dos processos mapeados e reconhecimento da área de estudo. Posteriormente a esse trabalho de campo, houve a necessidade de revisão do mapeamento, por meio da identificação mais

detalhada das feições erosivas. O mapeamento realizado foi checado e validado pelo orientador e co-orientador, resultando na inclusão de novos processos.

O planejamento do segundo trabalho de campo foi feito, porém a concretização do trabalho não foi possível em função dos impedimentos tais como:

- a) dificuldades relacionadas a situação pandêmica (diversos períodos em que o parque esteve fechado);
- b) indisponibilidade de veículos para acompanhamento das atividades no campo e de verba para seu custeio;
- c) a ocorrência de incêndio nas dependências da área de estudo nos dias que antecederam a data marcada para as atividades de campo, comprometendo a realização das mesmas.

Desse modo, foram mantidos os processos já checados no primeiro campo, os processos validados conforme citados acima. Já os processos duvidosos foram excluídos do mapeamento, tornando-o mais condizente com a realidade terrestre.

Para a finalização do mapa de formas erosivas, os tipos de erosões foram separados por cores e então sobrepostos ao mapa hipsométrico e ao sombreado do relevo, possibilitando a visualização das erosões sobre o modelado do relevo.

5.3.5.1 Mapeamento da densidade de formas erosivas

A densidade de formas erosivas foi estimada para o conjunto de todas as feições, por meio do estimador Kernel, que, para o cálculo da densidade,

desenha uma vizinhança circular ao redor de cada ponto da amostra, correspondendo ao raio de influência, e então é aplicada uma função matemática de 1, na posição do ponto, a 0, na fronteira da vizinhança. O valor para a célula é a soma dos valores kernel sobrepostos, e divididos pela área de cada raio de pesquisa (SILVERMAN, 1986 *apud* SOUZA *et al.*, 2013, p. 4960).

Para a estimativa da densidade de formas erosivas utilizou-se a ferramenta *Kernel Density*, contida em *Spatial Analyst tools*, e foi empregado o raio de abrangência de 1 km, o qual define a área interpolada em torno do vetor. O *raster* gerado foi recortado para a área de estudo, sendo posteriormente fatiado em 4 classes por meio do classificador *Natural Breaks*, uma vez que este classificador diminui a interferência subjetiva do pesquisador na classificação dos dados (FERREIRA, 2014).

5.3.6 Elaboração do Mapa Geomorfológico

O mapa geomorfológico é um produto cartográfico que fornece um grande número de informações úteis ao planejamento ambiental, na medida em que representa a distribuição espacial de formas, materiais e processos (ALMEIDA, 1986).

A elaboração do mapa geomorfológico do PESBE baseou-se na metodologia desenvolvida por Ab' Sáber (1969), Pires Neto (1991), Ross (1990) e IPT (1981). Na definição das formas de relevo foi utilizada a metodologia de Pires Neto (1991) que considera o mapeamento baseado na análise de *tipos de relevo* (DEMECK, 1967), também denominado *complexo de formas de relevo* (SPIRIDONOV, 1980) e *unidades genéticas do relevo* (VERSTAPPEN; VAN ZUIDAN, 1975). Esta unidade taxonômica (3º táxon) diz respeito a uma associação de formas de relevo, que considera os sistemas de interflúvios e vales, associando atributos morfométricos e morfográficos (FERREIRA, *et al.*, 2019).

Na tabela 1 são apresentadas as características morfométricas de cada *tipo de relevo*, com base em Pires Neto (1991).

Tabela 1 – Características morfométricas dos diferentes *tipos de relevo*

TIPO DE RELEVO	AMPLITUDE	DECLIVIDADE	PADRÕES DE CORES
Escarpa (E)	> 350m	> 20%	Marrom
Morros e Montanhas (MMh)	> 300m	> 15%	Roxo
Morros com encostas suaves (M)	100 a 300m	5 - 15%	Rosa
Morrotes (Mt)	< 100m	> 15%	Cinza
Colinas (C)	< 100m	0 a 15%	Verde claro
Planícies Fluviais (P) e Alvéolos (A)	-	-	Amarelo

Fonte: Adaptado de Pires Neto (1991)

Para a execução do mapeamento, foram utilizadas cartas topográficas na escala 1:50.000 das folhas Boa Esperança e Cristais, que abrangem o PESBE. Inicialmente foi realizada a delimitação das sub-bacias pertencentes ao PESBE, de forma manual sobre as cartas topográficas. Em seguida, foram calculados os valores de amplitude e declividade das diferentes formas de relevo, considerando a cota altimétrica dos pontos cotados (topos) e o nível de base do rio principal (cota altimétrica da última curva de nível antes do rio) de cada sub-bacia. Assim,

foi traçado o 3º. Táxon (ROSS, 1992), que corresponde as unidades dos padrões de formas semelhantes do relevo, identificadas em função do índice de dissecação do relevo, formato dos topos, vertentes e vales.

A compartimentação do relevo proposta, seguiu a demarcação dos relevos de denudação (escarpa, morros e montanhas, morros com encostas suaves, morrotes, colinas) e os relevos de agradação (planícies fluviais e alvéolos).

Na área do PESBE ocorrem *relevos de denudação* como Escarpas (E) e Morros com Encostas Suaves (M); *relevos de agradação* como planícies aluviais (P) e alvéolos (A); formas de origem denudativa (cristas retilíneas e arredondadas, rupturas de declive convexa e colo); e formas de origem fluvial (rede hidrográfica).

Finalizado o mapeamento geomorfológico, foi realizada a sua vetorização no SIG ArcMap 10.5. Através do módulo *Editor*, foram criados arquivos *shapefile* de polígonos referentes a cada compartimento de relevo, bem como foram criados arquivos *shapefile* de linhas correspondendo as diferentes formas de origem denudativa. Para representar as formas de origem fluvial foi utilizado o arquivo vetorial de linhas correspondente a rede de drenagem do PESBE.

Sobre os tipos de relevo mapeados, foi sobreposto o *layer* referente as feições erosivas mapeadas no parque, sendo elas classificadas em: formas e processos erosivos (erosão laminar, em sulco, ravina e voçoroca); formas de origem gravitacional (cicatrizes antigas e atuais de escorregamentos); e formas de origem antrópica (erosão causada por *Off Road*).

Por fim, foram atribuídas cores aos polígonos referentes a cada tipo de relevo, foram feitas edições nos arquivos *shapefile* de linha referentes as formas de origem denudativa, para que atendessem aos padrões da cartografia geomorfológica e foi gerada uma legenda demonstrando a simbologia de todas as feições mapeadas.

5.4 MAPEAMENTO DAS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS RELACIONADAS À FRAGILIDADE AMBIENTAL

As variáveis geoambientais consideradas, a priori, como influenciadoras da fragilidade ambiental à processos no PESBE foram: declividade (DEC), índice de vegetação (NDVI), probabilidade de ocorrência de chuvas intensas (POCI), densidade de drenagem (Dd), densidade de lineamentos estruturais (DLE) e densidade de vias de circulação (DVC).

A escolha destas variáveis se justifica por dois fatores:

- a) Devido a relação que as variáveis eleitas possuem com o desenvolvimento de processos erosivos, na medida em que vertentes declivosas, áreas que abrigam altas densidades de drenagem, lineamentos estruturais e vias de circulação, solos desprovidos de cobertura vegetal ou cobertos por uma vegetação pouco vigorosa e setores do relevo que recebem chuvas de forte intensidade são favoráveis ao desenvolvimento e dinamização de processos erosivos (BIGARELLA, 2007; CASSSETI, 1991; COELHO, 2008; CUNHA; THOMAZ, 2017, GAROFALO; FERREIRA, 2015, MESSIAS; FERREIRA, 2017, RODRIGUES NETO; FERREIRA, 2020, SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010; SOARES; FIORI, 1978).
- b) Devido às características físico-ambientais e antrópicas do parque, que abriga um relevo montanhoso, abundante rede hidrográfica, com presença de diversos trechos retilíneos e formas anômalas; cobertura vegetal predominantemente formada por campos de altitude com presença de alguns fragmentos florestais; uma estação chuvosa bem definida com chuvas concentradas no verão e uma vasta rede de trilhas.

Além disto, a escolha destas variáveis se deve às suas distribuições contínuas no espaço, possibilitando assim classifica-las utilizando-se o método de classificação *Fuzzy* (FERREIRA, 2014), bem como o fato de as mesmas poderem ser mapeadas em escalas de médio detalhamento.

5.4.1 Declividade – DEC

O mapeamento da declividade demonstra a inclinação, em graus ou porcentagem, representada pelo gradiente ou taxa de mudança máxima no valor Z de cada célula de uma superfície *raster* (ESRI, 2016).

O mapa de declividades foi produzido no ArcMap 10.5, através da ferramenta *Slope*, contida em *Spatial Analyst tools*, utilizando-se como *raster* de entrada o MDE ALOS PALSAR RTC e optando-se pela demonstração dos valores em graus. Após a geração do *raster*, o mesmo foi recortado para a área de estudo e seus valores foram fatiados em quatro classes, pelo classificador *Quantile*.

5.4.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI foi empregado para a obtenção de características da cobertura vegetal do Parque Estadual Serra da Boa Esperança. O NDVI é gerado em uma escala que varia de -1 a 1, onde: os valores próximos a -1 correspondem a água; os valores positivos, porém próximos a 0, estão relacionados a solo exposto ou vegetação esparsa; e, os valores próximos a 1 correspondem a uma cobertura vegetal mais densa, vigorosa (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011, p. 525). Este índice é o mais utilizado na literatura e em pesquisas que contemplam temas diversos, entre eles os temas relacionados à erosão dos solos (MESSIAS, 2018).

5.4.2.1 Justificativa para a utilização de uma imagem que representa a tendência central da reflectância (mediana de bandas) na geração do NDVI

A vegetação apresenta diferentes níveis de reflectância em imagens de satélite obtidas em períodos distintos. As alterações no volume de precipitação ao longo do ano modificam o crescimento da vegetação, favorecendo-o ou prejudicando-o, acarretando assim em alterações na taxa de acumulação de biomassa e na taxa de senescência, o que irá refletir em diferentes valores de NDVI (LEE *et al.*, 2002). Estudos desenvolvidos por Quesada *et al.* (2017) em uma bacia hidrográfica do Paraná, demonstram que a vegetação ripária na área apresentou distintos valores de NDVI para diferentes períodos de 2015, sendo constatado que verão e outono apresentaram índices elevados, ao passo que primavera e inverno apresentaram os menores índices. Desse modo, é importante frisar que o Cerrado, bioma em que o PESBE está inserido, apresenta uma marcante sazonalidade climática, caracterizada por um período seco, que apresenta entre cinco a seis meses de estiagem, com destaque para o inverno; e um período chuvoso, comportando seis ou sete meses relativamente chuvosos, com as chuvas concentradas sobretudo no verão (AB'SÁBER, 2003; MALHEIROS, 2016).

Além das mudanças de ordem sazonal, a observação de características da vegetação nas imagens de satélite também está susceptível a ser impossibilitada por fenômenos naturais, como os incêndios no Cerrado. Também deve ser levado em consideração o fato de que as imagens de satélites obtidas por sensores ópticos podem conter áreas cobertas por nuvens, que mascaram as informações da superfície terrestre. Logo, a geração do NDVI utilizando uma única data

pode apresentar interferência desses fenômenos e, conseqüentemente, não expressar o comportamento padrão da vegetação em certos locais da imagem.

Em razão dos fatores mencionados, ao invés de ser utilizada a imagem de uma única data para o cálculo do NDVI, optou-se por selecionar imagens de diferentes datas e realizar uma álgebra dessas imagens em SIG. Esta álgebra demonstra a tendência da vegetação em diferentes períodos e possibilita obter um NDVI capaz de representar o vigor da vegetação considerando a tendência central entre os meses mais secos e os meses mais chuvosos, em um período de alguns anos.

Foi utilizada a mediana como medida de tendência central, pois a mediana evita a influência de eventos isolados no produto final, como a presença de nuvens e queimadas, uma vez que considerará o valor central da reflectância. Não foram utilizadas a média e a moda pois a média considera todos os valores de pixels, incluindo os relacionados a eventos isolados; já a moda não permite atribuir valores aos pixels cuja reflectância não se repete entre as diferentes cenas, deixando-os vazios (MESSIAS, 2018).

5.4.2.2 Álgebra de imagens Landsat para a geração de uma imagem mediana

O NDVI foi calculado por meio de imagens provenientes do sensor *Operational Terra Imager* (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30m. Foram selecionadas um total de doze imagens entre 2014 e 2019, sendo que a cada ano foram adquiridas duas imagens de meses e períodos diferentes. Buscou-se selecionar as imagens com a mínima interferência possível de nuvens sobre a área do PESBE. Essas imagens orbitais já foram adquiridas dotadas de correção geométrica e atmosférica, mediante solicitação prévia no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (USGS, 2020).

Para o cálculo da imagem mediana foi utilizada a ferramenta *Cell statistics*, presente no *Spatial Analyst* do ArcMap 10.5. Considerando que para a obtenção do NDVI são utilizadas somente as bandas do infravermelho próximo e do vermelho, foram selecionadas apenas as mesmas para a geração da imagem mediana, sendo o processo realizado tanto para as 12 bandas do infravermelho próximo, quanto para as 12 bandas do vermelho. Como resultado foram gerados dois arquivos matriciais: a banda mediana do infravermelho próximo e a banda mediana do vermelho.

5.4.2.3 Cálculo do NDVI

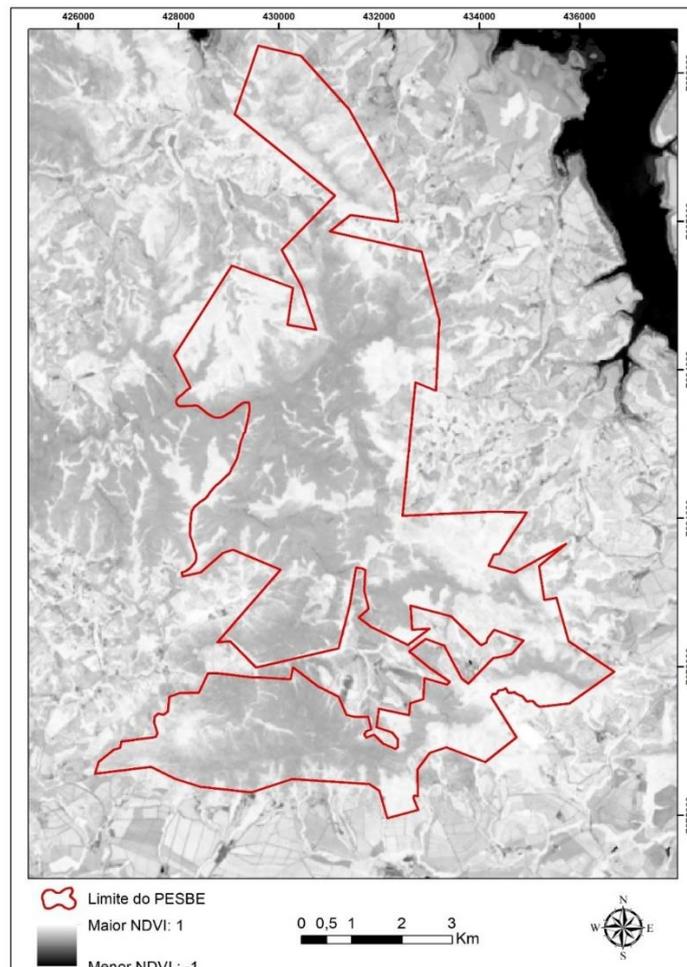
Para o cálculo do NDVI, foram utilizadas ferramentas de álgebra de bandas em SIG, aplicando a seguinte equação:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad [\text{Eq.1}]$$

onde NIR corresponde à reflectância na banda do infravermelho próximo e RED corresponde à reflectância na banda do vermelho (ROUSE *et al.*, 1973).

No ArcMap 10.5, as medianas das bandas do infravermelho próximo e do vermelho obtidas previamente foram reprojatadas para o Datum Sirgas 2000, sendo em seguida inseridas na equação de Rouse *et al.* (1973) para a geração do NDVI (Figura 15), através da ferramenta *Raster Calculator*, contida no *Spatial Analyst tools*.

Figura 17 – NDVI gerado com detalhe para a área de estudo e entorno



Fonte: Do Autor (2021)

O *raster* gerado foi recortado para a área de estudo e, posteriormente, foram atribuídas quatro classes pelo classificador *Quantile*, sendo inserida uma rampa de cores que varia do amarelo claro, para os valores de NDVI mais baixos, passando por tons claros de verde, indicando um NDVI intermediário, até o verde escuro, que representa a classe detentora do maior índice de vegetação.

5.4.3 Probabilidade de Ocorrência de Chuvas Intensas – POCI

Garófalo e Ferreira (2012) argumentam que, na ausência de pluviógrafos, pode-se obter precipitações de intensidade máxima em um período de 24 horas com base em chuvas de intensidade máxima em um período de um dia, através de modelos de desagregação de chuvas. Em sua pesquisa a respeito da probabilidade de ocorrência de chuvas de intensidade extrema na APA Fernão Dias (MG), considerando o período chuvoso, Garófalo e Ferreira (2012) utilizaram o método de desagregação de chuvas de Occhipinti e Santos (1966) – em que a precipitação máxima em 24 horas apresenta uma constante de 1,14 em relação a precipitação máxima em um dia – e consideraram como chuvas intensas aquelas com alturas superiores a 50 mm em um período de 24 horas, pois estas são equivalentes à chuvas de 25 mm em 120 minutos, consideradas como limite para selecionar as chuvas intensas.

Sendo assim, o mapeamento da probabilidade de ocorrência de chuvas intensas (POCI) foi realizado com base na metodologia apresentada por Garófalo e Ferreira (2012), sendo considerados para análise os meses de dezembro a março, que se caracterizam como os mais chuvosos na região em que se localiza a área de estudo. Após uma análise detalhada das estações pluviométricas localizadas em áreas no entorno do PESBE, na qual foi considerada a distância em relação ao parque, o tamanho de suas séries históricas e a regularidade dos dados apresentados por elas, foram selecionadas as estações mais próximas ao parque, as que continham séries de aproximadamente 30 anos ou mais e com uma defasagem de dados relativamente pequena. Após realizar esta análise prévia, foi selecionado um total de 10 estações pluviométricas (Tabela 2).

Tabela 2 - Estações pluviométricas utilizadas para aquisição de dados de precipitação
(continua)

Estação pluviométrica	Município	Latitude	Longitude	Série histórica
Alfenas	Alfenas	-21,45	-45,94	1984-2019
Bom Jesus da Penha	Bom Jesus da Penha	-21,02	-46,52	1995-2019
Campos Gerais	Campos Gerais	-21,24	-45,76	1984-2019

Tabela 2 - Estações pluviométricas utilizadas para aquisição de dados de precipitação
(conclusão)

Estação pluviométrica	Município	Latitude	Longitude	Série histórica
Candeias	Candeias	-20,76	-45,27	1975-2019
Coqueiral	Coqueiral	-21,19	-45,45	1976-2019
Formiga	Formiga	-20,46	-45,42	1975-2014
Ilicínea	Ilicínea	-20,95	-45,82	1984-2019
Lavras	Lavras	-21,23	-45	1975-1998
Piumhi	Piumhi	-20,46	-45,95	1975-2018
Santana do Jacaré	Santana do Jacaré	-20,91	-45,13	1972-2016

Fonte: Organizado pelo autor (2021)

Em seguida os valores de chuva acumulada máxima em um dia, dentre todos os dias do mês, foram extraídos das séries históricas de cada estação para os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, considerando-se cada ano compreendido nas séries históricas. Os dados foram tabulados no Excel 2016 (MICROSOFT, 2015) e convertidos de chuva máxima em um dia para chuva máxima em 24 h (Tabela 3), aplicando-se a constante de transformação de Occhipinti e Santos (1966), por meio da fórmula seguinte:

$$Máx\ 24h = Máx\ dia \times 1,14 \quad [Eq.2]$$

onde *Máx 24h* representa chuva acumulada máxima em um período de 24 horas; *Máx dia* corresponde a chuva acumulada máxima em um dia e 1,14 é a constante de transformação.

Tabela 3 – Valores de chuva acumulada máxima em um dia e valores de chuva acumulada máxima em 24 h, para os meses de dezembro a março, da estação pluviométrica de Formiga.

Ano	Dia Dez.	Dia Jan.	Dia Fev.	Dia Mar.	24h Dez.	24h Jan.	24h Fev.	24h Mar.
1976	57	40,6	58	51,2	64,98	46,284	66,12	58,368
1977	43	71	18	35,2	49,02	80,94	20,52	40,128
1978	38,1	47,2	28,3	38	43,434	53,808	32,262	43,32
1979	71	35,2	45,3	22,3	80,94	40,128	51,642	25,422
1980	35,2	105,3	37,2	14	40,128	120,042	42,408	15,96
1981	72,3	32,3	23,3	40,2	82,422	36,822	26,562	45,828
1982	32,3	78,4	64,2	130,3	36,822	89,376	73,188	148,542
1983	62,3	48,4	142,4	63,3	71,022	55,176	162,336	72,162
1984	100,2	46,4	33,1	19,2	114,228	52,896	37,734	21,888
1985	75,3	142,8	55,2	42,6	85,842	162,792	62,928	48,564
1986	50,2	55,4	38,2	14,2	57,228	63,156	43,548	16,188

(continua)

Tabela 3 – Valores de chuva acumulada máxima em um dia e valores de chuva acumulada máxima em 24 h, para os meses de dezembro a março, da estação pluviométrica de Formiga.

(conclusão)

Ano	Dia Dez.	Dia Jan.	Dia Fev.	Dia Mar.	24h Dez.	24h Jan.	24h Fev.	24h Mar.
1987	33,8	39,6	17,2	29,2	38,532	45,144	19,608	33,288
1988	30,2	21,8	50	90,3	34,428	24,852	57	102,942
1989		30,8	58,8	80,4	0	35,112	67,032	91,656
1990	16,8	34,2	23,2	50,4	19,152	38,988	26,448	57,456
1991	28,4	41,5	49,4	36,2	32,376	47,31	56,316	41,268
1992	108,6	149,6	39,6	18,4	123,804	170,544	45,144	20,976
1993	39,2	23,2	42,3	46,4	44,688	26,448	48,222	52,896
1994	56,4	53,4	55,4	22,4	64,296	60,876	63,156	25,536
1995	54,2	19,6	79,8	38,4	61,788	22,344	90,972	43,776
1996	77,2	35,6	33,2	37	88,008	40,584	37,848	42,18
1997	112,6	80,4	37,6	29,2	128,364	91,656	42,864	33,288
1998	105,6	75,2	30,4	30,2	120,384	85,728	34,656	34,428
1999	68,4	95,8	29,4	30,4	77,976	109,212	33,516	34,656
2000	66,2	53,6	40,4	78,2	75,468	61,104	46,056	89,148
2001	75,8	65,4	74	35,4	86,412	74,556	84,36	40,356
2002	55,2	30,4	74,6	40,6	62,928	34,656	85,044	46,284
2003	39	79,4	35,2	52,2	44,46	90,516	40,128	59,508
2004	88,2	77,2	40,4	35,2	100,548	88,008	46,056	40,128
2005	85	39	34,2	29,8	96,9	44,46	38,988	33,972
2006	50	32,4	31,8	45,6	57	36,936	36,252	51,984
2007	70,2	61,5	17,8	12,6	80,028	70,11	20,292	14,364
2008	154	86,5	37,8	41	175,56	98,61	43,092	46,74
2009	44,5	50,4	77,5	59,3	50,73	57,456	88,35	67,602
2010	31,1	50	59,5	43,1	35,454	57	67,83	49,134
2011	87,7	41,8	67	136,7	99,978	47,652	76,38	155,838
2012	34,1	98,3	21,4	71	38,874	112,062	24,396	80,94
2013	68,8	45,9	25	36	78,432	52,326	28,5	41,04
2014	28,6	23	12	12,1	32,604	26,22	13,68	13,794

Fonte: Adaptado de ANA (2021)

Em seguida, os dados de chuva máxima em 24 horas de cada estação pluviométrica, considerando os quatro meses analisados, foram inseridos em apenas uma coluna em uma nova planilha, para serem utilizados no cálculo da probabilidade de ocorrência de chuvas intensas. Aplicou-se, conforme a metodologia empregada por Garófalo e Ferreira (2012), o modelo de distribuição de Gumbel:

$$F(X) = e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad [\text{Eq.3}]$$

onde X representa a variável chuva máxima.

Com base em Garófalo e Ferreira (2012), utilizou-se o método dos momentos para se obter os parâmetros α e β , parâmetros estes que de acordo com os autores são estimados com base na média e no desvio padrão através das seguintes equações:

$$\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s \quad [\text{Eq.4}]$$

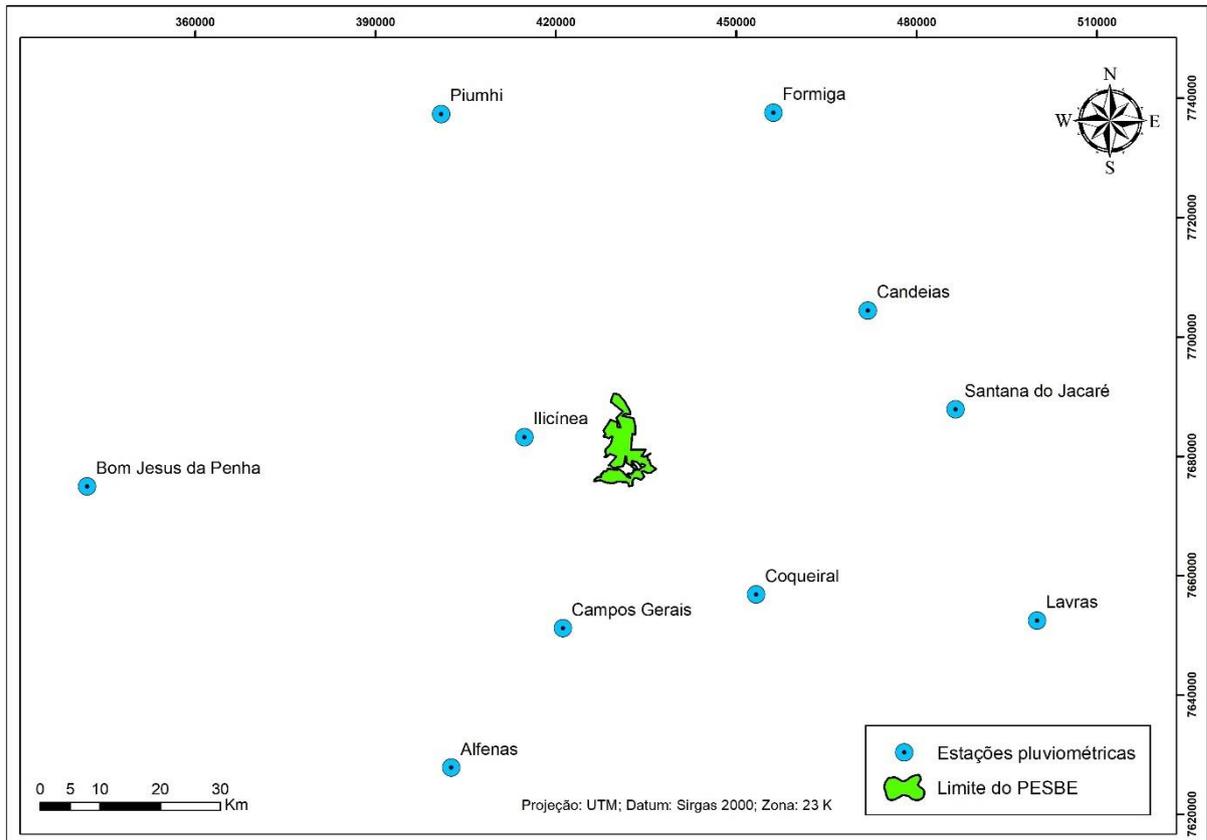
$$\alpha = \mu - 0,5752 \beta \quad [\text{Eq.5}]$$

onde s é o desvio padrão e μ é a média da amostra.

O modelo de Gumbel foi então aplicado aos dados das dez estações pluviométricas consideradas no estudo, através do software Excel 2016, obtendo-se os valores de POCI.

O próximo passo foi a espacialização das estações pluviométricas através de seus pares de coordenadas no ArcMap 10.5, sendo criado um arquivo vetorial de pontos representando a localização espacial das estações (Figura 16). Na tabela de atributos deste arquivo foi inserida uma nova coluna contendo os valores de POCI de cada estação, para, posteriormente, ser realizada a interpolação dos pontos com base nestes valores.

Figura 18 – Distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas na interpolação



Fonte: Do Autor (2021)

Para a interpolação dos dados pluviométricos foi utilizado o método Inverso da Distância Ponderada – em inglês, *Inverse Distance Weighted* (IDW), adotando-se 2 como o expoente da distância. Segundo Ferreira (2014), este método estima um novo valor de uma variável aleatória a um ponto cujo valor é desconhecido, com base em valores já conhecidos situados em outras posições, sendo que os pontos situados mais próximos do ponto cujo valor é desconhecido exercerão maior influência sobre ele. O autor salienta que, quando o expoente da distância é 2 – caracterizando o algoritmo inverso do quadrado das distâncias (IQD) – ou menor que 2, a influência de todos os pontos inseridos no plano, inclusive os mais distantes, é distribuída de forma mais equitativa.

Sendo assim, optou-se pelo uso do interpolador IQD, devido a distribuição espacial irregular das estações pluviométricas na região do PESBE, estando algumas localizadas mais próximas e outras mais distantes ao parque, além do número de estações ser insuficiente para uma utilização confiável do modelo *Krigagem*, por exemplo. A interpolação foi realizada no ArcMap 10.5, através da ferramenta *IDW*, inserida em *Spatial Analyst tools*.

