



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Estudo da Susceptibilidade à Erosão Laminar em Bacia Hidrográfica da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil

Heitor Carvalho Lacerda¹, André Luiz Lopes de Faria², Humberto Paiva Fonseca³, Marco Antônio Saraiva da Silva⁴, Wesley Oliveira Soares⁵, Fillipe Tamiozzo Pereira Torres⁶, Liovando Marciano da Costa⁷

¹ Geógrafo e mestrando na Pós-Graduação de Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), endereçado na Av. Antônio Carlos, 6.627 - Pampulha - CEP: 31270-901 Belo Horizonte - MG. heitorcarvalho7@gmail.com. ² Geógrafo, Dr. e Coordenador do Laboratório de Geomorfologia do Quaternário - Departamento de Geografia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Campus Viçosa, endereçado na Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900. andre@ufv.br. ³ Geógrafo e mestrando na Pós-Graduação de Meteorologia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Campus Viçosa, endereçado na Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900. humbertopfonseca@gmail.com. ⁴ Geógrafo e mestrando na Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Campus Viçosa, endereçado na Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900. marco.geografia.ufv@gmail.com. ⁵ Geógrafo pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Campus Viçosa, endereçado na Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900. wesleyoliveiras@hotmail.com. ⁶ Geógrafo, Dr. e Coordenador do Laboratório de Incêndios Florestais - Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Campus Viçosa, endereçado na Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900. torresftp2@gmail.com. ⁷ Dr. e Professor titular aposentado do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), endereçado na Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900. liovandomc@yahoo.com.br

Artigo recebido em 10/09/2020 e aceito em 19/04/2021

RESUMO

Land degradation and soil loss is a global socio-environmental issue, which leads to various losses and is implicit in many United Nations sustainable development goals. The study of this topic is relevant in the mesoregion of the Zona da Mata of Minas Gerais, given the predominance of poorly managed pasture cover and the significant degradation of the soil. In this study, the objective was to understand which geodynamic variables are important in the prediction of laminar erosive processes and the best predictive model, through multicriteria comparisons, making it possible to understand the phenomenon in a watershed in the mesoregion. Thus, it was used the method of attributing grades by Literature (L) and Field reality (RC), whose weighting of the mapped laminar erosive (60%) processes weighted the grade of the variable classes by their area. The integration of the variables was through weighting tests and total and partial integration. The evaluation of the models generated was by descriptive statistics (Box-Plot), different methods of categorization (Manual, Natural Breaks and Geometrical Interval) and ROC curve with AUC efficiency calculation (40% of the mapped erosions). The results showed that the lack of moisture is an important factor for the occurrence of laminar erosive processes, on the other hand, the morphometric variables were not important for the prediction. Models based on RC (72.41% average AUC) achieved considerably greater efficiency than L (65.41% average AUC), when compared to the integration of all geodynamic variables and only the most important ones and when integrated with weighting and without weighting, there was no considerable statistical difference. The most efficient model obtained 76.3% AUC, considered good and adequate to the reality of the studied area.

Keywords: Geotechnologies; Comparison of risk models; Multicriteria analysis.

Study of Susceptibility to Sheet Erosion in a Watershed in Zona da Mata, Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT

The study of susceptibility to surface erosion is relevant in the mesoregion of the Zona da Mata of Minas Gerais, given the predominance of pasture cover, the significant degradation of the soil and the stagnation of the agricultural sector. In this study, the objective was to understand which geodynamic variables are important in the prediction of surface erosive processes and the best predictive model among eight, through multicriteria comparisons, making it possible to understand the phenomenon in a watershed in the mesoregion. Thus, it was used the method of attributing grades by Literature (L) and Field Reality (RC), whose weighting of the mapped surface erosive (60%) processes weighted the grade of the

1707

Lacerda., H., C., Faria., A., L., L., Fonseca., H., P., Marco Silva., M., A., S., Soares., W., O., Torres., F., T., P Costa., L., M.

variable classes by their area. The integration of the variables was through weighting tests and total and partial integration. The evaluation of the models generated was by descriptive statistics (Box-Plot), different methods of categorization (Manual, Natural Breaks and Geometrical Interval) and ROC curve with AUC efficiency calculation (40% of the mapped erosions). The results showed that the lack of moisture is an important factor for the occurrence of surface erosive processes, on the other hand, the morphometric variables were not important for the prediction. Models based on RC (72.41% average AUC) achieved considerably greater efficiency than L (65.41% average AUC), when compared to the integration of all geodynamic variables and only the most important ones and when integrated with weighting and without weighting, there was no considerable statistical difference. The most efficient model obtained 76.3% AUC, considered good and was adequate to the reality of the studied area.

Key words: Geotechnologies; Comparison of Risk Models; Multicriteria Analysis

Introdução

Aproximadamente 15% da superfície terrestre está em processo de degradação precedida de atividades antrópicas e estima-se que entre 70% e 84% da superfície terrestre já estão degradadas no mundo (Gao et al., 2015; Scholes et al., 2018). O processo de degradação das terras viabiliza a intensificação dos processos erosivos que, por sua vez, leva a perda de solos, afetando diretamente a produtividade agrícola, a qualidade da água e a estrutura das estradas e construções (Zakerinejad e Maerker, 2015; Arabameri et al., 2019). A diversidade de prejuízos ocasionados pela perda de solos por erosão vai na contramão dos objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas (United Nations, 2015), como, na erradicação da pobreza, fome zero, agricultura sustentável, vida na água etc.

O processo de perda de solos por erosão deve ser compreendido e gerenciado por abordagens integradas, que envolvam os componentes ambientais, sociais e econômicos (Keesstra et al., 2018). Os fatores geodinâmicos que propiciam as condições favoráveis às erosões em diferentes investigações são realizados por integração sistêmica de aspectos topográficos, litológicos, pedológicos, climáticos e o uso e manejo da terra (Garosi et al., 2018; Mosavi et al., 2020). Um dos meios para compreensão das erosões são os modelos de susceptibilidade espacialmente explícitos, os quais são pertinentes e recomendados para a gestão eficiente da paisagem e são elaborados a partir de integração das informações geodinâmicas (Mosavi et al., 2020).

Pesquisas sobre erosões lineares são desenvolvidas a partir da integração de múltiplas variáveis geodinâmicas por métodos estatísticos com apoio de Sistemas de Informações Geográficas (Gómez-Gutiérrez et al., 2015; Rahmati et al., 2017a; Zakerinejad e Maerker,

2015; Choubin et al., 2019; Mosavi, et al., 2020; Mafra et al., 2020). As pesquisas sobre os processos erosivos lineares são amplamente difundidas e aprofundadas na abordagem da susceptibilidade, porém é notório o recente empenho direcionado as investigações de feições erosivas caracterizadas por expressas manchas de solos expostos (Caldas et al., 2019; Da Silva e Mendes, 2019; Bosino et al., 2020; Cama et al., 2020), advindas de acentuada degradação e ação da erosão laminar.

A mesorregião da Zona da Mata, Minas Gerais, em virtude do histórico de uso da terra, nos últimos séculos, sofre com a degradação da terra devido intensivos usos antrópicos. Essa condição decorre do desmatamento nos últimos séculos e da implementação de diferentes ciclos de cultivo, com destaque para o café e cana-de-açúcar (Valverde, 1958; Resende et al., 1996). Atualmente, predomina na região da Zona da Mata a cobertura de pastagens degradadas e esparsos fragmentos de florestas secundárias nos topos de morros (Projeto MapBiomass, 2020). O uso prolongado e intensivo do solo na região oportunizou a degradação ambiental generalizada da região, com ocorrência de manchas expressivas de solo exposto.

