

# MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL À PROCESSOS EROSIVOS LINEARES E MOVIMENTOS DE MASSA NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACHADO- MG

Manoel Ribeiro Rodrigues Neto<sup>1</sup>

Marta Felícia Marujo Ferreira<sup>2</sup>

**RESUMO:** A Área de Proteção Ambiental da bacia hidrográfica do Rio Machado, integra a bacia do Alto rio Grande situando-se no sul do estado de Minas Gerais (Brasil) sendo definida pelos limites físicos da bacia. O presente artigo teve como objetivo mapear a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Machado à ocorrência de processos erosivos lineares e movimentos de massa, visando analisar quais zonas são mais propensas a ocorrência de tais processos. A metodologia utilizada consiste em uma adaptação do procedimento metodológico desenvolvido por Garófalo e Ferreira (2015), por meio de técnicas de análise geoespacial em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o mapeamento da fragilidade ambiental utilizando as seguintes variáveis geoambientais: índice de vegetação (NDVI), declividade (DEC), densidade de lineamentos estruturais (DLE) e densidade de vias de circulação (DVC). Os resultados demonstraram que as áreas mais frágeis estão situadas nos setores sul e norte da bacia, principalmente em Espírito Santo do Dourado e São João da Mata e as áreas menos frágeis se encontram principalmente nos municípios de Poço Fundo e Machado. Foi evidenciado que as áreas mais frágeis comportam diversos processos erosivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Planejamento ambiental; Geomorfologia; Erosão; Ocupação antrópica; Conservação.

## MAPPING OF ENVIRONMENTAL FRAGILITY TO LINEAR EROSIVE PROCESSES AND MASS MOVEMENTS IN THE ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA OF RIO MACHADO WATERSHED-MG

**ABSTRACT:** The Environmental Protection Area of the Rio Machado hydrographic basin, integrates the Upper Rio Grande basin located in the south of the state of Minas Gerais (Brazil) being defined by the physical limits of the basin. The present paper aimed at

---

<sup>1</sup> Discente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas – PPGEO – UNIFAL - MG. E-mail: manoelnt93@gmail.com

<sup>2</sup> Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas – PPGEO – UNIFAL- MG. E-mail: martafelicia@uol.com.br

mapping the environmental fragility of Rio Machado watershed in order to find linear soil erosion processes as well as mass movement, seeking to analyze which zones are more likely to suffer from such processes. The methodology adopted consists in an adaptation of the methodological process developed by Garófalo e Ferreira (2015), through techniques of geospatial analysis in Geographic Information Systems to map the environmental fragility, using the following geoenvironmental variables: vegetation index (NDVI), slope (DEC), density of structural lineaments (DLE) and density of circulation paths (DVC). The results showed the most fragile areas are located in southern and northern parts of the watershed, mainly in Espírito Santo do Dourado and São João da Mata and the least fragile areas are mainly in Poço Fundo e Machado. It could be evidenced that the most fragile areas present several processes of soil erosion.

**KEYWORDS:** Environmental planning; Geomorphology; Erosion; Anthropic occupation; Conservation.

## CARTOGRAFIA DE LA FRAGILIDAD AMBIENTAL EN PROCESOS EROSIVOS LINEALES Y MOVIMIENTOS DE MASAS EN EL ÁREA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO MACHADO-MG

246

**RESUMEN:** El Área de Protección Ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Machado, integra la cuenca del Alto Río Grande ubicada al sur del estado de Minas Gerais (Brasil) quedando definida por los límites físicos de la cuenca. Lo presente artículo tuvo el objetivo de mapear la fragilidad ambiental de la cuenca del Río Machado a la ocurrencia de procesos erosivos lineales y movimientos de masas, a fin de analizar qué zonas son más propensas a la ocurrencia de tales procesos. La metodología utilizada consiste en una adaptación del procedimiento metodológico desarrollado por Garófalo y Ferreira (2015), utilizando técnicas de análisis geoespacial en Sistemas de Información Geográfica para mapear la fragilidad ambiental, utilizando las siguientes variables geoambientales: índice de vegetación (NDVI), pendiente (DEC), densidad de lineamientos estructurales (DLE) y densidad de vías de circulación (DVC). Los resultados mostraron que las áreas más frágiles están ubicadas en los sectores sur y norte de la cuenca, principalmente en Espírito Santo do Dourado y São João da Mata, y las áreas menos frágiles se encuentran principalmente en los municipios de Poço Fundo y Machado. Se evidenció que las áreas más frágiles tienen varios procesos erosivos.

**PALABRAS CLAVE:** Planificación ambiental; Geomorfología; Erosión; Ocupación antrópica; Conservación.

## INTRODUÇÃO

Historicamente a região sul de Minas Gerais tem se baseado em uma economia dirigida fundamentalmente para o setor agrícola, sendo, por exemplo, liderança para o estado na produção de café (DANTAS, 2011). Esse fato faz com que os processos de erosão do solo se configurem como um problema de caráter socioeconômico e ambiental preocupante para a região, uma vez que estes processos afetam a conservação dos agrossistemas e causam prejuízos econômicos (GUERRA; MENDONÇA, 2004, PANACHUKI et al., 2006).

A Área de Proteção Ambiental da Bacia hidrográfica do Rio Machado (APA-BHRM) é uma Unidade de Conservação Estadual de uso sustentável (Lei Federal 8895/2000). Foi criada pela Lei nº 13.373 de 30 de novembro de 1999, e teve sua implantação em outubro de 2014. Sua competência é atribuída ao Instituto Estadual de Florestas - IEF do estado de Minas Gerais, vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente – SEMAD (SANTOS, 2019). A APA do rio Machado 247 abrange os municípios de Alfenas, Campestre, Machado, Paraguaçu, Fama, Congonhal, Espírito Santo do Dourado, Ipuiúna, São João da Mata, Poço Fundo, Carvalhópolis e Santa Rita de Caldas, sendo inserida nesta forte dinâmica produtiva regional, apresentando também os problemas erosivos resultantes dela.

Santos (2019) salienta que a APA do rio Machado é uma unidade de conservação criada com objetivo principal de auxiliar no uso sustentável, sendo esta unidade de conservação formada majoritariamente por propriedades privadas. Nestas propriedades é comum “práticas agrosilvopastoril, com a presença de plantios anuais e perenes, a exemplo do café, milho, morango, mandioquinha e batata, como também a silvicultura de eucalipto e a pecuária de corte e leite” (SANTOS, 2019, p. 150).

Alves et al. (2019) estudando a dinâmica econômica dos municípios que integram a APA do Rio Machado ressaltam que estes se localizam numa das regiões mais desenvolvidas do estado de Minas Gerais. Os autores destacam também a “intensa atividade agropecuária, principalmente o agronegócio cafeeiro nos mananciais e áreas de nascentes, pois as áreas plantadas e colhidas dessas culturas agrícolas estão presentes em todos municípios e áreas da APA” (ALVES, et al., p. 179). É importante destacar também, conforme Porto et al. (2019), que a maioria dos municípios possuem “alta taxa de urbanização, sugerindo que os cursos d’água que atravessam ou tangenciam áreas urbanas, ou densamente povoadas, carecem de atenção e intervenção por parte dos órgãos que administram a região da bacia” (PORTO et al., 2019, p. 86).

Considerando-se a configuração espacial e a dinâmica produtiva nesta APA, bem como o grave problema de erosão dos solos, que causa a diminuição da produtividade agrícola e até o encerramento das atividades agrícolas (GUERRA; MENDONÇA, 2004), é necessário a realização de estudos na área, que visem o diagnóstico geoambiental e auxiliem no planejamento territorial e no desenvolvimento sustentável.

248

A fragilidade ambiental, conceito preconizado por Ross (1994), é um dos estudos que destaca a necessidade de conhecer as potencialidades dos ambientes de forma integrada. Para isso, o autor se baseia no conceito de “Unidades Ecodinâmicas” de Tricart (1977), no qual o ambiente é analisado por meio da teoria sistêmica. Desse modo, Ross (op. cit.) define Unidades Ecodinâmicas Instáveis, aquelas com intervenção humana e as Unidades Ecodinâmicas Estáveis, aquelas em estado natural e equilibrado sem a intervenção humana.

Pesquisas sobre fragilidade ambiental desenvolvidas por Garófalo e Ferreira (2015) e Messias e Ferreira (2017) apresentam um procedimento

alternativo de mapeamento da fragilidade ambiental baseado em técnicas de análise geoespacial em Sistema de Informação Geográfica. Segundo Garofalo e Ferreira (2015), este procedimento tem como vantagem:

estimar o valor dos pesos das variáveis por análise estatística; utilizar a classificação contínua para a representação da fragilidade ambiental; e possibilitar o mapeamento de fragilidade ambiental em áreas onde não haja a disponibilidade de mapas pedológicos e geológicos em escala adequada (p.214).

Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo realizar o mapeamento da fragilidade ambiental da APA da bacia hidrográfica do rio Machado à ocorrência de processos erosivos lineares e movimentos de massa, utilizando a metodologia de análise geoespacial proposta por Garófalo e Ferreira (2015).

Este trabalho justifica-se em razão da sua importância como potencial subsídio ao planejamento ambiental de uma unidade de conservação ocupada, 249 na medida em que demonstra as áreas mais propensas ao desenvolvimento de processos erosivos e que, portanto, carecem de um maior controle sobre as atividades que podem ser nela desenvolvidas. Conforme Santos (2019), os principais vetores de pressão na APA do rio Machado são: expansão urbana sobre áreas nativas, mineração e dragagem de areia do rio Machado, uso intensivo de agrotóxico e parcelamento do solo rural, desmatamento e atropelamento da fauna nas rodovias e o uso do fogo sem autorização (SANTOS, 2019).