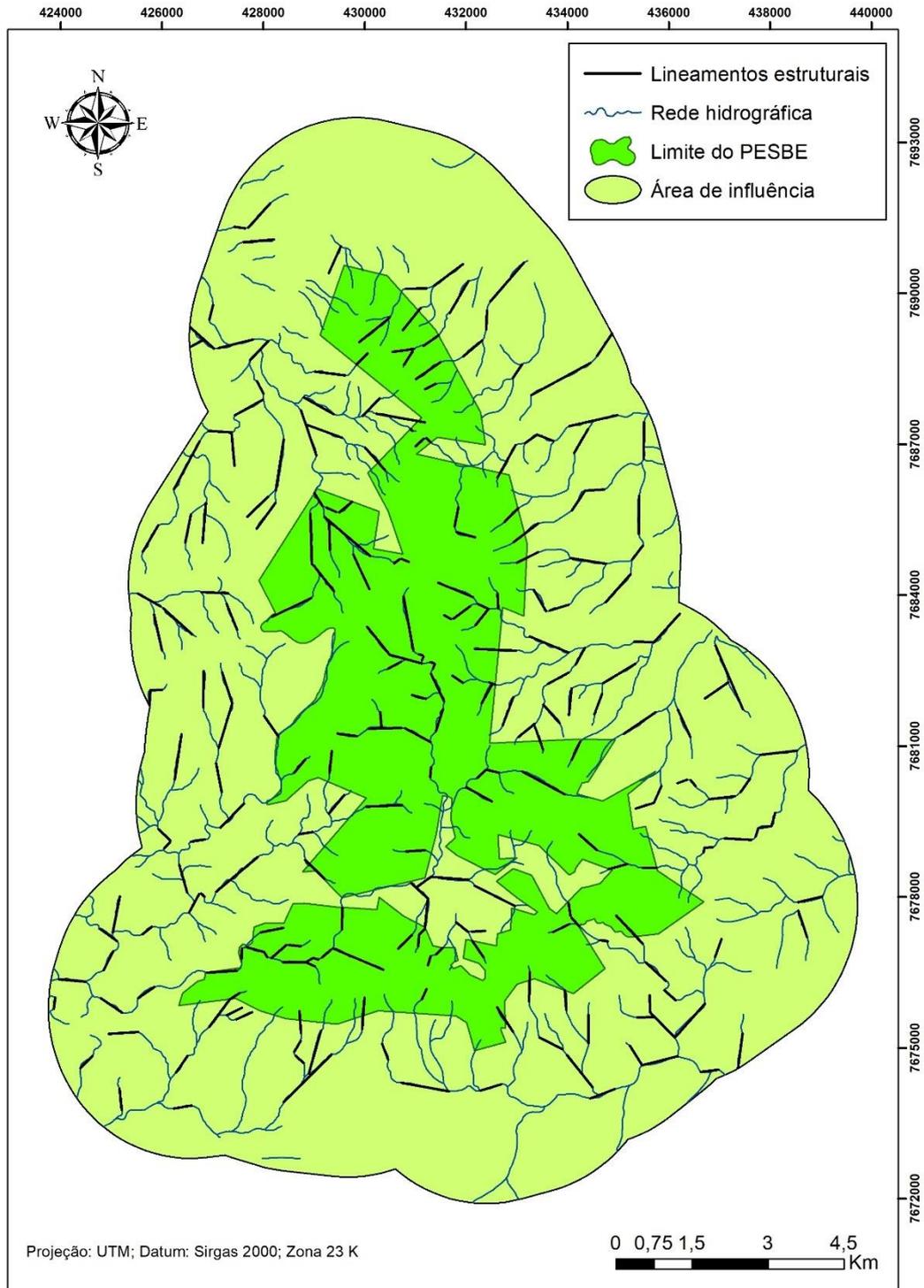
5.4.4 Densidade de Drenagem- Dd

O mapeamento da densidade de drenagem representa um índice morfométrico que correlaciona o comprimento total dos canais (em km) em uma determinada unidade de área (km²). A estimativa da densidade foi calculada utilizando um raio de abrangência de 1 km, a partir do arquivo vetorial de linhas que representam os rios localizados no parque e na área de influência. Utilizou-se o estimador Kernel, através da ferramenta *Kernel Density*, contida no *Spatial Analyst tools* do ArcMap 10.5. Em seguida, o *raster* gerado foi recortado para a área do parque e fatiado em 4 classes por meio do classificador *Quantile*.

5.4.5 Extração dos Lineamentos Estruturais

Foram identificados e cartografados os lineamentos mais evidentes impostos pelas drenagens orientadas. Com base em Soares e Fiori (1978), os lineamentos estruturais foram identificados visualmente por meio da rede de drenagem da área de estudo e da área de influência em arquivo vetorial e com auxílio do sombreamento do relevo previamente criado. Sendo assim, a vetorização dos trechos retilíneos ou que apresentavam ângulos abruptos, caracterizando os lineamentos estruturais (Figura 17), foi realizada por meio de funções da barra de ferramentas *Editor*, mantendo-se uma escala fixa de mapeamento de 1:100.000, afim de se extrair as feições de lineamentos a partir de uma ótica mais geral. A partir disto, foi criado um arquivo vetorial de linhas contendo os lineamentos estruturais mapeados.

Figura 19 – Lineamentos estruturais mapeados na área de estudo e na área de influência



Do Autor (2021)

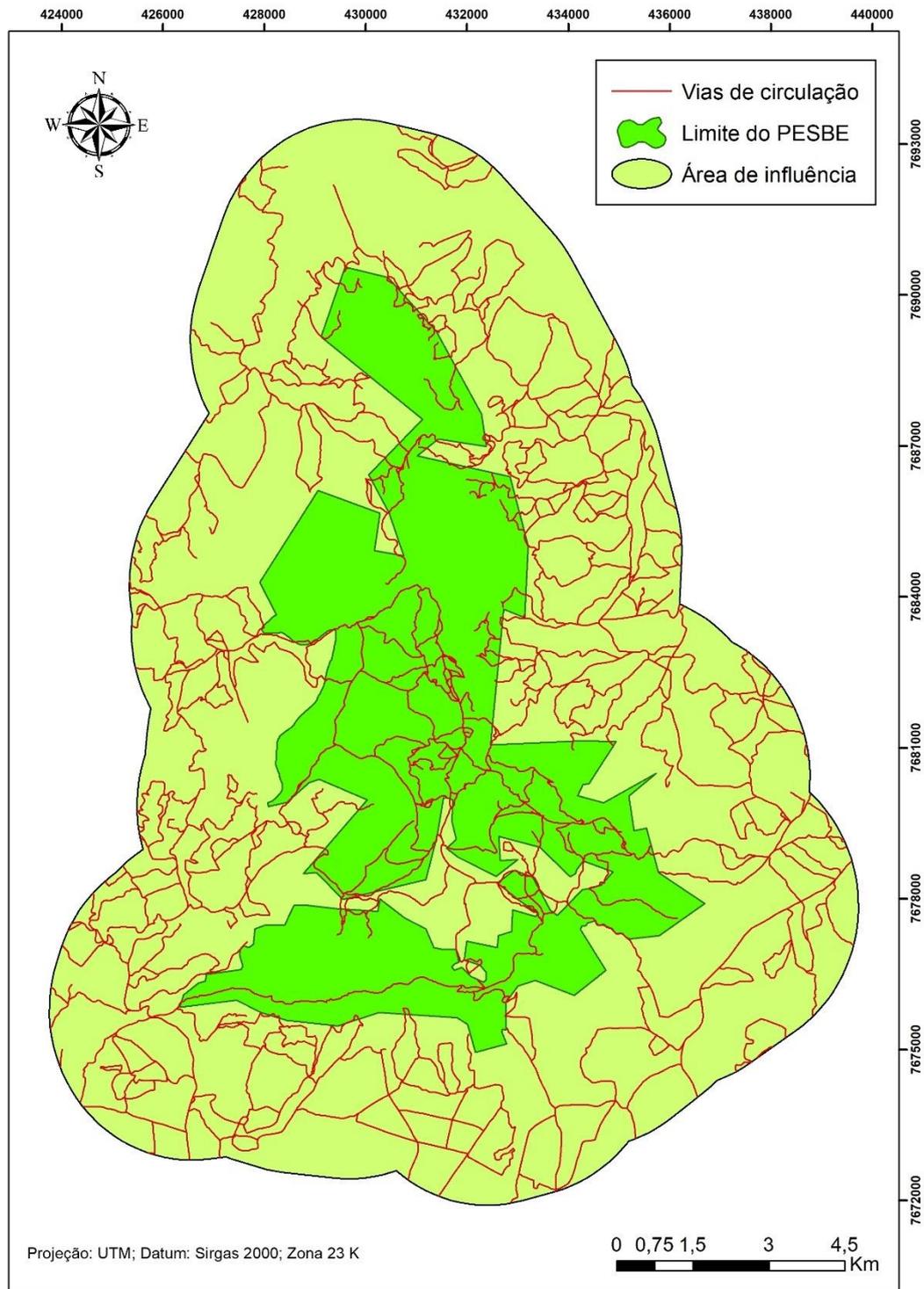
5.4.5.1 Mapeamento da Densidade de Lineamentos Estruturais

A densidade de lineamentos estruturais foi estimada por meio do estimador Kernel, utilizando-se como feição de entrada o arquivo vetorial de lineamentos estruturais previamente mapeados e aplicando-se um raio de abrangência de 1 km. Para aplicação do estimador Kernel, foi utilizada a ferramenta *Kernel Density*, contida no *Spatial Analyst tools*, do ArcMap 10.5 e o produto final foi dado em km / km^2 – neste caso, quilômetros de lineamentos por quilômetros quadrados. Foi realizado o recorte do *raster* gerado para a área de estudo, sendo o mesmo posteriormente classificado em 4 classes por meio do classificador *Quantile*.

5.4.6 Extração das Vias de Circulação

As vias de circulação presentes no PESBE e na área de influência (Figura 18) foram identificadas e mapeadas pela plataforma Google Earth Pro, adotando-se uma altitude do ponto de visão de 1,90 km e o sistema de coordenadas planas Universal Transversa de Mercator (com o Datum WGS 1984, padrão da plataforma). Para o mapeamento das vias, foram traçadas linhas sobre as feições identificadas nas imagens orbitais, através da função Adicionar Caminho, presente na barra de ferramentas do Google Earth Pro. As linhas vetorizadas foram salvas em uma pasta em formato kml e, posteriormente, já no ArcMap 10.5, convertidas em *layer*, através da ferramenta *Kml to Layer*, contida em *Conversion tools*. O procedimento a seguir foi a extração das linhas de vias do *layer* para um novo arquivo *shapefile*, que foi realizado através da função *Export Data* contida no arquivo em questão.

Figura 20 – Vias de circulação mapeadas na área de estudo e na área de influência



Do Autor (2021)

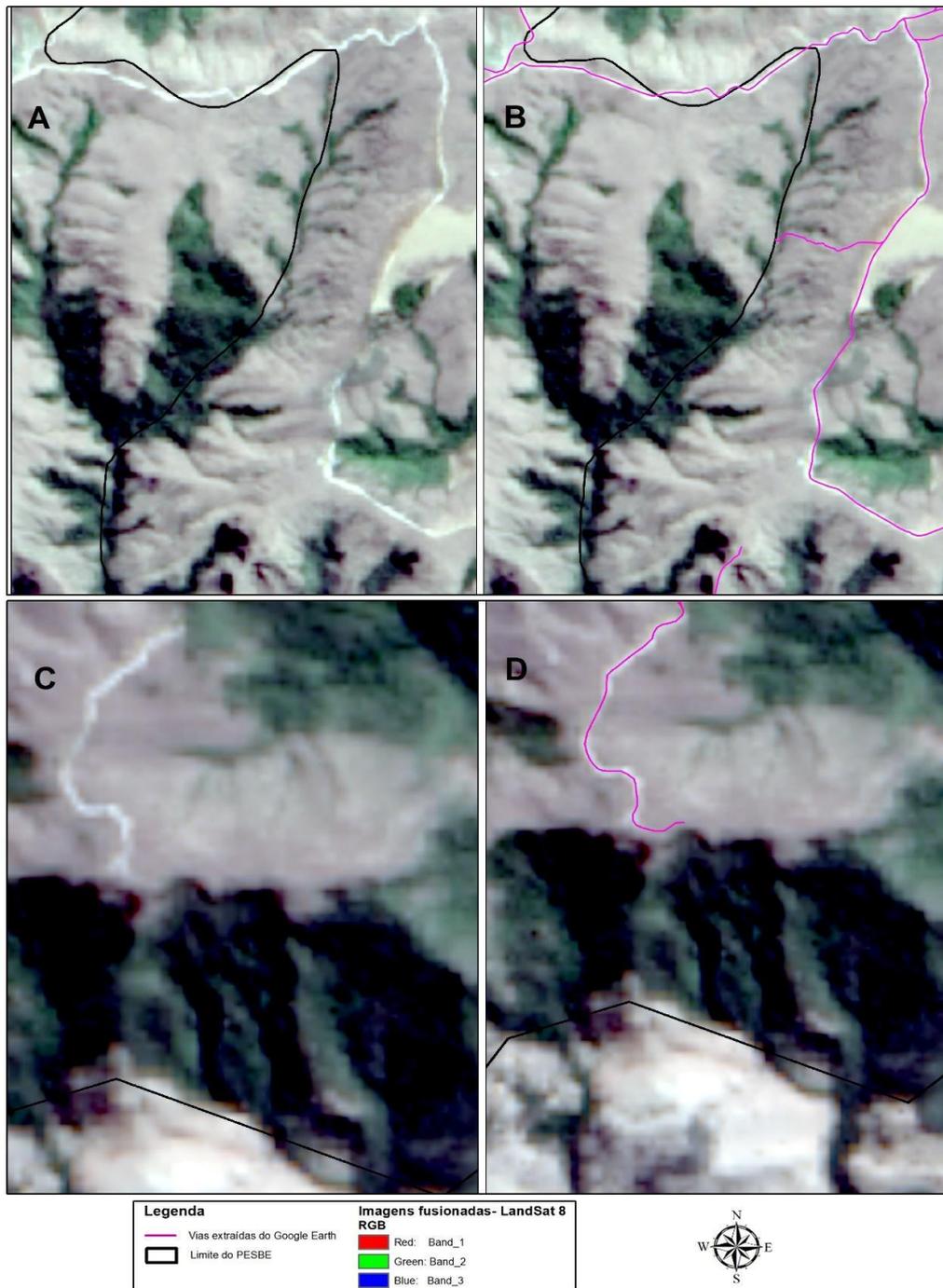
Antes de se estimar a densidade de vias, julgou-se necessário uma validação do georreferenciamento das imagens acessadas na plataforma Google Earth Pro, sendo esta

validação realizada com base em imagem OLI Landsat 8 – LS8, uma vez que as imagens deste sensor apresentam um excelente ajuste geométrico. Esta imagem foi previamente processada, visando a obtenção de uma melhor identificação visual de “vias amostrais” para a validação.

Primeiramente foi realizada a composição de bandas, através da ferramenta *Composite Bands*, contida no *Data Management Tools*, visando gerar a composição cor verdadeira, sendo esta, no Landsat 8, a 4R/3G/2B, sendo que a banda 4 se refere ao vermelho, 3 ao verde e 2 ao azul. Para uma melhor visualização das feições desejadas, optou-se por realizar o processo de fusão desta composição de bandas com a banda pancromática, que no LS8 possui uma resolução espacial de 15 m, possibilitando a obtenção de ganho em resolução espacial. Este procedimento foi realizado através da ferramenta *Create Pan-sharpened Raster Dataset*, encontrada também em *Data Management Tools*.

Para a sobreposição das vias mapeadas sobre a composição do LS8, visando a validação do arquivo de vias, ambas as camadas foram reprojatadas para o Datum Sirgas 2000, e, em seguida, observou-se em algumas áreas do parque se as vias mapeadas no Google Earth sobrepunham as vias observadas na composição LS8, obtendo-se uma resposta positiva, como demonstrado na figura 19.

Figura 21 – Validação do georreferenciamento do Google Earth Pro através de imagem OLI Landsat 8.



Fonte: Do Autor (2021)

Legenda: A: Vias observadas na imagem LS8

B: Vias mapeadas no Google Earth sobrepostas as vias observadas na imagem LS8

C: Vias observadas na imagem LS8

D: Vias mapeadas no Google Earth sobrepostas as vias observadas na imagem LS8

5.4.6.1 Mapeamento da Densidade de Vias de Circulação

Para a estimativa da densidade de vias de circulação, foi aplicado o estimador Kernel ao arquivo vetorial contendo as vias mapeadas, por meio da ferramenta *Kernel Density*, presente no *Spatial Analyst tools* do ArcMap 10.5. Em seguida, para a elaboração do mapa final de densidade de vias de circulação, foi feito o recorte do *raster* gerado para a área do PESBE, e este *raster* foi fatiado em 4 classes, pelo classificador *Quantile*. O mapa apresenta valores de quilômetros de vias por quilômetros quadrados (km / km²).

5.5 ATRIBUIÇÃO DE PESOS ÀS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS POR MEIO DO TESTE ESTATÍSTICO KOLMOGOROV-SMIRNOV

5.5.1 Teste Estatístico Kolmogorov-Smirnov

O teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS) pode ser utilizado para se verificar a associação entre variáveis nominais e ordenadas, por meio da comparação entre uma função hipotética e outra derivada empiricamente (MESSIAS, 2014; FERREIRA, 2014). “Este teste não paramétrico – o qual não exige que as amostras tenham uma distribuição normal, relaciona a distribuição das variáveis, considerando o erro de amostragem entre a função empírica e hipotética” (MESSIAS, 2014, p. 159). O teste KS possibilita que as seguintes hipóteses sejam avaliadas:

$$H_0: \text{Os dados seguem distribuição normal - hipotética}$$

$$H_1: \text{Os dados não seguem distribuição normal - empírica}$$

“O teste de KS é calculado com base na diferença máxima ($D_{máx}$) entre a função acumulada das distribuições empírica e hipotética. O valor da diferença máxima deverá ser comparado a um valor crítico, a certo nível de confiança “(MESSIAS, 2018, p. 215). Ferreira (2014) salienta que os valores críticos de D para o teste KS, que podem ser também chamados de D crítico (D_C), podem ser encontrados em uma tabela apresentada por Taylor (1977) ou outras obras de estatística, e acrescenta que quando o D máximo é maior ou igual ao D crítico ($D_{máx} \geq D_{cr}$), a hipótese nula H_0 é rejeitada e a hipótese H_1 é aceita, demonstrando que existe relação entre as variáveis analisadas.

A aplicação do teste KS para a modelagem da relação entre variáveis geoambientais e processos erosivos nesta pesquisa será baseada nos estudos de Taylor (1977). O autor aplicou o teste KS para analisar a relação entre fazendas hortícolas (utilizando uma amostra aleatória de 100 propriedades) e duas variáveis, sendo elas o tipo de solo e a distância do mercado

consumidor. Para isso, Taylor inicialmente classificou as variáveis em 4 classes, atribuindo a cada classe de ambas as variáveis a área percentual de terra ocupada pelas mesmas e o número de fazendas hortícolas observadas (amostra empírica). Em seguida, calculou-se a distribuição esperada de fazendas (amostra hipotética). Converteram-se os valores observado e esperado de fazendas para frequências observadas e esperadas em cada uma das classes, as quais ele utilizou para obter as frequências acumuladas observadas e esperadas (GAROFALO, 2013; MESSIAS, 2014).

Taylor (1977) calculou então a diferença entre a frequência acumulada observada e a frequência acumulada esperada, visando encontrar o valor máximo desta diferença ($D_{máx}$) para comparar com o valor crítico de D . O valor do D_{cr} ao nível de significância adotado pelo autor ($\alpha = 0,05$), e considerando uma amostra de 100 indivíduos, foi de 0,136. O autor observou um valor máximo de D de 0,2 em uma das classes de distância do mercado consumidor, rejeitando, portanto, a hipótese H_0 , uma vez que $D_{máx} \geq D_{cr}$. Concluiu-se, com um nível de significância de 95%, que a localização das fazendas hortícolas amostradas está relacionada à distância do mercado consumidor (GAROFALO, 2013; MESSIAS, 2014).

5.5.2 Procedimentos metodológicos para a aplicação do teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS) na atribuição de pesos as variáveis geoambientais influenciadoras

A aplicação do teste KS nesta pesquisa teve como intuito avaliar se há relação entre as variáveis dinamizadoras de processos erosivos, e as formas erosivas empiricamente mapeadas, além de demonstrar a importância relativa de cada uma das variáveis no tocante ao desenvolvimento destes processos.

A análise dos processos pretéritos são a base para este desenvolvimento metodológico, partindo da hipótese de que, entendendo a dinâmica dos processos formados no passado, podemos prever quais as áreas de maior ou menor risco à ocorrência futura (MESSIAS, 2014, p. 128).

Devido à variável Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas ter apresentado resultados insatisfatórios, como descrito no item 5.4.3., ela foi desconsiderada nesta etapa da pesquisa. O teste KS será realizado, portanto, para as seguintes variáveis geoambientais: Declividade, NDVI, Densidade de Drenagem, Densidade de Vias de Circulação e Densidade de Lineamentos Estruturais.

Nesta etapa da pesquisa, os materiais cartográficos utilizados foram os arquivos matriciais das variáveis geoambientais, em formato *raster*, e o arquivo vetorial de pontos

referente ao mapeamento das formas erosivas no PESBE – amostra empírica. Todos os procedimentos envolvendo cartografia e geoprocessamento foram realizados no SIG ArcMap 10.5 e a tabulação de dados e aplicação de fórmulas foi realizada no software Microsoft Office Excel 2016, ambos disponíveis no Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG.

O procedimento inicial foi a classificação dos arquivos em formato *raster* das variáveis geoambientais em quatro classes de áreas semelhantes, utilizando-se o classificador *Quantile*. Em seguida, esses arquivos *raster* foram reclassificados em valores de 1 a 4, para que posteriormente pudessem ser convertidos em arquivos vetoriais e assim fosse possível contabilizar a ocorrência de formas erosivas (amostra empírica) em cada uma de suas classes. A reclassificação foi realizada por meio da ferramenta *Reclassify*, presente no *Spatial Analyst Tools*; já a conversão das variáveis em formato *raster* para vetor foi realizada através da ferramenta *Raster to Polygon*, encontrada em *Conversion Tools*. Com isso, cada novo arquivo gerado em formato vetorial (polígonos) passou a conter em sua tabela de atributos uma coluna com valores entre 1 e 4, demonstrando a classe a que cada polígono da variável geoambiental pertence.

Em seguida, a partir de cada variável em formato vetorial foram gerados quatro novos arquivos de polígonos, cada um referente a uma classe. Esse procedimento foi realizado para que fosse possível efetuar a contabilização das formas erosivas (ocorrências observadas) em cada uma das classes. Para a obtenção dos arquivos vetoriais das classes, cada uma delas foi selecionada pela tabela de atributos de cada variável por meio da função *Select by attributes*, sendo então exportadas em novos arquivos *shapefile*. Feito isso, foi criada uma nova coluna na tabela de atributos de cada arquivo gerado, sobre a qual foi aplicada a função *Calculate Geometry* para calcular a área (em km²) de cada um dos polígonos pertencentes a determinada classe. Os valores de área foram tabulados no Excel e somados, gerando-se a área total de cada classe em km², para todas as variáveis geoambientais.

As ocorrências observadas de formas erosivas em cada classe foram encontradas extraíndo-se os pontos de formas erosivas localizados sobre os polígonos das respectivas classes. Para isso, foi utilizada a função *Clip*, contida em *Geoprocessing*, pela qual o arquivo vetorial de formas erosivas foi recortado utilizando-se como máscara os arquivos vetoriais das classes. O passo seguinte foi o cálculo da área percentual ocupada pelas classes, por meio de regra de três simples, procedimento necessário para que fosse possível se obter a Ocorrência Esperada (O_E) de formas erosivas. A O_E diz respeito a simulação da distribuição das formas

erosivas nas classes considerando apenas as áreas ocupadas por estas e desconsiderando as influências das variáveis geoambientais, ou seja, seguindo uma distribuição normal. Para a obtenção da O_E de cada classe foi calculado o produto da área percentual de determinada classe e o número total de formas erosivas mapeadas no parque dividido por 100, como demonstrado na equação abaixo:

$$O_E = \frac{Ac\% \times n}{100} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Onde: O_E : ocorrência observada

Ac%: área percentual de uma classe

n: número total de formas erosivas

Os dados referentes a área absoluta e relativa das classes de cada variável geoambiental, bem como as ocorrências observadas e esperadas são apresentados nas tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos da variável Declividade

Parâmetros estatísticos	Classes de Declividade			
	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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos da variável Índice de Vegetação

Parâmetros estatísticos	Classes de 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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos da variável Densidade de Vias de Circulação

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Vias de Circulação			
	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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos da variável Densidade de Lineamentos Estruturais

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Lineamentos Estruturais			
	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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos da variável Densidade de Drenagem

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Drenagem			
	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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Com os valores de ocorrências observadas e esperadas foi possível calcular as frequências observadas e esperadas de cada classe. A frequência observada (F_O), caracterizada como a razão entre o número de feições erosivas contido em cada classe e o número total de feições erosivas mapeadas no parque, representa a hipótese H_I , ou seja, a distribuição das formas erosivas no parque é influenciada por fatores geoambientais, visto que são considerados os valores empíricos de distribuição das feições nas classes. Já a frequência esperada (F_E) equivale à razão entre a ocorrência esperada e o número total de feições erosivas no parque, representando a hipótese nula (H_0), a qual considera uma distribuição normal dos dados amostrais (a distribuição está relacionada unicamente à área das classes), demonstrando que as variáveis geoambientais não exercem influência sobre a ocorrência das feições erosivas mapeadas. Desse modo, quanto maior for a diferença entre os processos mapeados

empiricamente e os processos esperados, em cada classe, maior será a influência exercida por determinada variável ambiental na distribuição espacial das feições erosivas.

O teste Kolmogorov-Smirnov considera as frequências observadas e esperadas de maneira cumulativa. Sendo assim, foi necessário calcular as frequências acumuladas observadas e as frequências acumuladas esperadas das classes, por meio da soma do valor de determinada classe com os valores das classes anteriores. Em seguida, foram calculadas as diferenças modulares (D) entre as frequências acumuladas observadas e esperadas para cada classe:

$$D = |F_{AO} - F_{AE}| \quad [\text{Eq. 7}]$$

Onde: D : diferença entre frequência acumulada observada e frequência acumulada esperada

F_{AO} : frequência acumulada observada

F_{AE} : frequência acumulada esperada

A aplicação do teste KS compreende comparar o maior valor encontrado para D (que é chamado de D máximo – $D_{máx}$), com o valor crítico de D (GAROFALO, 2013). Os valores críticos de D para amostras que contenham mais de 35 indivíduos, a um nível de significância de 95% ($\alpha=0,05$), devem ser obtidos por meio da equação a seguir:

$$D_{cr} (\alpha=0,05) = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad [\text{Eq. 8}]$$

Onde: $D_{cr} (\alpha=0,05)$: valor crítico de D a um nível de significância de $\alpha=0,05$

n : total de indivíduos amostrais

Ao aplicar a equação foi encontrado o valor crítico de D igual a 0,1022. Esse valor deve ser comparado com a maior diferença modular entre frequências acumuladas observadas e esperadas (o valor máximo de D). Realizando a comparação dos valores de $D_{máx}$ e D_{cr} para cada variável geoambiental, com o intuito de avaliar a normalidade das distribuições, há dois cenários possíveis:

- a) Se $D_{máx} \geq D_{cr}$, aceita-se a hipótese H_1 e rejeita-se a hipótese nula H_0 . Este resultado evidencia que a variável exerce influência considerável na distribuição dos processos erosivos (distribuição não-normal).
- b) Se $D_{máx} < D_{cr}$, rejeita-se a hipótese H_1 aceita-se a hipótese nula H_0 . Neste cenário a distribuição dos processos erosivos ocorre de maneira semelhante dentro das classes de uma variável (distribuição normal). Deste modo, o teste indica baixa influência da variável em relação à distribuição dos processos.

Os resultados da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov são demonstrados nas tabelas 9, 10, 11, 12 e 13 (os valores máximos de D estão destacados em negrito).

Tabela 9 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Declividade

Parâmetros estatísticos	Classes de Declividade			
	0 - 11,38	11,39 - 16,77	16,78 - 23,07	23,08 - 76,40
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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 10 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Índice de Vegetação

Parâmetros estatísticos	Classes de NDVI			
	0,230 - 0,551	0,552 - 0,653	0,654 - 0,768	0,769 - 0,896
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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 11 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Vias de Circulação

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Vias de Circulação			
	0 - 1,052	1,053 - 1,908	1,909 - 2,985	2,986 - 6,240
Frequência observada	0,1129	0,1694	0,2542	0,4632
Frequência esperada	0,2485	0,2502	0,2497	0,2509

(continua)

Tabela 11 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Vias de Circulação

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Vias de Circulação			
	0 - 1,052	1,053 - 1,908	1,909 - 2,985	2,986 - 6,240
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

(conclusão)

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 12 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Lineamentos Estruturais

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Lineamentos Estruturais			
	0 - 0,313	0,314 - 0,542	0,543 - 0,865	0,866 - 2,163
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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Tabela 13 – Resultado da aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov a variável Densidade de Drenagem

Parâmetros estatísticos	Classes de Densidade de Drenagem			
	0,091 - 0,996	0,997 - 1,402	1,403 - 1,865	1,866 - 3,048
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

Fonte: Organizado pelo Autor (2021)

Quanto maior o valor de $D_{máx}$ em relação ao D_{cr} , maior é a concentração de processos erosivos em determinada classe, sendo assim, maior é a influência exercida pela variável geoambiental à ocorrência de processos. Por outro lado, valores de $D_{máx}$ próximos ou inferiores ao seu D_{cr} demonstram uma pequena influência da variável na distribuição destes processos, evidenciando que eles ocorrem mediante uma distribuição normal. Esta relação permite inferir qual a influência de cada variável geoambiental na ocorrência dos processos erosivos que foram empiricamente mapeados e, deste modo, os valores de $D_{máx}$ podem ser empregados como ponderadores das variáveis geoambientais na aplicação do modelo de fragilidade.

5.5.3 Considerações acerca dos pesos obtidos

Os valores de $D_{máx}$ que foram obtidos para cada variável geoambiental, em ordem decrescente, são os seguintes: NDVI: 0,3445; Densidade de vias de circulação: 0,2162; Densidade de drenagem: 0,1327; Densidade de lineamentos estruturais: 0,0624 e Declividade: 0,0417. Logo, as variáveis NDVI, Densidade de vias de circulação e Densidade de drenagem apresentaram valores de $D_{máx}$ superiores ao D_{cr} (0,1022), indicando que estas variáveis exercem influência considerável sobre a ocorrência de processos erosivos no parque.

É importante ressaltar que mesmo as variáveis que apresentaram valores de $D_{máx}$ inferior ao D_{cr} exercem alguma influência, mesmo que baixa, sobre a ocorrência de processos erosivos. Por isso, a variável Declividade foi mantida no modelo, porém, ela exercerá uma influência significativamente inferior às outras.

Por outro lado, optou-se pela exclusão da variável Densidade de lineamentos estruturais no modelo, pois a maior concentração de pontos de erosão ocorreu nas duas classes de menor adensamento de lineamentos. Esperava-se, ao contrário, que a maior quantidade de processos estivesse concentrada nas classes de maior densidade de lineamentos conforme demonstraram os estudos de Garófalo e Ferreira (2015) e Messias e Ferreira (2017).

A exclusão da variável se justifica pois o mapa de lineamentos estruturais gerado no PESBE não obteve resultados satisfatórios para o modelo de fragilidade. Durante o mapeamento visual dos lineamentos sobre a rede de drenagem do parque, não foi possível verificar a intersecção de lineamentos e tampouco associa-los as principais direções estruturais de caráter regional no parque. Isto se explica pelo fato de a área do parque ser pequena; pelo seu limite ser fortemente recortado e também devido escala de trabalho adotada. Embora os lineamentos tenham sido mapeados considerando uma área no entorno de 3 km, grande parte dos rios alinhados estruturalmente são canais de 1ª ordem que mostram maior influência do declive das vertentes escarpadas e pouco controle estrutural.

5.5.4 Normalização dos valores de $D_{máx}$ e geração de pesos

Devido ao fato de os valores de $D_{máx}$ não seguirem uma escala específica, foi realizado o reescalonamento dos valores. Este procedimento visa determinar os pesos que serão aplicados no modelo de fragilidade para cada variável geoambiental. Como o referido modelo é proposto com a utilização de mapas em escala *Fuzzy*, os valores dos pesos serão obtidos em uma escala

que varia de 0 a 1. Este procedimento foi realizado dividindo-se o $D_{máx}$ de cada variável pela soma dos $D_{máx}$ de todas as variáveis (Eq. X).

$$PV1 = \frac{D_{máx1}}{D_{máx1} + D_{máx2} + \dots + D_{máx n}} \quad [\text{Eq.9}]$$

Onde: PVI = Peso que será obtido para a variável 1

$D_{máx1}$ = D máximo da variável 1

$D_{máx2}$ = D máximo da variável 2

$D_{máx n}$ = D máximo de n variáveis que forem inseridas no modelo.