Nesta investigação, selecionou-se a bacia hidrográfica do rio dos Bagres (BHRB), visto sua localização central na mesorregião da Zona da Mata, a qual representa bem o quadro histórico da dinâmica espacial de uso da terra dessa paisagem. Dessa maneira, objetivou-se compreender quais variáveis geodinâmicas são importantes na predição dos processos erosivos laminares e o melhor modelo preditivo, através de comparações multicritérios, possibilitando entender o fenômeno na BHRB. Destaca-se, como objetivos específicos, a busca por compreender os processos erosivos laminares ao comparar: o uso do critério baseado em treinamento das variáveis geodinâmicas e baseado na literatura; o uso de diferentes modelos

na predição dos processos erosivos laminares; a integração de todas as variáveis geodinâmicas e parcela das mesmas; e o uso de diferentes métodos de categorização.

Espera-se que as variáveis geodinâmicas mais susceptíveis à erosão laminar sejam as que remetem às atividades antrópicas, as características topográficas e a natureza dos solos. Além disso, acredita-se que todos os modelos preditivos sistematizados na investigação tenham eficácia adequada para servir de apoio à gestão ambiental, porém com resultados superiores para os modelos calibrados pelos processos erosivos, integrado pelas variáveis geodinâmicas mais importantes.

Material e métodos

Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio dos Bagres (BHRB) está localizada no sudeste do Brasil, na mesorregião da Zona da Mata do estado de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Guiricema e

Ervália, entre os meridianos 42°48'00'' - 42°32'00'' e paralelos 20°51'00'' - 21°60'00'' (Figura 1). A BHRB está na jurisdição do Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Pomba e Muriaé – PS2 e é inserida na bacia hidrográfica exorréica do Rio Paraíba do Sul, a qual é considerada de importância estratégica para o sudeste do país, visto que abrange as unidades federativas de Minas Gerais, São Paulo e grande parte do estado do Rio de Janeiro, cuja região metropolitana é abastecida por essa unidade hídrica (Cavalcanti et al., 2016).

De acordo com o critério de classificação de Köppen (1936) a região da BHRB apresenta clima mesotérmico (CWA), com verões chuvosos e invernos mais secos (Martins, et al., 2018).

A BHRB está localizada em sua maior parte na unidade geomórfica da depressão do rio Xopotó e outra parcela nas Serras da Zona da Mata mineira (Neto et al., 2018), ambas as regiões são caracterizadas por predomínio de relevos mamelonares, que condicionam padrões de drenagens dendríticas.

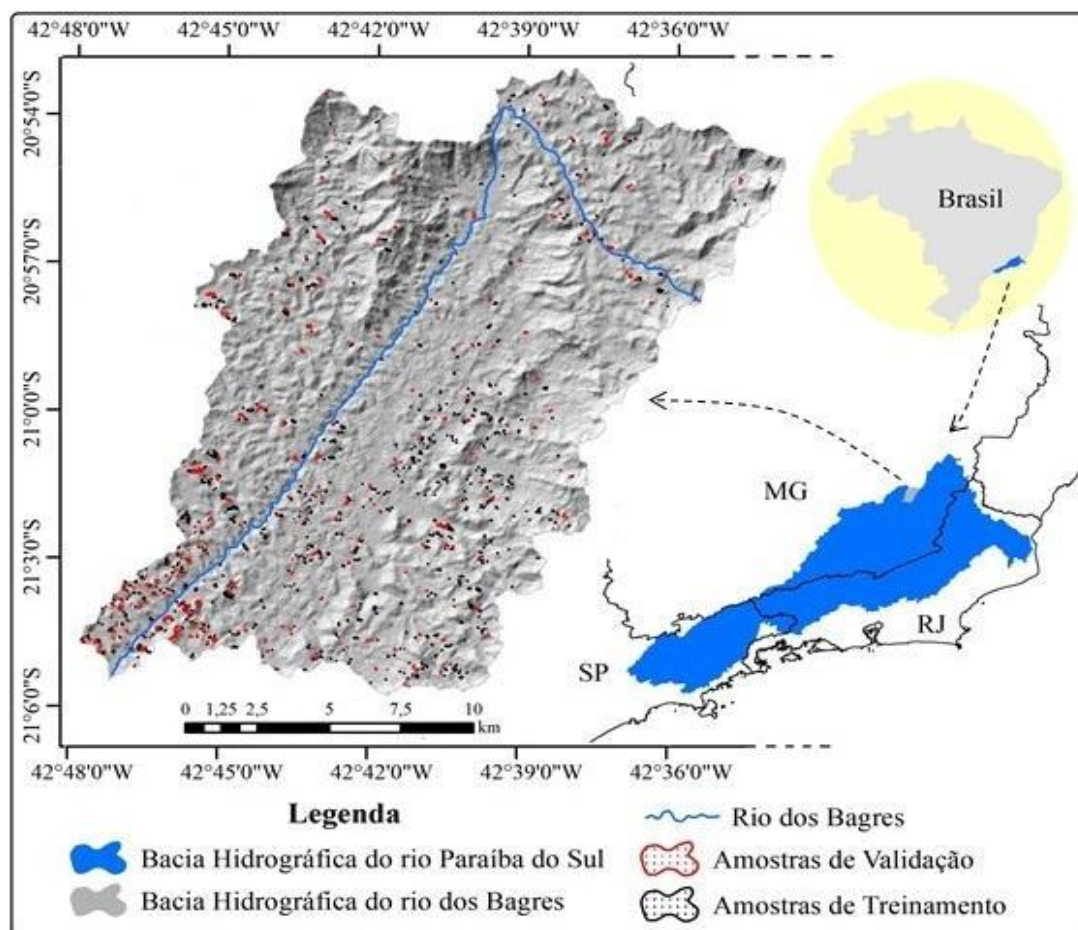


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do rio dos Bagres.

Banco de Dados e Variáveis Geodinâmicas

O limite da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bagres (BHRB) foi adquirido no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) através do website HIDROWEB e utilizado para limitar o processamento dos demais materiais (acesso em 01/2020).

O modelo de Uso e Cobertura da Terra (UCT) foi elaborado a partir da imagem do satélite Sentinel-II, com *ground sample distance* (GSD) de 10 metros e datada do mês de julho, de 2019, a qual foi submetida a correção atmosférica no *software Snap* pela plugin *Sen2cor 2.5.5* e, no *software ArcGis 10.4^R*, foi realizado a composição de 8 bandas (*Blue 2, Green 3, Red 4, Red-edge 5, 6 e 7, NIR 8 e Red-edge 8A*). A segmentação da imagem foi realizada pelo método de classificação não-supervisionada ISO CLUSTER, com posterior ajuste manual por fotointerpretação em diferentes composições de imagem falsa-cor. As classes estabelecidas foram: pastagem, solo exposto, área agrícola, mata nativa, área urbana e corpos d'água (Figura 3). A validação do produto foi realizada através da matriz de confusão por pontos de controle obtidos no *software Google Earth Pro*, com imagens de 2019 (mesmo período da imagem MSI/Sentinel-II), que possibilitou avaliar a acurácia da classificação por meio do índice de exatidão global e coeficiente Kappa.

O *Enhanced Vegetation Index* (EVI), desenvolvido por Huete et al. (2002), é um índice que busca otimizar a resposta da vegetação sobre o registro da radiação eletromagnética, a fim de reduzir os efeitos atmosféricos (Equação 1). O valor desse índice varia entre - 1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais é destacado a vegetação (Figura 2).