Além do mais, este artigo poderá contribuir com futuros estudos sobre fragilidade ambiental, uma vez que utiliza uma metodologia desenvolvida recentemente, baseada em variáveis geoambientais compatíveis com sistemas de informação geográfica.

## REVISÃO DOS CONHECIMENTOS ANTERIORES

A erosão do solo é um dos principais problemas que afetam o desenvolvimento sustentável. Segundo Correia, De Lima e Bezerra (2015), a erosão é um processo morfológico natural, resultante de ações do intemperismo, responsável pelo deslocamento e transporte de sedimentos na superfície da terra, sendo agravado por atividades antrópicas.

De acordo com Panachuki et al. (2006), a degradação dos solos é resultante de práticas inadequadas de manejo agrícola, e deve ser compreendida quando se almeja a manutenção ou o aumento da produtividade agrícola e a conservação ambiental, de maneira a contribuir para a manutenção da sustentabilidade de agroecossistemas.

Botelho e Silva (2004), salientam que “grande parte dos problemas relacionados à erosão, assoreamento, volume e qualidade da água nas bacias hidrográficas seria resolvida se a taxa de infiltração nos solos fosse maior” (p. 168). Segundo os autores (op. cit.), para se aumentar a taxa de infiltração, o escoamento superficial deve ser mitigado, sendo que nas microbacias hidrográficas onde este escoamento foi reduzido devido a implementação de programas de planejamento, a qualidade do ambiente da bacia e até fora dela foi melhorada.

250

Seguindo esta lógica, para que haja um planejamento ambiental eficiente que vise à mitigação de processos erosivos, é necessário dar-se devida importância à relação entre escoamento superficial e ocupação agrícola, uma vez que, de acordo com Botelho e Silva (2004) nas áreas agrícolas alguns fatores, como exposição do solo às gotas de chuva, ausência de cobertura vegetal durante uma parte do ano e a falta de práticas conservacionistas, propiciam a formação de fluxo superficial.

A APA do rio Machado integra a subzona Planalto Sul de Minas Gerais (CAVALCANTE et al., 1979), inserindo-se no domínio das regiões serranas de

morros mamelonares do Brasil de Sudeste ou Mares de Morros conforme Ab'Sáber (2003).

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”. Ainda segundo Ab'Sáber (op. cit.), em todo território brasileiro, este domínio se mostra muito vulnerável à ocorrência dos processos erosivos e movimentos coletivos de solo.

Leite e Rosa (2012, p.269) afirmam que a necessidade de se combater os problemas relacionados a erosão tem ocasionado a “formulação de metodologias que explicitem o potencial natural de áreas de modo que subsidie a ocupação antrópica, gerando planos conforme as peculiaridades locais”. Os estudos sobre fragilidade ambiental se encaixam nesse contexto, uma vez que “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).

251

Spörl & Ross (2004) frisam 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.

As metodologias para o mapeamento da fragilidade ambiental mais utilizadas no Brasil foram as desenvolvidas por Ross (1994), por Crepani et al. (1996) e Crepani et al. (2001), sendo que o método de Ross (1994) busca estimar a estabilidade das Unidades Ecodinâmicas com base na combinação entre variáveis de origem natural (fragilidade potencial) e de origem natural associadas a

variáveis de origem antrópica (fragilidade emergente). Já o método de Crepani et al. (1996; 2001), também baseado no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977), relaciona variáveis de origem natural, como geologia, cobertura vegetal e climatologia para gerar cartas de vulnerabilidade natural à erosão (BATISTA; SILVA, 2013; MESSIAS; FERREIRA, 2017).

Ao avaliarem estas metodologias, Spörl e Ross (2004) constataram que o principal problema apresentado por elas diz respeito à forma de atribuição de pesos, em geral subjetiva, às variáveis utilizadas nos modelos, devido à complexidade em se verificar a contribuição de cada uma das variáveis a níveis de fragilidade ambiental (GARÓFALO e FERREIRA, 2015).

Levando em consideração os problemas apresentados pelos métodos clássicos de fragilidade ambiental, Garófalo e Ferreira (2015) desenvolveram uma pesquisa na qual apresentam um procedimento metodológico desenvolvido através de técnicas de análise geoespacial em Sistema de Informação Geográfica (SIG) para o mapeamento da fragilidade ambiental, o qual foi aplicado na APA Fernão Dias, no sul de Minas Gerais. Esse método conseguiu sanar o problema da subjetividade na atribuição dos pesos às variáveis geoambientais, uma vez que os pesos foram atribuídos através de estatística.

252

Desse modo, a presente pesquisa se baseou na metodologia de fragilidade ambiental proposta por Garófalo e Ferreira (2015) cujas variáveis geoambientais utilizadas foram: índice de vegetação, declividade, densidade de lineamentos estruturais, densidade de vias de circulação.

## ÁREA DE ESTUDO

Á área de estudo consiste na APA da bacia hidrográfica do Rio Machado, apresentando uma superfície de 1.016 km<sup>2</sup>. Localiza-se no sul do estado de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Espírito Santo do Dourado, Congonhal,

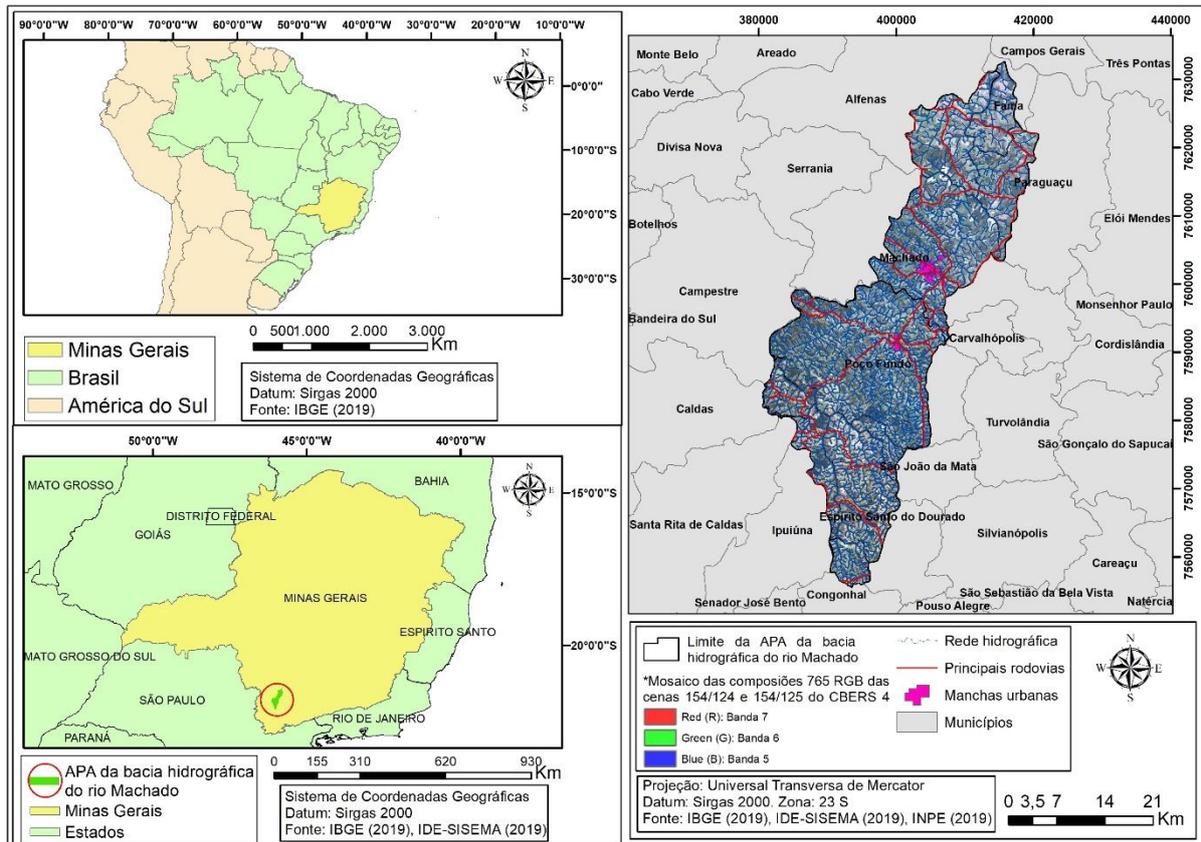
Ipuiúna, São João da Mata, Poço Fundo, Carvalhópolis, Campestre, Machado, Alfenas, Paraguaçu e Fama (Figura 1).

Segundo Coelho et al. (2014), o clima da região é do tipo Cwb (subtropical moderado úmido), apresentando invernos secos e verões chuvosos, de acordo com o sistema de Köppen. A temperatura e a precipitação anuais médias ficam, respectivamente, em torno de 23°C e de 1500 mm.

No que se refere ao contexto geomorfológico, Ferreira et al. (2019) propuseram a compartimentação geomorfológica da APA do rio Machado, agrupando unidades de padrões de formas semelhantes, considerando o índice de dissecação e a forma dos topos, vertentes e vales. Foram mapeados seis compartimentos de relevo, sendo eles: Escarpas, Morros e Montanhas, Morros com Encostas Suaves, Morrotes, Colinas e Planícies. Os compartimentos que abrangem as maiores áreas são, respectivamente, Colinas (26%), Planície (24%) e Morros com encostas suaves (21%). Por outro lado, as Escarpas, Morrotes e Morros e Montanhas são os compartimentos de menor dimensão, ocupando, respectivamente, 17 %, 10 % e 2 % das terras da APA (FERREIRA et al., 2019).

253

**Figura 1** – Localização da APA da bacia hidrográfica do Rio Machado - MG.



Fonte: Dos autores (2019)

254

Através da análise do mapa de compartimentos geomorfológicos de Ferreira et al., (2019), verifica-se que os setores norte e sul da APA apresentam um relevo mais suavizado, dominado por colinas, enquanto o setor central abriga um relevo mais serrano, com a presença de escarpas e morros e montanhas, associados a morros com encostas suaves.