Os pesos foram calculados apenas para as variáveis definidas como influenciadoras na ocorrência de processos erosivos no PESBE, ou seja, NDVI, Densidade de vias, Densidade de drenagem e Declividade (Tabela 14).

Tabela 14 – Valores de peso 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 pelo Autor (2021)

5.6 PADRONIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS UTILIZANDO A FUNÇÃO FUZZY

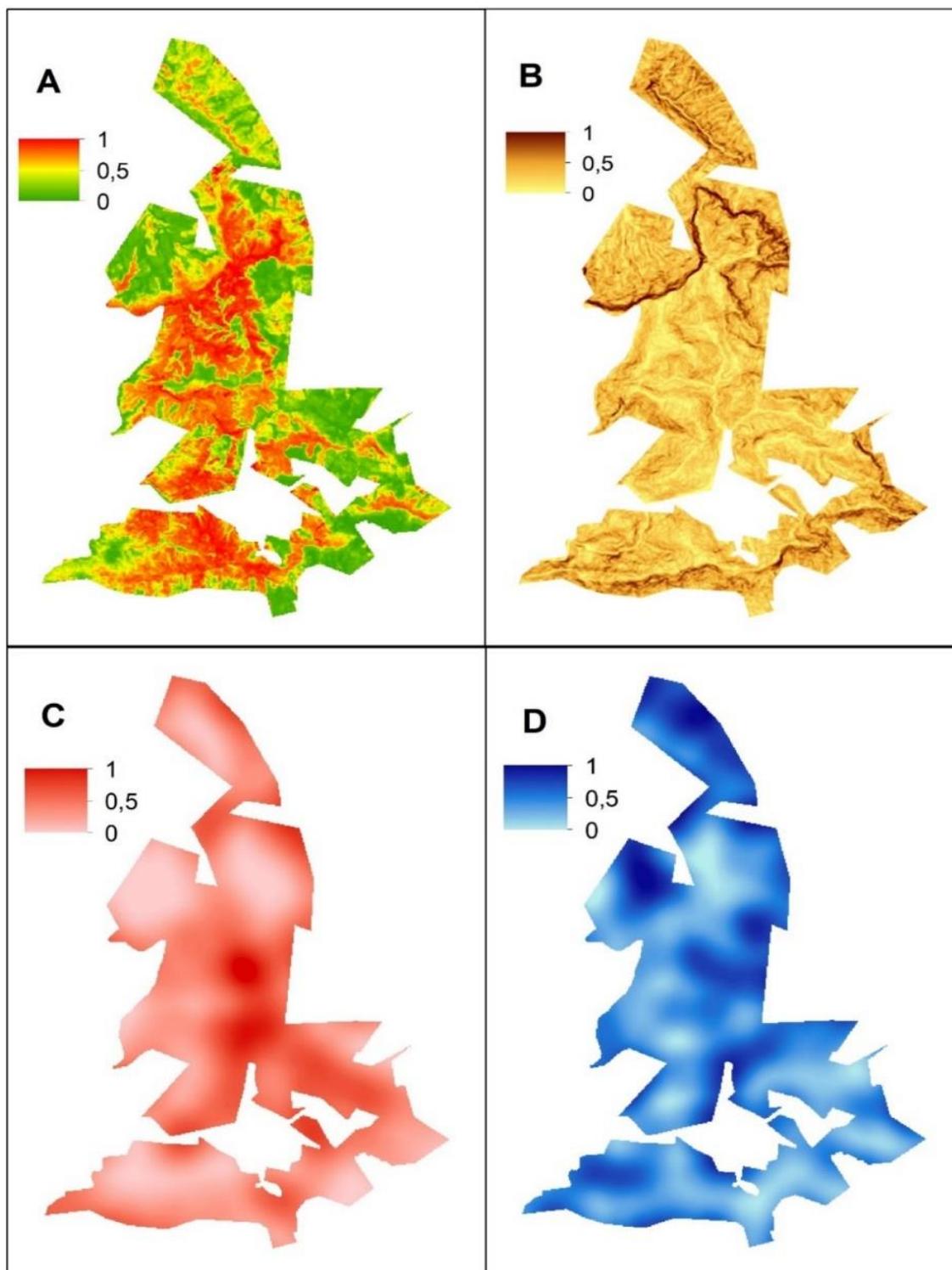
Para que as variáveis geoambientais em formato *raster* possam ser analisadas em SIG de maneira integrada, é necessário que apresentem valores de *pixel* em uma mesma escala de valores. Sendo assim, foi adotada a função *Fuzzy* para realizar a padronização das escalas das variáveis geoambientais (Figura 20), uma vez que a lógica *Fuzzy* transforma os valores originais das variáveis em uma nova escala entre [0 – 1].

Além disto, a metodologia utilizada propõe a criação de um modelo de fragilidade ambiental sem rigidez de classes. Na lógica *Fuzzy* “os limites espaciais entre duas ou mais classes são

representados por zonas transitórias e os valores da variável são distribuídos de forma contínua” (FERREIRA, 2014, p. 286). Esse processo decisório considera a probabilidade que um elemento (pixel) tem de pertencer à cada uma das classes, ou a sua afinidade com as mesmas. Logo, por menor que seja a afinidade de um pixel com determinada classe, ainda existe possibilidade de ele pertencer a ela, o que não ocorre no processo decisório *booleano*, no qual as classes apresentam linhas limítrofes rígidas, considerando apenas a possibilidade de o pixel pertencer ou não a determinada classe (FERREIRA, 2014).

A lógica *Fuzzy* foi aplicada às variáveis geoambientais por meio da função *Fuzzy Membership*, contida no *Spatial Analyst Tools*, do ArcMap 10.5. A função de pertinência adotada foi a Linear (Figura 21), a qual calcula a associação com base na transformação linear dos valores de pixel do *raster*, atribuindo 0 para o valor mínimo e 1 para o valor máximo (ESRI, 2016). Ressalta-se que para a variável NDVI essa lógica foi inversa, adotando-se 1 para o valor mínimo encontrado no *raster* e 0 para o máximo, pois, de acordo com a literatura especializada, as áreas que apresentam uma cobertura vegetal menos densa (menor NDVI) tendem a ser mais susceptíveis ao desenvolvimento de processos erosivos.

Figura 22 – Variáveis geoambientais reescaladas através da lógica *Fuzzy*.



Fonte: Do Autor (2021)

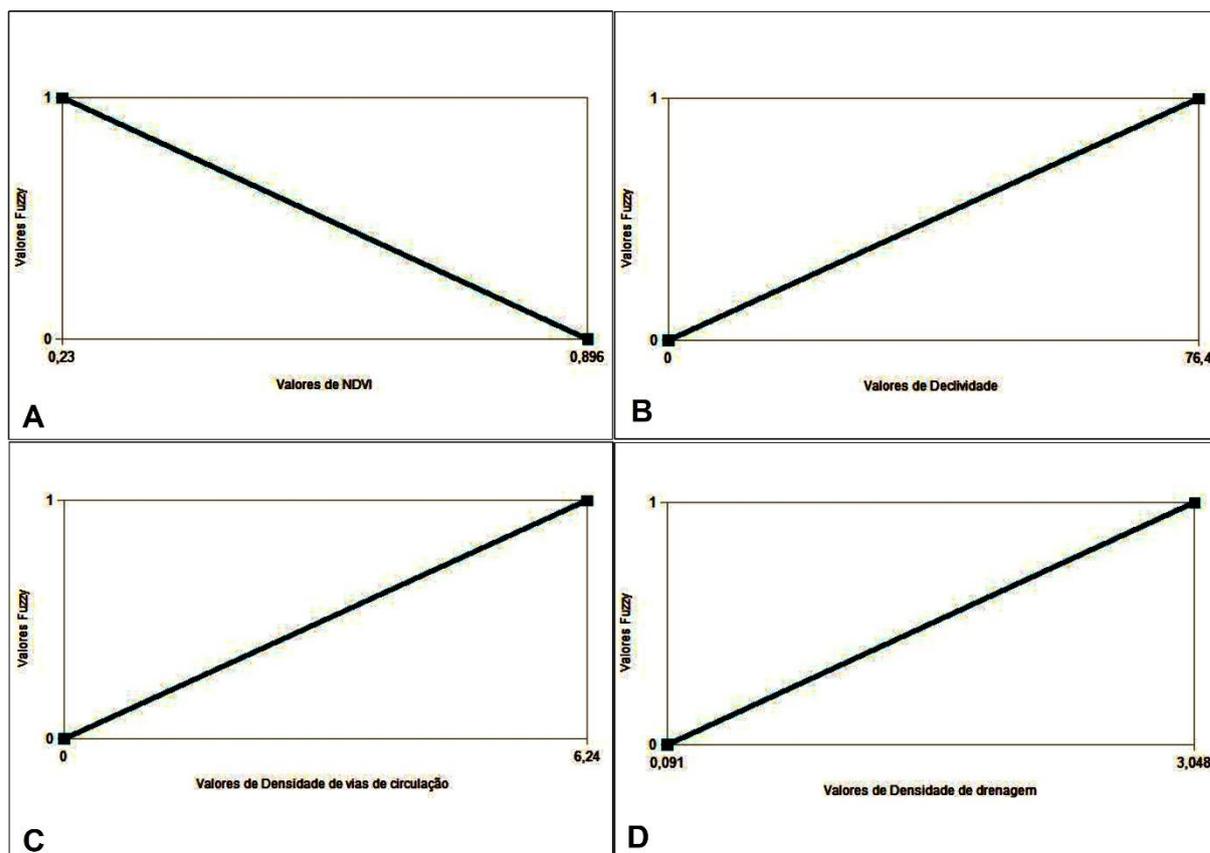
Legenda: A: NDVI

B: Declividade

C: Densidade de Vias de Circulação

D: Densidade de Drenagem

Figura 23 – Gráficos de função de pertinência.



Fonte: Do Autor (2021)

Legenda: A: NDVI

B: Declividade

C: Densidade de Vias de Circulação

D: Densidade de Drenagem

5.7 ÁLGEBRA DE MAPAS PARA OBTENÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

Para obtenção do mapa principal de fragilidade ambiental a processos erosivos, realizou-se a álgebra dos mapas das variáveis geoambientais influenciadoras (com valores de pixel entre 0 e 1), ponderando-as conforme a influência indicada no teste KS. A álgebra dos mapas foi realizada por meio de *Média Ponderada*. Sendo assim, foi realizada a soma dos produtos das variáveis geoambientais em formato *raster* por seus respectivos pesos, dividido pela soma dos pesos (Eq, 10), gerando então um *raster* contendo valores contínuos de fragilidade (em escala *fuzzy*). Esse procedimento foi realizado pela ferramenta *Raster Calculator*, presente no *Spatial Analyst Tools* do ArcMap 10.5

$$FA = \frac{[(V1*P1)+(V2*P2)...+(Vn*Pn)]}{P1+P2...+Pn} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Onde: FA = Fragilidade Ambiental

VI = Arquivo *raster* da variável 1

P1 = Peso da variável 1

V2 = Arquivo *raster* da variável 2

P2 = Peso da variável 2

Vn = Arquivo *raster* de n variáveis que forem inseridas no modelo

Pn = Peso de n variáveis que forem inseridas no modelo

Além do mapa principal de fragilidade ambiental, que tem seus valores apresentados de forma contínua, optou-se por criar uma proposta de zoneamento da FA, por meio da elaboração de um mapa complementar que apresenta zonas de fragilidade (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta), visando possibilitar a utilização de maneira mais prática do mapeamento da fragilidade ambiental como subsídio à gestão territorial e ao planejamento ambiental do PESBE. Para isso, os valores de FA em escala *fuzzy* foram agrupados em 5 classes, por meio do classificador de intervalos Desvio Padrão. De acordo com Ferreira (2014), esse classificador é o que melhor considerada a distribuição estatística dos valores de uma variável mapeada. Inicialmente é calculada a média (\bar{X}) e o desvio padrão (σ) da distribuição, e posteriormente o classificador

[...] segmenta a série de dados em intervalos de classe, cujos limites são proporções do desvio padrão dos valores da variável. Cada variável é posicionada em relação à distância até a média de toda a série de dados. As classes posicionadas abaixo da média têm limites medidos em valores negativos de desvio ($-\sigma$) e as classes posicionadas acima da média tem limites medidos em valores positivos de desvio ($+\sigma$) (FERREIRA, 2014, p. 262).

Considerou-se que, para a análise de fragilidade no PESBE, os valores que ficam em torno da média, ou seja, entre $-0,5$ a $0,5 \sigma$. A classe de fragilidade baixa agrupa os valores dentro do intervalo de $-0,5$ a $-1,5 \sigma$, e muito baixa aqueles abaixo de $-0,5 \sigma$. Por outro lado, a fragilidade alta é aquela em que os valores estão entre $0,5$ e $1,5 \sigma$ e muito alta acima de $1,5 \sigma$.

5.8 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS PARA A ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ESPACIAL ENTRE O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL E A OCORRÊNCIA DE FORMAS EROSIVAS NO PESBE

De acordo com Ferreira (2014, p. 93), “o grau de relação entre duas variáveis pode ser estimado a partir de coeficientes numéricos que nos indicam se há relação entre ambas e qual a

intensidade e significância desta relação”. O autor salienta que, na ciência geográfica, um dos indicadores utilizados para analisar o grau de associação entre duas variáveis é o coeficiente de correlação de Pearson (r), adequado para se avaliar a dependência entre variáveis expressas em números reais.

Nesse sentido, além de se realizar uma análise visual dos pontos de erosão sobrepostos ao mapa de fragilidade ambiental (FA), utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson para verificar o grau de associação entre a fragilidade ambiental mapeada e a ocorrência de formas erosivas no PESBE. Deste modo, foi possível averiguar se o mapeamento de FA realizado é condizente com a distribuição espacial dos pontos de erosões.

Inicialmente foram atribuídas 10 classes ao mapa de fragilidade ambiental, por meio de intervalos iguais, no ArcMap 10.5. Em seguida, foi calculado o valor médio de fragilidade e a área de cada classe. Na sequência foi calculada a densidade de formas erosivas ao longo das classes, por meio de planilha no software BrOffice Calc (MESSIAS; FERREIRA, 2019; FERREIRA; MESSIAS, 2021).

Foi determinado o grau de associação entre os valores médios das classes de fragilidade ambiental (variável X) e de densidade de formas erosivas referentes a cada classe (variável Y) por meio da geração de um diagrama de dispersão no BrOffice Calc. Foi posteriormente inserida a linha de tendência e então obtido o valor de r .

O passo seguinte foi a realização do teste *t de Student*, visando verificar o nível de significância de r (FERREIRA, 2014). Para isso, primeiramente foram formuladas duas hipóteses (H_0 e H_1), onde H_0 demonstra que o valor de r ocorreu por acaso e H_1 demonstra que o coeficiente de correlação é maior do que se poderia esperar, caso ocorresse por acaso (FERREIRA, 2014). Considerando 8 graus de liberdade ($gl = n-2$), foi possível se obter o valor t calculado, por meio da seguinte equação:

$$t = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{(1-r^2)}} \quad [\text{Eq. 11}]$$

Onde: t = valor da distribuição t de Student

r = coeficiente de *Pearson*

n = número de amostras

Feito isso, o valor t calculado foi confrontado à valores críticos tabelados da distribuição t *Student*. Com base nos graus de liberdade, obteve-se o valor imediatamente inferior ao t calculado e conseqüentemente o nível de significância (FERREIRA, 2014).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA DO PARQUE ESTADUAL SERRA DA BOA ESPERANÇA (PESBE): EROÇÃO, COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIPSOMETRIA

As variáveis propostas para o mapeamento da fragilidade ambiental permitiram a construção dos mapas de declividade (DEC); índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI); densidade de lineamentos estruturais (DLE); densidade de vias de circulação (DVC); probabilidade de ocorrência de chuvas intensas (POCI) e densidade de drenagem (Dd).

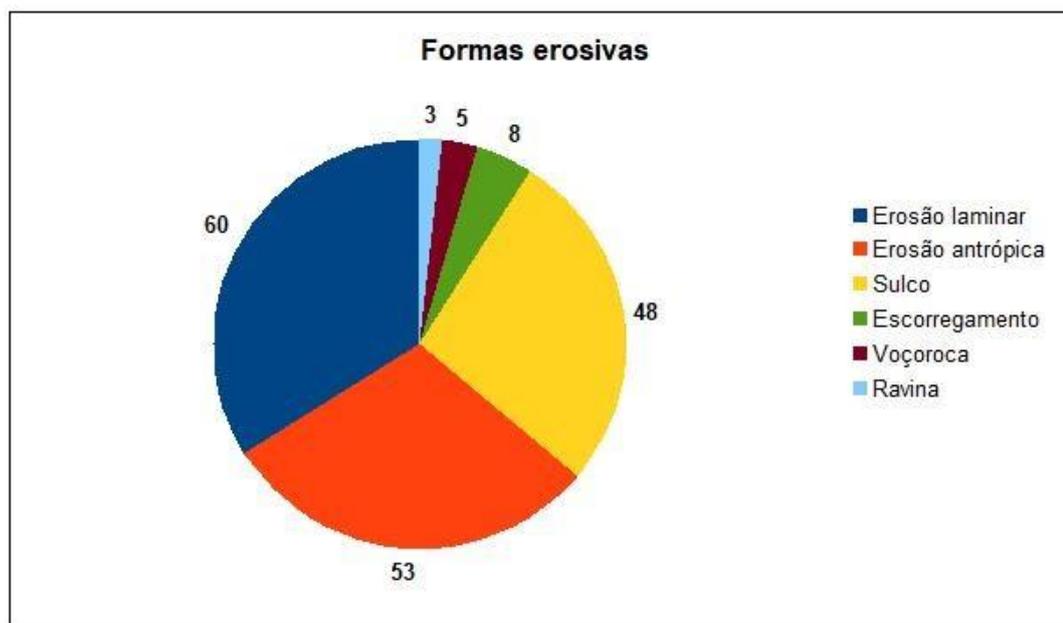
Além destes, os mapas hipsométrico e geomorfológico são instrumentos técnicos importantes que auxiliam na discussão das características geoambientais da área de estudo. De acordo com Tricart (1965) o mapa geomorfológico deve apresentar análises morfográficas (geometrias das formas), morfométricas (dados obtidos pela carta topográfica), morfogenéticas (natureza do material, formações superficiais e substrato) e morfocronológicas (formas atuais e formas herdadas de processo pretéritos). O mapa geomorfológico elaborado no âmbito deste trabalho se baseou em análises morfográficas (geometria das formas) e morfométricas (dados obtidos pela carta topográfica).

6.1.1 Erosão e Geomorfologia

Os processos erosivos são condicionados e regulados pelas componentes da natureza - relevo, solo, clima, rocha, hidrografia e características da vegetação - que integram e definem o ambiente. Estes componentes se modificam em função da materialização da atividade humana sobre o relevo, o qual, segundo Ross (2006, p. 9) “sustenta os arranjos espaciais produzidos pela humanidade”. Embora os processos erosivos possam ocorrer em função da estrutura natural do ambiente, as intervenções humanas podem gerar formas erosivas e intensificar os processos, causando a fragilidade dos ambientes.

Os processos erosivos identificados no PESBE, totalizam 177 processos, sendo 60 erosões laminares, 53 erosões antrópicas (causadas por motociclismo *Off Road*), 48 sulcos, 8 escorregamentos, 3 ravinas e 5 voçorocas (Figura 24).

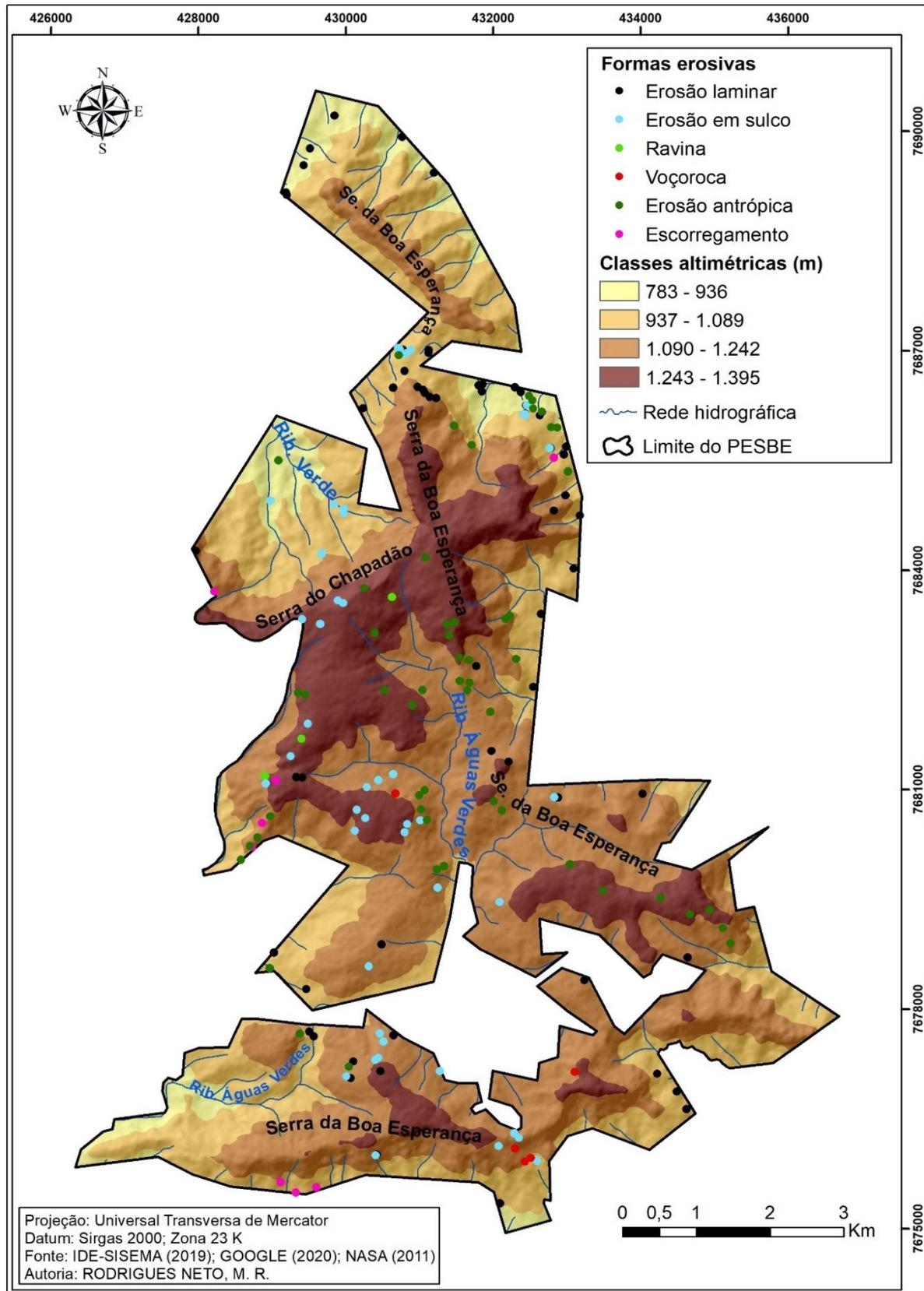
Figura 24 – Quantificação das formas erosivas mapeadas na área de estudo



Fonte: Do Autor (2021)

A erosão presente de forma mais abundante no PESBE é a laminar, distribuída em uma vasta área do parque num total de 60 ocorrências (Figura 25). A erosão laminar, difusa ou em lençol é definida por Guerra (1995) como o escoamento superficial que se distribui de forma dispersa sobre as vertentes sem, contudo, se concentrar em canais. Nascimento *et al.* (2016) afirmam que a remoção lenta e contínua da camada superficial do solo, gera diminuição da produtividade agrícola. Além da perda desta camada, mais rica em nutrientes, outra consequência é a grande produção de sedimentos que são levados aos corpos hídricos mais próximos, assoreando-os. No PESBE, estas ocorrem nas bordas dos setores norte e nordeste, trechos estes que delimitam o parque das propriedades agrícolas existentes, demonstrando conflitos de usos da terra.

Figura 25 – Distribuição espacial das formas erosivas sobre o mapa hipsométrico da área de estudo



Elaboração: Do Autor (2021)

A atividade de motociclismo *Off Road* promove a compactação do solo em trilhas, além da formação de feições lineares no terreno (erosões antrópicas), as quais contemplam exposição e compactação do solo e incisões superficiais provocadas pelos pneus das motos, tendo ocorrência de 53 feições no PESBE. Figueiredo *et al.* (2010), estudando a compactação do solo como indicador pedogeomorfológico para erosão em trilhas de Unidades de Conservação analisaram diversos pontos amostrais ao longo de uma trilha no Parque Nacional da Serra do Cipó- MG, e concluíram que o leito da trilha sofreu mais danos relacionados a erosão do que as áreas ao redor, estimulando os transeuntes a abrirem novas trilhas nas áreas adjacentes, ampliando assim os efeitos da compactação do solo e da erosão.

No caso do PESBE, as erosões antrópicas (Figura 25) estão localizadas principalmente nos setores centro-leste e nordeste, onde estão mais concentradas, ocorrendo também de forma significativa no setor sudeste, com destaque para os processos localizados sobre a Serra da Boa Esperança, acompanhando a direção NW-SE; e no setor oeste, em um trecho de uma trilha consideravelmente extensa.

Os sulcos erosivos (ligados a ação da água) totalizam 48 ocorrências, se distribuem principalmente nos setores centro-oeste, sul e noroeste do parque (Figura 25), estando neste último setor relacionados aos canais tributários do Ribeirão Verde. Grande parte dos sulcos que ocorrem no PESBE tem início nos canais de 1ª ordem, associados a bacias de drenagem cujas cabeceiras apresentam declives acentuados e com pouca vegetação ciliar. A retomada erosiva remontante é reativada em função da pouca preservação destas cabeceiras.

Os movimentos de massa mapeados no PESBE são do tipo escorregamentos e se apresentam como cicatrizes antigas e atuais. Há 08 ocorrências, estando a maioria deles localizados nos setores sul, mais especificamente nas escarpas da Serra da Boa Esperança, e oeste, nas proximidades do limite do parque (Figura 25). Importante ressaltar que por meio da interpretação visual de imagens orbitais, foram observados sinais de que algumas destas feições possivelmente se encontram em processo de regeneração natural, visto que foi constatado a presença de vegetação no interior e na borda das mesmas.

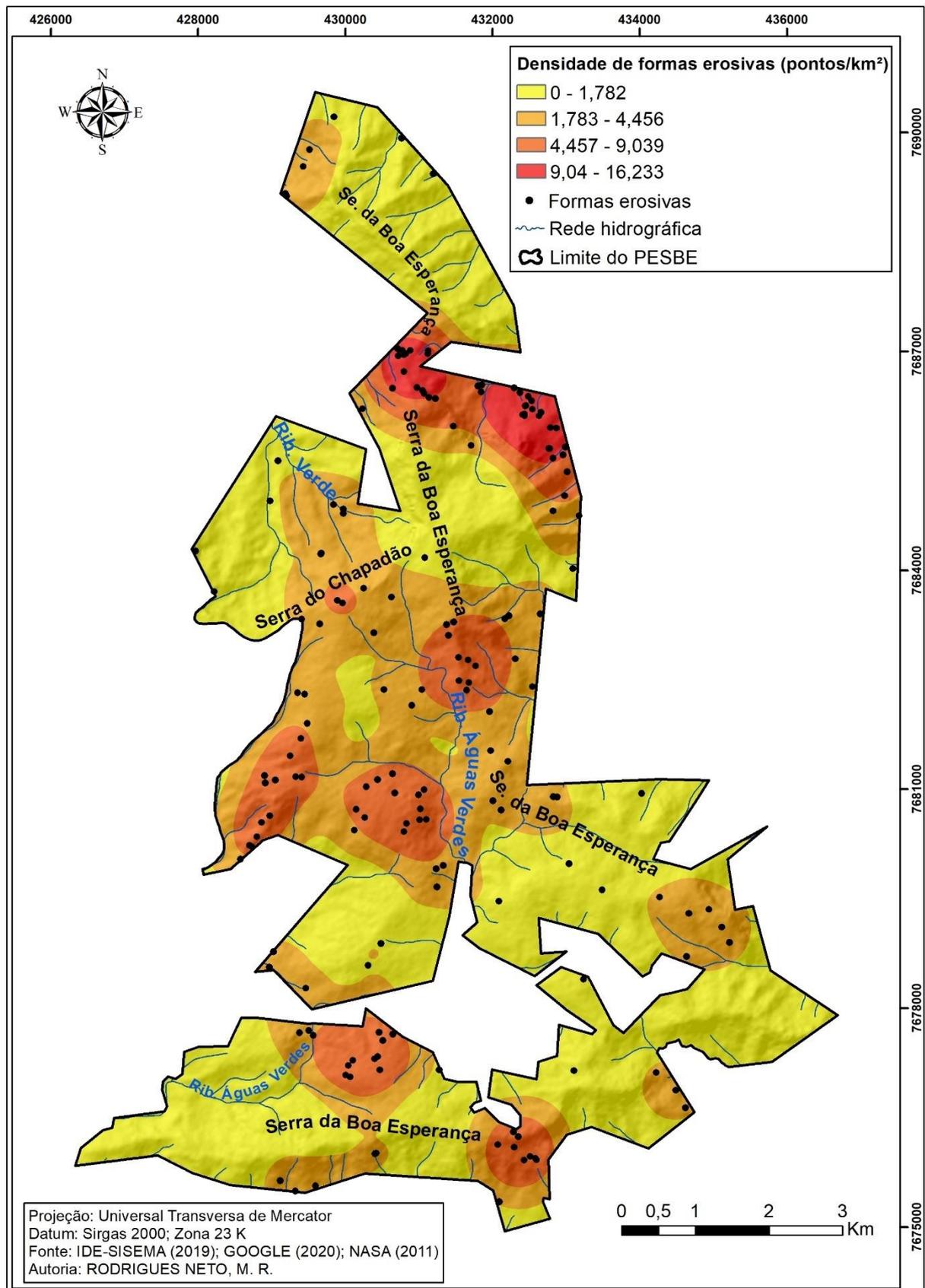
As ravinas totalizam apenas 3 ocorrências (Figura 25), sendo duas no setor oeste e uma no setor central, nas proximidades da nascente do Ribeirão Águas Verde. Da mesma maneira, as voçorocas também possuem baixa ocorrência no PESBE, uma vez que foram identificadas apenas 5 destas feições (Figura 25), estando três ativas e duas em processo de regeneração natural, apresentando-se pouco degradadas. As voçorocas ativas foram visualizadas no setor sul do parque, na face sul da Serra da Boa Esperança, localizadas próximas entre si. A identificação

de bordas ativas nestas voçorocas demonstra um processo de erosão regressiva a montante, o que juntamente com a presença de solo exposto sugere deslizamentos destas bordas e assoreamento nos fundos da voçoroca. Já no que concerne as voçorocas inativas, uma localiza-se no setor sul, na vertente norte da Serra da Boa Esperança e outra encontra-se no setor central da UC.