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 \times \rho_{RED} - C2 \times \rho_{BLUE} + L} \quad (1)$$

Onde: *G* é uma constante, 2,5; ρ_{NIR} refere-se a banda *NIR*; *Pred*; é a banda *Red*; ρ_{BLUE} , banda *Blue* C1, 6; C2, 7,5; e L, 1 - são constantes.

A Distância das Estradas (DE) foi elaborada a partir do mapeamento das estradas rurais identificadas nas imagens disponíveis no

Google Earth Pro (Figura 2). A maior parte das informações geodinâmicas utilizadas na pesquisa derivou do Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR, sendo elas: Altitude (AI), Curvatura Horizontal (CH) e Vertical (CV), Declividade (D), Orientação das Vertentes (OV), Incidência de Radiação Solar (IRS), *Topographic Wetness Index* (TWI) e o fator *Slope-Length* (LS).

O TWI é considerado um fator secundário da topografia (Rahmati et al., 2016), que envolve a concentração da umidade distribuída na área drenada (Figura 2) e sua relação pode ser vista na equação 2.

$$TWI = \ln \left(\frac{S}{\tan \alpha} \right) \quad (2)$$

Onde: *S* é a área que acumula e drena a água através de um ponto, por unidade de comprimento de contorno e α é referente a declividade em graus.

O fator *LS* é um parâmetro utilizado para entender o efeito da topografia na erosão, considerando a inclinação em função do comprimento de rampa (Figura 2), influenciando diretamente a velocidade do escoamento superficial, ver equação 3.

$$LS = \left(fa \cdot \frac{cellsize}{22.13} \right) 0.4 \times \left(\frac{\sin \sigma}{0.0896} \right) 1.3 \quad (3)$$

onde *fa* é referente ao acúmulo de fluxo, *cellsize* se refere ao tamanho da célula e $\sin \sigma$ é a inclinação da área.

A Densidade de Drenagem (DD) foi elaborado a partir da drenagem adquirida do banco de dados provenientes de projetos de mapeamentos geológicos (referenciadas a seguir) e elaborado pelo método *Kernel Density* do *ArcGis 10.4* (Figura 2). Os tipos de rochas da BHRB foram contemplados por dois mapas geológicos na escala de 1:100.000, os quais foram elaboradas por Gradim et al. (2014), folha Viçosa, e outro por Noce et al. (2003), folha Ubá (Figura 2). Já os tipos de solos, foi utilizado o mapeamento do estado de Minas Gerais na escala de 1:600.000 elaborado pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (Figura 2). Os órgãos setoriais do país não possuem informações pedológicas e

geológicas com escala maior para a área de estudo.

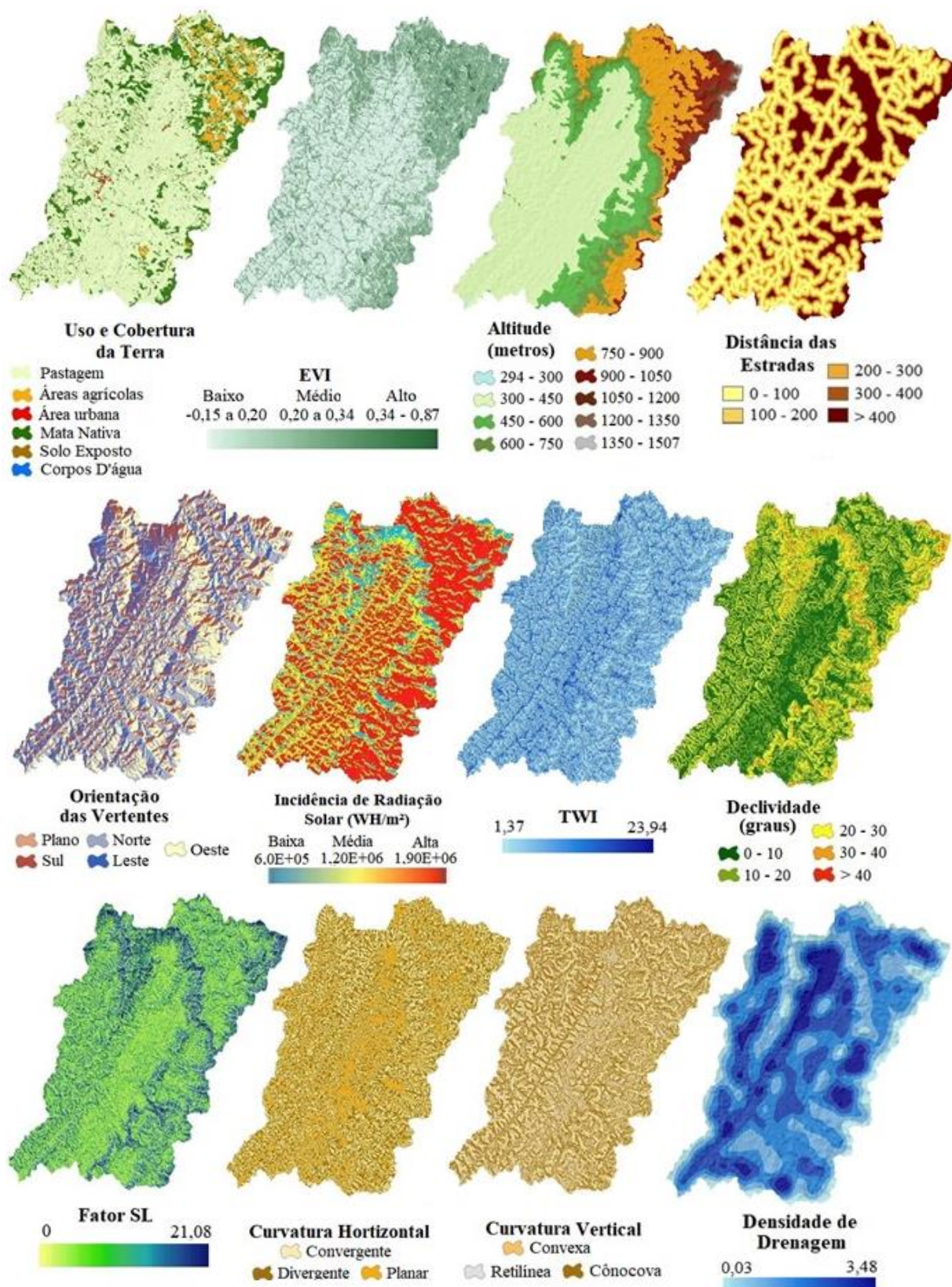




Figura 2. Representação espacial das variáveis geodinâmicas da bacia hidrográfica do rio dos Bagres (BHRB).

Critérios de notas das variáveis Geodinâmicas

Os critérios estabelecidos na avaliação e atribuição de notas às classes das variáveis geodinâmicas foram fundamentados na literatura e na realidade de campo. Entende-se por literatura o critério baseado nas referências bibliográficas e artigos recentes que buscaram compreender e avaliar o arranjo e fatores da paisagem que propiciam as erosões. Por outro lado, a realidade de campo visa apontar configurações e fatores espaciais específicos da área de estudo pelo treinamento das variáveis geodinâmicas. Portanto, separou-se 60% dos processos erosivos laminares mapeados para treinamento, os quais foram ponderados pela área das classes, objetivando entender a probabilidade a erosão laminar pelo histórico de ocorrência na própria área de estudo (Figura 3).