No tocante ao uso da terra, Santos (2019) salienta que predominam na bacia a cafeicultura e as pastagens, e em menor área, culturas anuais e perenes. Quanto a cobertura vegetal nativa, Santos (op. cit.) afirma que a bacia apresenta fragmentos da Mata Atlântica, principalmente nos municípios de Poço Fundo, Machado, Espírito Santo do Dourado e Congonhal; bem como fragmentos de cerrado, que ocupam uma área menos extensa ao norte da bacia, no município de Alfenas.

Santos (2019) elucida que a área possui uma importante riqueza de espécies, como animais vulneráveis ou ameaçados de extinção, a exemplo “da onça parda, do lobo guará, da jaguatirica, do bugio, entre outros” (p. 148). Apresenta também espécies arbóreas importantes como “ [...] massaranduba, jequitibá, jacarandá, canela sassafrás, óleo vermelho, barba timão, etc.” (SANTOS, op. cit.).

Filetto e Alencar (2001) ressaltam que a agricultura possui grande relevância para os diversos municípios que compõem a APA do rio Machado, principalmente o café, cultura característica do sul de Minas Gerais. A região sul-mineira é responsável por quase metade da produção de todo o estado, fato que confere a ela importância nacional no âmbito da produção cafeeira.

A APA do rio Machado, possui diversas propriedades rurais dedicadas ao cultivo do café, muitas delas cooperadas da COOPFAM (Cooperativa dos Agricultores Familiares de Poço Fundo), localizada no município de Poço Fundo e da COOXUPÉ (Cooperativa Regional de Cafeicultores de Guaxupé), que possui um núcleo em Alfenas.

255

## METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa são demonstrados na figura 2.

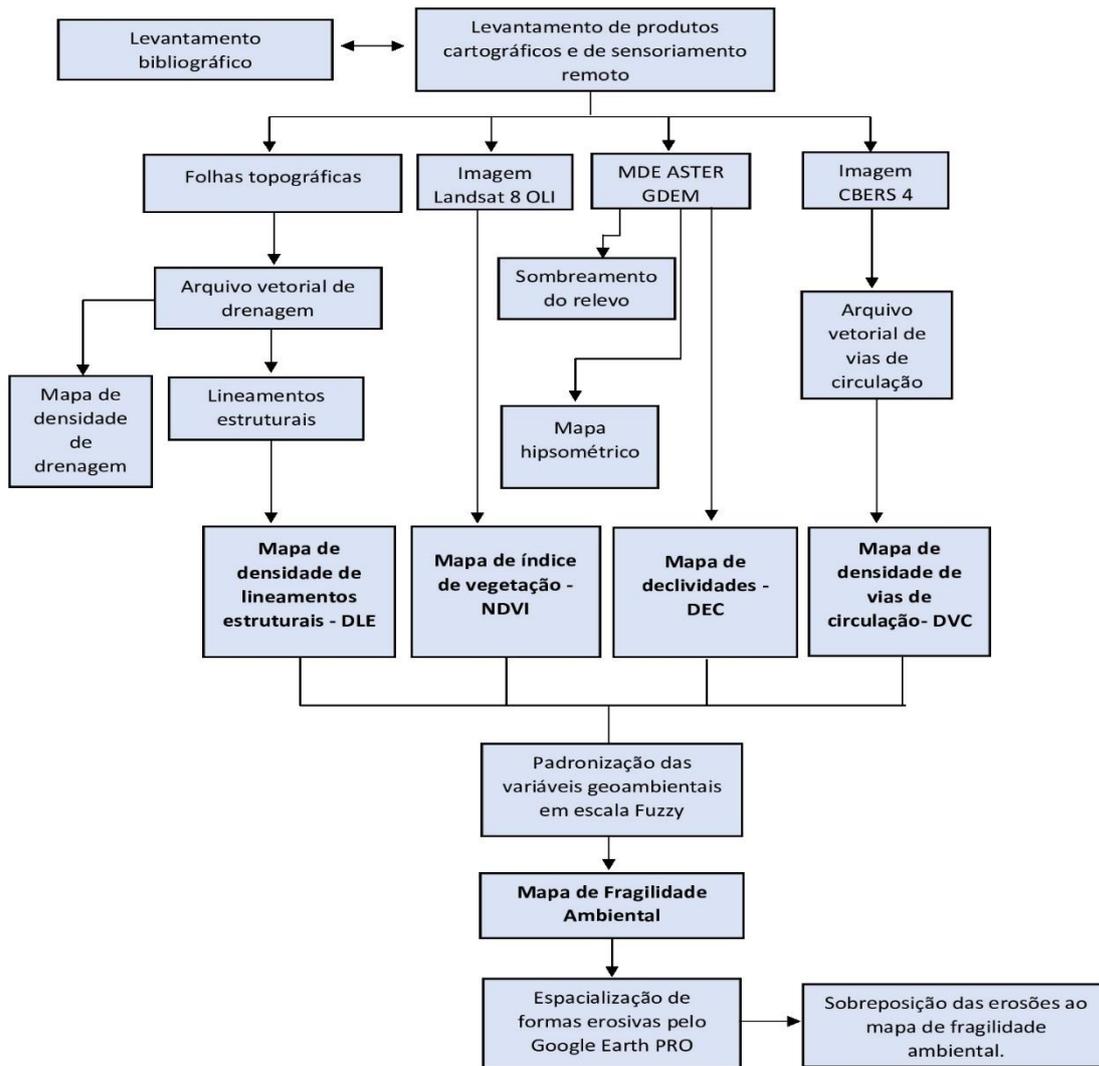
O levantamento e a revisão de materiais cartográficos, tais como as cartas topográficas na escala 1:50.000 correspondentes a área de estudo (Pouso Alegre, Poço Fundo, Campestre, Machado, Ipuiúna e Capivari) (IBGE, 1970); bibliográficos, tratando-se principalmente de artigos científicos e livros que abordam temas de interesse para a pesquisa; e de sensoriamento remoto, como imagens multiespectrais e Modelo Digital de Elevação, foram etapas fundamentais para o cumprimento dos objetivos propostos na pesquisa. O material foi adquirido

fisicamente, em bibliotecas, e através de diferentes *sites*, tais como Scientific Electronic Library Online (SCIELO, 2019) (material bibliográfico); Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), (material cartográfico); Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2019) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019) (material de sensoriamento remoto).

Todo o mapeamento temático foi gerado na escala 1:50.000, através do SIG *Arcgis* 10.5<sup>TM</sup> (ESRI, 2016) disponível no Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal de Alfenas-UNIFAL-MG. Os mapas foram projetados no sistema de coordenadas planas Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum SIRGAS 2000 e classificados em 4 classes pelo classificador *Natural Breaks*. Este classificador foi utilizado pois ele visa eliminar, em certa medida, a interferência subjetiva do pesquisador nos dados (FERREIRA, 2014). Após a análise de vários números de classes, optou-se por 4, pois a representação espacial das variáveis geoambientais com este número de classes mostrou-se bastante condizente com a realidade terrestre. O software Google Earth PRO (GOOGLE, 2019) foi utilizado para a identificação e levantamento de feições erosivas na área de estudo. Os mapas foram projetados no sistema de coordenadas planas Universal Transversa de Mercator (UTM), *Datum* SIRGAS 2000.

256

**Figura 2** – Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa.



Fonte: Dos autores (2019)

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em uma adaptação da metodologia desenvolvida por Garófalo e Ferreira (2015), aplicada pelos autores na APA Fernão Dias (MG), sendo também aplicada por Messias e Ferreira (2017) no Parque Nacional da Serra da Canastra, MG. A metodologia se baseia no uso de técnicas de análise geoespacial para o mapeamento da fragilidade ambiental, utilizando uma base de dados composta por variáveis geoambientais (declividade, índice de vegetação, densidade de vias de circulação, densidade de lineamentos estruturais e probabilidade de ocorrência de chuvas intensas) padronizadas para função Fuzzy, que são combinadas por meio de pesos obtidos empiricamente

através do teste estatístico *Kolmogorov-Smirnov* (KS) para a obtenção do mapa de fragilidade ambiental.

Segundo Ferreira (2014), a função *Fuzzy* representa os limites espaciais entre classes de uma variável como zonas transitórias, distribuindo os valores desta variável de forma contínua, o que melhor representa a realidade terrestre dos sistemas ambientais.

O teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS) “permite avaliar dados não paramétricos, gerando valores que indicam a dependência entre duas variáveis, baseando-se em uma amostra mapeada empiricamente e outra hipotética” (YOUNG, 1977, n.p. apud MESSIAS; FERREIRA, 2017). Na metodologia de Garófalo e Ferreira (2015), o teste KS é utilizado na atribuição de pesos as variáveis geoambientais visando avaliar o grau de aderência entre a distribuição espacial dos valores de cada uma destas variáveis e a ocorrência de feições erosivas mapeadas para a área de estudo. Logo, o peso de cada variável geoambiental, ou a importância que as mesmas possuem em relação a fragilidade do ambiente ao desenvolvimento de processos erosivos, é representado por este grau de aderência, sendo atribuído empiricamente (GARÓFALO; FERREIRA, 2015).

258

A adaptação metodológica realizada no presente trabalho consiste em duas alterações em relação a metodologia de Garófalo e Ferreira (2015): a não utilização de uma variável para o mapeamento da fragilidade ambiental (no caso, probabilidade de ocorrência de chuvas intensas), devido a distribuição insuficiente de estações pluviométricas na área de estudo, o que comprometeria os resultados alcançados; e a adoção proporcional (uma vez que foram utilizadas 4 variáveis ao invés de 5) dos pesos atribuídos por Garófalo e Ferreira (2015) aos mapas temáticos produzidos pelos autores para a APA Fernão Dias. Esta decisão foi em razão das similaridades físico-ambientais entre a referida Unidade de Conservação e a área de estudo deste trabalho 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.