Como enfatizado por Guerra (2020), a erosão hídrica é dinâmica e evolutiva, iniciando com a erosão laminar, devido à ação do escoamento difuso, que ao se tornar concentrado provoca os sulcos erosivos, que por sua vez pode evoluir para ravinas e, em um cenário mais crítico, culminar nas voçorocas. No PESBE, a baixa ocorrência de ravinas e voçorocas e, por outro lado, a alta ocorrência de erosões laminares e sulcos erosivos, evidencia que características do meio físico na UC, como a cobertura vegetal e a litoestrutura não são elementos dinamizadores de processos erosivos mais graves, porém, caso o equilíbrio sistêmico seja perturbado, há um grande potencial para o aumento destes processos, pois a grande presença de erosões laminares e sulcos evidencia a ação erosiva do escoamento superficial em diversas áreas do parque.

O mapa de densidade de formas erosivas, expresso em pontos/km² (Figura 26), demonstra que os menores valores de densidade (0 a 1,782) são encontrados em uma grande porção do parque, estando localizados principalmente nos setores sul, sudeste, sudoeste, noroeste, centro-norte e norte do parque. Os valores intermediários de densidade (1,783 a 9,039) são encontrados majoritariamente nos setores central, sul e nordeste, sendo também observados em manchas menores em outros setores. Já a classe de maior densidade (9,04 a 16,233) pode ser observada nas proximidades do limite do parque, no setor nordeste e em parte do setor norte, onde é observado um grande número de formas erosivas. As duas últimas classes denotam uma maior densidade de processos, indicando uma maior aproximação da ocorrência entre eles.

Figura 26 - Mapa de densidade de formas erosivas da área de estudo



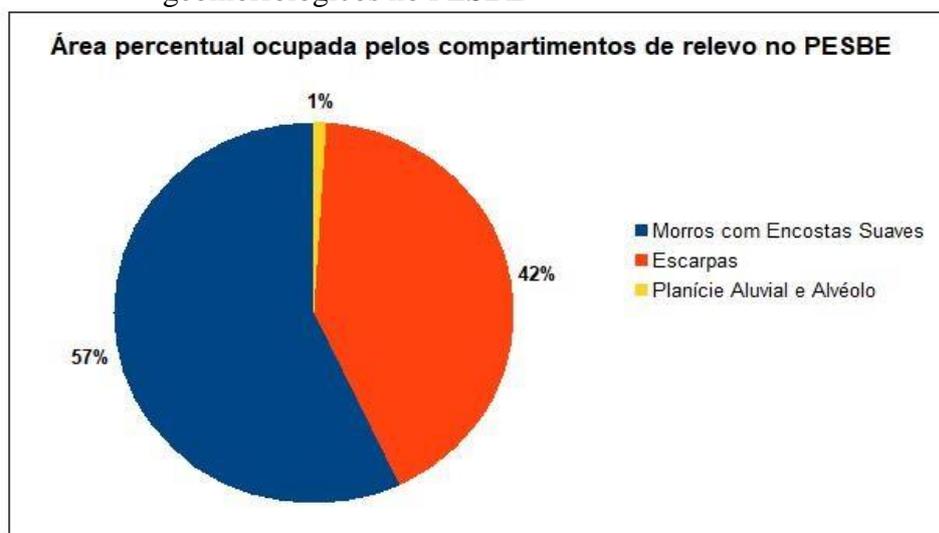
Fonte: Do Autor (2021)

6.1.2 Compartimentação Geomorfológica e Hipsometria

A Serra da Boa Esperança, principal unidade fisiográfica do PESBE, se constitui em um sistema montanhoso cuja extensão local integra, num contexto regional, o Domínio Morfoestrutural dos Remanescentes de Cadeias Dobradas, proposto por Gatto *et al.* (1983). Este domínio é dividido em dois subdomínios: Região dos Planaltos da Canastra e Região dos Planaltos do Rio Grande. A área do PESBE insere-se neste último subdomínio, sendo a Serra da Boa Esperança, um alto topográfico e estrutural cujo embasamento quartzítico predominante (Sequência Serra da Boa Esperança 2), se distribui em grande parte na UC, nas faixas altimétricas mais elevadas (1.143 a 1.395 m), áreas de topos agudos e tabulares da Serra da Boa Esperança. Permite um alinhamento de cristas com orientação NNW – ENE ao norte e E-W ao sul, que afetam diversas unidades lito-estratigráficas como Granitos e Ortognaisses; Xisto Costas; Sequência Serra da Boa Esperança 1 (unidade pelítica associada a filitos sericíticos), localizados em faixas altimétricas mais baixas, entre 783 a 1.143m; e Formação Samburá.

A proporção em área percentual dos compartimentos geomorfológicos que ocorrem no PESBE, pode ser verificada na Figura 27. Esses compartimentos de relevo foram identificados por meio da elaboração do mapa geomorfológico (Figura 28). Com base nos índices de dissecação do relevo e amplitude topográfica, foi realizada a compartimentação do relevo em unidades de padrões de formas semelhantes (FERREIRA, *et al.*, 2019), obtendo-se os seguintes compartimentos: *Morros com Encostas Suaves*, *Escarpas* e *Planícies Aluviais e Alvéolos*.

Figura 27 - Área percentual ocupada pelos compartimentos geomorfológicos no PESBE



Fonte: Do Autor (2021)

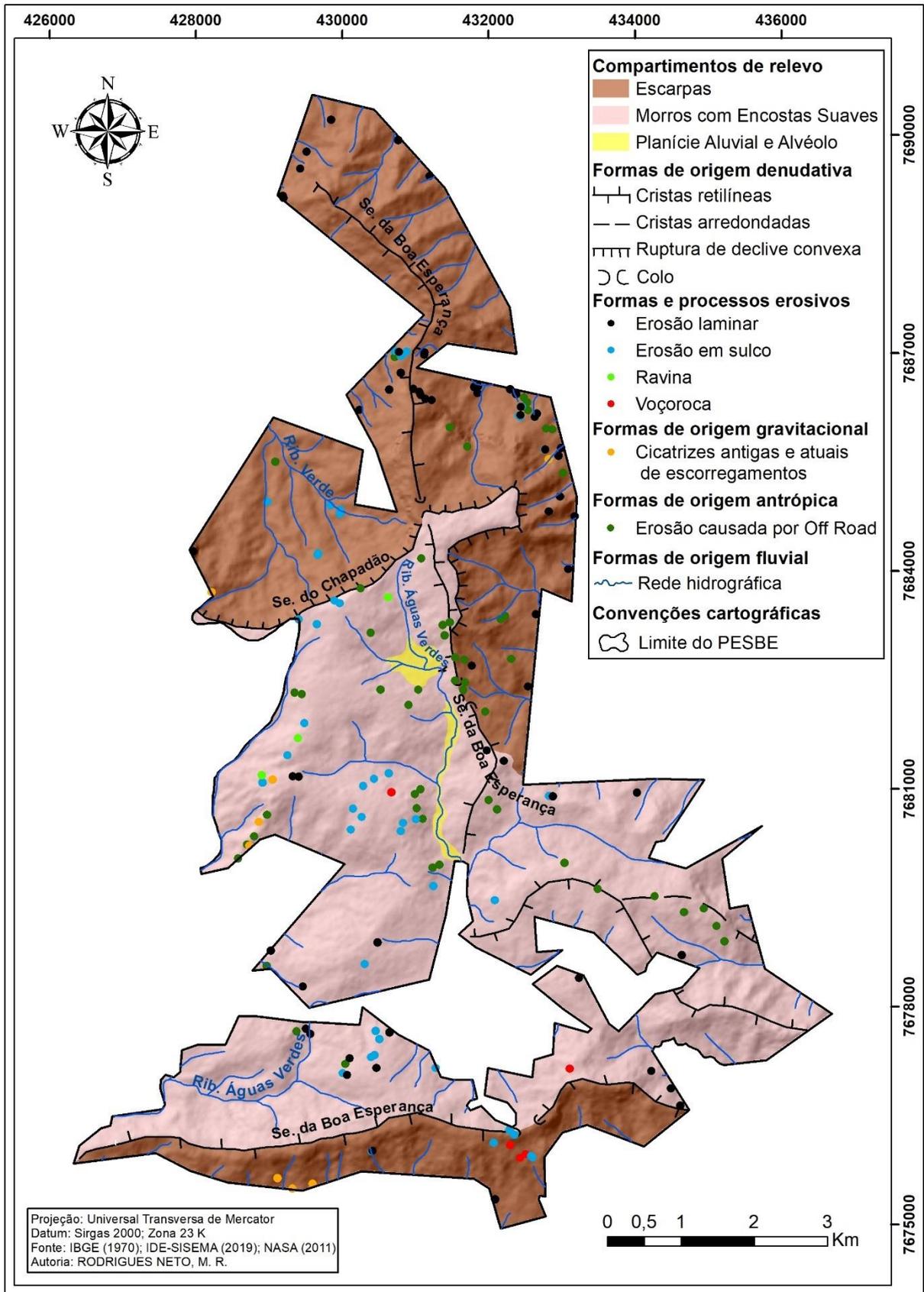
Para a análise geomorfológica do PESBE, os mapas hipsométrico e geomorfológico (Figuras 25 e 28, respectivamente) foram fundamentais para o reconhecimento e compreensão da fisiografia do parque, além de permitir a associação entre formas de relevo presentes na área e as classes altimétricas. As altitudes do parque variam entre 783 a 1.395 metros, e a amplitude altimétrica da UC é de 612 m.

O diagrama da proporção em área ocupada por cada compartimento geomorfológico no PESBE (Figura 27) mostra que o compartimento *Morros com Encostas Suaves* é predominante no parque, com área de 33,56 km², correspondendo a 57 % da área total da UC. Tem maior expressão areal no setor central, ocorrendo também nos setores sudeste, sudoeste e sul, neste último representando a face norte da Serra da Boa Esperança.

Neste compartimento, a ocorrência e distribuição das classes altimétricas variam entre 783 e 1.395 m, cujos valores mais baixos, ao sul, estão vinculados a bacia do Ribeirão Águas Verdes, e valores mais altos, são encontrados nos topos tabulares ou levemente convexos dos morros localizados no setor centro oeste, em áreas denominadas de cimeira, entre 1.243 a 1.395m, além das cristas retilíneas da Serra da Boa Esperança. Neste compartimento se desenvolve grande parte do sistema hidrográfico da UC, sendo o Ribeirão Águas Verdes e seus tributários os principais elementos que dissecam os relevos de morros e vertentes declivosas. É neste compartimento que se localizam grande parte dos sulcos erosivos e das erosões antrópicas, especialmente nas áreas de cimeira.

Além da Serra da Boa Esperança, o reverso da Serra do Chapadão se localiza neste compartimento, e está inserida também nos limites do PESBE, unindo-se à primeira no setor central do parque. Com direção principal NE-SW, a Serra do Chapadão tem em sua borda uma ruptura de declive convexa que delimita uma face escarpada voltada para NW, onde se abriga o trecho montante da bacia do Ribeirão Verde, canal que se torna de 3^a. ordem próximo ao limite do parque. Dentro dos limites do parque, a Serra da Boa Esperança encontra-se erodida pela ocorrência de um sistema hidrográfico que se desdobra em pequenas bacias de drenagem, sendo que a bacia do Ribeirão Águas Verdes atinge hierarquia de 3^a ordem no setor central do parque, com canais tributários que dissecam o compartimento de *Morros com Encostas Suaves*, desenhando na paisagem da UC um reafeiçoamento das vertentes dos morros mapeados.

Figura 28 – Mapa Geomorfológico da área de estudo



Fonte: Do Autor (2021)

Os canais de 1ª ordem da alta bacia do Ribeirão Águas Verdes têm início em cotas altimétricas mais elevadas (1.243 a 1.395m) onde se encontram as superfícies de cimeira. Estas superfícies se caracterizam pela presença de topos agudos e tabulares e são mantidas por campos rupestres que se desenvolvem em substratos quartzíticos aflorantes, e em solos pouco profundos, do tipo Litossolos. Os canais fluem para níveis mais baixos entre 783 a 1.089m, nos sopés dos escarpamentos da serra da Boa Esperança e nos sopés dos relevos do compartimento *Morros com Encostas Suaves*, conduzindo seus fluxos em direção ao nível de base regional, que é o reservatório de Furnas. Ressalta-se que o ribeirão Águas Verdes juntamente com o ribeirão Verde são os principais sistemas responsáveis, respectivamente, pelos remanescentes e festonamentos da Serra da Boa Esperança e da Serra do Chapadão.

As menores altitudes, entre 783 e 936 m, são encontradas em áreas próximas ao limite do parque, pertencentes aos setores sul, nordeste, noroeste e norte. É importante ressaltar que a delimitação do parque foi estabelecida nas áreas de topografias mais rebaixadas, em trechos do sopé da Serra da Boa Esperança, evidenciando a necessidade de preservação e conservação dos ecossistemas montanhosos do PESBE.

Altitudes intermediárias, entre 937 e 1.242 m, estão localizadas em todos os setores do parque, com exceção de algumas áreas como os vales dos baixos trechos do Ribeirão Águas Verdes e do Ribeirão Verde; nascentes do Ribeirão Águas Verdes, de uma grande área no setor central e de áreas mais próximas ao limite da UC nos setores nordeste e norte.

O compartimento *Escarpas*, ocorre em grande área, correspondendo a 42 % da área do parque, ou 24,64 km². De maneira geral, este compartimento apresenta altitudes intermediárias, variando de 937 a 1.242 metros. Estas classes altimétricas são compreensíveis, pois o compartimento *Escarpas* se constitui em um elemento morfológico que ocorre em relevos com grandes amplitudes conformando vertentes declivosas que atingem gradativamente, cotas altimétricas mais baixas até atingir o sopé das grandes serras. Este compartimento acompanha o sistema montanhoso e as vertentes das serras da Boa Esperança e Chapadão envolvendo os setores norte, nordeste, leste e sul da Serra da Boa Esperança e noroeste da Serra do Chapadão. Ressalta-se que no setor centro-norte a crista retilínea da Serra da Boa Esperança, que se encontra na classe de maior altitude, pertence ao compartimento *Escarpas*, evidenciando uma grande dissecação do relevo na área.

No setor sul, as classes altimétricas mais baixas (783 a 1.089 m) presentes no compartimento *Escarpas* são encontradas em uma área no sopé da Serra da Boa Esperança, na face escarpada sul, onde localizam-se 3 das 5 voçorocas mapeadas, além de sulcos erosivos e

cicatrizes de escorregamentos. No setor nordeste, as menores altitudes ocorrem nas proximidades da divisa do parque, onde são encontradas algumas áreas de cultivo agrícola associadas principalmente às erosões laminares e erosão antrópica. Já no setor noroeste, as baixas altitudes correspondem ao fundo de vale do Ribeirão Verde, que apresenta um perfil pouco encaixado nesta área; e por fim, no setor norte, a menor classe altimétrica é identificada nos limites do parque, em uma área onde a Serra da Boa Esperança vai se tornando suavizada até dar lugar a um relevo mais colinoso fora dos limites do parque, nas proximidades da planície do reservatório de Furnas. Tanto no setor noroeste quanto no norte do PESBE existe uma baixa ocorrência de formas erosivas, sendo identificados alguns sulcos no setor noroeste, atrelados aos tributários do Ribeirão Verde e algumas erosões laminares no setor norte.

O compartimento *Planície Aluvial e Alvéolo* é encontrado de maneira isolada no setor central da UC (Figura 28), ocupando uma área de 0,57 km², o que equivale a apenas 1% da área total do PESBE. Ao longo do canal principal do Ribeirão Águas Verdes se localiza a feição alveolar isolada, à montante da planície estreita deste rio. Esta feição em alvéolo se caracteriza como alargamentos do fundo de vale, com deposição expressiva de sedimentos intercalado por trechos de canais encaixados. É possível que os alvéolos foram formados e originados de desbarrancamentos e solapamentos pretérito das margens dos canais.

Este compartimento se insere no alto setor da bacia do Ribeirão Águas Verdes, em um relevo que possui cotas altimétricas que variam de 1.090 a 1.242 metros.

Já a planície aluvial encontra-se em cotas altimétricas mais rebaixadas, sendo caracterizada por ser estreita em relação ao alvéolo, o que evidencia que possivelmente devido a características topográficas, a área em que se formou o alvéolo favoreceu uma deposição pretérita, ao passo que a área mais a jusante promoveu maior atividade erosiva do Ribeirão Águas Verdes, ocasionando assim uma maior dissecação do relevo e impossibilitando a formação de uma planície mais larga. Não foram identificadas formas erosivas nesse compartimento.

Ressalta-se que as altitudes intermediárias são evidenciadas nos 3 compartimentos de relevo, sobretudo nos altos e médios setores das vertentes da Serra da Boa Esperança e dos morros com topos planos ou levemente arredondados situados principalmente no setor central, sudeste e sudoeste do PESBE, bem como em trechos da crista da Serra da Boa Esperança, um pouco mais rebaixados, como ocorre no setor sul, sudeste e norte.

6.2 GEOMORFOLOGIA E CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOAMBIENTAIS

6.2.1 Declividades

Analisando a variável declividade por meio do mapa elaborado (Figura 29), o relevo do PESBE possui declives que variam de 0 a 76,4°. Observa-se que os valores mais altos de declividade (23,08 a 76,4) localizam-se em diversas áreas do parque (principalmente nos setores norte, noroeste e sul), associados ao compartimento de *Escarpas* das serras da Boa Esperança e do Chapadão, com declives mais acentuados próximo a borda das serras citadas. A Serra da Boa Esperança possui papel de destaque nesse quesito, uma vez que apresenta faces escarpadas em diversos trechos, como no setor sul, leste, nordeste e norte do parque. Ademais, os altos índices de declividade são encontrados na parte superior do *front* da Serra do Chapadão; em vertentes de morros festonados no setor leste e nordeste; e em áreas das vertentes dos vales fluviais presentes no setor norte.

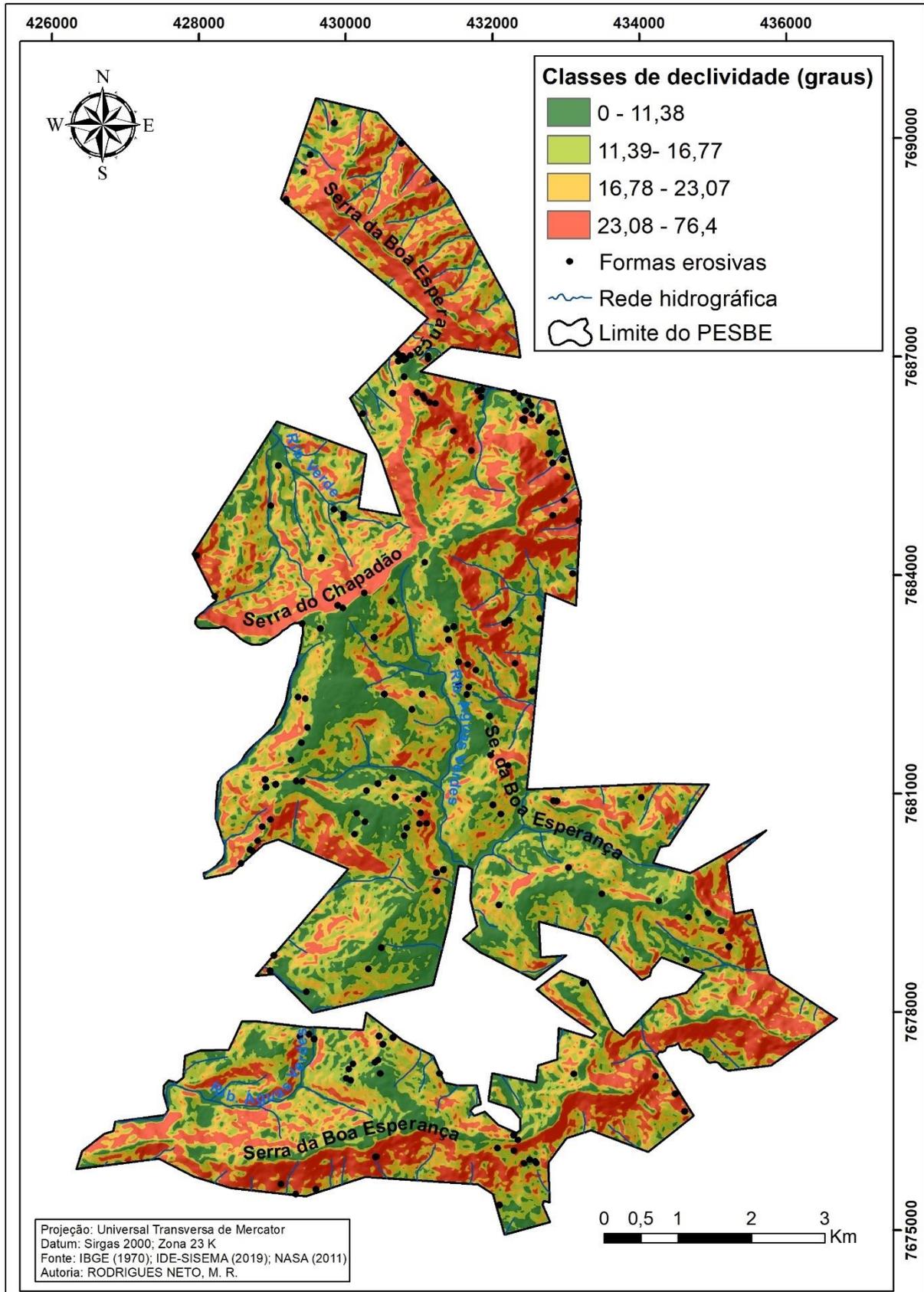
As menores declividades (0 a 11,38°) encontram-se predominantemente nos setores central, sul e noroeste do parque (Figura 29), estando associadas sobretudo aos topos levemente convexos do compartimento *Morros com Encostas Suaves*, às planícies de inundação de cursos d'água, a crista da Serra da Boa Esperança e a parte alta da bacia do Ribeirão Águas Verdes, no setor central; à crista e vertente norte da Serra da Boa Esperança, no setor sul e ao fundo de vale do Ribeirão Verde, no setor noroeste.

As declividades médias (11,39 a 23,07°) estão dispersas por todos os setores do parque (Figura 29), associadas, de modo geral, às vertentes dos *Morros com Encostas Suaves* encontrados no setor central; as vertentes de diversos trechos da Serra da Boa Esperança e aos fundos de vale de alguns tributários do reservatório de Furnas localizados no setor norte.

Observa-se, em diversas áreas do parque, que os declives menores estão relacionados sobretudo aos setores mais altos do relevo, nas áreas de cimeira (de 1.243 a 1.395m) onde se desenvolve a bacia do ribeirão Águas Verdes, salvo exceções como o fundo de vale do Ribeirão Verde, áreas do setor norte e uma área de depósito coluvionar situada no sopé da Serra da Boa Esperança, no setor sul do parque.

Por outro lado, as áreas mais declivosas situam-se majoritariamente em altitudes médias, uma vez que correspondem as vertentes escarpadas das feições geomorfológicas do parque, tais como o compartimento de *Morros com Encostas Suaves* e as serras da Boa Esperança e do Chapadão, estando, por conseguinte em faixas de altitude menores que as faixas dos topos.

Figura 29 – Mapa de declividade da área de estudo



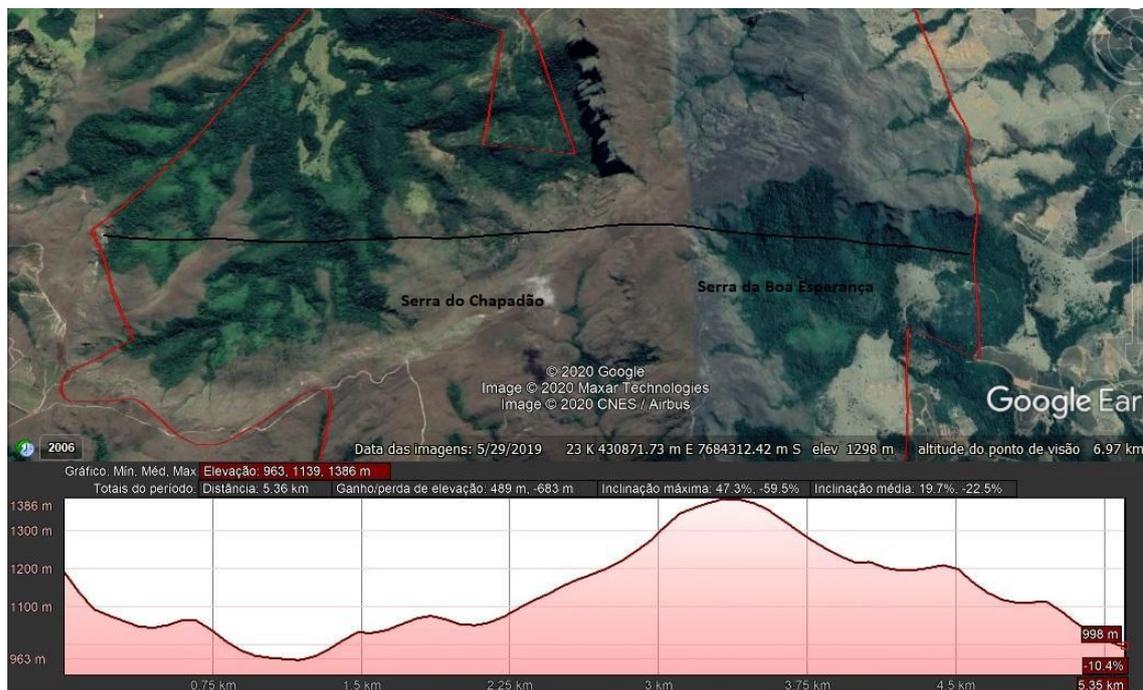
Fonte: Do Autor (2021)

Em algumas áreas, a exemplo da escarpa da Serra da Boa Esperança, próxima ao limite noroeste do parque, o relevo festonado indica um processo de erosão diferencial, cujas protuberâncias presentes na escarpa, são compostas de rochas mais resistentes – neste caso a ocorrência da unidade quartzítica (Serra da Boa Esperança 2) que resistiram aos processos de intemperismo enquanto as rochas subjacentes, unidades metapelíticas (Serra da Boa Esperança 1) foram desgastadas. Ademais, as quebras abruptas de declividade entre a escarpa e os setores inferiores do relevo (que apresentam um solo consolidado pois comportam fragmentos florestais consideráveis), indicam processos pretéritos de deposição de sedimentos oriundos das rochas mais frágeis meteorizadas por erosão diferencial das escarpas à montante.

Para a análise do relevo, levando-se em consideração as declividades presentes (Figura 29) e as classes altimétricas (Figura 25), o setor centro-oeste do parque se destaca pois ali ocorre o encontro da Serra do Chapadão e da Serra da Boa Esperança. Esta área comporta uma grande amplitude altimétrica (em torno de 680 metros), altos índices de declividade observados nas vertentes de ambas as Serras, além do fato de a Serra do Chapadão se caracterizar como divisor de águas entre dois importantes rios do parque, o ribeirão Verde, que nasce em seu front e segue na direção noroeste; e o ribeirão Águas Verdes, que nasce em seu reverso e segue na direção sul. Para uma melhor análise do relevo foi gerado o perfil topográfico no sentido E-W (Figura 30), através do qual é possível observar o comportamento morfométrico do relevo.

Nas áreas menos declivosas do relevo do PESBE, as feições erosivas mais observadas são os sulcos e a erosão antrópica, ao passo que, nas vertentes mais declivosas, predominam os processos de erosão laminar, sendo observadas também cicatrizes de escorregamentos. Este cenário pode estar atrelado à forma côncava de alguns sopés das vertentes e de vales fluviais na área do parque, o que facilita a formação do fluxo concentrado, e conseqüentemente dos sulcos. Destaca-se também, à facilidade imposta pelo relevo menos dissecado ao trânsito das motos se comparado a superfícies muito íngremes, que podem funcionar como barreiras mesmo aos veículos *Off Road*; além das características morfométricas e geométricas de várias vertentes declivosas observadas, caracterizadas por apresentar rampas retilíneas e alongadas, facilitando o fluxo difuso e o desenvolvimento de erosões laminares.

Figura 30 – Perfil topográfico no sentido NE-SW entre as serras do Chapadão e da Boa Esperança.



Fonte: Do autor (2021)

6.2.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI

Constatou-se na área de estudo, valores de NDVI que variam de 0,230, associados a uma vegetação pouco vigorosa a 0,896, correspondentes a uma vegetação com alto vigor (Figura 31). Os menores índices de vegetação (0,230 a 0,551) são encontrados predominantemente no compartimento *Morros com Encostas Suaves*, nos setores central, sul e sudoeste. Verifica-se que no setor central, os índices inferiores de NDVI estão majoritariamente associadas as áreas mais elevadas e menos declivosas do relevo, como as áreas de topos que se inserem no compartimento *Morros com Encostas Suaves*. Esses baixos índices também são identificados em vertentes declivosas e até escarpadas, a exemplo de uma área da Serra da Boa Esperança no setor sul, onde estão associados, além da vegetação pouco vigorosa, a afloramentos rochosos e solo exposto.

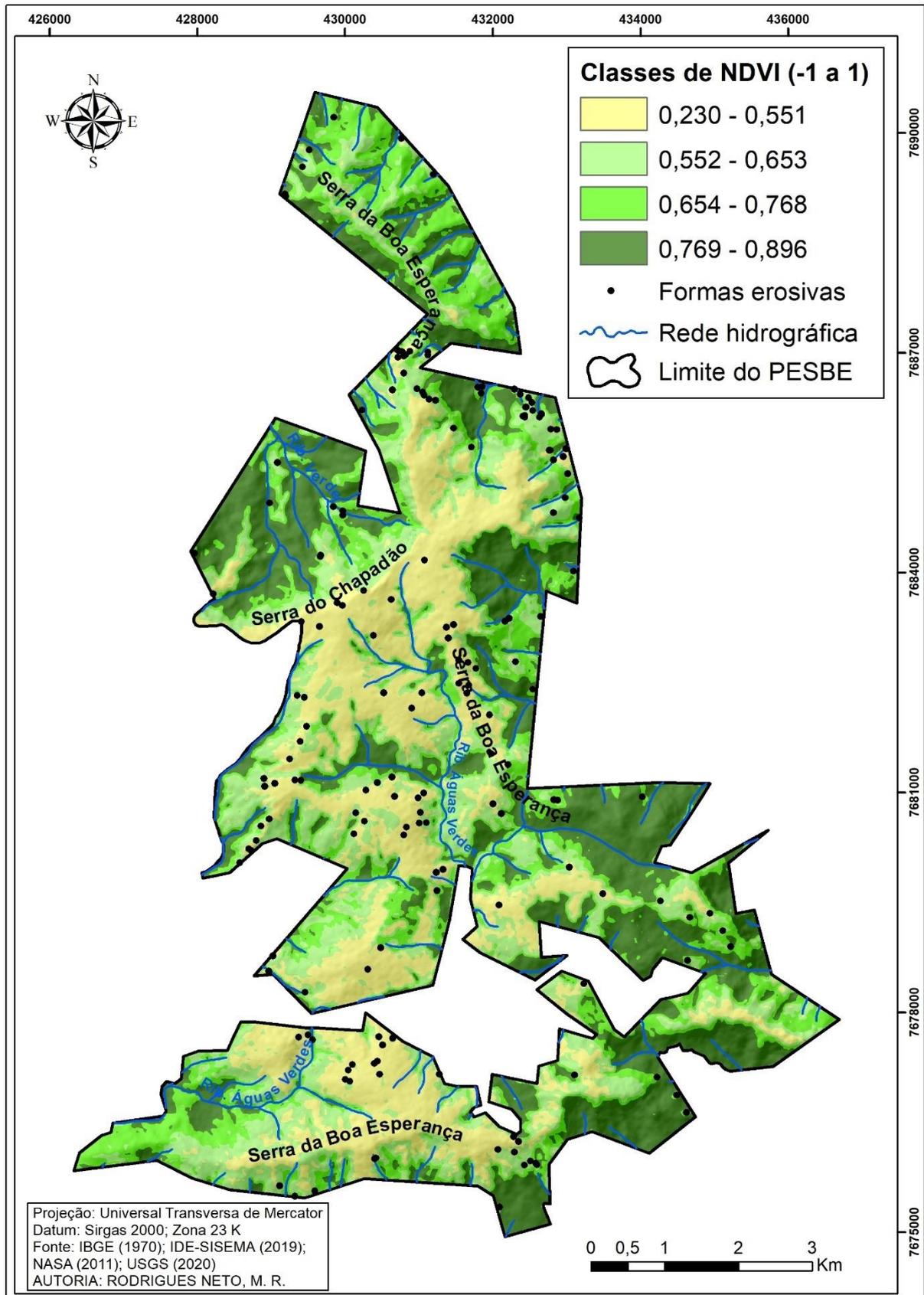
Nas áreas do PESBE onde os índices de vegetação são menores (Figura 31), ocorre o desenvolvimento de diversos processos erosivos, caracterizados como sulcos e erosão antrópica. A presença de vegetação pouco vigorosa ou até mesmo a ausência de vegetação, associada ao motociclismo *Off Road* pode causar sérios danos ambientais, uma vez que segundo Gualtieri-Pinto *et al.* (2008), a exposição do solo no leito das trilhas utilizadas pelos praticantes

da atividade em questão e a compactação causada pelo pisoteio e uso de veículos, ocasionam, além de outros problemas, mudanças na estrutura do solo, redução da taxa de infiltração, aumento do escoamento superficial e por fim, aumento da erosão, que pode ser favorecido por altos índices pluviométricos e de declividade.