Proposta de interação das variáveis Geodinâmicas

Propõe-se comparar e avaliar como a quantidade de variáveis geodinâmicas integradas influencia na predição das erosões laminares quando integrado integralmente, como as 14 variáveis geodinâmicas supracitadas, e a integração de um número restrito de variáveis baseado no desempenho do treinamento por realidade de campo (Figura 3). Nessa perspectiva, testa-se a hipótese de que quando uma ou duas classes se destacam em detrimento das demais (maior amplitude), a variável geodinâmica tende a apontar com maior

precisão as áreas de risco e criar modelos preditivos mais eficientes.

O método de integração utilizado foi por média aritmética simples e ponderada, baseado na teoria das combinações lineares (Voogd, 1983), as quais permitem, a multiplicação dos pesos entre as variáveis em integração a partir de critérios pré-estabelecidos, sendo operacionalizado pixel-a-pixel a partir do ambiente SIG (Figura 3). Assumiu-se que a integração ponderada das variáveis derivados de Sensoriamento Remoto, a partir de dados com alta-média resolução espacial (10 metros), receberia maior ponderação (valor = 3), visto que envolve informações geográficas fundamentais na ocorrência de erosões laminares (atividades antrópicas e coberturas vegetais). A segunda maior ponderação (valor = 2) foi atribuída aos dados provenientes das características do relevo (MDE) e a densidade de drenagem, os quais possuem escala cartográfica média. Os mapas de solos/litotipos, em função da escala média-pequena, não foram ponderados. Baseado nessas premissas, foram gerados 8 modelos (Figura 3). Resumidamente, vê-se a seguir a síntese dos critérios de cada modelo: 1. literatura, sem ponderação e integração total; 2. realidade de campo, sem ponderação e integração total; 3. literatura, com ponderação e integração total; 4. realidade de campo, com ponderação e integração total; 5. literatura, sem ponderação e integração parcial; 6. realidade de campo, sem ponderação e integração parcial; 7. literatura, com ponderação e integração parcial; 8. realidade de campo; com ponderação e integração parcial.

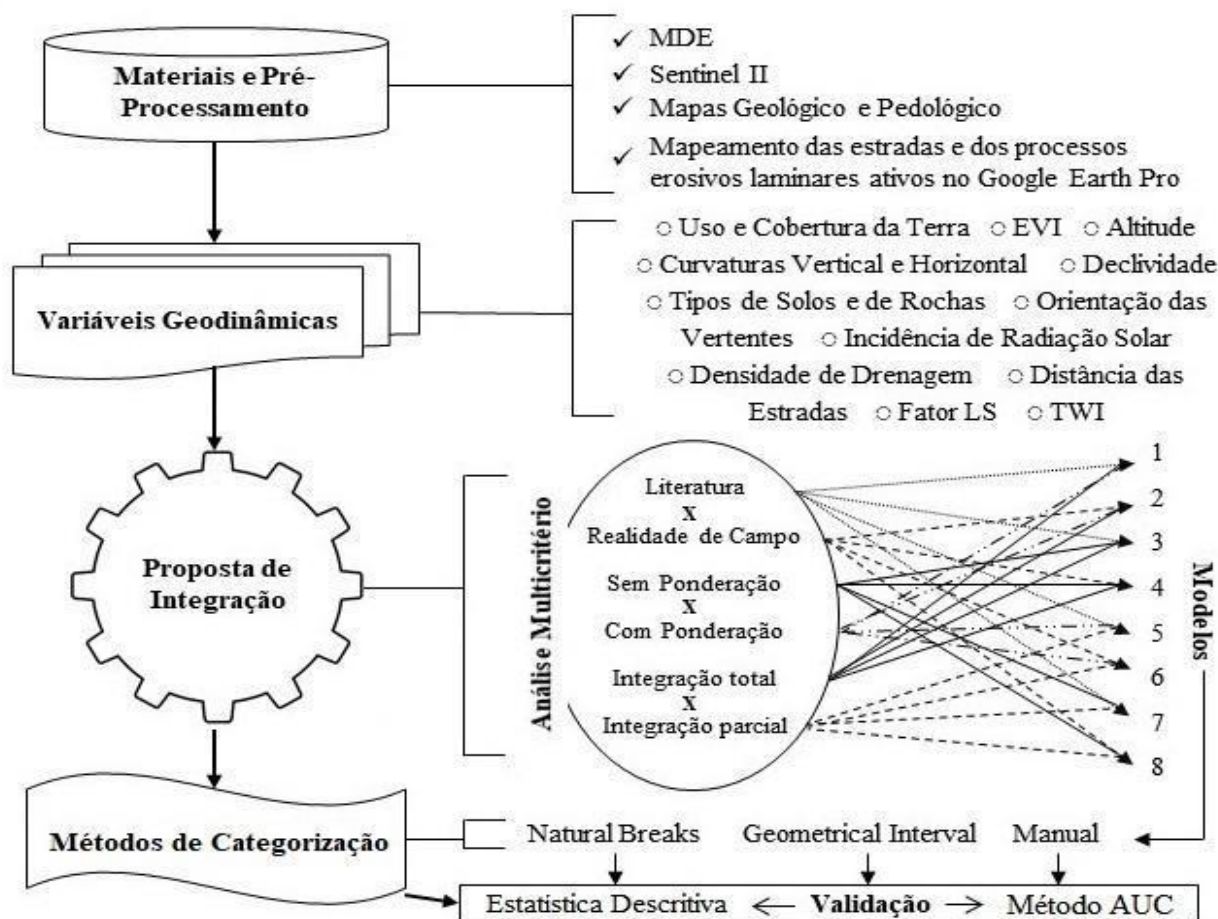


Figura 3. Fluxograma metodológico.

Avaliação dos Modelos de Risco

Na avaliação dos modelos foram estabelecidos três tipos de categorização das classes para testes, a primeira foi o Natural Breaks, algoritmo que realiza quebras naturais entre o agrupamento dos dados, maximizando as diferenças entre as classes. A segunda foi o algoritmo *Geometrical Interval*, o qual realiza as divisões das classes baseado nos intervalos que tem série geométrica. A terceira, e última categorização, foi por método manual, baseado na quantidade de área com processos erosivos. Ressalta-se que 91 ha das manchas de solo exposto mapeadas estão em menos de 1% da área da bacia hidrográfica e, portanto, propôs-se classificar os 40% da área com valores mais baixos do modelo de risco na classe muito baixo, 30% da área dos valores posteriores para a classe baixa, 15% para a classe média, 10% para a classe alta e, por fim, 5% das áreas com os

valores mais altos destinado a classe muito alta. A análise dos resultados da categorização dos modelos foi realizada por estatística descritiva, com o gráfico Box-Plot, comparando os três métodos.

O método de validação de desempenho dos modelos foi a curva *Receiver Operating Characteristic* (ROC) (Swets, 1996), expressa pela relação dos valores da *True Positive Rate* (TPR) e do *False Positive Rate* (FPR) para a probabilidade de ocorrência das erosões laminares nas classes de predição. A avaliação da curva ROC é simplificada com o cálculo da *area under the curve* (AUC), que representa a capacidade do modelo prever a ocorrência de eventos predefinidos (Naghibi et al. 2014). De acordo com a avaliação da precisão quantitativa e qualitativa do valor AUC, Yesilnacar (2005) pôde definir que a predição é: ruim entre 50 a

60%; regular entre 60 a 70%; boa entre 70 a 80%; muito boa entre 80 a 90%; excelente entre 90 a 100%. Adotou-se o gráfico Box-Plot para facilitar a avaliação dos modelos.