Os procedimentos metodológicos para a elaboração do mapeamento temático proposto são descritos a seguir:

i – Declividade

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 declividade foi elaborado com base no mosaico das cenas S22W046, S22W047, S23W046 e S23W047 do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pelos dados altimétricos do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), apresentando resolução espacial de 30 m. Justifica-se a utilização do MDE ASTER devido a sua resolução espacial compatível com a escala de mapeamento do presente trabalho, considerando também a ampla disponibilidade e o fácil acesso as imagens.

259

Inicialmente foi utilizada a ferramenta *Fill* para remover pequenas imperfeições do MDE (ESRI, 2016). Em seguida, foi gerado o *raster* contendo os valores de declividade, em graus, através da ferramenta *Slope*.

ii – Índice de Vegetação

O mapeamento do índice de vegetação foi realizado aplicando-se o método Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NVDI (ROUSE et al., 1973). O NDVI trata-se de “um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1. Nas superfícies que contém água ou nuvens, esta variação é sempre menor do que 0” (GAMEIRO, et al., 2016). É obtido a partir da razão entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (VIS) pela soma destas mesmas bandas, como demonstrado na equação 1:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (\text{eq.1})$$

onde  $\rho_{NIR}$  e  $\rho_{RED}$  são, respectivamente, a reflectância na faixa espectral do infravermelho e a reflectância na faixa espectral do vermelho (ROUSE et al., 1973).

Para o cálculo do NDVI foram utilizadas as bandas quatro (vermelho) e a cinco (infravermelho próximo) da cena que abrange a área de estudo (219/075), com a data de 21 de janeiro de 2019, provenientes do sensor OLI (*Operational Land Imager*) a bordo do satélite Landsat 8. Estes produtos já foram adquiridos com correção atmosférica, por meio da página *EarthExplorer* contida no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2019).

Optou-se por gerar o NDVI com uma imagem adquirida no mês de janeiro pois o referido mês faz parte do período chuvoso no tipo climático em que a área de estudo está inserida (SOUZA; SANTOS; SANCHES, 2019), e no período em que ocorre uma maior concentração de chuvas os processos erosivos tendem a se intensificar, fato que aumenta ainda mais a importância do papel da cobertura vegetal no tocante a proteção do solo frente ao efeito erosivo das chuvas (BIGARELLA, 2001).

260

As bandas 4 e 5 foram reprojatadas para o sistema de coordenadas planas UTM, no *Datum SIRGAS 2000*, zona 23S, e posteriormente o NDVI foi calculado aplicando-se a Equação 1, por meio da ferramenta *Raster Calculator*. O raster gerado foi recortado com base no arquivo vetorial poligonal do limite da APA da bacia hidrográfica do rio Machado, utilizando-se a ferramenta *Extract by Mask*.

### iii) Densidade de vias de circulação

Para a produção do mapa de densidade de vias de circulação (DVC), foi utilizado o estimador Kernel sobre o arquivo vetorial de linhas representando as vias de circulação identificadas na área de estudo. As vias de circulação foram

vetorizadas sobre as cenas 154/124 e 154/125 das câmeras PAN e MUX, a bordo do satélite CBERS 4. Optou-se pela utilização destes sensores devido à alta resolução espacial (5 m) apresentada pela banda pancromática que, mediante a técnica de fusão espectral de imagens, permite gerar uma composição de bandas espectrais que possibilita uma identificação satisfatória das feições de vias de circulação; levando em consideração a disponibilização gratuita das imagens no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Inicialmente foram testadas diversas composições de bandas espectrais formadas através da combinação das bandas do vermelho (R), verde (G) e do azul (B), do sensor MUX, com objetivo de selecionar a composição que possibilitasse a melhor identificação das vias de circulação. Este teste foi realizado por meio da ferramenta *Composite Bands*, sendo selecionada a composição 7R/6G/5B. O procedimento seguinte foi a realização do mosaico de cada banda selecionada de uma das cenas com a respectiva banda da segunda cena, para que, posteriormente, toda à área de estudo fosse contemplada em uma única imagem. Este mesmo procedimento também foi realizado para as bandas pancromáticas, através das ferramentas *Mosaic to a new raster* e *Mosaic*.

261

Em seguida, foi realizada a fusão da composição 7R/6G/5B com a banda pancromática do sensor PAN, que apresenta resolução espacial de cinco metros, a fim de se obter um ganho de resolução espacial para a composição escolhida. Este procedimento foi realizado por meio da ferramenta *Create Pan-Sharpned Raster Dataset*.

Após estas etapas de pré-processamento, as vias foram vetorizadas manualmente sobre a composição 7R/6G/5B, e o mapa de densidade de vias de circulação foi gerado utilizando-se o estimador de densidade Kernel, por meio da ferramenta *Kernel Density*. O raio de abrangência para o estimar a densidade

(também empregado para o cálculo da densidade de lineamentos e de drenagem) foi o preconizado no trabalho de Messias e Ferreira (2017), equivalente a 3 km.

iv) Densidade de lineamentos estruturais

Os lineamentos estruturais são feições de drenagem retilíneas ou que apresentam ângulos abruptos, fortemente condicionadas pela estrutura geológica, e que demonstram a presença de zonas de fraturamento (SOARES; FIORI, 1978).

O mapa de densidade de lineamentos estruturais (DLE) foi elaborado utilizando como base o arquivo vetorial de rede de drenagem da área de estudo, vetorizado manualmente sobre as cartas topográficas que abrangem a APA (IBGE, 1970). A identificação dos lineamentos estruturais foi realizada de acordo com a metodologia de interpretação visual proposta por Soares e Fiori (1978). Os lineamentos identificados foram digitalizados sobre a rede de drenagem, através do módulo Editor, sendo então criado um arquivo vetorial, a partir do qual foi calculada a densidade de lineamentos estruturais, em km/km<sup>2</sup>, aplicando-se o estimador Kernel por meio da ferramenta *Kernel density*.

262

v) Mapas auxiliares: densidade de drenagem e hipsometria

Os mapas hipsométrico e de densidade de drenagem foram elaborados para auxiliar na análise integrada das características ambientais da APA da bacia hidrográfica do Rio Machado. Ambos foram classificados em 4 classes por meio do classificador *Quebras Naturais*, assim como as variáveis usadas no modelo de fragilidade. Para elaboração do mapa hipsométrico, o MDE ASTER anteriormente utilizado para o mapeamento da declividade foi classificado, sendo a ele atribuída uma rampa de cores. Já o mapa de densidade de drenagem foi elaborado por meio da aplicação do estimador Kernel ao arquivo vetorial de drenagem da área de estudo, sendo o *raster* gerado, recortado sobre o limite da APA e classificado como os demais mapas.

vi) Atribuição de pesos as variáveis geoambientais e obtenção da fragilidade ambiental

A atribuição de pesos as variáveis geoambientais consiste em uma etapa fundamental para se obter o mapa de fragilidade ambiental, na medida em que este mapa é resultado da média ponderada entre as variáveis. Os pesos referem-se ao grau de importância quantitativo de cada variável em relação a sua contribuição aos processos geomorfológicos. Garófalo e Ferreira (2015) estabeleceram pesos as variáveis geoambientais de acordo com a associação de cada uma delas a distribuição espacial de processos erosivos na APA Fernão Dias, localizada no sul de Minas Gerais. Os valores dos pesos atribuídos por Garófalo e Ferreira (2015), adaptados ao presente trabalho, são apresentados na tabela 1:

**Tabela 1** – Valores dos pesos atribuídos às variáveis geoambientais.

<b>Pesos das variáveis geoambientais</b>			
Densidade de vias de circulação	Densidade de lineamentos estruturais	Declividade	NDVI
<b>0,1228</b>	<b>0,0514</b>	<b>0,2068</b>	<b>0,619</b>

Fonte: Adaptado de Garófalo e Ferreira (2015)

263

O procedimento metodológico seguinte foi a conversão dos valores originais dos mapas em valores Fuzzy. De acordo com Garófalo e Ferreira (2015), para se analisar as variáveis geoambientais de maneira integrada por meio de mapas temáticos é necessário que os valores dos campos destes mapas sejam padronizados para ficarem em uma mesma escala de valores. Para isso, foi utilizada a função de afinidade linear, contida na ferramenta Fuzzy Membership. As variáveis densidade de vias de circulação, densidade de lineamentos estruturais e declividade após terem seus valores convertidos em escala Fuzzy passaram a variar de 0,0 (menor afinidade à fragilidade) a 1,0 (maior afinidade à fragilidade),

com relação linearmente direta. Para o mapa de NDVI foi utilizada a relação linear inversa, visto que as áreas com baixos valores de índice de vegetação estão associadas a uma maior possibilidade de desenvolvimento de processos erosivos. As variáveis apresentadas em conjunto *fuzzy* estão representadas na Figura 3.