Nas áreas topograficamente mais baixas, no setor nordeste, se constata a presença de pastagens degradadas e exposição do solo. Com base em Rangel (2017) e na análise de imagens orbitais, pode-se afirmar que a fitofisionomia predominante nas áreas que apresentam baixos índices de vegetação diz respeito aos campos de altitude, um tipo de vegetação pouco vigorosa e que por isso apresenta NDVI baixo.

Os valores intermediários de NDVI (0,552 a 0,768) estão presentes em todos os setores do parque (Figura 31), e não possuem uma relação específica com a altimetria ou declividade do terreno, podendo ser encontrados em diversos setores do relevo que apresentam diferentes morfometrias. São mais detectados nos setores norte, no compartimento *Escarpas* da Serra da Boa Esperança (onde ocupam uma grande área), nordeste, sul e sudeste. Tais valores, por exemplo, estão associados às vertentes declivosas e em cotas altimétricas consideradas baixas ou medianas, como é evidenciado nos vales dos tributários do Reservatório de Furnas no setor norte do parque. Estes valores são verificados também nas áreas de relevos mais suavizados e rebaixados, como ocorre no setor sudoeste, a alguns trechos da crista da Serra da Boa Esperança, localizados a médias altitudes, no setor norte e a áreas declivosas que se encontram em altitudes baixas e médias no front da Serra da Boa Esperança, setor sul do PESBE.

Figura 31 – Mapa de Índice de vegetação da Diferença Normalizada – NDVI da área de estudo



Fonte: Do Autor (2021)

Já os maiores índices de vegetação (0,769 a 0,896) estão situados principalmente em formas de mosaicos no compartimento *Escarpas* nos setores sul, sudeste, centro-leste (Serra da Boa Esperança), e noroeste (Serra do Chapadão). São encontrados em setores do relevo de baixa e média altitude, que ora apresentam formas mais suavizadas, ora mais declivosas.

As áreas com índices mais elevados de vegetação (Figura 31) ocorrem em algumas bacias hidrográficas que possuem uma cobertura vegetal densa formada por fragmentos florestais, a exemplo de uma bacia formada na margem direita da Serra da Boa Esperança, no setor leste do parque. Índices maiores também ocorrem em trechos de margens de diversos cursos fluviais, devido a presença de mata ciliar ou mata de galeria. Verifica-se também, a presença de um fragmento florestal de relevante extensão no compartimento *Morros com Encostas Suaves*, localizado a médias e baixas altitudes, no setor sudeste do PESBE. É importante ressaltar uma variação de NDVI observada em algumas manchas no interior deste fragmento florestal (Figura 31). Através da análise de imagens do *Google Earth* referentes a agosto de 2020, constatou-se a presença de pequenas áreas de cultivo agrícola (café) inseridas em meio a este fragmento de vegetação densa, dentro dos limites da UC, que denotam valores intermediários de NDVI, diferentemente da vegetação mais vigorosa circundante, que apresenta valores altos.

Tal constatação é preocupante na medida em que estas práticas de uso da terra não se enquadram com os objetivos de uma unidade de conservação de proteção integral. Ressalta-se que alguns dos motivos da criação do PESBE foi justamente a proteção da vegetação nativa da área e a contenção da expansão do cultivo de café em direção a Serra da Boa Esperança.

6.2.3 Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas- POCI

A tabela 15 demonstra os resultados da análise estatística referente a probabilidade de ocorrência de chuvas intensas (> 50 mm), realizada em séries históricas de dados de precipitação das dez estações pluviométricas consideradas neste estudo.

Tabela 15 – Estações pluviométricas e seus respectivos valores de Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCI

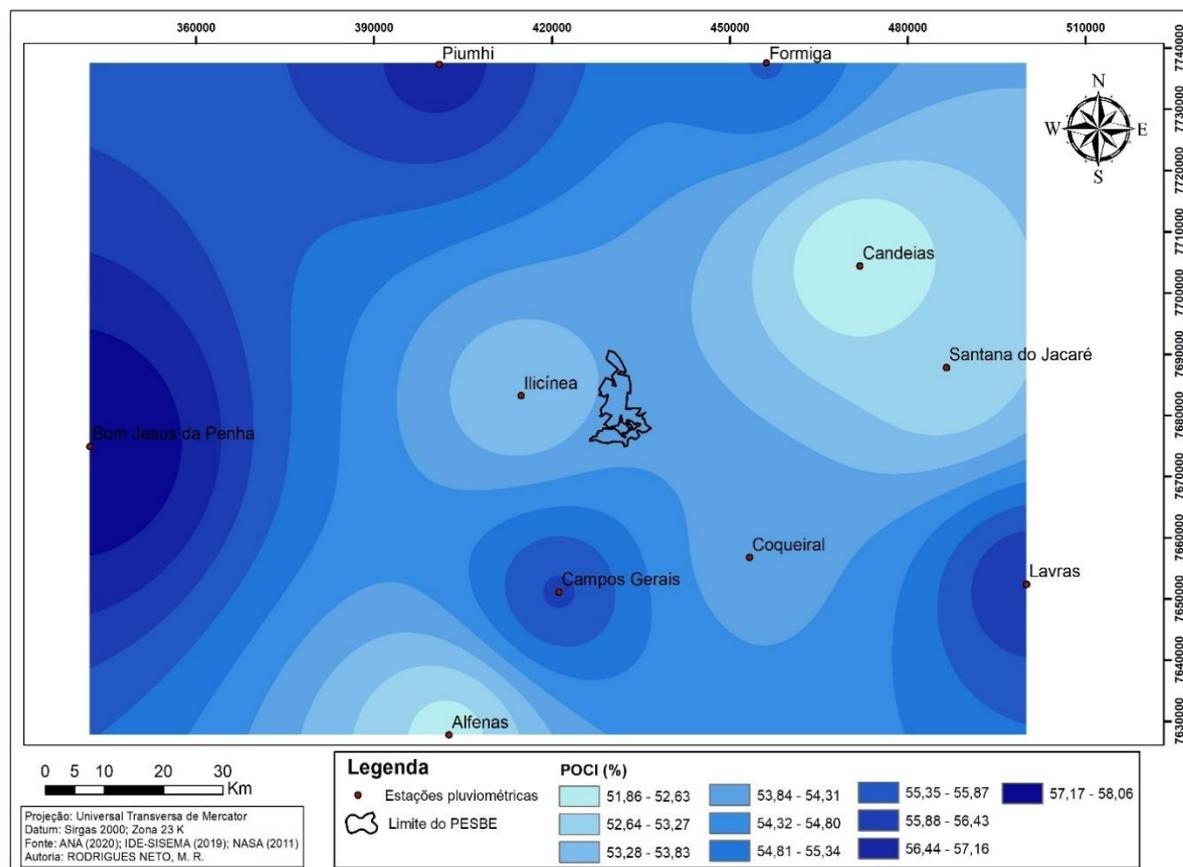
Estação pluviométrica	Município	Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas (POCI)
Alfenas	Alfenas	52,40%
Bom Jesus da Penha	Bom Jesus da Penha	58,07%
Campos Gerais	Campos Gerais	55,94%
Candeias	Candeias	51,86%
Coqueiral	Coqueiral	54,15%
Formiga	Formiga	55,37%
Illicínea	Illicínea	53,37%
Lavras	Lavras	56,36%
Piumhi	Piumhi	56,65%
Santana do Jacaré	Santana do Jacaré	52,72%

Fonte: ANA (2020) Org.: Do Autor (2021)

As maiores probabilidades de ocorrência de chuvas intensas foram observadas nos municípios de Bom Jesus da Penha (58,07 %), localizado a oeste do parque; Piumhi (56,65 %), a noroeste e Lavras (56,36%), a sudeste. Por outro lado, as menores probabilidades foram detectadas nos municípios de Candeias (51,86 %), localizado a nordeste da UC; Alfenas (52,40 %), a sudoeste e Santana do Jacaré (52,72 %), localizado a nordeste. Illicínea, que se trata do município localizado mais próximo ao PESBE apresenta uma probabilidade intermediária (53,37 %).

Através da interpolação dos valores obtidos para cada estação, foi gerado um mapa que demonstra, através de superfícies contínuas, as probabilidades de ocorrência de chuvas intensas na região do PESBE (Figura 32).

Figura 32 – Mapa da probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCI da região do PESBE



Fonte: Do Autor (2021)

Ao se fazer o recorte do *raster* gerado para a área do parque (Figura 33) constatou-se que houve uma grande homogeneização dos valores de POCI na área em questão, denotando uma variação de apenas 0,3%, fato que pode ter ocorrido devido a dois fatores:

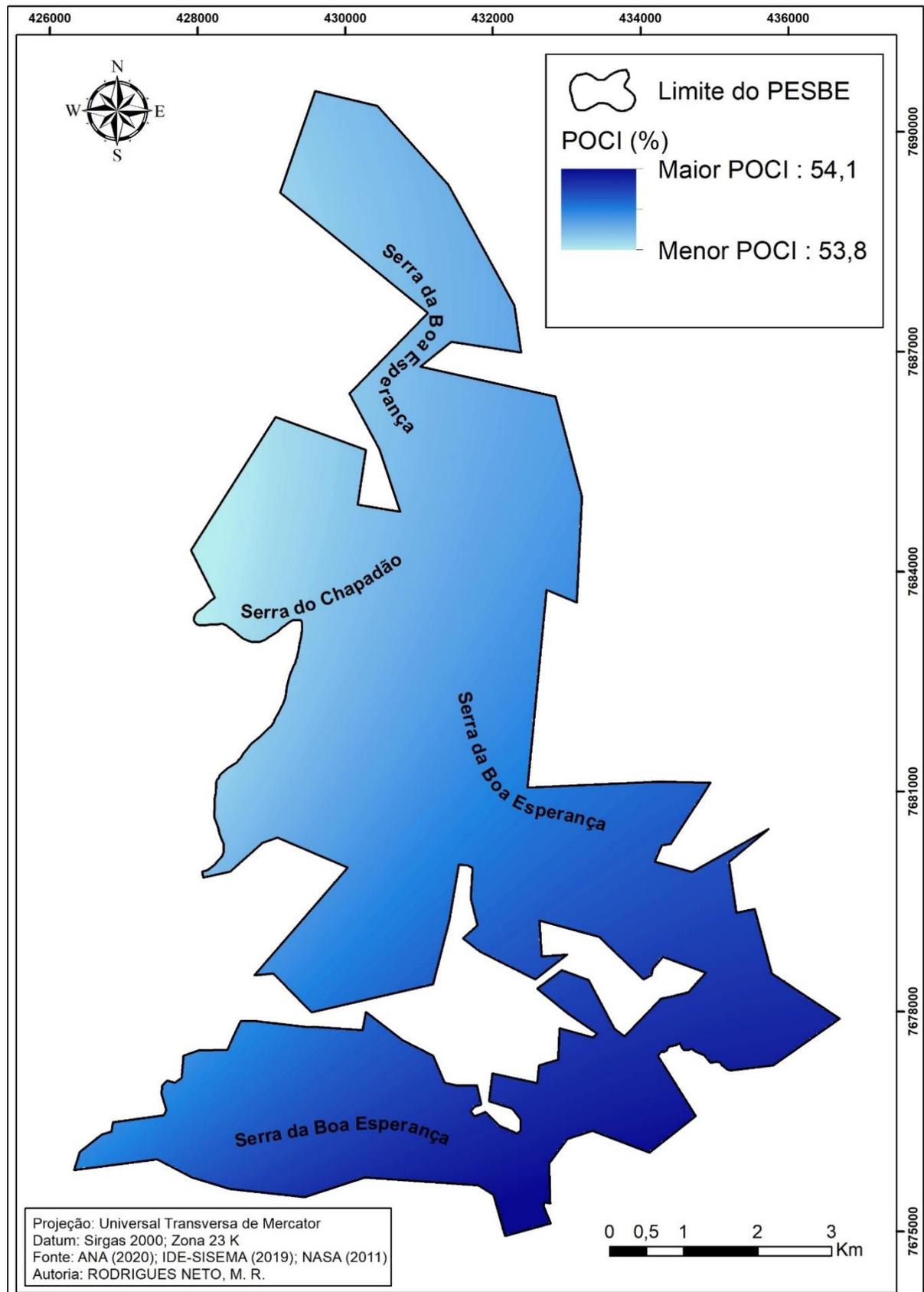
O primeiro fator está atrelado a dimensão relativamente pequena do parque (aproximadamente 5.874 ha), levando-se em consideração o caráter mais regional apresentado pelas variáveis climáticas. Os índices de pluviosidade tendem a não variar consideravelmente em um contexto local, a não ser que haja algumas características específicas, como relevos muito elevados. Na área de estudo apesar do relevo chegar a atingir 1.395 m, não existem estações pluviométricas inseridas no setor mais alto e no setor mais baixo do relevo para constatar se a variável topográfica interfere na precipitação, logo, sendo considerados apenas os dados oriundos das estações localizadas em sua região.

Já o segundo fator, refere-se à distribuição insatisfatória das estações pluviométricas, uma vez que além de não haver nenhuma estação dentro dos limites da UC (estando a mais próxima localizada a 13,7 km), a média da distância em linha reta das estações até o parque é

de 48 km. Este fato faz com que o interpolador generalize algumas áreas que estão entre as estações, como pode ter ocorrido na área de estudo, que está inserida em uma mancha intermediária de valores de POCl, estando localizada entre estações que apresentam os menores valores identificados e estações que possuem os valores mais elevados.

Devido a esta variação insignificante nos valores de POCl para a área de estudo optou-se por não utilizar esta variável na produção do mapa de fragilidade ambiental, uma vez que foi constatado que a mesma não apresentaria uma relação verdadeira com os processos erosivos mapeados no parque.

Figura 33 – Mapa de Probabilidade de ocorrência de chuvas intensas – POCI da área de estudo



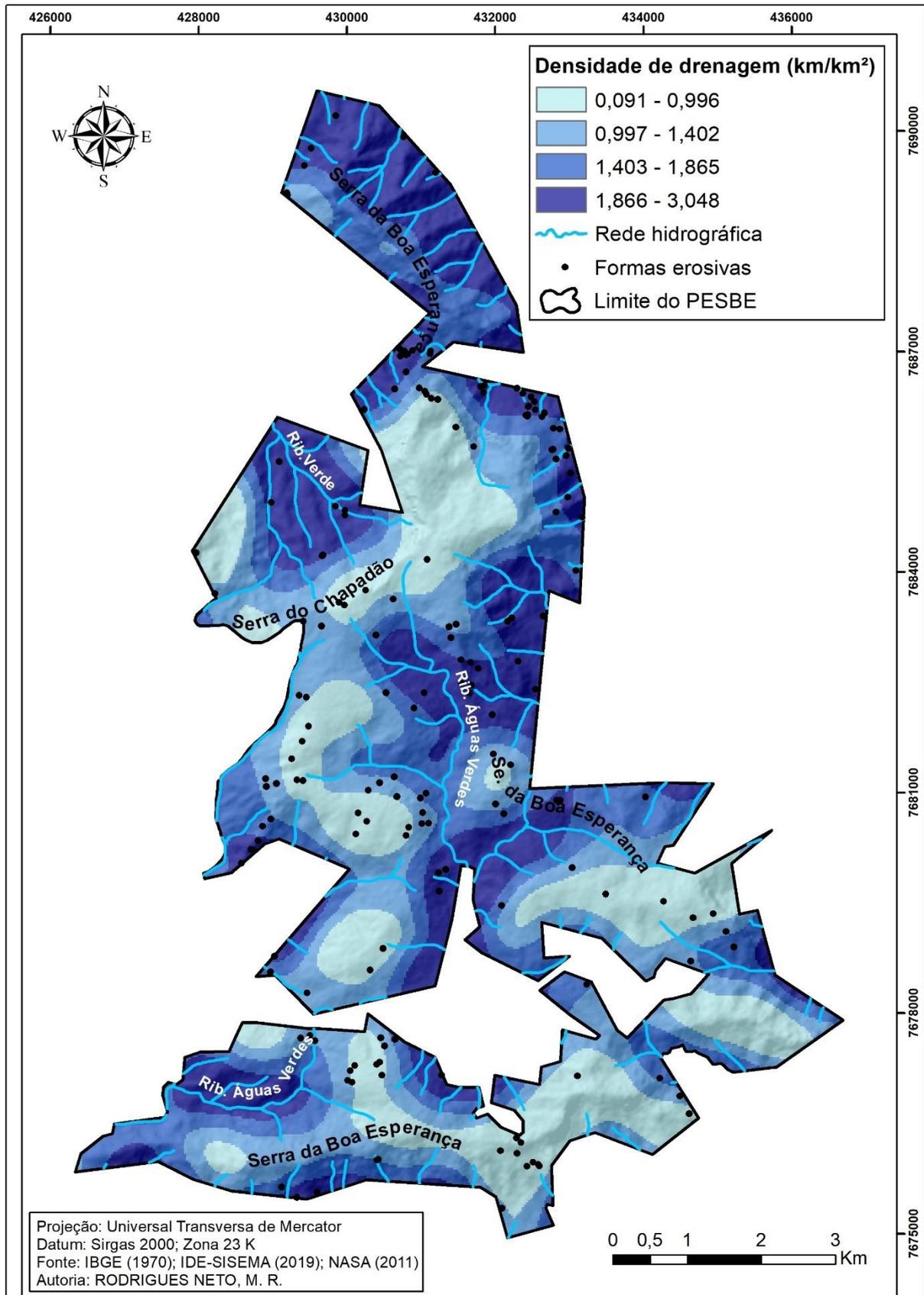
Fonte: Do Autor (2021)

6.2.4 Densidade de drenagem

A densidade de drenagem possui uma forte relação com as características de permeabilidade/impermeabilidade do terreno, sendo que, de acordo com Bigarella (2007), os terrenos mais impermeáveis apresentam uma rede de drenagem mais densa ao passo que os mais permeáveis apresentam uma rede de drenagem menos densa.

Constatou-se no PESBE que as menores densidades de drenagem (0,091 a 0,996 km²) são encontradas principalmente nos setores sul, sudeste, centro-sul e centro-norte do parque, geralmente associadas ao compartimento *Morros com Encostas Suaves*. Já os valores intermediários de densidade (0,997 a 1,865 km/km²) são observados em diversas áreas do parque, principalmente nos setores nordeste, sul e central. Por fim, as maiores densidades de drenagem (1,866 a 3,048 km/km²) estão presentes de maneira mais significativa nos setores norte, noroeste, centro-leste, centro-sul e sul, associados ao compartimento *Escarpas* e a rede hidrográfica das bacias dos Ribeirões Verde e Águas Verdes (Figura 34).

Figura 34 – Mapa de densidade de drenagem da área de estudo



Fonte: Do autor (2021)

Bigarella (2007) elucida que a drenagem de uma região depende de algumas variáveis, como a pluviosidade, a topografia, a cobertura vegetal, o tipo de solo, a litologia e a estrutura geológica. Essas variáveis estão relacionadas também ao poder erosivo dos rios, na medida em que o trabalho executado pelos cursos d'água, que inclui os processos de erosão, transporte e sedimentação, origina-se da velocidade, turbulência e fluxo dos canais, características essas que sofrem influência das variáveis mencionadas. Coelho (2008) complementa afirmando que “os processos de erosão, transporte e deposição de um sistema fluvial variam no decorrer do tempo e, espacialmente, são interdependentes, resultando não apenas das mudanças do fluxo, como também da carga existente” (COELHO, 2008, p. 18).

O comportamento da densidade de drenagem do PESBE (Figura 34) pode ser explicado por meio da análise das litologias presentes no parque. Como discutido no item 3.3.3, referente aos aspectos físico-geográficos da UC, a caracterização geológica da área mostra o predomínio de quartzitos e metarenitos, seguidos por metapelitos, filitos, xistos e granitos e ortognaisses milonitizados.

De maneira geral, o comportamento hidrológico das rochas que ocorrem na área, dado pela composição mineralógica, favorece a permeabilidade e percolação das águas, resultando em baixas densidades de drenagem em uma grande área do parque. Essa análise é reforçada pela presença de granitos e ortognaisses em toda a face norte da Serra da Boa Esperança, ao sul do parque, que se encontram milonitizados. Esta característica pode resultar no alto grau de fraturamento, o que favorece a infiltração e percolação para os lençóis subterrâneos.

Observa-se que a baixa densidade de drenagem presente nos setores central e centro-norte do parque (Figura 34) está relacionada às áreas de cimeira, topograficamente mais elevadas, como os topos tabulares do compartimento *Morros com Encostas Suaves*. O relevo mais suavizado contribui para que o escoamento superficial não adquira grande volume e velocidade. Sendo assim, infere-se que nestas áreas o escoamento concentrado não colabore de maneira significativa para a esculturação do relevo pelos rios perenes, e tampouco gere quantidade significativa de canais efêmeros, o que repercute nos baixos valores de densidade de drenagem.

Já nos setores sul e sudeste, especialmente vinculados ao compartimento de *Morros com Encostas Suaves*, ocorrem áreas que comportam baixas densidades de drenagem aliadas a presença de vertentes íngremes, recobertas por florestas. Esse cenário indica que apesar dos altos índices de declividade, durante a ocorrência de chuvas de forte intensidade a vegetação densa tende a diminuir o escoamento superficial que alimentaria o volume dos rios,

consequentemente colaborando para o aumento do componente perpendicular (infiltração), o que possibilita a formação de um solo espesso o suficiente para sustentar a vegetação de grande porte e, por outro lado, colaborando para a baixa densidade de drenagem.

Pode-se inferir que nestes setores a capacidade erosiva dos rios não seja alta, pois os poucos trechos de canais fluviais presentes nessas áreas são de 1ª ordem, logo não contando com um grande volume de fluxo. Além do mais, apesar das médias e altas declividades encontradas nos vales desses canais, que contribuiria para o aumento da velocidade do fluxo, a presença da vegetação densa diminui a capacidade erosiva dos canais, como corroborado por Bigarella (2007), ao afirmar que a vegetação possui “efeito inibidor sobre a erosão tanto nas cabeceiras quanto nas margens do canal” (BIGARELLA, 2007, p. 1277).

Em contrapartida, as altas densidades de drenagem apresentadas pelo setor norte do parque (Figura 34) estão relacionadas às diversas nascentes localizadas sobre um relevo que apresenta médias altitudes, nos setores mais elevados das vertentes da Serra da Boa Esperança, e altitudes relativamente baixas, nas demais áreas; formado por vertentes, em geral, bastante declivosas que sustentam uma vegetação medianamente vigorosa.

Esses elevados valores de Dd podem estar relacionados à cobertura vegetal relativamente densa existente na área, que ao facilitar a infiltração da água das chuvas favorece o aumento do nível freático, fazendo com que, no período chuvoso, o lençol freático se localize próximo a superfície, o que pode explicar a existência de diversas nascentes no reverso da Serra da Boa Esperança. Além disso, considerando-se a atribuição espacial do conceito de densidade, pode-se afirmar que foram encontrados valores altos de densidade de drenagem neste setor devido à pequena extensão territorial apresentada por ele perante a soma das extensões dos canais ali presentes.

No tocante a erosão fluvial, afirma-se que os canais presentes no setor norte não possuem grande potencial erosivo, na medida em que a maioria deles são de primeira ordem, indicando que os mesmos apresentam pouco volume de fluxo. Ademais, as vertentes em que se localizam estes canais apresentam rampas curtas, consequentemente não possibilitando um grande incremento do volume destes corpos d'água devido ao escoamento superficial durante episódios de chuva intensa.

Nas proximidades do limite do parque, em áreas do setor nordeste, foram evidenciadas altas densidades de drenagem (Figura 34) relacionadas à relevos rebaixados e aplainados, localizados no sopé da Serra da Boa Esperança. Essas áreas, recobertas por vegetação pouco vigorosa como pastagens degradadas e cultivos agrícolas, são suscetíveis ao efeito das gotas de

chuvas durante a ocorrência de precipitações intensas, que irão produzir o efeito de *splash* (GUERRA, 2020), dificultando a infiltração e favorecendo o escoamento das águas pluviais para os canais fluviais

Em adição a este fator, devido aos elevados valores de amplitude e declividade e aos baixos valores de NDVI das vertentes à montante, a água escoada em superfície e subsuperfície nestas encostas, ao invés de ser transmitida para o lençol freático e repassada lentamente para os rios, incrementa rapidamente o fluxo dos canais perenes e intermitentes, podendo também criar canais efêmeros, o que pode explicar a alta densidade de drenagem nessas áreas (BIGARELLA, 2007).

Considerando que a proteção oferecida ao solo pela vegetação é baixa nessas áreas e que a topografia e cobertura da terra à montante favorecem, em alguns trechos, o aumento do escoamento superficial e o incremento da velocidade e do volume do fluxo dos rios durante precipitações, infere-se que se a mata ciliar destes canais for retirada, a capacidade de trabalho dos mesmos será potencialmente elevada durante episódios de chuva intensa, aumentando as taxas de erosão fluvial.

Altos valores de densidade de drenagem também são observados na bacia do Ribeirão Verde, a noroeste do PESBE (Figura 34). Essa bacia de 3ª ordem está localizada no front da Serra do Chapadão, apresentando um relevo em grande parte modestamente íngreme, o qual sustenta uma vegetação vigorosa. A conjunção destes fatores tende a favorecer a infiltração e a percolação das águas pluviais, aumentando o nível freático e garantindo a perenidade dos rios. Apesar da vegetação e das vertentes em grande parte pouco declivosas, durante precipitações de grande intensidade e duração a capacidade erosiva do Ribeirão Verde e de seus afluentes pode se tornar alta, uma vez que alguns desses rios nascem em uma área escarpada do front da Serra do Chapadão, próximo ao topo, fato que somado a grande amplitude altimétrica da bacia pode incrementar o volume e a velocidade do fluxo dos canais fluviais, podendo ocasionar a erosão fluvial.

Além da erosão fluvial, a densidade de drenagem também apresenta uma forte relação com os processos de erosão hídrica, na medida em que altas densidades de drenagem indicam predominância do escoamento superficial sobre a infiltração, e o escoamento superficial é o agente responsável pelo desenvolvimento e dinamização das erosões de ordem pluvial (GUERRA, 2020). Clubb *et al.* (2016) analisaram a relação entre densidade de drenagem e a taxa de erosão em cinco diferentes paisagens nos Estados Unidos, utilizando o modelo numérico *Channel-Hillslope Integrated Landscape Development* (CHILD), que considera os fatores

incisão fluvial e o transporte de sedimentos em encostas. Os autores obtiveram como resultado uma relação positiva entre Dd e taxa de erosão em quatro das cinco paisagens estudadas, e salientaram que em relevos de maior altitude o transporte de sedimentos é superior a deposição, e a incisão fluvial ocorre à montante dos vales, ocasionando maiores densidades de drenagem.

Nesse sentido, chama-se a atenção para vários processos de erosão hídrica, do tipo sulcos erosivos, no compartimento *Escarpas*, mais especificamente no interior da sub-bacia do Ribeirão Verde e em seu divisor de águas, que se constitui na ruptura de declive convexa da Serra do Chapadão. Vários destes sulcos estão localizados muito próximos aos leitos dos tributários do Ribeirão Verde, indicando a influência da dissecação exercida por esses canais sobre as encostas e sobre a dinâmica do escoamento superficial, culminando na formação dos sulcos.

6.2.5 Densidade de Lineamentos Estruturais- DLE

O mapa de densidade de lineamentos estruturais - DLE (Figura 35) demonstra que o parque apresenta densidades que variam de 0 a 2,163 km/km². As menores densidades (0 a 0,313) são encontradas principalmente em áreas mais periféricas, próximas aos limites da UC, sobretudo nos setores sul, sudoeste, oeste e norte. Nessas áreas predominam os canais de primeira ordem, que geralmente não possuem controle estrutural, tendo sua sinuosidade influenciada pela morfologia da vertente. Já os valores intermediários de DLE (0,314 a 0,865) são encontrados em grande parte do território do parque, ocorrendo principalmente nos setores oeste e nordeste. Por fim, a maior densidade de DLE (0,866 a 2,163) é encontrada de maneira mais significativa nos setores central e noroeste, correspondendo a área das bacias dos ribeirões Verde e Águas Verdes, bem como nos setores norte e sul, neste último estando atrelada ao trecho inferior do ribeirão Águas Verdes.