Resultados e discussão

Variáveis Geodinâmicas

A classificação da imagem MSI/Sentinel-II obteve qualidade muito boa (0,85) no coeficiente Kappa e na exatidão global (88%). A vegetação mais densa sobre a superfície e o manejo adequado influencia positivamente na proteção do ambiente contra os processos erosivos (Zakerinejad e Maeker, 2015; Touré et al., 2019; Guerra et al., 2020).

Nesse sentido, nota-se que na UCT da BHRB (Figura 4 A) os processos erosivos laminares foram constatados majoritariamente nas pastagens e nas manchas de solos expostos, enquanto na imagem EVI os processos erosivos foram encontrados nos valores menores, onde é destacado áreas com pouca ou nenhuma resposta vegetativa (Figura 4 B). Observou-se, a partir destas informações, que as áreas de solos expostos estão envolvidas por pastagem, a qual é utilizada na região para produção pecuária, que sugere uso intensivo e manejo irregular da pastagem. O patamar superior da BHRB apresentou menor susceptibilidade à erosão, isto devido à maior presença vegetal (áreas agrícolas e formação vegetal), já nas cotas altimétricas mais baixas, a presença marcante da pastagem condicionou o maior risco aos processos erosivos (Figura 4 C).

A proximidade com as estradas está relacionada a intervenção na dinâmica da vertente, ocasionando deslizamentos de terras, rachaduras e maior infiltração das águas, os quais em efeito promovem processos erosivos (Rahmati et al. 2017b; Jiao et al., 2019; Pasang & Kubíček, 2020). As áreas mais próximas das estradas (entre 0 a 100 metros e de 100 a 200 metros) foram as que mais se evidenciaram os processos erosivos, resultado que sugere a correlação positiva da ação antrópica (Figura 4 D). Apesar das estradas comumente serem ligadas aos processos erosivos lineares, entende-se que a relação vista na área de estudo está mais relacionada às estradas rurais, as quais auxiliam no manejo do gado na pastagem, aumentando a densidade de uso próximo às estradas, uma vez

que se mapeou somente os processos erosivos laminares.

As vertentes orientadas ao sul recebem menos irradiação solar e maior exposição aos ventos úmidos vindos do oceano Atlântico na área de estudo, localizada no hemisfério sul e, em contrapartida, as vertentes voltadas a Norte recebem maior irradiação solar, deixando a superfície mais seca e menos propensa a cobertura vegetal consistente (Arabameri et al., 2018; Francisco e Gruber, 2018; Mosavi et al., 2020).

A orientação voltada ao Norte e as áreas com maior incidência de radiação solar foram aspectos marcantes na presença dos processos erosivos laminares na BHRB (Figura 4 E e F), combinação que mostra a importância da manutenção da umidade para controle e proteção do solo a esse tipo de erosão. A importância da falta de umidade para ocorrência das erosões laminares também é vista na resposta da variável TWI, na qual se pode observar que as áreas com menores valores na BHRB (Figura 4 G), ou seja, áreas com menor concentração de umidade, apresentaram maior ocorrência às erosões laminares.

A declividade do terreno é uma importante variável para estudo de erosões e deslizamentos de terra, devido a força potencial gravitacional exercida sobre a matéria em superfície, quanto maior inclinação, maior é essa força e maior é a favorabilidade as erosões (Vijith & Dodge-Wan, 2019; Mosavi et al., 2020). No mesmo sentido, o fator LS é uma importante variável relacionada ao transporte de sedimentos, visto que controla a velocidade do movimento superficial da água (Gayen et al., 2019) e, quanto maior o comprimento-inclinação da vertente maior é a probabilidade a ocorrência de erosões. Já os diferentes tipos de curvaturas, tanto horizontais, quanto verticais, indicam as áreas preferenciais onde os fluxos de água vão convergir, influenciando a ocorrência de processos erosivos lineares, ou divergir. (Azareh et al. 2018; Gayen et al. 2019). No entanto, apesar das características geomórficas demonstrar grande importância nas ocorrências as erosões, notou-se que a declividade, fator LS e curvaturas não demonstraram características preferenciais de maneira significativa para o fenômeno de erosões laminares na BHRB, o que indica que as manchas de solos exposto pode ocorrer em qualquer lugar na área de estudo

quando considerado somente esses aspectos geomórficos (Figura 4 H, I, J e K).

Valores altos de densidade de drenagem apontam locais na paisagem com menor infiltração e, com efeito, maior escoamento superficial e fluxo de superfície mais distribuído espacialmente, características nas quais favorecem as erosões (Tehrany et al., 2014; Conoscenti et al., 2018). As áreas com valores menores de densidade de drenagem foram as que mais registraram processos erosivos (Figura 4 L), as quais se referem às áreas com maior infiltração e maior espaçamento das drenagens, indicando que a erosão laminar na BHRB não ocorre em áreas com grande mobilização de partículas sólidas, como em feições de fluxo d'água concentrado.

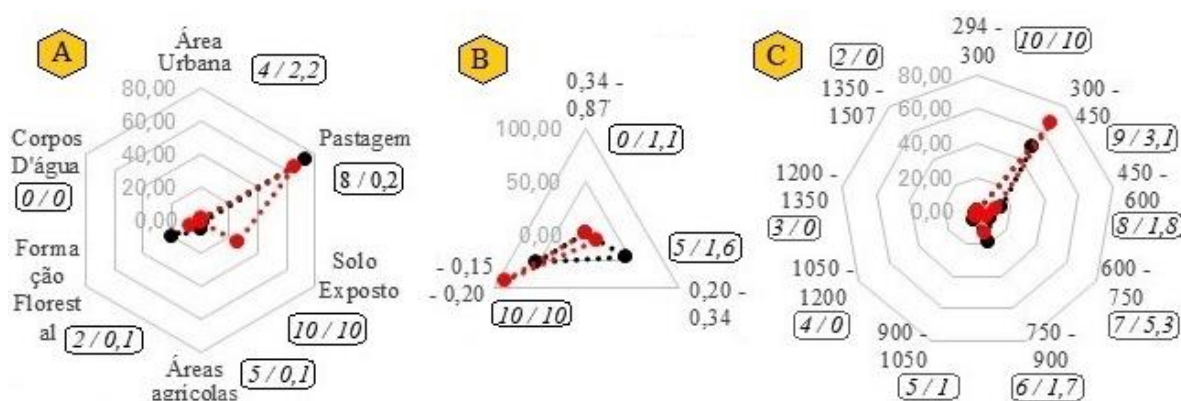
Assim como em outras investigações (Domazetović et al., 2019; Mosavi et al., 2020), a pequena escala do mapa de solos utilizado, muito generalizada, provavelmente foi um dos motivos que não tornou essa variável geodinâmica importante na identificação das erosões (Figura 4 M). Os tipos de solos com maior ocorrência a erosão foram, proporcionalmente, o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) e o Latossolo Vermelho-Amarelo com textura argilosa (LVAd2) e, em contrapartida, o Cambissolo Húmico distrófico (CHd) e o Latossolo Vermelho-Amarelo textura muito argilosa (LVAd1), foram os tipos de solos que menos concentraram processos erosivos. Nota-se que não necessariamente os tipos de solos com maior fertilidade natural, eutróficos, foram decisivos para a proteção do ambiente contra a erosão, nem a maior presença percentual da fração argila, cuja característica tende a maior proteção

dos solos (Mosavi et al., 2020), foi decisiva para a maior proteção.