Após essas etapas, o mapa de fragilidade ambiental (FA) foi gerado a partir da aplicação da álgebra ponderada dos mapas das variáveis geoambientais, através da função *Raster Calculator* aplicando-se a equação 2:

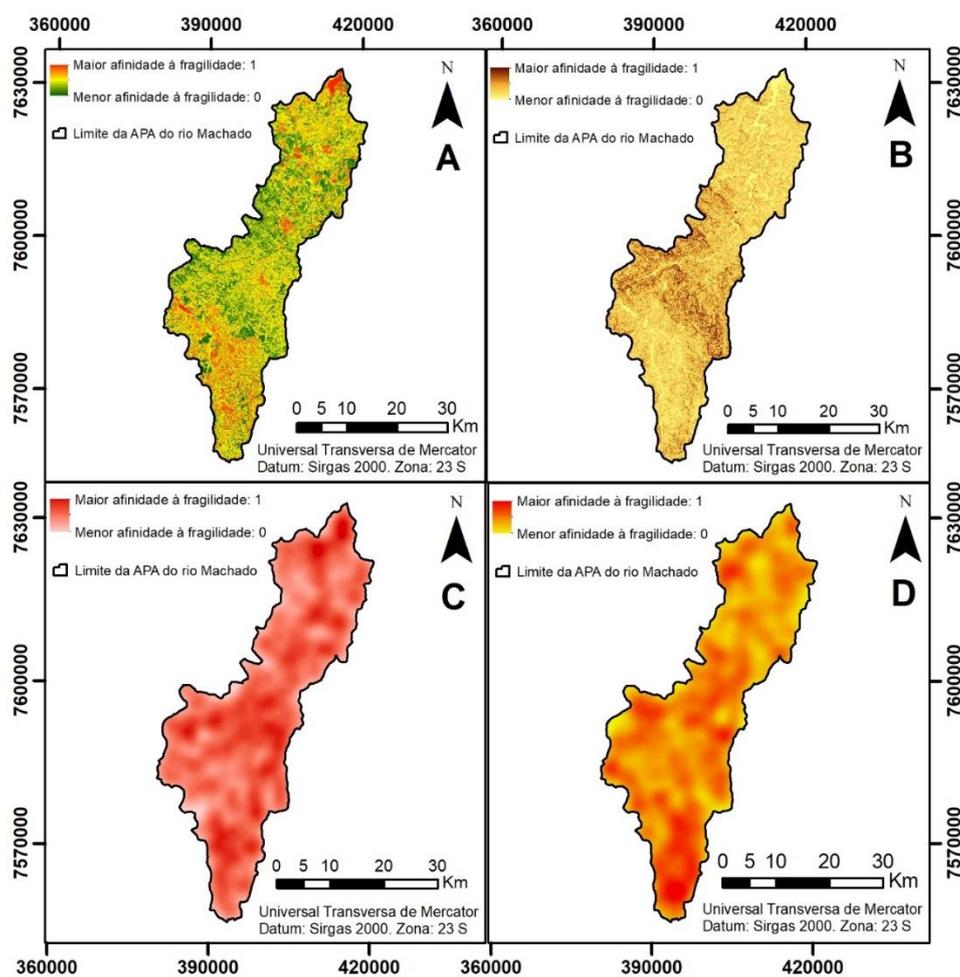
$$FA = \frac{NDVI.0,619 + DEC.0,2068 + DVC.0,1228 + DLE.0,0514}{0,619 + 0,2068 + 0,1228 + 0,0514} \text{ (eq. 2)}$$

#### vii) Mapeamento de formas erosivas

O mapeamento dos processos erosivos lineares e movimentos de massa na área de estudo foi realizado visando relacionar os índices de fragilidade à ocorrência destes processos. Este mapeamento foi executado através do Google Earth Pro no mês de julho de 2019, por meio da identificação visual com base na literatura especializada. Foi estipulada a escala fixa de mapeamento de 1:700, pois esta escala permitiu a visualização e diferenciação das diferentes formas erosivas. Foram mapeados um total de 110 processos erosivos, entre erosões lineares e movimentos de massa. Cada feição identificada foi demarcada através da função "Adicionar Marcador" e salva em uma pasta em formato *kml*, que posteriormente foi convertida em *layer*, através da ferramenta *layer to kml*, do ArcGis 10.5™. Neste SIG, as feições foram exportadas para um arquivo vetorial de pontos e reprojetaas para SIRGAS 2000. Foram realizados trabalhos de campo para verificação da realidade terrestre e obtenção de fotografias, e por fim os pontos das erosões foram sobrepostos ao mapa de fragilidade.

264

**Figura 3** – Variáveis geoambientais com valores de seus respectivos campos convertidos em escala *fuzzy*: (A) Índice de vegetação - NDVI; (B) Declividade - DEC; (C) Densidade de lineamentos estruturais - DLE; (D) Densidade de vias de circulação - DVC.



Fonte: Dos autores (2019).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fragilidade ambiental (FA) da APA do rio Machado à ocorrência de processos erosivos e movimentos de massa apresentou valores que variaram entre 0,086 (baixa FA) a 0,807 (alta FA). Os menores valores de FA foram observados em áreas dos municípios de Poço Fundo e Machado, na média bacia do rio Machado (Figura 3). Valores altos de fragilidade predominam ao sul da bacia, no trecho superior do rio Machado, principalmente nos arredores do referido corpo d'água, no trecho médio, na sub-bacia do Ribeirão do Machadinho e nas proximidades da mancha urbana de Machado, bem como no setor norte, trecho inferior da bacia, em que grande área de seu território detém valores de FA que variam de médios a altos, apresentando valores maiores nos arredores do Reservatório de Furnas.

A espacialização da fragilidade ambiental da APA do rio Machado e os processos erosivos mapeados, está demonstrada no mapa da figura 4.

Comparando os mapas das variáveis geoambientais utilizados nesta pesquisa (Figura 5) com o mapa de fragilidade ambiental, foi constatado que há uma relação inversa entre fragilidade ambiental e Índice de Vegetação (NDVI). Isto se deve ao fato de o NDVI ter o maior peso (0,619) em relação às demais variáveis geoambientais. Portanto, áreas com maior densidade de cobertura vegetal são menos vulneráveis à ocorrência de processos erosivos.

266

Botelho e Silva (2004) salientam a importância da cobertura vegetal para a conservação do solo, e conseqüentemente, para evitar ou mitigar os processos erosivos. Os solos de florestas apresentam uma capacidade de infiltração maior que os solos nus, fato atribuído à presença da serrapilheira, que protege o solo contra o impacto direto da chuva, e por outro lado, pela ação de diversos organismos, que contribuem para a melhoria da estrutura do solo.

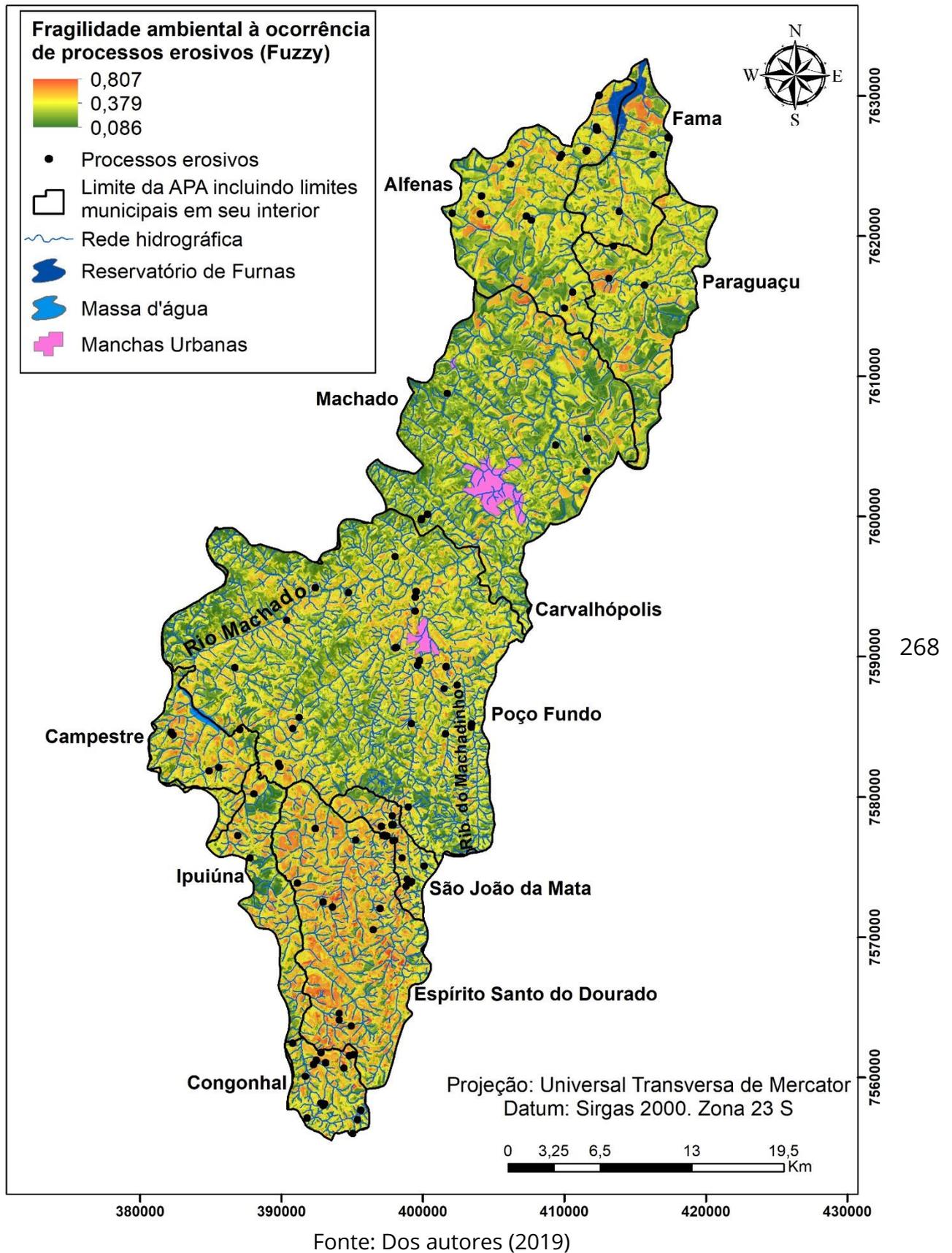
Foi observado na área de estudo que grande parte das áreas com maiores valores de declividades (DEC) ocorrem em áreas com baixos valores de FA, fato

que vai na contramão do que era esperado do ponto de vista geomorfológico, uma vez que em relevos com declives mais acentuados geralmente predominam processos de morfogênese onde o desgaste do relevo é predominante (OLIVEIRA, 2014). Estes baixos valores de FA podem ser explicados pelo fato de os terrenos com maior densidade de cobertura vegetal estarem associados a relevos mais declivosos na área de estudo.