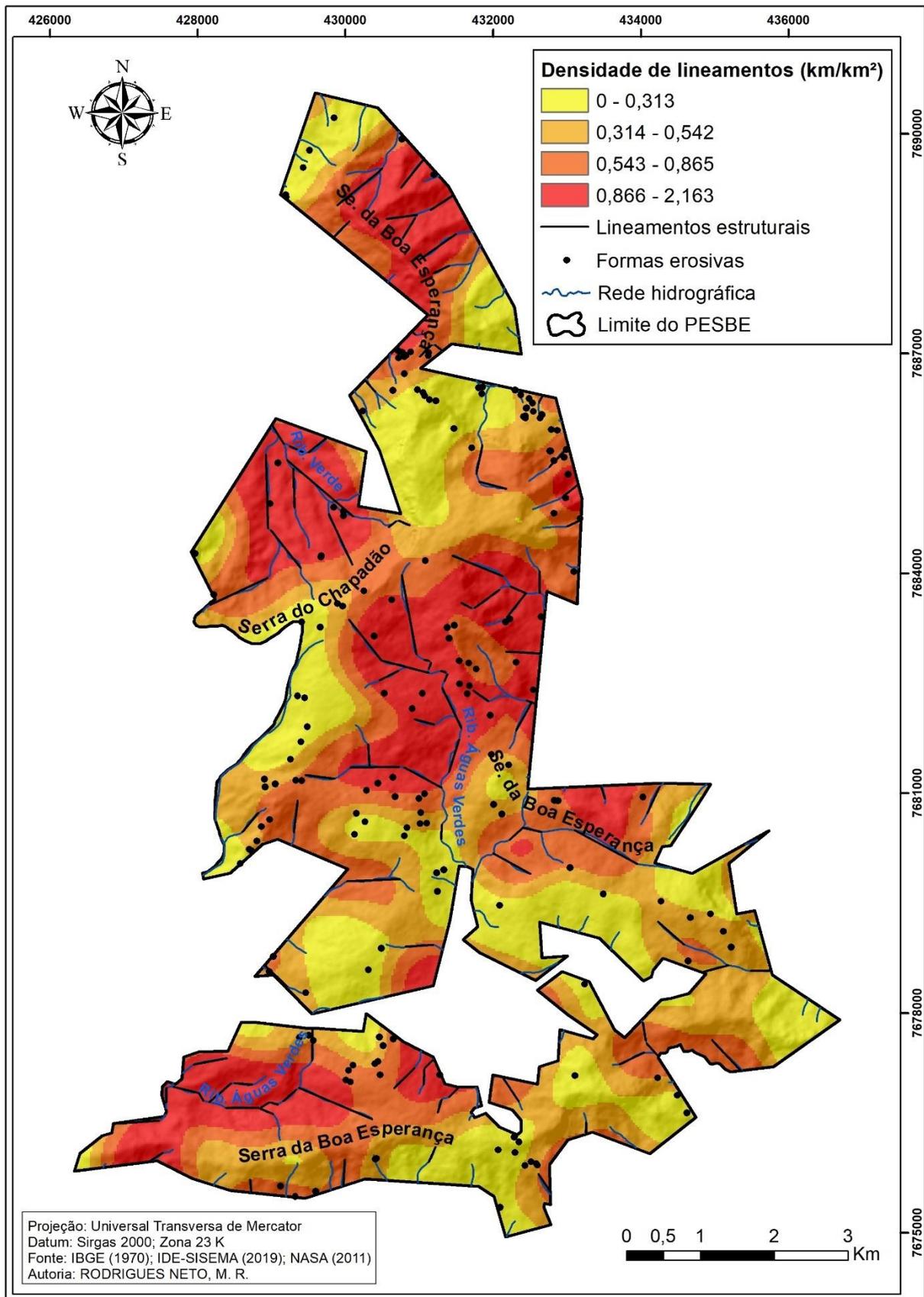
A maior classe de densidade de lineamentos estruturais, identificada na área mais central, sul e noroeste do parque (Figura 35), insere-se nas vertentes da Serra da Boa Esperança e da Serra do Chapadão, em áreas que abrigam os trechos superiores dos rios de maior ordem hierárquica dentro dos limites da UC, o Ribeirão Verde e o Ribeirão Águas Verdes, ambos de 3^a ordem. No que concerne à textura e estrutura do relevo constata-se, com base em Soares e Fiori (1987), que as bordas das serras mencionadas acima se caracterizam como rupturas de declive convexas e dispostas de maneira estruturada. As rupturas de declive se consistem em

elementos de grande relevância na análise do relevo para interpretação geológica (SOARES; FIORI, 1978).

Ainda de acordo com os autores citados, constata-se na rede de drenagem dos dois ribeirões mencionados uma predominância dos trechos mais retilíneos sobre os mais sinuosos, o que é um indicativo da presença de zonas de fraqueza estrutural. Estes lineamentos apresentam predominantemente orientações NW-SE, NNW-SSE e ESE-WNW, sendo observado a existência de lineamentos situados tanto no reverso da Serra do Chapadão como em seu *front* que possuem direções similares.

Considerando todo o território do PESBE, as pequenas sub-bacias localizadas no setor norte, associadas ao compartimento de *Escarpas*, e as bacias do Ribeirão Águas Verdes e do Ribeirão Verde, são as áreas que apresentam a maior concentração de lineamentos por km² (Figura 35). No setor norte, estes lineamentos estão atrelados a nascentes de canais que percorrem pequenos trechos dentro dos limites do parque e desemboca no reservatório de Furnas. Já nos rios de 3^a ordem citados são observados alguns trechos fortemente angulosos e formas anômalas, como cotovelos e meandros isolados. Foram identificados também lineamentos de dimensões consideráveis (a exemplo de um lineamento com extensão de 1169 metros localizado na rede hidrográfica do Ribeirão Verde e de um lineamento de 1091 metros, na rede hidrográfica do Ribeirão Águas Verdes). Assim, constata-se que, de maneira geral, as redes hidrográficas destes cursos d'água são influenciadas, em certa medida, pela estrutura geológica, podendo estar alguns trechos de seus canais, dispostos sobre zonas de fraturamento.

Figura 35 – Mapa de densidade de lineamentos estruturais – DLE da área de estudo



Fonte: Do Autor (2021)

Ressalta-se que a presença dos maiores valores de DLE associados à grande concentração da erosão antrópica na área da bacia do Ribeirão Águas Verdes e arredores, bem como a presença de sulcos erosivos nas proximidades dos tributários do Ribeirão Verde pode acarretar em um cenário em que as prováveis zonas de fraqueza estrutural presente nessas áreas facilite a evolução das erosões causadas pelas práticas de atividades *Off Road* em processos erosivos lineares, podendo também colaborar para evolução dos sulcos já existentes em ravinas e até mesmo em voçorocas, caso a cobertura vegetal seja prejudicada, através dos incêndios, por exemplo.

É importante frisar que grande parte dos lineamentos estruturais mapeados no PESBE está relacionada a canais de primeira ordem (Figura 35), que apresentam a sinuosidade de seus leitos influenciada pela morfologia das vertentes e não por zonas de fraturamento. Esse cenário está atrelado ao fato de que o parque abriga muitos canais que nascem nas proximidades de seus limites e se desenvolvem nas áreas externas. Sendo assim, afirma-se que mesmo que as bacias que apresentaram os maiores valores de DLE possuam um certo controle estrutural, não é possível afirmar com base nos lineamentos da drenagem que existam grandes zonas de fraqueza estrutural no parque, sendo necessários estudos mais aprofundados no ramo da Geologia para tal constatação.

6.2.6 Densidade de Vias de Circulação – DVC

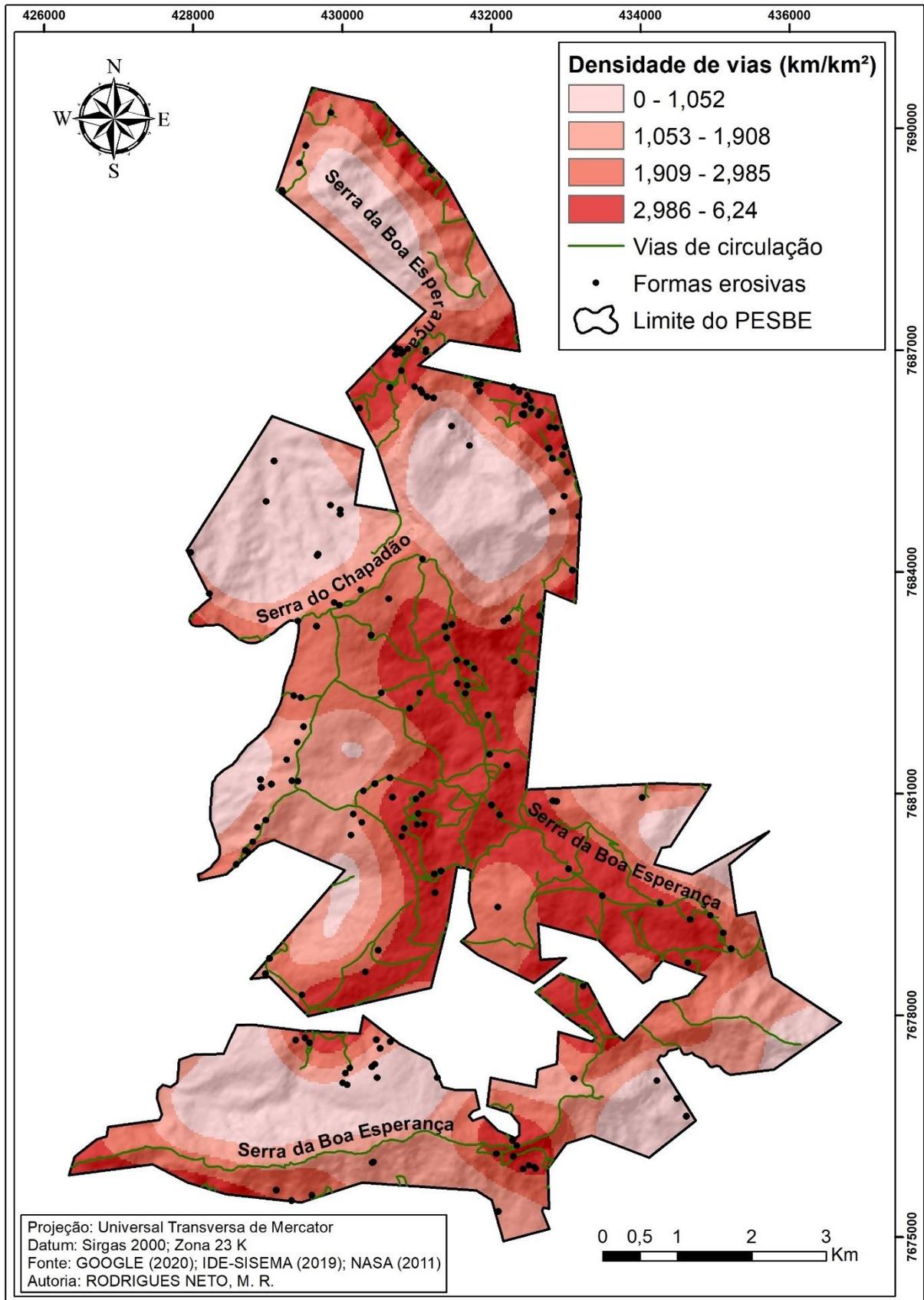
No PESBE foi encontrada uma densidade de vias de circulação (consideradas nesta pesquisa como estradas rurais e trilhas) variando 0 a 6,24 km/km². A classe de menor DVC (0 a 1,052) é encontrada predominantemente nos setores sul, nordeste, noroeste e norte. Já a classe que representa os valores intermediários de DVC (1,053 a 2,985) localiza-se principalmente nos setores sul, sudeste, centro-oeste e norte. Por fim, os maiores valores de DVC (2,986 a 6,24) estão dispostos principalmente em uma mancha que abarca todo o setor centro-leste do parque, chegando até os setores sudeste e sudoeste. Altos valores de densidade de vias também podem ser observados nos setores sul, nordeste e norte.

Através do mapa produzido (Figura 36) foi possível constatar que a maioria das vias de circulação identificadas no parque dizem respeito a trilhas, que em sua grande maioria são oriundas da atividade de motociclismo *Off Road*. Essas trilhas apresentam-se bastante conectadas entre si nas áreas mais centrais do parque, associadas ao compartimento *Morros com Encostas Suaves*, possuindo também eixos de ligação com as estradas vicinais.

A baixa densidade de vias em algumas áreas do setor sul (Figura 36) tem relação com os altos índices de declividade apresentados pela face sul da Serra da Boa Esperança (área escarpada) e com os fragmentos florestais presentes na área, o que dificulta a abertura de trilhas para o motociclismo *Off Road*. No setor noroeste os baixos valores de DVC são atrelados também as dificuldades impostas pelo ambiente ao desenvolvimento de atividades antrópicas, uma vez que este setor abriga o compartimento *Escarpas*, com vertentes íngremes, a exemplo da escarpa da Serra do Chapadão, bem como uma vegetação majoritariamente vigorosa e diversos canais tributários do Ribeirão Verde.

Por outro lado, os altos valores de DVC encontrados sobretudo no setor centro-leste (Figura 36), tanto no compartimento *Morros com Encostas Suaves* como no compartimento *Escarpas*, associam-se a grande quantidade de trilhas causadas pelo motociclismo *Off Road*. Neste setor, as trilhas localizam-se predominantemente em uma área onde a Serra da Boa Esperança vai gradativamente ganhando altitude em direção ao setor noroeste. Essas trilhas estão dispostas tanto sobre a crista da Serra, seguindo em direção as cotas altimétricas mais elevadas do relevo, quanto nas encostas, em áreas que por vezes se apresentam consideravelmente íngremes e cobertas por uma vegetação pouco vigorosa. Pode-se relacionar a grande quantidade de trilhas nestas áreas à beleza cênica proporcionada pelos picos da Serra da Boa Esperança neste setor, possibilitando uma visão panorâmica da paisagem no entorno (inclusive do Reservatório de Furnas); e também ao próprio relevo, que apesar de serrano não se configura como uma barreira para a prática de atividades *Off Road*, podendo inclusive, justamente por suas características topográficas, ser um atrativo aos praticantes da modalidade fora de estrada.

Figura 36 – Mapa de densidade de vias de circulação – DVC da área de estudo



Fonte: Do Autor (2021)

Além das formas erosivas de origem antrópica, foram identificadas também erosões laminares e sulcos nas áreas que apresentam maiores índices de DVC, corroborando a influência desta variável antrópica sobre a morfogênese.

A combinação entre vertentes relativamente íngremes, vegetação pouco densa e a prática recorrente do motociclismo *Off Road* em algumas áreas do parque, provoca ranhuras no terreno situadas muito próximas entre si (formando redes) e ligadas a trilhas já consolidadas, muitas vezes estando dispostas de maneira perpendicular às curvas de nível. Estas feições lineares, denominadas nesta pesquisa como sulcos superficiais causados pela prática de motociclismo *Off Road*, ou apenas erosões antrópicas (Figura 37), mesmo que não se configurem efetivamente como sulcos ou ravinas, considerando os agentes causadores e os critérios dimensionais, possuem um grande potencial para evoluírem para processos erosivos hídricos, uma vez que além de apresentarem solos expostos e compactados, podem favorecer o surgimento do escoamento concentrado. De acordo com Bigarella (2007), o escoamento laminar quando encontra pequenas ranhuras perpendiculares as curvas de nível, passa a ser concentrado, adquirindo velocidades capazes de promover incisões no solo através de ação erosiva. O autor complementa que estas incisões são aprofundadas pelo fluxo carregado de sedimentos, pois este fluxo adquire maior poder erosivo ao varrer o fundo e as paredes da ranhura, transformando-a em sulcos erosivos e em ravinas de maiores dimensões.

Figura 37 – Processo de erosão antrópica apresentando sulco superficial, exposição e compactação do solo na área de estudo



Fonte: Arquivo pessoal

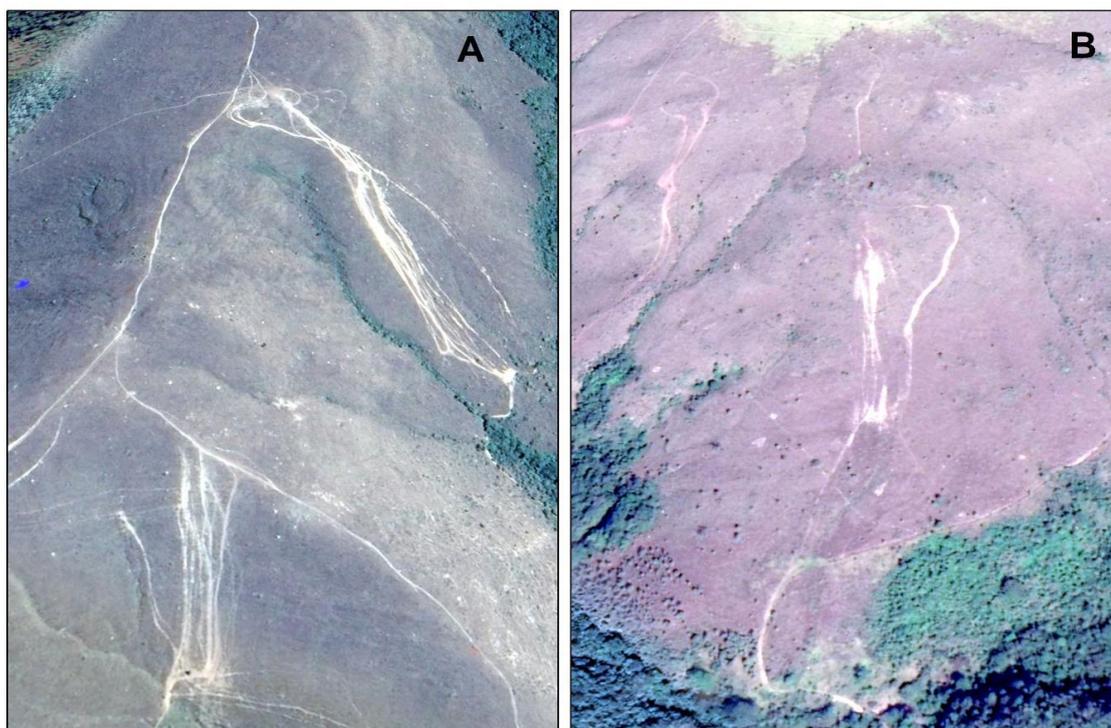
Guerra (2020) salienta que até incisões milimétricas no solo apresentam potencial para se tornarem ravinas, por propiciarem o início do escoamento concentrado, reforçando que

à medida que o fluxo se torna concentrado em canais bem pequenos, em pontos aleatórios da encosta, a profundidade do fluxo aumenta e a velocidade diminui, devido ao aumento da rugosidade, e há uma queda simultânea da energia do fluxo, causada pelo movimento de partículas que são transportadas por esses pequenos canais [...] (GUERRA, 2020, p. 30).

Corroborando as afirmações acerca do potencial de evolução das erosões antrópicas, constatou-se através do mapeamento de formas erosivas que estas feições, em diversas áreas do parque, estão associadas espacialmente a sulcos erosivos, podendo indicar um possível estágio de evolução destas formas já em andamento. As erosões antrópicas foram identificadas

principalmente no setor centro-leste do parque, em áreas que apresentam altas densidades de vias de circulação, como na Serra da Boa Esperança (Figura 38-A), porém também ocorrem em algumas áreas que apresentam valores médios e inclusive baixos de densidade de vias, como em vertentes amplas de morros localizados no setor centro-oeste (Figura 38-B), demonstrando que estas erosões de origem antrópica também estão relacionadas as trilhas mais isoladas, que tendem a ser menos utilizadas.

Figura 38 – Erosões antrópicas na área de estudo



Fonte: GOOGLE (2021). Org.: Do Autor (2021)

Legenda: A: feições localizadas na Serra da Boa Esperança.

B: feições localizadas em vertentes de morros no setor centro-oeste.

Como é perceptível na figura 38, algumas trilhas localizam-se nas proximidades de canais fluviais, fato que se configura como um problema em potencial, uma vez que as trilhas podem reter combustível proveniente de vazamento das motos em seus leitos (SOUZA; BINKOWSKI, 2016). Durante as chuvas, o combustível retido pode ser transportado até corpos d'água a jusante das trilhas e contaminar suas águas. Nesse sentido, destaca-se o setor leste do parque, que apresenta altas densidades de vias de circulação e de drenagem, abrigando nascentes de cursos d'água que desaguam em um braço do Reservatório de Furnas. Logo,

através da perspectiva sistêmica, se estes cursos d'água forem contaminados poderão transportar o combustível até o reservatório, consequentemente o contaminando.

6.3 ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

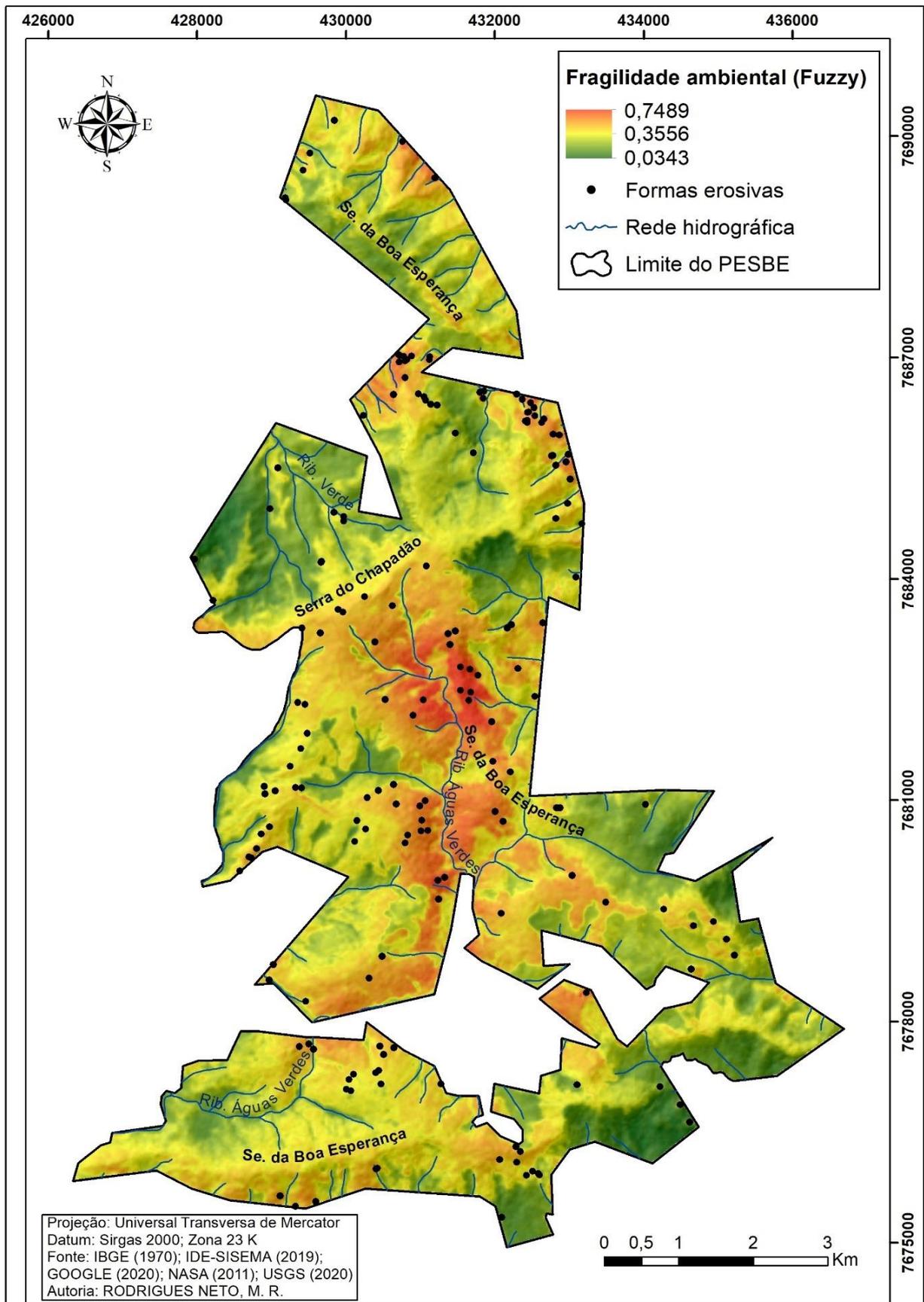
O mapa de fragilidade ambiental (FA) à processos erosivos do PESBE demonstra que os índices de FA variam de 0,0343 a 0,7489 (Figura 39). Os menores valores de FA estão localizados principalmente nos setores sul, sudeste, noroeste e norte, além de também serem observados junto a canais fluviais, no setor centro-oeste, e em forma de uma mancha de área considerável atrelada a uma sub-bacia hidrográfica de segunda ordem, no setor nordeste. Os valores médios de fragilidade são os mais evidenciados no território do parque, sendo identificados em todos os setores, principalmente nos setores sul, central e norte. Já a fragilidade ambiental mais alta está atrelada ao alto curso do Ribeirão Águas Verdes e a um trecho da Serra da Boa Esperança, no setor central.

O Índice de Vegetação (NDVI), seguido da Densidade de Vias de Circulação (DVC), são as variáveis geoambientais que exercem maior influência sobre a fragilidade ambiental do PESBE, pois além de apresentarem os maiores valores de peso, nessas variáveis às erosões mapeadas se concentram na classe de menor NDVI e de maior DVC, o que é corroborado pela literatura especializada (CASSETI, 1991; BIGARELLA, 2007; CUNHA; THOMAZ, 2017; FONSECA FILHO *et al.*; 2019). Nesse sentido, foi evidenciada uma ocorrência observada de formas erosivas (O_O) muito superior a ocorrência esperada (O_E) na classe de menor NDVI (O_O 97% maior que a O_E), e na classe de maior DVC (O_O 85% maior que a O_E). Por outro lado, a variável que menos apresentou associação com a ocorrência de formas erosivas foi a Declividade (DEC), pois a distribuição das erosões em suas classes ocorreu de maneira semelhante à distribuição normal, sendo constatado que a maior ocorrência observada de erosões (identificada no intervalo de 16,78° a 23,07°) foi apenas 11% maior que a ocorrência esperada.

De maneira geral, constatou-se que as maiores declividades se encontram em vertentes escarpadas, como é o caso do compartimento *Escarpas*, ao norte (trecho da Serra da Boa Esperança), ao noroeste, no front da Serra do Chapadão e ao leste e sudeste, especialmente as escarpas com faces voltadas para leste. Nestas localidades, o NDVI (Figura 31) mostra altos valores de cobertura vegetal. Assim, a vegetação mais densa, propicia proteção e manutenção da camada superficial do solo, dificultando a ocorrência de erosões.

O Índice de Vegetação é a variável que possui maior destaque no modelo de fragilidade devido ao seu elevado valor de peso, 59% maior que o peso da Densidade de Vias. Nesse sentido, através da análise do mapa de FA em conjunto com os mapas das variáveis geoambientais, foi observado uma relação inversa entre a variável Índice de Vegetação e a fragilidade ambiental, uma vez que, na maior parte do território do parque, foi constatado que as áreas que apresentam os menores valores de FA são as que detém os maiores valores de NDVI, como ocorre nas áreas que comportam fragmentos florestais, localizadas de maneira mais significativa no front da Serra da Boa Esperança, em seu trecho no setor sul do PESBE; na vertente leste desta mesma serra, no setor sudeste e na bacia do Ribeirão Verde, no setor noroeste.

Figura 39 – Mapa de Fragilidade Ambiental (FA) da área de estudo



Fonte: Do autor (2021)

A relação inversa entre FA (Figura 39) e NDVI (Figura 31) está atrelada à baixa quantidade de processos erosivos identificada nas áreas que detêm uma vegetação mais vigorosa. Esse fato pode ser explicado devido a capacidade da vegetação de auxiliar no predomínio da infiltração da água da chuva sobre o escoamento superficial, por meio da interceptação de parte das gotas de chuva e consequente diminuição do impacto das mesmas sobre o solo, evitando assim que ocorra o início do processo erosivo (CASSETI, 1991; GUERRA, 2020). É importante destacar que a porcentagem de precipitações interceptada é maior nas florestas sempre verdes do que nas decíduas e na vegetação herbácea (BIGARELLA, 2007), ou seja, as coberturas vegetais que possuem maiores valores de NDVI contribuem mais eficazmente para a redução da ação erosiva.

A baixa fragilidade ambiental encontrada no front da Serra da Boa Esperança, em áreas inseridas tanto no compartimento Escarpas quanto no compartimento Morros com Encostas Suaves, no setor sul do PESBE, está relacionada à um relevo que, de modo geral, apresenta vertente íngremes (com exceção das áreas de limite do parque), sendo recobertas por uma vegetação arbórea densa, caracterizada por fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (RANGEL, 2017), e possuindo poucos canais fluviais, de 1ª ordem, que nascem nas proximidades do limite do parque. Nas áreas de baixa FA dessas vertentes não são identificadas trilhas ou estradas vicinais, gerando uma densidade de vias que apresenta valores baixos e médios, estando os valores médios associados às trilhas que existem na crista da Serra da Boa Esperança, à montante dessas áreas.

A conjunção dessas características indica que apesar de íngremes, essas vertentes encontram-se estabilizadas pela presença de uma vegetação vigorosa, situada sobre um terreno permeável, que favorece a pedogênese e a baixa densidade de drenagem (BIGARELLA, 2007). Esses fatores de ordem natural associados a ausência de vias de circulação podem explicar a baixa ocorrência de formas erosivas e os baixos índices de FA nessas vertentes.

Entretanto, é importante ressaltar que à montante dessas áreas protegidas pela vegetação florestal, ocorre uma vegetação predominantemente formada por campos de altitude, que oferecem menor proteção ao solo. Nesses terrenos, situados no compartimento de Escarpas, foram identificadas três voçorocas ativas associadas à vários sulcos erosivos, nas proximidades da nascente um canal fluvial pertencente a uma sub-bacia hidrográfica que se desenvolve fora dos limites do parque.

Levando-se em consideração o fato de que as únicas voçorocas ativas mapeadas no parque se encontram nessa área, estando localizadas espacialmente próximas a sulcos erosivos,

infere-se que esses terrenos sejam susceptíveis à uma rápida evolução de processos erosivos lineares, uma vez que os sulcos, mediante ação do escoamento concentrado, podem se desenvolver rapidamente formando ravinas de dimensões variadas, que em condições favoráveis podem se aprofundar até atingir o nível freático, culminando nas voçorocas (ALMEIDA FILHO, 2014). O fato de não terem sido identificadas ravinas nos arredores pode indicar que os processos de voçorocamento sejam recentes, sendo assim, elucida-se que caso haja uma interferência antrópica predatória, a exemplo da prática do motociclismo *Off Road* nesta área, a erosão linear ali existente passe a ser acelerada, podendo ocasionar uma rápida evolução dos sulcos em novas voçorocas (BIGARELLA, 2007).

Os valores intermediários tendendo a baixos valores de FA localizam-se principalmente no reverso da Serra da Boa Esperança – setor sul do parque; nos topos e vertentes amplas dos *Morros com Encostas Suaves*, no setor oeste; e na área de transição entre os compartimentos de *Escarpas* e de *Morros com Encostas Suaves*, no setor centro-norte. Nessas áreas, predomina uma vegetação mais esparsa, principalmente os campos de altitude; densidades de drenagem predominantemente baixas, médias-baixas de densidade de vias e uma declividade também intermediária.

Quanto a ocorrência de formas erosivas destaca-se uma área no setor oeste do parque, sobre o compartimento de *Morros com Encostas Suaves*, que apresenta uma densidade considerável de feições erosivas de tipologias diferentes (4,457 a 9,039 pontos/km²), ocorrendo principalmente sulcos, ravinas, erosões antrópicas e escorregamentos. Considerando que as características do meio físico da área em questão não são favoráveis ao desenvolvimento de processos erosivos, pode-se relacioná-los à uma estrada que corta a área e segue em direção norte, visto que as estradas rurais não pavimentadas interferem nos processos hidrossedimentológicos e geomorfológicos, favorecendo o desenvolvimento de erosões hídricas devido ao incremento da velocidade do escoamento superficial (CUNHA; THOMAS, 2013; VESTENA, 2013; CUNHA; THOMAZ, 2017). Esse fato é corroborado pela espacialização das feições erosivas na área mencionada, pois estas se localizam ao longo da referida via, bastante próximas a ela.

Já os valores intermediários tendendo a altos valores de FA são encontrados sobretudo no setor central do parque (no entorno da área que apresenta os maiores valores de FA), ocorrendo também nos setores centro-sul, sudoeste, nordeste e norte.