Os latossolos, mesmo com características próximas, apresentaram importância desigual na presença das erosões, provavelmente devido a maior proteção da cobertura vegetal ($LVAd2 > LVAd1$). O CHd, o qual contém características favoráveis à erosão (distrófico e relevo com alta inclinação), constatou consideráveis fragmentos de mata nativa, que provavelmente foram importantes para a proteção contra os processos erosivos (Figura 3).

Diferentemente dos tipos de solos, os tipos de rochas foram importantes (Figura 4 N), sendo que na feição Anfibolito hornblenda-biotita (Ahb) foi identificado mais processos erosivos. Essa rocha é derivada de médio a alto grau de metamorfismo e é considerada um litotipo de média a alta resistência quando comparado com os depósitos aluviais e coluviais (Crepani et al. 2001; Nekhay et al., 2009). O Ahb também foi superior na presença de processos erosivos laminares do que Ortognaisse enderbítico (Oe), porém são rochas que possuem pouca diferença, tanto em gênese, quanto em composição mineralógica e, portanto, indica influência de outras variáveis e é necessário estudos locais são importantes para determinar a diferença entre esses tipos de rocha e a suas respectivas fragilidades aos processos erosivos.

Os resultados demonstram que as variáveis geodinâmicas mais importantes foram a altitude, a incidência de radiação solar, os tipos de rochas, a orientação das vertentes, a densidade de drenagem, o uso e cobertura do solo, o EVI e o TWI, os quais participaram da integração parcial dos modelos preditivos 5 à 8 (Figura 3).



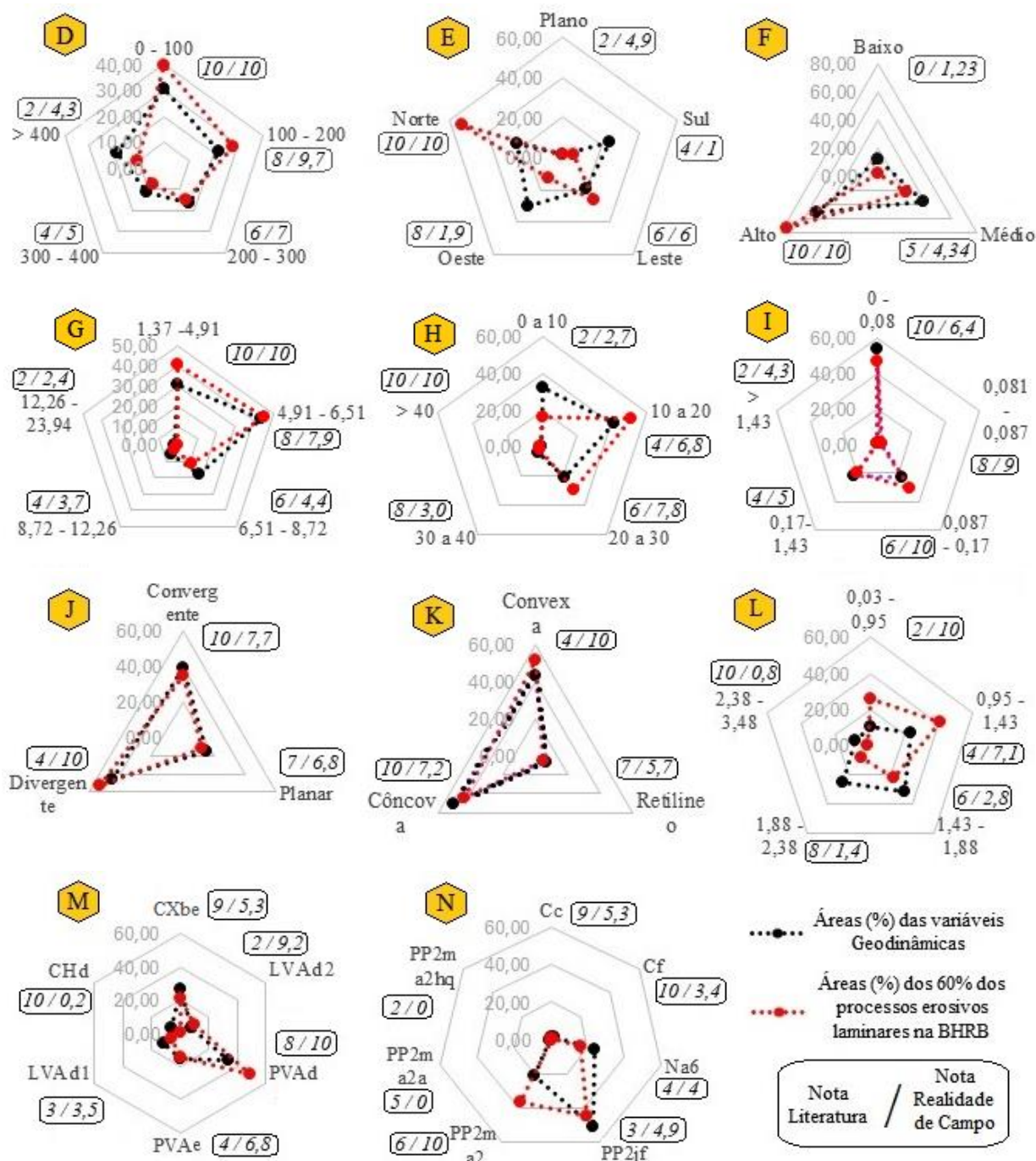


Figura 4. Gráficos Radares representando o tamanho das classes das variáveis ambientais e antrópicas e aos 60% dos processos erosivos em cada classe. A – Uso e Cobertura da Terra; B – EVI; C – Altitude (m); D – Distância as Estradas (m); E – Orientação das Vertentes; F – Incidência de Radiação Solar; G – TWI; H – Declividade (graus); I – Fator LS; J – Curvatura Horizontal; K – Curvatura Vertical; L – Densidade de Drenagem; M – Tipos de Solos; N – Tipos de Rochas.

Avaliação dos Modelos

A ponderação entre as áreas das classes de risco e a área dos processos erosivos utilizados (valores adimensional) para validação demonstrou que o método *Natural Breaks* (NB) apresentou a melhor distinção entre as classes

muito baixo à muito alta, porém com média 4,81 inferior ao ser comparado ao método *Geometrical Interval* (GI, 6,86) e *Manual* (M, 6,83) (Figura 5). Os modelos categorizados pelos métodos M apresentam maior homogeneidade na classe muito alto em relação

aos demais (Figura 5). Esse resultado mostra que caso se opte por elaborar somente um modelo de risco para análise da susceptibilidade à erosão laminar na BHRB, é aconselhável utilizar o método *M*, visto que se obteve maior homogeneidade e um valor médio mais alto

dentre os métodos de categorização. Nesse sentido, a premissa de que a categorização manual baseada na observação da área total ocupada pelos processos erosivos atuais pode auxiliar na categorização e predição dos eventos foi aceita.