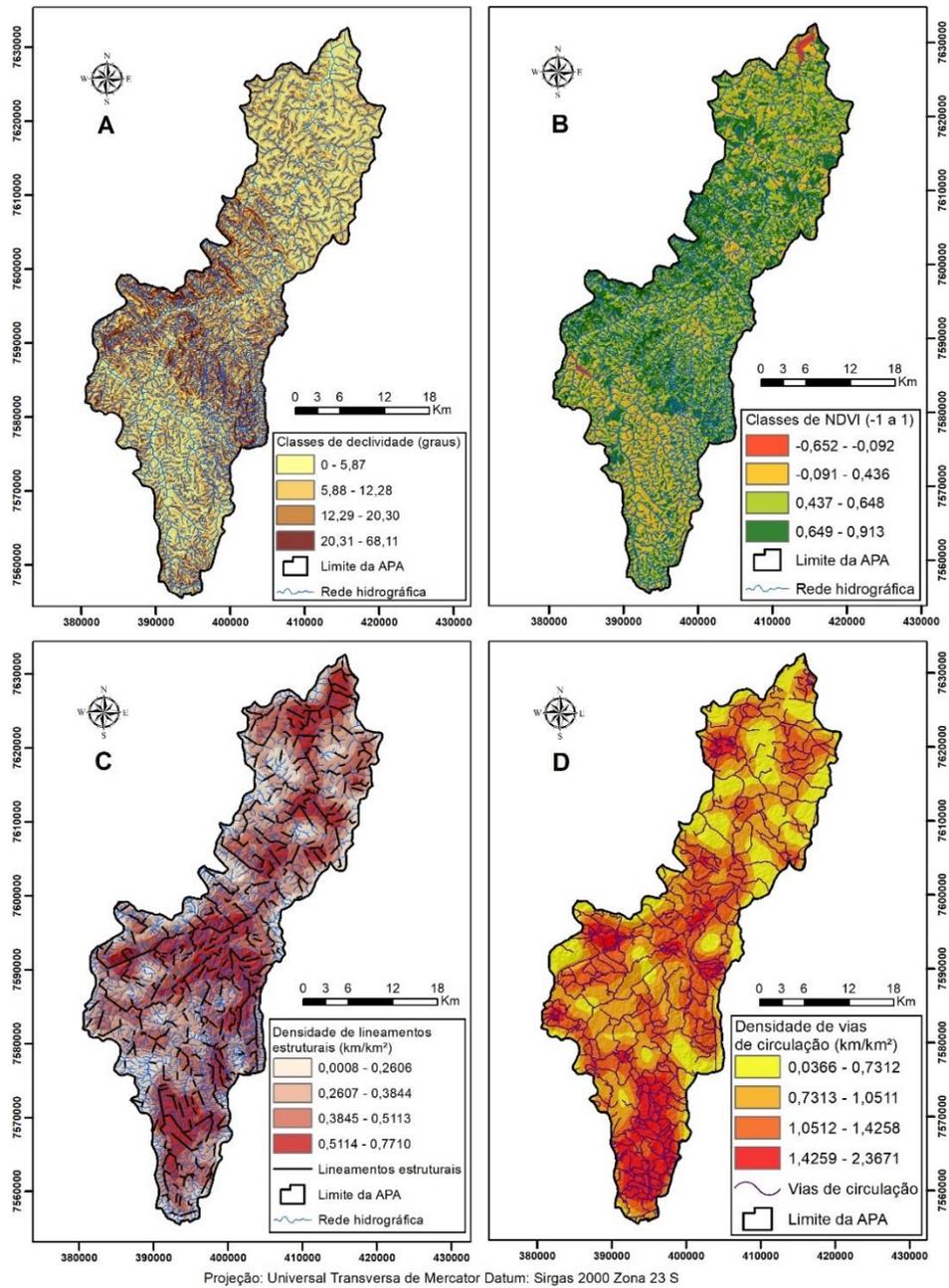
Por outro lado, áreas com menores valores de DEC estão ocupadas pela agricultura ou pastagens e, por isto, apresentam baixos índices de vegetação. Oliveira (2014), ressalta que a declividade controla de maneira direta a distribuição dos tipos de solos, uma vez que, em geral, quanto mais planos são os terrenos, maior a probabilidade de ocorrer o predomínio da pedogênese em relação à morfogênese. O autor afirma ainda que as áreas menos declivosas tendem a formar solos mais profundos, pela maior facilidade de infiltração da água das chuvas e sua ação na decomposição das rochas, favorecendo o desenvolvimento da agricultura, conseqüentemente a retirada de parte da vegetação nativa, o que contribui com o aumento da fragilidade ambiental.

267

**Figura 4** – Mapa de fragilidade ambiental à processos erosivos e movimentos de massa da APA da bacia hidrográfica do rio Machado-MG.



**Figura 5** – Variáveis geoambientais utilizadas na elaboração do mapeamento da fragilidade ambiental da APA da bacia hidrográfica do rio Machado- MG. (A) Declividade; (B) NDVI; (C) Densidade de lineamentos; (D) Densidade de vias.



Fonte: Dos autores (2019)

Como o peso atribuído ao NDVI foi maior, infere-se que nas formas mais suavizadas do relevo, embora os valores de DEC sejam menores, o escoamento

superficial tende a ser maior que a taxa de infiltração, aumentando assim, o potencial erosivo das águas pluviais e o índice de FA.

A associação inversa existente entre NDVI e DEC para com à fragilidade ambiental, foi percebida principalmente nas áreas central e oeste da bacia, mais especificamente nas Serras do Cantagalo, da Boa Vista e Serra Negra, cujas áreas apresentaram baixo índice de FA, alta declividade e altos valores de NDVI. Apesar dos altos valores de declividade, estas áreas se encontram relativamente protegidas da ação morfogenética devido a presença de uma cobertura vegetal vigorosa, uma vez que, segundo Bigarella (2007), a cobertura vegetal possui um papel importante na proteção das vertentes, através da retenção da água das chuvas, controlando o escoamento superficial e diminuindo a penetração de água em excesso no manto de intemperismo. Bigarella (op. cit.) salienta que a retirada da vegetação se caracteriza como um fator condicionante do início de movimentos de massa, além de processos erosivos lineares. Por outro lado, as características morfométricas dessas áreas também conferem uma certa proteção a vegetação, o que pode ser explicado “pela concordância entre limitações na mecanização agrícola neste tipo de terreno e as restrições impostas pela legislação ambiental” (FERREIRA, 2014, p. 108).

270

Foi constatado que os menores índices FA estão associados às áreas com presença de fragmentos de mata nativa intercalados com áreas de plantio de café, uma cultura perene, que apresenta alto índice de vegetação quando as plantas se encontram na fase adulta. Este perfil de cobertura da terra ocorre em áreas com relevos de maiores amplitudes como Morros e Montanhas, Morros com Encostas Suaves e Morrotes, existentes nos municípios de Machado e Poço Fundo. No município de Ipuíuna, as áreas com baixos valores de FA estão ocupadas pela silvicultura e fragmentos florestais relativamente maiores e mais contínuos. É válido ressaltar, que o “entorno de fragmentos sofre pressão de atividades

agrosilvopastoril evidenciando a importância de estabelecer regras protetivas” (SANTOS, 2019).

Por outro lado, valores médios do índice FA distribuem-se também em relevos de Morros com Encostas Suaves, com ocupação agrícola considerável, intercaladas a pastagens extensas, menores fragmentos florestais e matas ciliares. Este padrão foi constatado nos municípios de Poço Fundo e Machado.

Ao se analisar o mapa de DEC e o mapa hipsométrico (Figura 6), foi observado que o setor central da bacia do rio Machado apresenta uma característica morfológica particular, pois, nesta área ocorre um degrau topográfico (*knickpoint*) associado às serras do Cantagalo, da Bela Vista e do Cardoso. Estas serras apresentam amplitude altimétrica expressiva (aproximadamente 110 metros) e altos valores de DEC, expondo brusca descontinuidade entre os padrões morfométricos a montante, um planalto composto por Colinas, que apresenta baixas amplitudes e cujas áreas atingem mais de 1.400 metros de altitude. Por outro lado, no trecho inferior da bacia, a jusante, domina o compartimento de colinas, com baixas amplitudes e declividades suaves.

271

Associado ao desnivelamento altimétrico, o rio Machado apresenta forte encaixamento, traçado retilíneo e degrau topográfico (*knickpoint*) indicado pela presença de queda d’água. Ressalta-se que neste trecho, ocorre alteração significativa no perfil longitudinal do rio Machado (Figura 7), com desnível de cerca de 400m (FERREIRA et al, 2019). Esta anomalia no perfil longitudinal também é apontada por Lima et. al. (2010) em estudo desenvolvido na área.