Os valores de FA evidenciados no setor norte do PESBE demonstram que apesar do NDVI ser a variável que detém o maior peso em relação a fragilidade ambiental, as variáveis

densidade de vias e densidade de drenagem também exercem uma influência significativa na FA, tendo em vista que no referido setor predomina uma vegetação que apresenta valores de NDVI variando de médios a altos, ao passo em que, observa-se também, em boa parte de seu território, valores de FA variando de médios a altos. Isso se deve à predominância de valores elevados de densidade de drenagem, a ocorrência de valores intermediários de densidade de vias, e em um segundo plano, aos altos índices de declividade, que apesar de ter uma influência pequena na fragilidade ambiental, em conjunto com as demais características favoráveis ao desenvolvimento de processos erosivos contribui para elevar os valores de FA.

Já nos setores central, centro-sul e sudoeste os valores intermediários tendendo à altos são identificados principalmente sobre o compartimento de *Morros com Encostas Suaves*, mas também ocorrendo (no setor centro-sul) na *Planície Aluvial* do Ribeirão Águas Verdes, localizada no médio curso deste canal. Nessas áreas, predomina uma vegetação pouco densa caracterizada pelos campos de altitude, porém com presença significativa de vegetação arbórea, disposta em forma de fragmentos florestais e matas ciliares dos tributários do Ribeirão Águas Verdes. O relevo, de modo geral, é pouco dissecado, não apresentado altos índices de declividade e altas densidades de drenagem, com exceção de uma sub-bacia de 2ª ordem na margem direita do Ribeirão Águas Verdes e de uma pequena área próxima aos limites do parque no setor sudoeste, que comportam elevadas densidades de drenagem. Quanto ao uso antrópico, observa-se uma grande quantidade de vias de circulação, principalmente trilhas utilizadas pelos praticantes de motociclismo *Off Road*, o que repercute na predominância de altos valores de densidade de vias.

Quanto a ocorrência de processos erosivos, destaca-se uma área à montante da planície aluvial do Ribeirão Águas Verdes, onde é observada uma ocorrência significativa de erosões, sendo elas principalmente sulcos erosivos e erosões antrópicas, resultando em uma mancha de densidade de formas erosivas média, tendendo a alta (4,457 a 9,039 erosões/km²). Devido aos índices intermediários, tendendo a altos, de fragilidade ambiental nessa área, afirma-se que existe um potencial relativamente alto para o surgimento de novos processos erosivos e evolução dos já existentes, como corroborado por Bigarella (2007), ao salientar a tendência de evolução das ranhuras no terreno em sulcos erosivos, mediante ação do escoamento concentrado. Esse quadro pode se agravar com a recorrência do uso das trilhas e áreas adjacentes pelas motocicletas, na medida em que o atrito exercido por seus pneus no solo pode criar novas ranhuras ou aprofundar as feições existentes, além de danificar a cobertura vegetal que naturalmente já é mais fragilizada.

Ressalta-se que mesmo nas áreas que apresentam enclaves de vegetação com alta biomassa, nos setores central, centro-sul e sudoeste, são observados valores intermediários de FA, demonstrando que apesar da vegetação possuir grande influência na fragilidade ambiental, as características das demais variáveis ambientais nessas áreas as tornam potencialmente susceptíveis ao desenvolvimento de processos erosivos, tornando evidente que se essa vegetação for suprimida ou se tornar menos densa, existe uma grande possibilidade de evolução das erosões já existentes na área, além do surgimento de novos processos.

Quanto aos valores intermediários, tendendo a altos, de FA evidenciados no setor nordeste e na porção meridional do setor norte, pode-se afirmar que estão relacionados a uma cobertura da terra formada pelo mosaico de pastagens degradadas, campos naturais, áreas de cultivo agrícola, solo exposto, pequenos fragmentos florestais e matas ciliares, o que reflete em uma cobertura bastante heterogênea, porém predominando uma vegetação que apresenta valores de NDVI intermediários, tendendo a baixos. Essas áreas apresentam densidades de drenagem e de vias de circulação predominantemente altas, refletindo em um número considerável de canais de 1ª ordem associados a diversas trilhas, sendo que várias delas apresentam sinais de degradação.

O relevo pouco acidentado dessas áreas de sopé de serra facilitou a expansão da atividade agrícola para dentro dos limites do parque. Essa atividade, quando não realizada utilizando-se práticas corretas de manejo do solo, pode acarretar em sérios danos aos sistemas ambientais em diferentes esferas (GUERRA; MENDONÇA, 2020), sendo que no caso do PESBE pode-se exemplificar:

- a) Os prejuízos à cobertura vegetal natural, tendo em vista que as gramíneas introduzidas na vegetação nativa de áreas de Cerrado para incrementar a produtividade das pastagens, como espécies do gênero *Brachiaria*, são extremamente agressivas, tendo o potencial de deslocar as gramíneas nativas das áreas que invadem (BARUCH *et al.*, 1985; DURIGAN *et al.*, 1998), como já observado nessas áreas do parque;
- b) Os distúrbios à fauna silvestre devido à presença de animais domésticos, como cães e bovinos identificados nas dependências do parque por Alves (2019);
- c) A potencial contaminação dos recursos hídricos dessas áreas caso ocorra o uso de defensivos agrícolas nas áreas de cultivo que adentram os limites do parque ou estão situadas nas áreas adjacentes.

Ainda no tocante aos efeitos nocivos da atividade agrícola realizada sem o devido manejo, Guerra e Marçal (2018, p. 36) salientam que “o relevo de uma determinada área, bem como os solos aí existentes, podem, a médio e longo prazos, sofrer grandes transformações se não forem tomadas medidas conservacionistas no meio rural”. Nesse sentido, pode-se citar a remoção da camada superficial do solo em áreas de cultivos agrícolas, acarretando em perda de matéria orgânica e minerais (MAFRA, 2020), além da compactação do solo e criação de caminhos preferenciais para o escoamento superficial, como ocorre em áreas de pastoreio, o que aumenta o risco de erosão (BOTELHO; SILVA, 2004).

Corroborando tais afirmações, observa-se nestes setores do PESBE os mais altos valores de densidade de formas erosivas identificados na UC (9,04 a 16,233 erosões/km²), ocorrendo principalmente sulcos erosivos, erosões antrópicas e erosões laminares. As erosões em sulcos estão associadas às pastagens degradadas e áreas de cultivo, devido a compactação do solo e aos baixos valores de NDVI apresentados por estas áreas. Além disso, é importante considerar que devido à alta densidade de drenagem associada à uma vegetação esparsa, possivelmente o substrato geológico e/ou pedológico destas áreas é pouco permeável, favorecendo o escoamento concentrado e o desenvolvimento de sulcos, bem como a evolução da erosão antrópica em sulcos erosivos. Já as diversas erosões laminares estão associadas, além das pastagens, às áreas de cultivo, que apresentam baixos valores de NDVI, sendo observado inclusive a presença de solo exposto. Esse tipo de processo erosivo apesar de pouco perceptível devido a sua morfologia, se trata de uma das manifestações erosivas mais importantes, pois além da degradação física causa perda de fertilidade do solo (MAFRA, 2020).

Ressalta-se que apesar das áreas mencionadas estarem localizadas em sopés de serra, elas fazem parte do compartimento de *Escarpas*, estando, portanto, inseridas em uma forma de relevo que apresenta rampas com amplitudes superiores a 350 m e declividades superiores a 20 % (PIRES NETO, 1991). Tal fato torna essas áreas ainda mais críticas no tocante à fragilidade ao desenvolvimento de novos processos erosivos, bem como a dinamização dos processos já existentes, tendo em vista que a declividade e o comprimento de rampa, ou comprimento de encosta, são os atributos topográficos do terreno que exercem maior influência sobre a intensidade erosiva, interferindo diretamente na velocidade do escoamento fluvial (SALOMÃO, 2020).

Por fim, os valores mais altos de FA estão localizados no setor central do parque, em uma área que abarca o trecho superior da bacia do Ribeirão Águas Verdes, sobre o compartimento de *Morros com Encostas Suaves*, o front da Serra da Boa Esperança, inserida

no compartimento *Escarpas*, e a crista retilínea desta serra, que limita os dois compartimentos de relevo.

Nessa área, ocorre uma vegetação predominantemente pouco densa formada por campos naturais, com a presença de poucos enclaves de vegetação arbórea mais densa, associada à um relevo que apresenta rampas alongadas e declividades intermediárias, sobre o qual se desenvolvem densas redes de drenagem e de vias de circulação. Garofalo e Ferreira (2015) e Rodrigues Neto e Ferreira (2020) encontraram uma relação similar entre a cobertura vegetal, a densidade de vias de circulação e os índices mais elevados de FA em suas respectivas áreas de estudo, evidenciando que os terrenos mais frágeis à ocorrência de erosões apresentam baixos valores de NDVI e altas densidades de vias.

Pode-se associar os altos índices de FA nesses terrenos ao grande potencial erosivo apresentado pela vasta rede de trilhas ali presente, levando-se em consideração à impermeabilidade do substrato (inferida pelos altos índices de Dd), bem como o fato destas trilhas estarem situadas em um solo pouco protegido pela vegetação. Considerando a topografia das formas de relevo sobre as quais essas áreas estão majoritariamente situadas, pode-se afirmar que essas características em conjunto tendem a influenciar o predomínio do componente paralelo sobre o componente perpendicular, ou ainda da morfogênese sobre a pedogênese,

Ressalta-se que boa parte das trilhas mencionadas está situada na bacia do Ribeirão Águas verdes, que possui grande relevância para o parque, pois além de apresentar uma hierarquia fluvial de 3ª ordem, abrange uma porção considerável de seu território. Esse fato torna a presença dessas vias ainda mais preocupante no que tange a conservação da UC, uma vez que as mesmas ampliam a conexão entre vertente e canal fluvial, aumentando o escoamento superficial e a produção de sedimentos (LUCE; WEMPLE, 2001).

Destaca-se também que a ação erosiva promovida pela fricção dos pneus das motos tende a provocar a sedimentação dos canais. Nesse sentido, a localização do alvéolo e da planície aluvial do Ribeirão Águas Verdes ainda em seu curso médio é indicativo de uma concentração de sedimentos considerável nas águas desse ribeirão, o que tende a se agravar caso a produção de sedimentos não diminua.

Torna-se pertinente salientar que o aumento da produção de sedimentos promovido pelas motocicletas e destinados de maneira mais rápida ao Ribeirão Águas Verdes pelas vias de circulação também acarreta em mudanças na erosão do referido canal fluvial, pois a determinação da erosão “[...] realizada num curso d’água, apresenta uma visão global do movimento de sólidos numa bacia hidrográfica” (BIGARELLA, 2007, p. 1269).

Quanto à presença de erosões nas áreas mais frágeis do PESBE, foram identificadas majoritariamente as feições oriundas da atividade de motociclismo *Off Road* (Figura 40), as quais apresentaram uma densidade intermediária, tendendo a alta, oscilando entre 1,783 a 9,039 feições/km². Esse fato reforça a forte relação desta atividade antrópica predatória tanto com a fragilidade do ambiente em desenvolver processos erosivos – considerando que as trilhas são elementos da paisagem que exercem influência significativa na FA, quanto com o próprio desenvolvimento e dinamização destes processos, pois as motocicletas são agentes ativos da erosão no PESBE.

Figura 40 – Erosão antrópica identificada em área que apresenta alta FA na área de estudo



Fonte: Arquivo pessoal

Assim como ocorre nas áreas mais a jusante, no setor central, que abrigam diversas feições erosivas provocadas pela atividade *Off Road*, as áreas que apresentam os maiores índices de fragilidade, mais a montante neste mesmo setor, também correm sério risco destas feições de ordem antrópica se agravarem e se tornarem erosões hídricas, tendo em vista que quanto maiores são os índices de FA à ocorrência de processos erosivos, maior é a susceptibilidade do terreno em desenvolver as diversas formas destes processos.

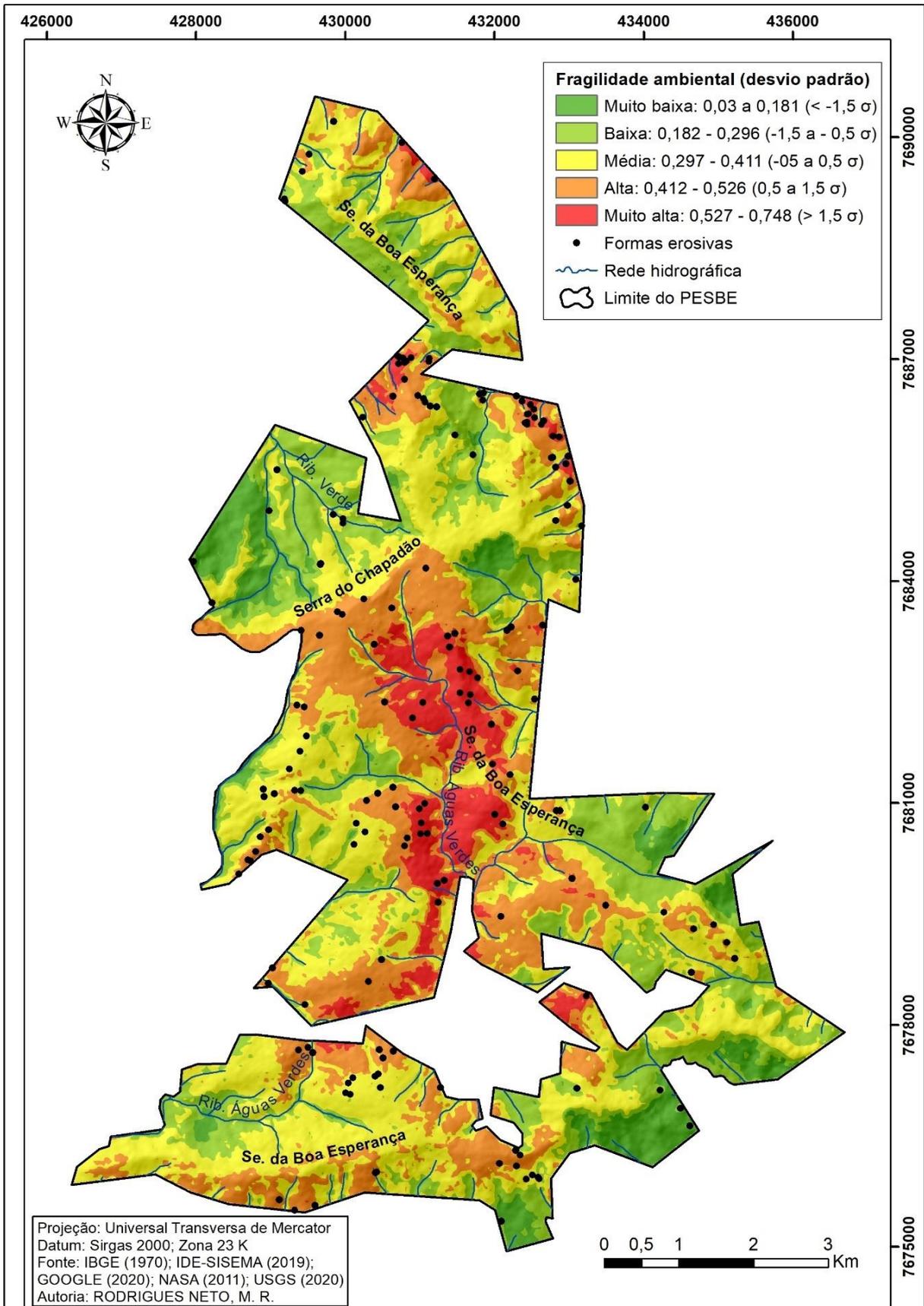
Considerando que os estudos analíticos de fragilidade ambiental “[...] são documentos de extrema importância ao Planejamento Ambiental, que tenha como centro de preocupação o desenvolvimento sustentado” (ROSS, 1994, p. 64), bem como o fato de que “ a análise das fragilidades proporciona diretrizes ao planejamento de uso e ocupação, de forma a preservar o equilíbrio ambiental” (AMARAL; ROSS, 2009, p. 77), foi criada, como produto complementar, uma proposta de zoneamento da fragilidade ambiental no PESBE (Figura 41), visando demonstrar através de categorias de fragilidade (variando de muito baixa a muito alta) quais são as zonas mais ou menos frágeis do parque, e assim oferecer um produto que apresenta uma interface mais adequada à sua utilização como subsídio para o Planejamento Ambiental da referida UC.

As zonas de fragilidade muito baixa ($< - 1,5 \sigma$) ocupam 6,88 % da área do PESBE, localizando-se principalmente nos setores sul, sudeste e noroeste. As zonas de fragilidade baixa ($- 1,5$ a $- 0,5 \sigma$) estendem-se por 23,15 % do território do parque, estando relacionadas as zonas de fragilidade muito baixa, além de abrangerem áreas nos setores norte, centro-norte, centro-oeste e leste. Estas zonas são aquelas menos propensas à evolução de processos erosivos.

As zonas detentoras de FA média ($- 0,5$ a $0,5 \sigma$) são as mais presentes no parque, abrangendo 39,17 % de suas terras. São identificadas em todos os setores do parque, porém ocupam maior quantidade de terras nos setores sul, centro-oeste, nordeste e norte. Recomenda-se que haja certa atenção no que se refere à conservação dessas áreas, principalmente no que concerne à prática do motociclismo Off Road, atividade fortemente relacionada à FA no PESBE.

Já as zonas de alta FA ($0,5$ a $1,5 \sigma$) representam 23,82 % da área do PESBE, estando inseridas principalmente nos setores central, norte, nordeste e sul. Por fim, as zonas que apresentam fragilidade muito alta ($> 1,5 \sigma$) correspondem a 6,96 % do território da UC, concentrando-se nos setores central e centro-sul, além de ocuparem pequenas porções de terra nos setores norte, nordeste e sul.

Figura 41 – Mapa de Zonas de Fragilidade Ambiental (FA) do PESBE-MG



Fonte: Do autor (2021)

Amaral e Ross (2009), ao analisarem a fragilidade ambiental do Parque Estadual do Morro do Diabo e de seu entorno, no município de Teodoro Sampaio – SP, concluíram que as maiores fragilidades no parque estão relacionadas a exposição e compactação do solo, e consideram que “a intervenção humana, verificada pela alteração no uso da terra, é o fator preponderante nos casos de processos erosivos observados na área” (AMARAL; ROSS, 2009, p. 76). Sendo assim, os autores recomendam que nas áreas mais frágeis seja realizado o reflorestamento onde a vegetação nativa foi removida, evitando que a erosão aja sobre o solo exposto, e salientam que as áreas no entorno da UC também devem ser preservadas, visando melhorar as condições ambientais da mesma.

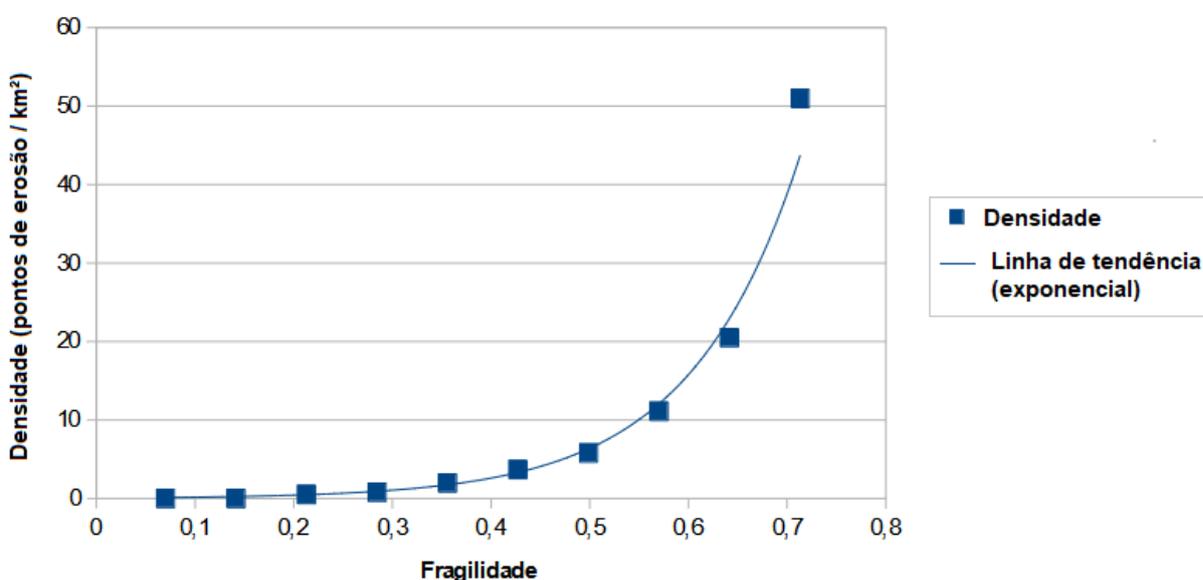
Por outro lado, Cavalcante *et al.* (2010), identificaram que as áreas mais vulneráveis no Parque Estadual Sumaúma, na Amazônia, concentram-se principalmente nas bordas da UC, devido à proximidade com ocupações urbanas, possuindo forte relação com a grande quantidade de trilhas. Dessa maneira, os autores recomendam que sejam realizados estudos sobre a capacidade de suporte das trilhas e que sejam criados programas de educação ambiental para fortalecer o vínculo entre a comunidade do entorno e a UC, afim de se minimizar os danos que ocorrem em seus limites.

Considerando as recomendações dos autores citados (2009; 2010) bem como as características específicas do PESBE quanto a fragilidade ambiental, recomenda-se que haja um controle mais severo das atividades antrópicas que influenciam a ocorrência e evolução de processos erosivos nestes locais, principalmente a atividade de motociclismo *Off Road*, que ocorre de maneira mais intensa no setor central, e das atividades agrícolas identificadas nas áreas limítrofes do setor nordeste. Nesse sentido, recomenda-se que se evite ao máximo a interferência antrópica nas áreas do PESBE que detêm coberturas vegetais pouco densas, pois como as mesmas são naturalmente mais frágeis à ação erosiva das chuvas, a ação antrópica apresenta um grande potencial para provocar a erosão acelerada. Por fim, recomenda-se que sejam criados programas de educação ambiental visando demonstrar os diversos aspectos do PESBE, como sua biodiversidade, recursos naturais, fragilidades e potencialidades, à população do município de Boa Esperança e aos turistas que frequentam o parque, objetivando criar um maior vínculo das pessoas com a UC, ressaltar a relevância da mesma no contexto local e regional, além de expor suas fragilidades, incentivando assim a preservação ambiental.

6.3.1 Análise da correlação espacial entre o mapeamento da Fragilidade Ambiental e a ocorrência de formas erosivas no PESBE

Foi realizada uma análise de regressão para avaliar o grau de associação entre a fragilidade ambiental e as erosões mapeadas no PESBE. O diagrama de dispersão (Figura 42) permitiu perceber o crescimento exponencial da densidade de pontos de erosão à medida em que se eleva o grau de fragilidade. Esta análise mostrou um pequeno adensamento de processos erosivos nas baixas e médias classes de fragilidade, enquanto há um forte adensamento de processos nas últimas.

Figura 42 – Diagrama de dispersão demonstrando a relação entre FA e densidade de formas erosivas



Fonte: Organizado pelo autor (2021)

A regressão do tipo exponencial entre os valores médios das classes atribuídas de fragilidade ambiental (variável X) e a densidade de formas erosivas (variável Y) apresentou coeficiente de correlação de Pearson (r) igual a 0,9971. A realização do teste *t de Student* demonstra que pode ser rejeitada a hipótese H_0 e aceita a hipótese H_1 , sendo assim, o valor obtido pelo coeficiente de correlação ($r = 0,9971$) é significativo dentro de um intervalo de confiança de 99,9%.

Essa constatação evidencia que o mapeamento da fragilidade ambiental realizado para o PESBE condiz com as evidências empíricas de processos erosivos no parque. Isto demonstra, por um lado, que a análise integrada das variáveis influenciadoras da FA foi realizada de maneira correta, e que existe uma grande potencialidade das áreas mais frágeis desenvolverem processos erosivos futuros.

7 CONCLUSÃO

O Parque Estadual Serra da Boa Esperança é uma unidade de conservação de grande relevância no contexto geográfico, pois além de abrigar recursos naturais importantes, como a rede hidrográfica e as áreas com vegetação nativa típica do Cerrado e da Mata Atlântica, apresenta grande potencial turístico, graças ao complexo sistema-relevo da Serra da Boa Esperança e aos seus diversos atrativos naturais, de grande beleza paisagística.

Desde sua criação, o PESBE enfrenta alguns problemas que dificultam o cumprimento de seu principal objetivo, que é a proteção da natureza. Estes problemas estão em parte relacionados: a ausência do Plano de Manejo, atualmente em execução; a lenta regularização fundiária, tão recorrente nas unidades de conservação nacionais; à falta de compreensão por parte da população a respeito do significado e da importância das unidades de conservação, o que provoca atividades conflitantes como incêndios criminosos, utilização inadequada de seus atrativos, e uma atividade recorrente que é o motociclismo *Off Road*, o que acarreta diversos prejuízos ambientais.

O mapeamento das variáveis geoambientais propostas para o modelo de Fragilidade Ambiental, em conjunto com o mapa geomorfológico e o mapa hipsométrico, permitiu a compreensão do meio físico do PESBE, além de possibilitar a análise da intervenção antrópica sobre o mesmo. O PESBE é formado predominantemente por *Morros com Encostas Suaves*, ocupando 57 % de sua área total, e por *Escarpas*, que ocupam 42% dos terrenos, apresentando altitudes que variam entre 783 a 1.395 m, e declividades que oscilam entre 0 a 76, 4°.

O mapa de Índice de Vegetação, obtido por meio do NDVI, demonstrou as diferenças entre a cobertura vegetal pouco vigorosa no setor central (em grande parte formada por campos naturais), e a vegetação com alto vigor, correspondendo aos fragmentos de mata estacional semidecidual encontrados nas áreas limítrofes do parque. A utilização da imagem mediana ao invés da imagem de uma única data demonstrou o comportamento da vegetação com base em diferentes momentos, considerando tanto o período seco quanto o chuvoso, e não apenas o comportamento em um dia específico, permitindo uma análise mais condizente com a realidade terrestre.

A inclusão da variável Densidade de Drenagem no modelo de fragilidade auxiliou na compreensão dos processos erosivos do PESBE, levando-se em consideração o fato de que os rios são importantes agentes modeladores do relevo, e que o parque apresenta abundantes recursos hídricos. Dentre as áreas que apresentam maiores densidades estão as bacias do

Ribeirão Verde e Ribeirão Águas Verdes, ambas de 3ª ordem. Estas bacias detêm boa parte dos recursos hídricos do parque – um dos motivos para sua criação – logo torna-se de suma importância que sejam preservadas.

O mapeamento da Densidade de Vias de Circulação evidenciou que a atividade de motociclismo *Off Road* ocorre de maneira intensa no parque, pois grande parte das vias mapeadas dizem respeito as trilhas utilizadas para essa atividade. Assim, a baixa proteção oferecida pela cobertura vegetal em diversas áreas do parque, aliada a capacidade destas trilhas de compactar o solo e disciplinar o escoamento superficial, favoreceu o desenvolvimento de processos erosivos e a conseqüente produção de sedimentos. Reforça-se, portanto, a necessidade de medidas que visem cessar as atividades de motociclismo *Off Road*, pois as mesmas auxiliam no surgimento e evolução de novos processos erosivos.

Constatou-se através do mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais que o PESBE não apresenta altas concentrações de lineamentos, visto que os maiores valores de densidade variam de 0,866 a 2,163 km/km². Isso se deve ao fato de que parte dos lineamentos está situada em canais de 1ª ordem localizados nos limites do parque, estando consideravelmente distantes de outros canais. Há maior concentração de erosões nas classes inferiores de lineamentos estruturais, demonstrando que esta variável possui relação ínfima com a ocorrência dos referidos processos em comparação as demais variáveis, por isso a mesma foi descartada do modelo.

A variável Probabilidade de Ocorrência de Chuvas Intensas não apresentou resultados satisfatórios, denotando uma grande homogeneização, devido à dimensão relativamente curta do parque associado a ausência de estações pluviométricas em seu interior ou no entorno.

Por meio do mapeamento das erosões no PESBE foram identificadas 177 formas erosivas, sendo mais recorrentes as feições do tipo erosão laminar (60 ocorrências), e as menos recorrentes, as ravinas (3 ocorrências). Ao se estabelecer os pesos das variáveis geoambientais em relação a ocorrência das formas erosivas mapeadas, foram consideradas as variáveis Índice de Vegetação, Densidade de Vias, Densidade de Drenagem e Declividade, ficando evidenciado que o Índice de Vegetação possui a maior influência sobre a formação e evolução dos processos erosivos ao passo que a Declividade possui a menor influência.

O mapeamento da Fragilidade Ambiental possibilitou concluir que as áreas menos frágeis do PESBE ocorrem nos setores sul, sudeste e noroeste, associadas à presença de fragmentos florestais e a ausência ou baixa ocorrência de vias de circulação. Já os terrenos mais frágeis localizam-se no setor central do parque, em áreas que abrangem parte da bacia do

Ribeirão Águas Verdes e da Serra da Boa Esperança. Nessas áreas há uma combinação entre vegetação pouco vigorosa e densas redes de drenagem e de vias, bem como uma grande ocorrência de erosão antrópica, gerando uma densidade de formas erosivas média-alta.

A análise de correlação espacial demonstrou a existência de uma relação altamente positiva entre a Fragilidade Ambiental e a ocorrência de formas erosivas, evidenciando o crescimento exponencial das erosões conforme o aumento dos valores de fragilidade, indicando que o resultado obtido pela álgebra ponderada das variáveis geoambientais condiz com as evidências de processos erosivos no PESBE.

Foi constatado que a metodologia de Fragilidade Ambiental empregada nesta pesquisa apresentou resultados satisfatórios, condizentes com a realidade terrestre do PESBE. A atribuição de pesos pelo teste estatístico Kolmogorov-Smirnov possibilitou que a influência de cada variável na susceptibilidade das áreas ao desenvolvimento e dinamização de processos erosivos fosse atribuída de maneira mais objetiva se comparada as metodologias tradicionais, sendo baseada na ocorrência empírica das erosões e gerando resultados condizentes com a morfodinâmica do parque. Por outro lado, a apresentação dos índices de fragilidade em escala *Fuzzy* possibilitou uma representação mais fiel da fragilidade dos terrenos do parque, evitando que ocorressem perdas no nível de detalhamento passíveis de ocorrer quando informações espaciais contínuas são classificadas com intervalos rígidos.

É importante ressaltar que a área relativamente pequena do PESBE não permitiu que a metodologia fosse aplicada com todo seu potencial, prejudicando o mapeamento da probabilidade de ocorrência de chuvas intensas e da densidade de lineamentos estruturais. Sendo assim, recomenda-se que essa metodologia seja aplicada em áreas que permitam um mapeamento em média escala, ou que sejam utilizadas estratégias para aumentar a escala de mapeamento quando possível, a exemplo de levantamento de dados em campo.