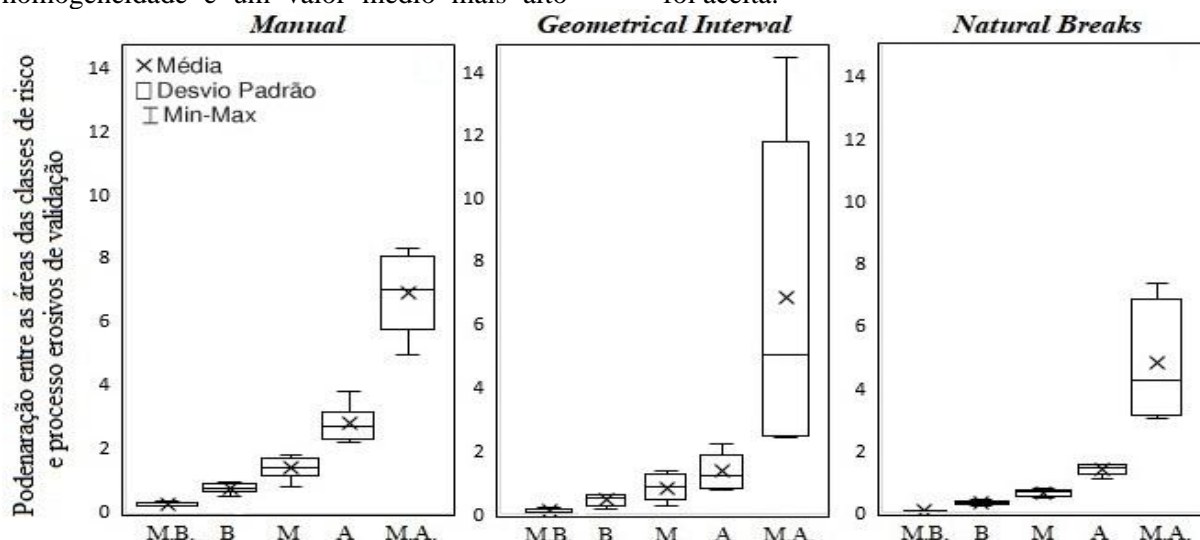


Figura 5. Gráficos *Box-Plot* referente às classes de riscos em relação aos processos erosivos, a partir das diferentes categorizações.

Na avaliação dos critérios de integração das variáveis, verifica-se que os modelos de risco fundamentados na realidade de campo apresentaram eficiência AUC significativamente superiores (média 72,41%) aos modelos baseados na literatura (média 65,31%), sendo que os valores encontrados para o primeiro critério é considerado de eficiência boa e para o segundo critério considerado de eficiência moderada (Yesilnacar, 2005), respectivamente (Figura 6. A).

Em relação aos resultados de comparação entre a integração de todas as variáveis e da integração das variáveis mais importantes (Figura 6. B), notou-se que em ambos os conjuntos os modelos apresentaram médias parecidas na eficiência AUC (68,34% e 69,38%, respectivamente). Por outro lado, os modelos derivados da integração das variáveis geodinâmicas mais importantes, integração parcial, obtiveram menor valor de desvio padrão. Já a última comparação de critérios, a integração das variáveis sem e com ponderação (Figura 6. C), não houve considerável diferença estatística (médias 68,68% e 69,04%, desvio padrão 3,49% e 4,55%, respectivamente).

Pesquisas recentes que discutem a susceptibilidade a erosão, utilizando análise multicritério, mostram que existem variáveis geodinâmicas mais importantes para predição a erosão do que outras e, se diferenciam em detrimento da localização da área de estudo, por exemplo: Rahmati et al. (2016), no Irã, observou que a distância do rio, a densidade da drenagem e o uso da terra foram os principais fatores para predição da erosão; Gómez-Gutiérrez et al. (2015), na Espanha e na Itália, constatou que o TWI e a curvatura do terreno foram as informações mais pertinentes para a predição da erosão; no Brasil, Capoane (2019) observou que a proximidade dos rios e curvaturas côncavas e convergentes são condicionam maior risco à erosão. Na presente pesquisa, os processos erosivos da BHRB estão associados a baixas altitudes, baixos valores de densidade de drenagem, orientação das vertentes voltada à Norte, incidência radiação solar alta, fraca cobertura da vegetação e a valores baixos de TWI. A seguinte tendência reafirma, assim como no presente estudo, que o critério baseado em calibração e o uso de muitas variáveis geodinâmicas é um avanço para se entender o

fenômeno de processos erosivos, visto que as paisagens geográficas se diferenciam em configuração e dinâmica ambiental e antrópica.

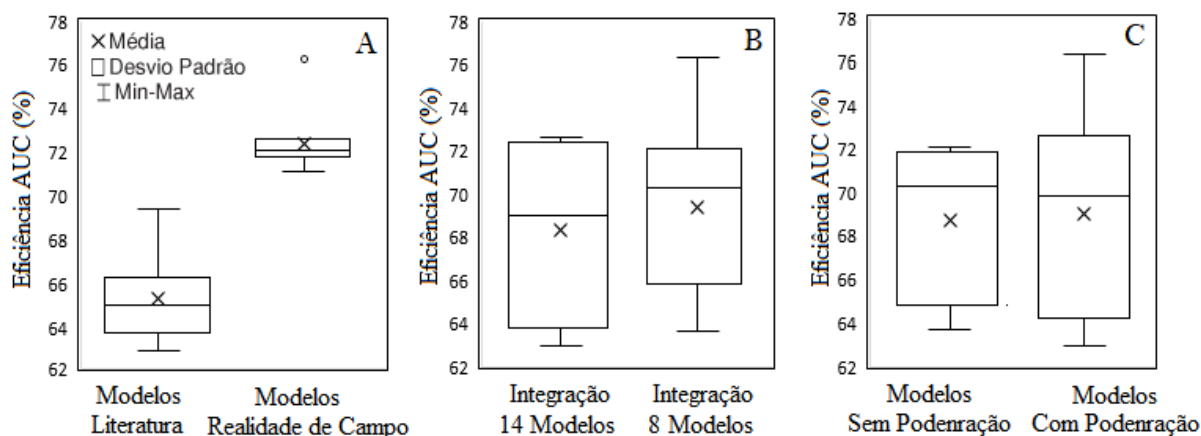


Figura 6. Gráficos de *Box-Plot* comparando os modelos por critérios.

O modelo 8, fundamentado na realidade de campo, integrado pelos oito modelos mais importantes de predição aos processos erosivos laminares e pela média aritmética ponderada, atingiu 76,3% de eficiência (sob categorização manual). Além de possuir a maior eficiência, o modelo 8 se adequa a realidade da BHRB, uma vez que a região nordeste, a qual é a região mais alta e mais protegida por cobertura vegetal, apresentou majoritariamente área com riscos baixo e muito baixo, enquanto as áreas com riscos alto e muito alto são representadas de forma esparsa e, principalmente, no patamar inferior da área de estudo (Figura 7).

Alguns locais foram destacados no referido modelo e, pode-se observar, que as representações B, C e G mostram boa adequação dos processos erosivos laminares com os riscos

mais altos, ocorrendo em áreas de pastagem, em encostas voltadas à norte e próximas às estradas, por exemplo. As incertezas no referido modelo podem ser vistas nas demais representações, com sobreposição razoável dos processos erosivos em A, D e F, e baixa correlação com as classes de alto risco em E. Particularmente, algumas situações são ressaltadas: em B, área em perímetro urbano, o modelo conseguiu identificar adequadamente o processo erosivo laminar; em E, o processo erosivo não possui compatibilidade com os riscos alto e muito alto; em F, o processo erosivo se localizou próximo da área de maior risco à sul da figura, mas contemplou riscos menores, o que indica que o mapeamento da erosão ocorreu em área de pouso.