Este degrau, gera um novo nível de base além do nível presente no exutório da bacia, formando planícies de inundação também à montante da bacia. Os altos índices de declividade impostos por rupturas de declive podem-se constituir, em

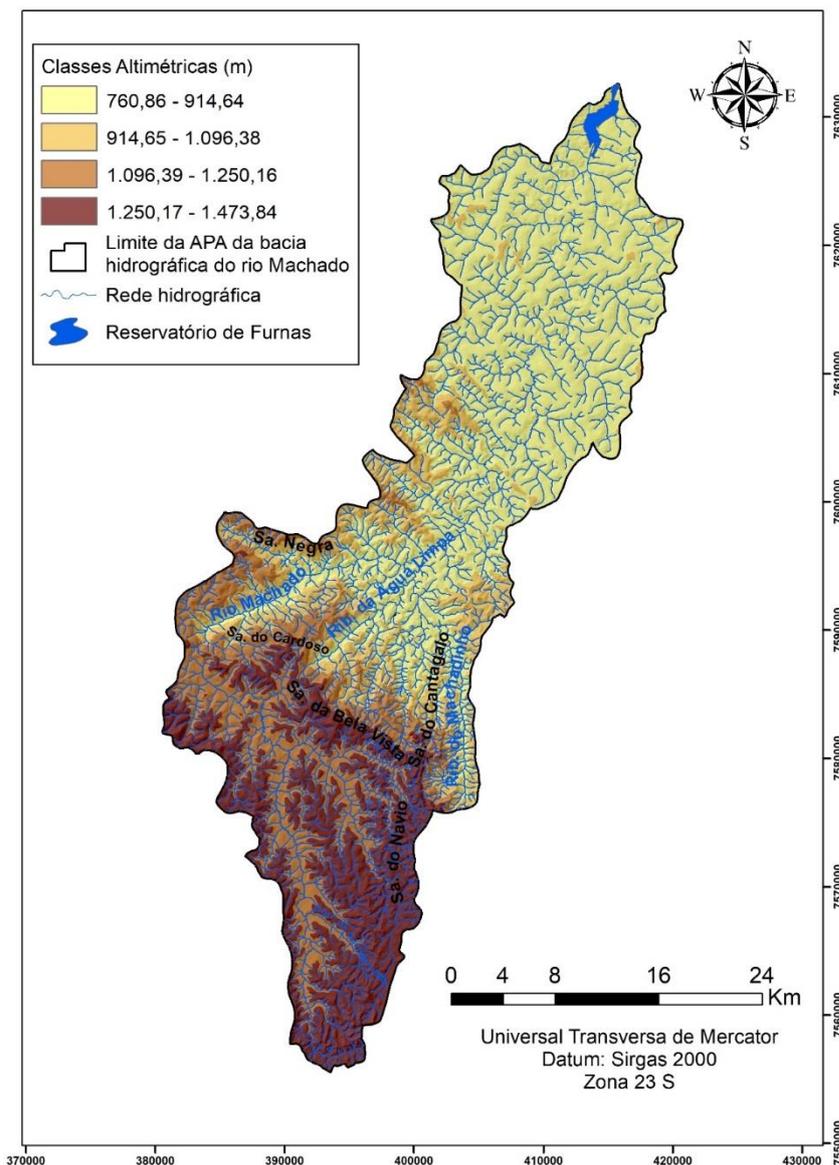
áreas que apresentam baixo índice de cobertura vegetal, como potenciais dinamizadores de processos erosivos.

Altos valores do índice FA foram observados ao sul da bacia, principalmente nos municípios de Espírito Santo do Dourado, Congonhal e São João da Mata. Nestas áreas, associam-se altos valores de DVC (Densidade de Vias de Circulação), relacionados principalmente a estradas rurais, e de DLE (Densidade de Lineamentos), baixos valores de NDVI e grande quantidade de áreas ocupadas por culturas anuais, que, quando não realizadas práticas de manejo adequadas, promovem a exposição do solo às chuvas concentradas, gerando compactação e favorecendo o início do processo erosivo linear.

Neste setor, as áreas com fragmentos florestais são pouco extensas, e estão envolvidas pelas culturas anuais e pastagens por vezes degradadas, como observado em trabalho de campo e imagens orbitais. Segundo Cunha e Thomaz (2017), as estradas rurais podem causar efeitos negativos ao ambiente, uma vez que alteram a resposta hidrológica natural da bacia hidrográfica, interferindo nos fluxos subsuperficiais. Cunha e Thomaz (op. cit.) em pesquisa realizada na bacia do rio Guabiroba, Paraná, constataram que as estradas interceptam diferentes fluxos em distintos setores da vertente, sendo o fluxo de retorno interceptado nos fundos de vale, o fluxo pipe pelos taludes das estradas na média vertente e o fluxo insaturado expelido no talude da estrada em alta vertente.

272

**Figura 6** – Mapa hipsométrico da APA da bacia hidrográfica do rio Machado-MG.



Fonte: Dos autores (2019)

Figura 7 - Perfil Longitudinal do rio Machado.



Fonte: Adaptado de Ferreira et al., 2019

A área sul da bacia apresenta características naturais do relevo que permitem maior mecanização da agricultura, combinadas à presença de lineamentos da rede de drenagem confirmadas pelos altos valores de DLE. De acordo com Mantelli e Rossetti (2009, p. 51) “diversos elementos de drenagem como canais retilíneos com junções em ângulos retos, ocorrência de meandros localizados, levam a interpretar que os lineamentos estão relacionados a presença de estruturas tectônicas”.

274

A presença dominante de uma alta densidade de lineamentos estruturais no setor sul revela forte controle destas estruturas no desenvolvimento de processos erosivos. Através do mapeamento destes processos, foi verificado que o setor sul abriga uma grande concentração de erosões lineares e movimentos de massa, a exemplo da ravina e do escorregamento rotacional demonstrado na figura 8.

A estruturação do relevo aliada às características antrópicas, e ao intenso uso da terra para fins agropecuários, faz com que o setor sul da bacia concentre altos índices de FA e um grande número de processos erosivos, se comparado aos demais setores, o que pode ser explicado, em parte, pelo fato das atividades humanas se configurarem como os principais agentes catalisadores de processos erosivos (PANACHUKI, 2006). Ademais, conforme estudos realizados por Baccaro (2010) os processos erosivos lineares podem ser gerados e dinamizados por zonas

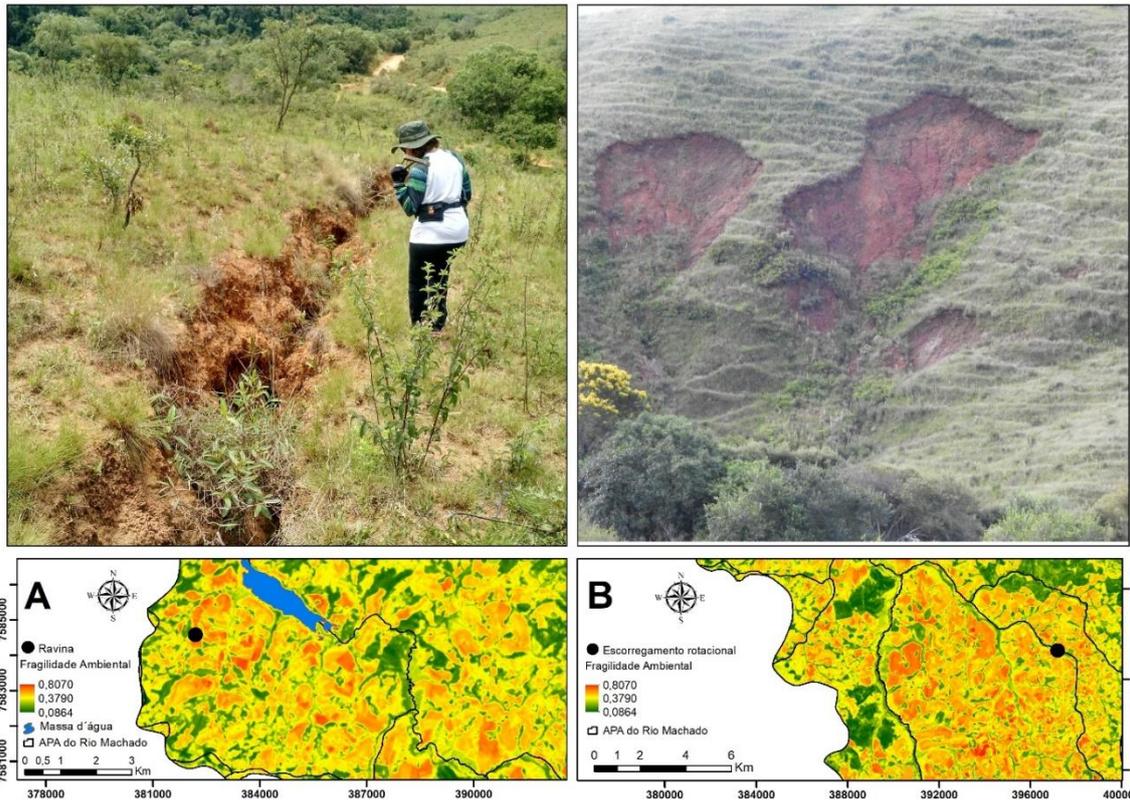
de fraturamento e de falhas “que se constituem em locais preferenciais de alívio da pressão piezométrica por meio de exfiltração da água, dando início à frente de erosão ou túneis que provocam o colapso do teto iniciando o processo erosivo” (p. 208).

Os altos valores de FA encontrados nos municípios de Alfenas, Fama e Paraguaçu, no setor norte da área de estudo, estão associados a presença de solo exposto, áreas agricultáveis, fragmentos florestais escassos e com dimensões reduzidas e altos valores de DLE, características propícias ao desenvolvimento de processos erosivos, como os que foram mapeados nessas áreas.

No trecho médio da bacia do rio Machado, a jusante da ruptura topográfica (*knickpoint*), foi verificada uma fragilidade ambiental relativamente alta se comparada ao relevo circundante. Este fato pode ser explicado pelo forte controle estrutural apresentado pelo rio neste trecho, que sofre mudança brusca de direção e altitude, pois seu curso se encaixa em uma falha (Lima et al, 2010). Outros fatores que podem explicar os altos valores do índice FA nesta área são: vegetação pouco expressiva existente próximo as margens do rio Machado, indicando que há ocupação da planície de inundação por agropecuária e a quantidade considerável de estradas nas proximidades (altos valores de DVC).