As informações levantadas sobre o Parque Estadual Serra da Boa Esperança nesta pesquisa podem servir como subsídio para o desenvolvimento de novas pesquisas no ramo da Geografia nesta Unidade de Conservação ainda tão pouco estudada, mas que apresenta um grande potencial para pesquisa científica devido as suas características geomorfológicas, biológicas e hidrológicas. Espera-se que este trabalho também contribua com informações para que sejam tomadas medidas para aumentar o grau de preservação das áreas mais frágeis à ocorrência de processos erosivos, dentre elas a proibição de atividades conflitantes com os objetivos da referida Unidade de Conservação.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, C. M. R.; BACANI, V. M. Diagnóstico da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Santo Antônio, MS: subsídio ao zoneamento ambiental. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 38, n. 3, p. 619-645, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56362>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- AB' SÁBER, AZIZ. **Os Domínios de Natureza no Brasil**. 6. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb v3.1.1**. Disponibiliza o download de dados de chuvas. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 02 dez. 2019.
- ALASKA SATELLITE FACILITY. **DATA SEARCH VERTEX**. 2020. Disponibiliza o download de produtos de sensoriamento remoto. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS>. Acesso em: 14 jul. 2020.
- ALMEIDA, N. O. de. Metodologias em Geomorfologia Ambiental. **Geosul**, [s. l.], v.1, n. 1, p. 59-68, 1986. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/12543>. Acesso em: 13 set. 2020.
- ALMEIDA FILHO, G. S. Uso das terminologias de processos erosivos lineares dos tipos ravina e voçoroca. **Revista Geonorte**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 693-699, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1790/1674>. Acesso em: 13 dez. 2020.
- ALVES, C. S. **Levantamento de mamíferos de médio e grande porte do Parque Estadual Serra da Boa Esperança, Minas Gerais**: contribuições para o plano de manejo. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências biológicas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- AMARAL, R. do.; ROSS, J. L. S. As Unidades Ecodinâmicas na análise da fragilidade ambiental do Parque Estadual do Morro do Diabo e entorno, Teodoro Sampaio/SP. **GEOSP Espaço e Tempo**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 59-78, 2009. Disponível em: 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2009.74128. Acesso em: 14 abr. 2019.
- AMBRÓSIO, Rafaela Vidal. **Situação fundiária dos Parques Estaduais de Minas Gerais**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – área de concentração em Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- ANDRADE, W. J. Implantação e manejo de trilhas. In: MITRAUD, S. (Ed.) **Manual de ecoturismo de base comunitária**: ferramentas para um planejamento responsável. Brasília: WWF. 2003. p.247-259.
- ANDREOTTI, G.; GABRIEL, K. Paisagens do espírito: a encenação da alma. **Atêlie Geográfico**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 264- 280, 2010. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/16677>. Acesso em: 18 jun. 2020.

ARAÚJO, T. P. de. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro /SP**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06122011-104236/en.php>. Acesso em: 11 mar. 2020.

BARUCH, Z., LUDLOW, M. M.; DAVIS, R. Photosynthetic responses of native and introduced C₄ grasses from Venezuelan savannas. **Oecologia**, [s. l.], v. 67, p. 388–393, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00384945>. Acesso em: 18 dez. 2020.

BATEIRA, C.; SOARES, L. Movimentos em massa no norte de Portugal. Factores da sua ocorrência. **Territorium**, [s. l.], n. 4, p. 63-77, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.14195/1647-7723_4_6. Acesso em: 15 ago. 2020.

BATISTA, J. P. G.; SILVA, F. M. da. Avaliação da fragilidade ambiental na microbacia do riacho Cajazeiras no semiárido Potiguar. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 33, n. 1, p. 53-72, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v33i1.23632>. Acesso em: 11 mai. 2019.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global. Esboço metodológico. **RA'E GA**, Curitiba, n. 8, p. 141-152, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/raega.v8i0.3389>. Acesso em: 02 jun. 2019.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007.

BINKOWSKI, P.; SOUZA, R. A. de. Impactos socioambientais causados pela prática de Motocross no município de São Francisco de Paula/RS. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, Porto Alegre, v.2, n.3, p.207-216, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21674/2448-0479.23.207-216>. Acesso em: 11 mai. 2020.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. da. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A. J. T. (orgs). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. cap. 6, p. 153-188.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Satélites de Monitoramento. **ALOS – Advanced Land Observing Satellite**. Disponibiliza informações sobre o satélite ALOS. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/alos>. Acesso em: 14 jul. 2020.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Biomas - Vetores. **Biomas do Brasil 1:250.000**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 13 set. 2020.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Geomorfologia 1:250.000 – Downloads. **Brasil_geom_area.zip**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/10870-geomorfologia.html?=&t=downloads>. Acesso em: 13 set. 2020.

BRUCK, E. C.; ONO, H. Y.; FONSECA, H. C. da.; LUDUVICE, M. L.; DINIZ, M.M.; SIMÕES, N. S. Unidades de conservação. **Revista do Serviço Público**, v. 40, n.4, p. 21-28, 1983. Disponível em: <https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/view/2140/1072>. Acesso em: 12 abril 2019.

CARVALHO, T. M. de.; BAYER, M. Utilização dos produtos da “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRTM) no mapeamento geomorfológico do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 35-41, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v9i1.99>. Acesso em: 01 ago. 2020.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991.

CAVALCANTE, D. G.; PINHEIRO, E. da. S.; MACEDO, M. A. de.; MARTINOT, J. F.; NASCIMENTO, A. Z. A.; MARQUES, J. P. C. Análise da vulnerabilidade ambiental de um fragmento florestal urbano na Amazônia: Parque Estadual Sumaúma. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 22, n. 2, p. 391-403, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S198245132010000200012&script=sci_arttext&tlng=p. Acesso em: 05 ago. 2020.

CEREDA JUNIOR, A.; ROHM, S. A. 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, 2014. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/26203407>. Acesso em: 15 set. 2020.

CIDADE-BRASIL. **Município de Boa Esperança**. 2020. Disponibiliza informações sobre Boa Esperança. Disponível em: <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-bo-esperanca.html>. Acesso em: 21 mai. 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 26, p. 16-32, 2008. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15721>. Acesso em: 06 out. 2020.

CLUBB, F. J.; MUDD, S. M.; ATTAL, M.; MILODOWSKI, D. T.; GRIEVE, S. W. D. The relationship between drainage density, erosion rate, and hilltop curvature: Implications for sediment transport processes. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 121, p. 1724-1745, 2016. Disponível em: doi:10.1002/2015JF003747. Acesso em: 21 jan. 2021.

COUTINHO, C. B.; ANDRADE, D. P. Levantamento da avifauna no Parque Estadual Serra da Boa Esperança. *In*: Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 14., 2016, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: GSC Eventos Especiais & IF Sul de Minas, 2016. n.p. Disponível em: <http://meioambientepocos.com.br/anais2016.html#>. Acesso em: 27 ago. 2020.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos:

INPE, 2001. Disponível em: <<http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2019.

CUNHA, M. C. da.; THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. Medidas de controle de erosão em estradas rurais na bacia do Rio das Pedras, Guarapuava-PR. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 107-118, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000100009>. Acesso em: 11 dez. 2020.

CUNHA, M. C. da.; THOMAZ, E. L. Fluxo subsuperficial interceptado por estrada rural: características e distribuição na paisagem. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v.3, n.3, p. 429-447, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v37i3.50763>. Acesso em: 05 mar. 2020.

DIAS, W. A.; THOMAZ, E. L. Avaliação dos efeitos do pastoreio sobre a erosão em margens de canal fluvial em sistema de faxinal. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 23-35, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1982-45132011000100003&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 22 mar. 2019.

DURIGAN, G.; CONTIERI, W. A.; FRANCO, G. A. D. C.; GARRIDO, M. A. O. Indução do processo de regeneração da vegetação de cerrado em área de pastagem, Assis, SP. **Acta bot. bras**, Feira de Santana, v. 12, n. 3, p. 421-429, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33061998000400011>. Acesso em: 12 fev. 2021.

EMÍDIO, Teresa. **Meio ambiente e paisagem**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2006. ESRI. ArcGIS Desktop 10.5 Help, 2016.

FELICÍSIMO, A. M. **Modelos Digitales del Terreno**: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. 1994. Internet. Disponível em: www.etsimo.uniovi.es. Acesso em: 06 out. 2020.

FERREIRA, M.C. **Iniciação à análise geoespacial**: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento. 1. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2014.

FERREIRA, M. C.; MESSIAS, C. G. Methodology for mapping the probability of fire occurrence in the Brazilian Cerrado biome based on the danger of fire propagation variables. **Territorium (Coimbra)**, 2021 (No prelo).

FIGUEIREDO, M. do. A.; BRITO, I. de. A.; TAKEUCHI, R. C.; ALMEIDA-ANDRADE, M. de.; ROCHA, C. T. V. Compactação do solo como indicador pedogeomorfológico para erosão em trilhas de unidades de conservação: estudo de caso no Parque Nacional da Serra do Cipó, MG. **Revista de Geografia-UFPE**, Recife, v. especial VIII SINAGEO, n.3, p.236-247, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/viewFile/228911/23322>. Acesso em: 24 nov. 2019.

FOLHARINI, S. de. O.; OLIVEIRA, R. C. de.; FURTADO, A. L. dos S. 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.343-359, 2017. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1082172>. Acesso em: 15 ago. 2020.

FOSENCA FILHO, R. E.; VARAJÃO, A. F. D. C.; CASTRO, P. de T. A. 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, 2019. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1561>. Acesso em: 10 out. 2020.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; LIMA, R. C. Análise da fragilidade ambiental na microbacia do córrego do Coqueiro, no noroeste paulista. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5040-5046.

FURNAS. **Linha do tempo**. Disponibiliza informações sobre a trajetória da usina hidrelétrica de Furnas. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subsecao/253>. Acesso em: 13 mar. 2020.

GAROFALO, D. T. **Mapeamento da fragilidade ambiental por meio de análise espacial: um exemplo da alta bacia dos rios Piracicaba e Sapucaí Mirim – APA Fernão Dias – MG**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/286955>. Acesso em: 11 out. 2020.

GAROFALO, D. T.; FERREIRA, M.C. Mapeamento da probabilidade de ocorrência de chuvas de intensidade extrema, durante o período de dezembro a março na APA Fernão Dias (MG), a partir de krigagem espacial. *In.: Congresso brasileiro sobre desastres naturais*, Rio Claro, UNESP, 2012.

GAROFALO, D.F.T.; FERREIRA; M.C.; FERREIRA, M.F.M.; MESSIAS, C.G. Mapeamento da densidade de processos erosivos e de movimentos de massa, a partir de imagens do Google Earth georreferenciadas, utilizando estimador kernel: uma aplicação na APA Fernão Dias (MG). *In.: Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 9, 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2012.

GAROFALO, D. T.; FERREIRA, M. C. 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 – USP**, [s. l.], v.29, p.212-245, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102118>. Acesso em: 28 mar. 2019.

GATTO, L. C. S.; RAMOS, V. L. S.; NUNES, B. T. A.; MAMEDE, L.; GÓES, M. H. B.; MAURO, C. A.; ALVARENGA, S. M.; FRANCO, E. M. S.; QUIRICO, A. F.; NEVES, L. B.; 1983. Geomorfologia, Folhas SF. 23/24 Rio de Janeiro/ Vitória ao Milionésimo. Levantamento de Recursos Minerais, Projeto RADAMBRASIL, Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, v.32. p.305-384.

GOOGLE ACADÊMICO. Disponível em: <<https://scholar.google.com.br/?hl=pt>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

GOMES, R. D. Ontologia sistêmica: construção do espaço e perspectiva ambiental. **Geosp Espaço e Tempo**, São Paulo, n.25, p. 109-122, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2009.74115>. Acesso em: 17 mai. 2019.

GOUDIE A. **The Changing Earth – Rates of Geomorphological Processes**. Blackwell: Oxford, 1995, 302 p.

GREGORY, K. J. **A natureza da Geografia Física**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1992.

GROHMANN, C. H. Análise comparativa preliminar entre dados SRTM, Topodata, ASTER GDEM e Modelos de Superfície/ Terreno do Projeto Radiografia da Amazônia. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 17, 2015, João Pessoa, **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 5726-5732.

GUALTIERI-PINTO, L.; OLIVEIRA, F. F. de.; ANDRADE, M. de. A.; PEDROSA, H. F.; SANTANA, W. A. de.; FIGUEIREDO, M. do. A. Atividade Erosiva em Trilhas de Unidades de Conservação: Estudo de Caso no Parque Nacional da Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. **E- scientia**, [s. l.], v.1, n.1, p.1-16, 2008. Disponível em: <https://revistas.unibh.br/dcbas/article/view/119>. Acesso em: 18 ago. 2019.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. *In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 2. ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 149-199, 1995.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. do C. O.; BEZERRA, J. F. R. Slope Processes, Mass Movements and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**, v. 27, n. 1, p. 27-41, 2017.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos. S. **Geomorfologia Ambiental**. 8. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2018.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. 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, 2020. cap. 8, p. 225-251.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. *In: GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S. da.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs). Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. B. do. V. **Introdução ao Geoprocessamento: princípios básicos e aplicação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/562>. Acesso em: 12 mar. 2019.

HOWARD, A.D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG Bulletin*. Virgínia-USA, v. 51, n. 11, p.2246-2259, 1967. Disponível em: <https://doi.org/10.1306/5D25C26D-16C1-11D7-8645000102C1865D>. Acesso em: 12 out. 2020.

INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Camadas**. Disponibiliza o download de dados geoespaciais. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 14 fev. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Biblioteca IBGE. **Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. (pdf). 1990. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv2269_1.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010- Sinopse por setores**. Disponibiliza informações oriundas do censo demográfico de 2010 a nível de setores municipais. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/>. Acesso em: 21 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos municípios- PIB por Município (2017)**. Disponibiliza informações sobre o PIB dos municípios para o ano de 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?t=pib-por-municipio&c=3107109>. Acesso em: 15 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de Mapas**. Disponibiliza o download de material cartográfico. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php>. Acesso em: 14 fev. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades- Boa Esperança**. 2020. Disponibiliza informações sobre o município de Boa Esperança. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/boa-esperanca/panorama>. Acesso em: 21 abr. 2020.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Banco de notícias. **Parque Estadual Serra da Boa Esperança**. 2007. Disponibiliza informações sobre o Parque Estadual Serra da Boa Esperança. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/280?task=view>. Acesso em: 15 jul. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Divisão de Geração de Imagens. Disponibiliza o download de produtos de sensoriamento remoto. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 15 abr. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Manuais- tutorial de geoprocessamento**. Disponibiliza informações sobre sensoriamento remoto e geoprocessamento. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html?fbclid=IwAR3_ci6T871FeFBy5OolEtR0EISX42F3axEK6e5hbSAUGKB00PtqswbABY4. Acesso em: 07 mar. 2019.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2. ed. Saddle River, NJ, United States: Prentice-Hall, 1996.

JORGE, M. do. C. O.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. *In*: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do. C. O (Orgs). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. cap. 1. p. 7-60.

KATZ, H. A.; DANIELS, J. M.; RYAN, S. Slope-area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope–channel interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, [s. l.], v.39, p. 285-295, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.3443>. Acesso em: 11 out. 2020.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2003-2210.

LASCHEFSKI, K. A.; DUTRA, C.; DOULA, S. M. A legislação ambiental como foco de conflitos: uma análise a partir das representações sociais da natureza dos pequenos agricultores em Minas Gerais, Brasil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 405-418, 2012. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/view/13209>. Acesso em: 13 set. 2020.

LEE, R.; YU, F.; PRICE, K. P., ELLIS, J.; SHI, P. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 12, p. 2505-2512, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160110106087>. Acesso em: 21 jan. 2021.

LEITE, E. F.; ROSA, R. Mapeamento geomorfológico: A carta de energia do relevo da bacia hidrográfica do rio Formiga- TO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 5, n.2, p. 269-284, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/viewFile/232790/26790>. Acesso em: 07 abr. 2019.

LEMOS JÚNIOR, C. B. **A implantação da usina hidrelétrica de Furnas (MG) e suas repercussões**: estudo sobre a territorialização de políticas públicas. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/287129>. Acesso em: 24 ago. 2020.

LIU, W.T.H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2. ed. ampl. Campo Grande: Ed UNIDERP, 2015.

LUCE, C. H; WEMPLE, B. C. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 26, p.111-113, 2001. Disponível em: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2001_luce_c001.pdf. Acesso em: 02 fev. 2021.

LUCHIARI, A. Identificação da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de produtos de sensoriamento remoto e de um sistema de informação geográfica. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, [s. l.], v.14, p. 47-58, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.2001.0014.0005>. Acesso em: 15 abr. 2019.

MACHADO, R. L.; RESENDE, A. S. de.; CAMPELLO, E. F. C.; MENEZES, C. E. G.; SOUZA, C. M. de.; FRANCO, A. A. **Recuperação de voçorocas em áreas rurais**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/629509>. Acesso em: 03 abr. 2020.

MAFRA, N. M. C. Erosão e planificação de uso do solo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (orgs). **Erosão e conservação dos solos**. 11. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. cap. 9, p. 301-322.

MALHEIROS, R. A influência da sazonalidade na dinâmica da vida no Bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.19, n.12, p. 113-128, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v19i0.48876>. Acesso em: 25 jan. 2021.

MARTINS, M. L. Olhares sobre o “Mar de Minas”: percepções dos moradores de Alfenas e Fama relativas ao Lago de de Furnas (1963-1999). **Ambiente & Sociedade**, v.13, n.2, p. 347-363, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2010000200009>. Acesso em: 06 jun. 2020.

MAURO, M.F.; VALADÃO, R.C. Organização estrutural da paisagem da Serra da Canastra (MG). **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v.30, n.1, p.53-79, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v30n1-2018-3>. Acesso em: 02 nov. 2019.

MEDEIROS, R.; PEREIRA, G. S. Evolução e implementação dos planos de manejo em Parques Nacionais no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 279-288, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rarv/v35n2/a12v35n2>. Acesso em: 15 jul. 2020.

MELO, K. C.; FURLAN, S. Â. Diferentes paisagens do município de Ubatuba-SP: um estudo geográfico. **GEOUSP Espaço e Tempo**, v. 21, n. 3, p. 650-666, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2017.116478>. Acesso em: 20 mai. 2019.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. de. 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**, v. 23, p. 520-533, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v23i0.24919>. Acesso em: 26 out. 2020.

MESSIAS, C.G. **Mapeamento das áreas susceptíveis à fragilidade ambiental na alta bacia do Rio São Francisco, Parque Nacional da Serra da Canastra-MG**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/286612>. Acesso em: 12 mar. 2020.

MESSIAS, C.G. **Modelo geoespacial para identificação de áreas com perigo de propagação de queimadas no Parque Nacional da Serra da Canastra-MG**. 2018. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/337243>. Acesso em: 13 jan. 2021.

MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. F. M.; RIBEIRO, M. B. P.; MENEZES, M. D. Análise empírica de fragilidade ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento: o caso da área de influência da Hidrelétrica do Funil-MG. **Revista Geonorte**, [s. l.], v.2, n.4, p.112-125, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/revista-geonorte/article/view/2063>. Acesso em: 13 mar. 2019.

MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. C. 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. **Revista Ra' e Ga**, Curitiba, v. 39, p. 111-127, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v39i0.42914>. Acesso em: 18 mar. 2019.

MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. C. Modelo geoespacial para identificação de áreas com perigo de propagação de queimadas no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista do Departamento de Geografia**, [s. l.], v.38, p. 154-168, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v38i1.153493>. Acesso em: 02 mar. 2021.

MICROSOFT EXCEL. Versão 2016 [s. l.]: Microsoft Corporation, 2015. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>. Acesso em: 21 mar. 2020.

MINAS GERAIS. 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, p.2, col.2, 17 mai. 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Unidades de Conservação**. Disponibiliza informações sobre as unidades de conservação. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/areas-protetidas/unidades-de-conservacao.html>. Acesso em: 16 mar. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Unidades de conservação. **Categorias**. Disponibiliza informações sobre as categorias de Unidades de Conservação. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/areas-protetidas/unidades-de-conservacao/categorias.html>. Acesso em: 16 mar. de 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Arquivos. **Licenciamento e Unidades de Conservação**. (pdf). Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/46_10112008050247.pdf. Acesso em: 03 set. 2020.

MORAIS, T. H. B.; MORAIS, W. L.; CAMARGO, A. S. O.; PIMENTA, A. P. 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 IFSULDEMINAS, 6, 2014, Pouso Alegre. **Anais** [...]. Pouso Alegre: IFSULDEMINAS, 2014. p. 1-7.

MOREIRA, J. F. R.; SILVA, C. A. Paisagem urbana e áreas verdes: contexto dos parques urbanos de Goiânia. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 239-254, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v32i2.21090>. Acesso em: 03 jun. 2019.

MUNDIM, R. A. L. **Geoprocessamento aplicado à análise espacial de uso e ocupação do solo na área urbana e entorno de São José da Lapa**. 2001. Monografia (especialização em geoprocessamento). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. Disponível em: <http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/lorenzomundim2001.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2019.

NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. de. A.; SALES, M. M.; VARGAS, C. A. L.; AMARAL, C. dos. S. Mapeamento da suscetibilidade e potencialidade a processos erosivos laminares e lineares ao longo do duto Osbra da Petrobras. **Revista Geociências**, v. 35, n. 4, p. 585-597, 2016. Disponível em:

<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9973>. Acesso em: 18 set. 2020.

NOVO, E. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

OCCHIPINTI, A.G.; SANTOS, P.M. **Relações entre as precipitações máximas de “um dia” e de “24 horas” na cidade de São Paulo**. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, USP. 1966. 26p.

OLIVEIRA, E. L. de. A. **Áreas de risco geomorfológico na bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS: zoneamento e hierarquização**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11321>. Acesso em: 21 set. 2020.

PAES, M. T. D. Gentrificação, preservação patrimonial e turismo: os novos sentidos da paisagem urbana na renovação das cidades. **GEOUSP Espaço E Tempo**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 667-684, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2017.128345>. Acesso em: 13 set. 2019.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; DE CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 261-268, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000200003>. Acesso em: 15 mar. 2019.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; POESEN.; BALLABIO, C.; LUGATO, E.; MEUSBURGER, K.; MONTANARELLA, L.; ALEWELL, C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. **Environmental Science & Policy**, [s. l.], v. 54, p. 438-447, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>. Acesso em: 16 set. 2020.

PARSONS A. J. **Hillslope Form**. Routledge: New York, 1988, 212 p.

PDRH FURNAS. **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do entorno do lago de Furnas: Diagnóstico da Bacia Hidrográfica**. Alfenas: ALAGO; FUPAI, 2013. 305 p. Disponível em: <https://alago.org.br/imagens/image/PDRH%20GD3%20-%20Diagn%C3%B3stico.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2020.

PIRES NETO, A. G. **As abordagens sintético-histórica e analítico-dinâmica: uma proposição metodológica para a geomorfologia**. 1991. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA ESPERANÇA. **Institucional**. Disponibiliza informações sobre os aspectos históricos do município de Boa Esperança. Disponível em: <https://www.boaesperanca.mg.gov.br/detalhe-da-materia/info/destinos-mais-procurados/6485>. Acesso em: 16 set. 2019.

QUESADA, H. B.; REDONDO, G.; VERNASQUI, L. G.; MAGNONI, P. H. J.; ARANTES, E. J. Análise da vegetação ripária em bacia hidrográfica utilizando Índice de Vegetação Normalizada (NDVI) no município de Maringá-PR. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 31, p. 439-455, 2017. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.26737>. Acesso em: 28 jan. 2021.

RANGEL, Mauro Sergio. **Situação fundiária do Parque Estadual Serra da Boa Esperança, Minas Gerais**. 2017. Monografia (Especialização MBA em Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/54770>. Acesso em: 29 jun. 2020.

RECKZIEGEL, B. W.; ROBAINA, L. E. de. S.; OLIVEIRA, E. L. de. A. Mapeamento de áreas de risco geomorfológico nas bacias hidrográficas dos Arroios Cancela e Sanga do Hospital, Santa Maria- RS. **GEOGRAFIA-** Revista do Departamento de Geociências, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 5-18, 2005. Disponível em: <http://www.uel.br/seer/index.php/geografia/article/download/6744/6085>. Acesso em: 11 jul. 2020.

RIBEIRO, A.; TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; NASCIMENTO, D. B.; CAMPOS, M. T. R.; NETO, V. C.; VALERIANO, C. de M.; DUSSIN, I. **Geologia e recursos minerais da folha Alfenas SF.23-V-D-I**. Rio de Janeiro: CPRM/UFRJ, 2020. 1 mapa. Escala 1:100.000.

RODRIGUES NETO, M. R.; FERREIRA, M. F. M. Mapeamento da fragilidade ambiental à 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, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/RevAGB/article/view/11729>. Acesso em: 03 jan. 2021.

RODRIGUES, C. A teoria geossistêmica e sua contribuição aos estudos geográficos e ambientais. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, [s. l.], v.14, p.69-77, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.2001.0014.0007>. Acesso em: 24 out. 2019.

ROLDAN, L. F.; MACHADO, R.; STEINER, S. dos. S.; WARREN, L. V. Análise de lineamentos estruturais no Domo de Lages (SC) com uso de imagens de satélite e mapas de relevo sombreado. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 57-72, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2010000200005>. Acesso em: 07 jul. 2020.

ROSS, J. L. S. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, [s. l.], v. 4, p. 25-39, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.1985.0004.0004>. Acesso em: 21 ago. 2020.

ROSS, J. L. S. O Registro Cartográfico dos Fatos Geomorfológicos e a Questão da Taxonomia do Relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 6, p. 17-29, 1992. Disponível em: <http://www.periodicos.usp.br/rdg/article/download/47108/50829>. Acesso em: 20 dez. 2020.

- ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, [s. l.], v. 8, p. 63-74, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>. Acesso em: 14 mai. 2019.
- ROSS, J. L. S. Geomorfologia aplicada aos EIAS-RIMAS. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. p. 291-336.
- ROSS, J. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 9. ed. São Paulo: Contexto, 2019.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington: NASA, 1974, v.1, p.309-317.
- SAADI, A. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais**. 1991. Tese (Professor Titular) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.
- SALES, V. D. C. Geografia, sistemas e análise ambiental: abordagem crítica. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 125 - 141, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2004.73959>. Acesso em: 20 set. 2019.
- SALMONA, Y. B.; RIBEIRO, F. F.; MATRICARDI, E. A. T. Parques “no papel” conservam? O caso do Parque dos Pireneus em Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 34, n.2, p. 295-310, 2014. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3371/337131734007.pdf>. Acesso em: 17 out. 2019.
- SALOMÃO, F. X. de T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (orgs). **Erosão e conservação dos solos**. 11. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. cap. 7, p. 229-267.
- SANTANA, R. B. **O Impacto ambiental dos esportes de aventura**. 2011. Disponível em: <https://amapac.blogspot.com/2011/05/o-impacto-ambiental-dos-esportes-de.html>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- SANTOS, A. M. dos. O ecoturismo, uso público e o Parque Nacional do Iguaçu. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v.6, n.3, p.229-242, 2010. Disponível em: http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/viewFile/82/85. Acesso em: 10 mar. 2020.
- SANTOS, M. P. A Paisagem como Imagem e Representação do Espaço na Geografia Humana. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, [s. l.], n. 28, p. 151-165, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2010.74175>. Acesso em: 02 ago. 2019.
- SANTOS, G. C.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000200001>. Acesso em: 13 ago. 2020.

SANTOS, J. C.; OLIVERA, L. A. de.; OLIVEIRA, L. A. de. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão São Bento da Ressaca, município de Frutal-MG. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, [s. l.], v.5, n.15, p. 02-23, 2013. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/45748>. Acesso em: 11 jul. 2019.

SANTOS, J. R. L. dos; MARCHIORO, E. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, [s. l.] v.39, p. 72-87, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.160946>. Acesso em: 24 ago. 2020.

SERPA, A. Paisagem, lugar e região: perspectivas teórico-metodológicas para uma geografia humana dos espaços vividos. **GEOUSP Espaço e Tempo**, [s. l.], n. 33, p. 168-185, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2013.74309>. Acesso em: 03 ago. 2019.

SCIENTIFIC ELETRONIC LIBRARY ONLINE (SCIELO). Disponível em: <https://scielo.org/>. Acesso em: 12 fev. 2019.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. 2 ed., Oxford University Press, Oxford, 1993, 451 p.

SILVA, A.; SOUZA FILHO, E. E. de.; NEVES, S. M. A. da. S. Erosão marginal e sedimentação no rio Paraguai no município de Cáceres (MT). **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 76-84, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20114117684>. Acesso em: 18 set. 2020.

SMITH, D. D. Factors affecting rainfall erosion and their evaluation. *In: International Union of Geodesy and Geophysics Assembly*, 1957, Toronto. Disponível em: <http://hydrologie.org/redbooks/a043/043010.pdf>. Acesso em: 02 set. 2020.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n32, p.71-104, 1978.

SOUZA, N. P. de.; SILVA, E. M. G. C.; TEIXEIRA, M. D.; LEITRE, L. R.; REIS, A. A. dos.; SOUZA, L. N. de.; ACERBI JUNIOR, F. W.; RESENDE, T. A. Aplicação do Estimador de Densidade *Kernel* em Unidades de Conservação na Bacia do Rio São Francisco para análise de focos de desmatamento e focos de calor. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 4958-4965. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.28.09/doc/p1135.pdf>. Acesso em: 04 out. 2020.

SOUZA, N. da. C.; GIANOTTI, M.A.; LARocca, A. P. C.; QUINTANILHA, J. A.; ALMEIDA FILHO, G. S. de. Análise da associação entre características topográficas e tipos de ocorrência de processos erosivos ao longo de linha férrea- estudo de caso: malha paulista – ALL (SP). **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 20, n. 4, p. 947-969, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000400052>. Acesso em: 03 set. 2020.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Geosp Espaço e Tempo**, [s. l.], n. 15, p.39-49, 2004. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/AN%C3%81LISE-COMPARATIVA-DA-FRAGILIDADE-AMBIENTAL-COM-DE-Spr%C3%B6l-Ross/9f97600e18fd1251813765b89aa2994da3be1e11?p2df>. Acesso em: 11 dez. 2019.

SUERTEGARAY, D. M. A. **(Re)Ligar a Geografia: Natureza e Sociedade**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2017.

THOMAS, D. S. G. **The dictionary of physical geography**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2016.

TRICART, J. **Principes et Méthodes de la Geomorphologie**. Paris: Masson et Cie Editeurs, 1965.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/ SUPREN (Recursos Naturais e Meio Ambiente), 1977, 91 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Eros Science Processing Architecture on Demand Interface**. Disponibiliza download de produtos de sensoriamento remoto sob demanda. Disponível em: <https://espa.cr.usgs.gov/>. Acesso em: 11 mai. 2020.

VALLEJO, L. R. Unidades de Conservação: Uma discussão teórica à luz dos conceitos de território e de políticas públicas. **Geographia**, Rio de Janeiro, v.4, n.8, p. 57-78, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2002.v4i8.a13433>. Acesso em: 13 abr. 2019.

VALERIANO, C. M. **Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da Represa de Furnas, Sudoeste de Minas Gerais**. 1992. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1992.

VALERIANO, C.de M.; PEREIRA, R. M.; ALMEIDA, J. C. H. de; DUARTE. B. P.; TURBAY, C.; ROSSI, A.; GONTIJO, A.; RIBEIRO, A.; NOGUEIRA, J.R.; HEILBRON, M.; CASTRO, C.; FALCAO, T. da C.; SILVA, V. G. M. da R. **Mapa geológico folha de Guapé - SF.23-V-B-IV**. Minas Gerais: UERJ/CPRM, 2007. 1 mapa. Escala 1:100.000: nota explicativa integrada com Alpinópolis.

VITTE, A. C. Os fundamentos metodológicos da Geomorfologia e a sua influência no desenvolvimento das ciências da terra. *In*: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. 8. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. cap. 1. p. 23-48.

XAVIER DA SILVA, J. Geomorfologia, Análise ambiental e Geoprocessamento. **Revista brasileira de Geomorfologia**. v.1, n.1, p.48-58, 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v1i1.69>. Acesso em: 09 ago. 2020.