275

**Figura 8-** Processos erosivos e movimentos de massa identificados na APA do rio Machado. (A): Ravina em área de FA no município de Campestre-MG; (B): Escorregamentos observados no município de Espírito Santo do Dourado (MG).



Fonte: dos autores (2019)

276

A sub-bacia do ribeirão do Machadinho também apresenta áreas com valores altos de FA, pois possui relevo relativamente declivoso (altos valores de DEC), a cobertura vegetal mais esparsa, além de uma densidade média de estradas e maior presença de pastagens. As pastagens favorecem a fragilidade do terreno a processos erosivos, pois, segundo Botelho e Silva (2004, p.165), “o pastoreio compacta o solo e cria caminhos preferenciais para o escoamento superficial, aumentando o risco de erosão”. Ressalta-se que o trecho desta sub-bacia próximo a mancha urbana de Poço Fundo apresenta índices elevados de FA associados a presença de vários processos erosivos.

## CONCLUSÃO

Foi constatado que a intensa ocupação por atividades agropecuárias, especialmente nos setores sul e norte da APA da bacia hidrográfica do rio

Machado está diretamente relacionada a uma maior fragilidade ambiental a processos erosivos lineares e movimentos de massa, bem como a presença de diversos processos erosivos, pois foi observado que, de maneira geral, as áreas que apresentam fragilidade ambiental variando de média a alta e uma maior concentração de erosões também concentram estas atividades antrópicas. Essa constatação está intimamente ligada ao fato de que as atividades agropecuárias, especialmente as pastagens sem manejo correto do solo na APA, causam diminuição da cobertura vegetal e/ou exposição do solo (principalmente na estação de estiagem, caracterizada por um inverno mais seco) culminando em baixos valores de NDVI; além de concentrarem uma maior quantidade de vias em suas proximidades para o escoamento da produção.

Foi observado também que o relevo de Colinas pode ter facilitado o desenvolvimento de atividades agrícolas nos setores sul e norte da bacia, aumentando o desmatamento e a intensa fragmentação da cobertura vegetal original, fato determinante para a ocorrência de áreas com altos índices de fragilidade ambiental.

277

Através de trabalhos de campo, análise de fotografias e de imagens orbitais foram identificados e mapeados diversos processos erosivos lineares, como ravinas, sulcos e voçorocas, bem como processos de escorregamentos nas áreas cujos índices de fragilidade ambiental a processos erosivos lineares e movimentos de massa variam de médios a altos, validando o mapeamento produzido.

Com base nos resultados obtidos, propõe-se uma maior fiscalização, pelos órgãos competentes, das atividades exercidas na UC, bem como o desenvolvimento de atividades de educação ambiental, através das cooperativas de produtores, por exemplo, que possam demonstrar aos habitantes da APA a importância desta UC do ponto de vista ambiental e, inclusive econômico, enfatizando a relevância do uso sustentável dos recursos naturais

A metodologia utilizada para a análise da fragilidade ambiental da APA do Rio Machado se mostrou satisfatória, permitindo o mapeamento em uma média escala de detalhamento. Apesar da não utilização de uma das variáveis utilizadas por Garófalo e Ferreira (2015), os resultados obtidos permitiram demonstrar a realidade terrestre, pois comprovou-se empiricamente a relação entre índices mais altos de fragilidade ambiental e o desenvolvimento de processos erosivos, mapeados e observados em campo. Ressalta-se que esta metodologia permite a utilização de quaisquer variáveis que apresentem distribuições contínuas no espaço, podendo assim, serem classificadas através da função *Fuzzy*. Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a variável Densidade de drenagem, que está intimamente ligada a evolução do relevo e pode contribuir com o modelo de fragilidade apresentado.

#### AGRADECIMENTOS

278

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES pela concessão da bolsa de mestrado que propiciou a finalização desse artigo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, n. 3, v. 38, p. 619-645, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56362>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

AB' SÁBER, AZIZ. **Os Domínios de Natureza no Brasil**. 6. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALVES, F. D.; PORTO, G. C. S.; BANDO, D. H.; RIBEIRO, T. M.; SILVA, M de O. Relação Campo-Cidade e dinâmica Econômica nos municípios da APA do Rio Machado-MG. **Caderno de Geografia**, v.29, Número Especial 1, 2019, p. 164-180.

BACCARO, C. A. D. Processos erosivos no domínio do Cerrado. //: GUERRA, A. J. T.; DA SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (orgs). **Erosão e conservação dos solos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. cap. 7, p. 195-223.

BATISTA, J.P.G.; DA SILVA, F.M. 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 jan. 2019.

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

BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. //: 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.

CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.S.; CHIEREGATI, L.A.; KAEFER, L.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G.N.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. Projeto Sapucaí. Brasília, DNPM. (Série Geologia, 4), (Relatório Final), 1979.

COELHO, P.N.; DE OLIVEIRA, E. B. B.; WISNIEWSKI, M. J. S. Comunidade zooplanctônica em um pequeno corpo d'água associado a um fragmento florestal e pastagem no município de Alfenas-MG. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l], v. 10, n. 3, p. 85-100, 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.17271/198008271032014843>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

CORREIA, F. N.; LIMA, W. S. G. de.; BEZERRA, I. S. Processos erosivos costeiros e recuperação de áreas degradadas na Praia de Tabatinga II, município de Conde-litoral sul, Paraíba- Brasil. *Revista Ambiental*, João Pessoa, v. 1, n. 3, p. 1-14, 2015.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. Curso de sensoriamento remoto aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico. INPE, São José dos Campos, 1996.

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 dez. 2018.

CUNHA, M. C. da.; THOMAZ, E. L. Fluxo subsuperficial interceptado por estrada rural: características e distribuição na paisagem. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 429-447, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5216/bgg.v37i3.50763>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

DANTAS, Mayara Fontes. **Impactos da modernização da agricultura na estrutura agrária sulmineira na microrregião de Alfenas- MG**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Geografia) - Instituto de Ciências da Natureza (ICN), Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2011. Disponível em: <<https://www.unifal-mg.edu.br/geres/files/TCC%20-%20Mayara.pdf>> . Acesso em: 14 dez. 2018.

ESRI. **ArcGIS Desktop**. Versão 10.5. Redlands: ESRI, 2016.

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

FERREIRA, M.F.M.; DA CRUZ, B.L.; GREGÓRIO, D.H.S.; DE ALFENAS, D.S.P.; PINTO, G.S.; MARINHO, G.S. Geomorfologia da Área de Proteção Ambiental do Rio Machado, Sul de Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, [s. l], v. 29, n. 1, p. 36- 57, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp36>> . Acesso em: 15 dez. 2018.

280

FILETTO, F.; ALENCAR, E. Introdução e expansão do café na região sul de Minas Gerais. **Organizações rurais e agroindustriais**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2001. Disponível em: < <http://revista.dae.ufla.br/index.php/ora/article/view/278>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

GAMEIRO, S.; TEIXEIRA, C. P. B.; SILVA NETO, T. A. da.; LOPES, M. de. F. L.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; ZIMBACK, C. R. L. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na sub-bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Terrae**, Campinas, v. 13, p. 15-22, 2016.

GARÓFALO, 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**, [s. l], São Paulo, v. 29, p. 212-245, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102118>>. Acesso em: 11 jan. 2019.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 09 out. 2019.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. //: VITTE, A.C.; GUERRA, A. J. T. (orgs). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. cap. 8, p. 225-251.

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 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.

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**, Pernambuco, v. 5, n. 2, p. 269-284, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.26848/rbgf.v5.2.p269-284>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

LIMA, H. C.; DORANTI, C.; HACHSPACHER, P.C.; RIBEIRO, M.C.S.; RIBEIRO, L.F.B. Análise morfométrica da rede de drenagem da bacia do rio do Machado-MG. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 22, n. 1, p. 23-34, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132010000100003>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

MANTELLI, L.R.; ROSSETTI, D. de F. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da ilha do Marajó. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 42-54, 2009. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7628>>. Acesso em: 15 jan. 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: 14 dez. 2018.

OLIVEIRA, I. J. de. Chapadões descerrados: relações entre vegetação, relevo e uso das terras em Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 34, n. 2, p. 311-336, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5216/bgg.v34i2.31734>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

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 jan. 2019.

PORTO, G. C. S.; ALVES, F. D.; BANDO, D. H.; RIBEIRO, T. M.; SILVA, M. de O. Notas sobre a formação territorial e dinâmica populacional dos municípios integrantes da APA do rio Machado – MG. **Caderno de Geografia**, v.29, Número Especial 1, 2019, p. 72-88.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, [s. l], v. 8, p. 63-74, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>>. Acesso em: 14 dez. 2018.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Remote Sensing Center, Texas A&M University, College Station, Texas, , 1973. p. 309-317.

SANTOS, C. A. dos. Diagnóstico e zoneamento geoambiental da APA da bacia hidrográfica do rio Machado- MG. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 1, p. 144-163, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp144>>. Acesso em: 04 jul. 2019.

282

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

SOARES, P. C.; FIORI, A.P. Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 71-104, 1976.

SOUZA, P. H. de.; SANTOS, B. C. dos.; SANCHES, R. G. A identificação de anos secos, chuvosos e normais em Machado/MG através do estudo de uma série histórica e análise do comportamento da precipitação. **Caderno de Geografia**, [s. l], v. 29, n. 1, p. 181-212. Disponível em:< <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp181>>. Acesso em: 07 dez. 2020.

SPORL, C.; ROSS, J.L.S. Análise comparativa da Fragilidade Ambiental com Aplicação de Três Modelos. **GEOUSP Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 39-49, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2004.123868>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

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

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Earth Explorer. [Desenvolvida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos. Disponibiliza produtos de sensoriamento remoto para download. Disponível em: < <https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

Submetido em: 09 de setembro de 2020

Aprovado em: 04 de dezembro de 2020

Publicado em: 24 de dezembro de 2020