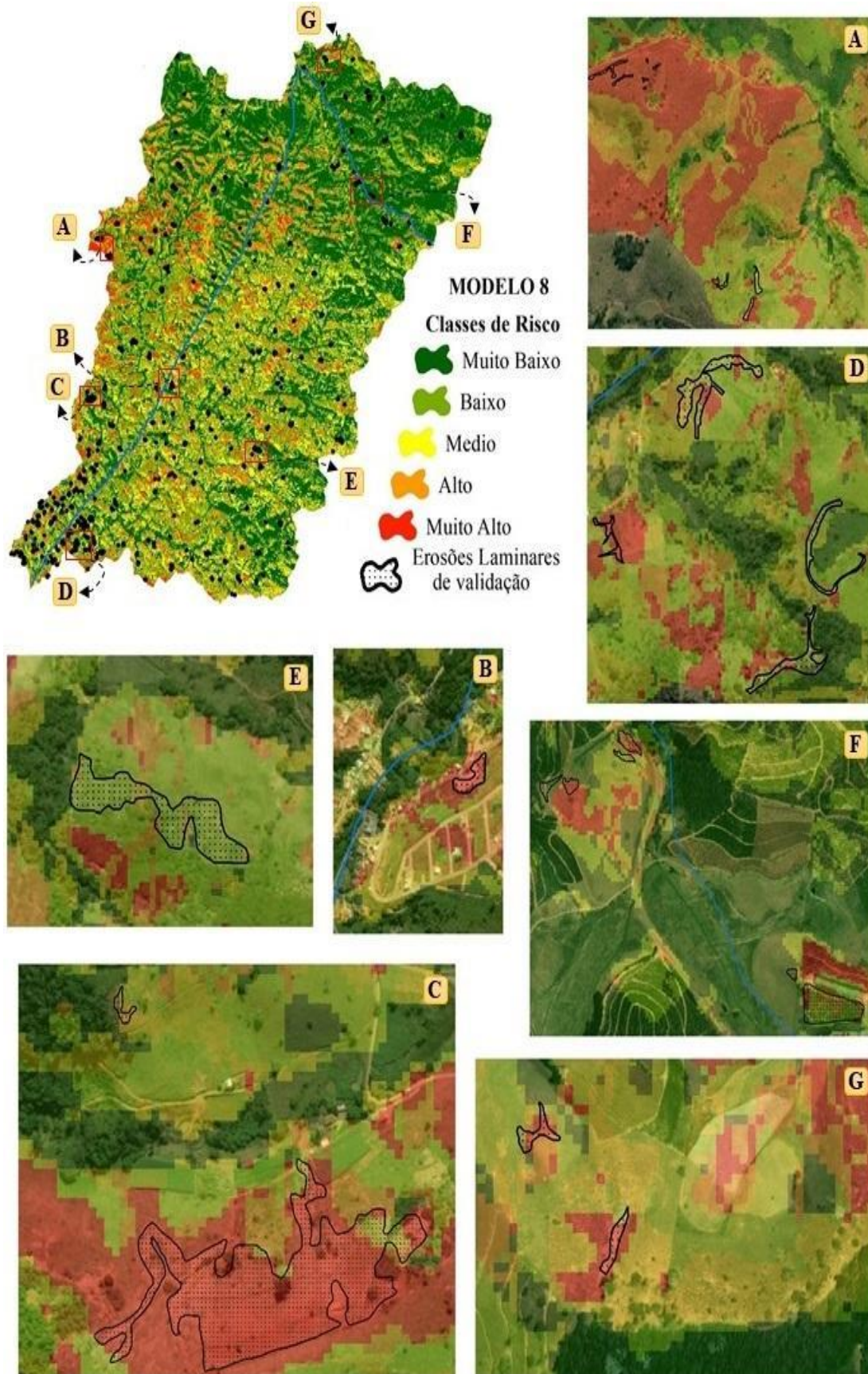


Figura 7. Modelo de risco 8 com sete representações de áreas com processos erosivos e o risco de erosão laminar.

Conclusões

1 - A BHRB apresentou alta suscetibilidade à erosão laminar nas áreas com baixa presença e concentração de umidade, devido à alta incidência de radiação solar e frágil cobertura vegetal, que revela a importância da presença da água no sistema para a conservação dos solos na área de estudo. Além disso, observou-se que o uso da pastagem de forma irregular tem degradado e oportunizado as manchas de solos expostos.

2 - O melhor modelo de suscetibilidade a erosão laminar para a BHRB foi fundamentado na realidade de campo, integração parcial com as variáveis geodinâmicas mais importantes, com ponderação e categorizado pelo método manual, o qual obteve eficiência AUC considerada boa.

3 - A fundamentação na realidade de campo para atribuição das notas para as classes das variáveis geodinâmicas obteve melhor desempenho para os modelos de risco do que as notas por literatura para a área de estudo. Em contrapartida, ao comparar o critério de integração total/parcial e com/sem ponderação das variáveis, não foi observado eficiência significativamente superior entre os modelos.

4 - O método *manual* apresentou maior homogeneidade nos resultados de forma geral e melhor eficiência preditiva entre os métodos categóricos. No entanto, necessita-se de mais estudos sobre a diferenciação dos métodos de categorização dos riscos, pois diferentes métodos influenciam consideravelmente a eficiência dos modelos de predição.

Agradecimentos

Agradecemos ao grupo de pesquisa “Paisagens continentais e costeiras” pela colaboração intelectual, ao Laboratório de Geomorfologia do Quaternário-DGE/UFV pela infraestrutura, a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela assistência financeira.

Referências Bibliográficas

Arabameri, A., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Rezaei, K., & Kerle, N., 2018. Spatial modelling of gully erosion using GIS and R programming: A comparison among three data mining algorithms. *Applied sciences*, 8(8), 1369.

Arabameri, A.; Chen, W.; Loche, M.; Zhao, X.; Li, Y.; Lombardo, L.; Bui, D. T., 2019. Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. *Geoscience Frontiers*, v. 11, 5. p. 1609-1620.

Azareh, A.; Rahmati, O.; Rafiei-Sardooi, E.; Sankey, J. B.; Lee, S.; Shahabi, H.; Ahmad, B. B., 2018. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of The Total Environment*. Volume 655, p. 684-696.

Bosino, A., Giordani, P., Quénéhervé, G., & Maerker, M., 2020. Assessment of calanchi and rill-interrill erosion susceptibilities using terrain analysis and geostochastics: A case study in the Oltrepo Pavese, Northern Apennines, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(12), 3025-3041.

Caldas, V. I. S. P., da Silva, A. S., & dos Santos, J. P. C., 2019. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica lagos-São João, no Estado do Rio de Janeiro-Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(04), 1415-1430.

Cama, M., Schillaci, C., Kropáček, J., Hochschild, V., Bosino, A., & Märker, M., 2020. A probabilistic assessment of soil erosion susceptibility in a head catchment of the Jemma Basin, Ethiopian Highlands. *Geosciences*, 10(7), 248.

Capoane, V., 2019. Suscetibilidade a erosão na bacia hidrográfica do córrego Guariroba, Campo Grande, Mato Grosso do Sul. *Acta Brasiliensis*, 3(2), 49-55.

Cavalcanti, B. S.; Marques, G. R. G., 2016. Recursos hídricos e gestão de conflitos: A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. *Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa*, 15(1), 04-16.

Choubin, B.; Rahmati, O.; Tahmasebipour, N.; Feizizadeh, B.; Pourghasemi, H. R. 2019. Application of fuzzy analytical network process model for analyzing the gully erosion susceptibility. In *Natural hazards gis-based spatial modeling using data mining techniques* (pp. 105-125). Springer, Cham.

Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N. A., & Rotigliano, E.,

1720

2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land degradation & development*, 29(3), 724-736.
- Crepani, E.; Medeiros, J. D.; Hernandez Filho, P.; Florenzano, T. G.; Duarte, V.; Barbosa, C. C. F., 2001 Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial, 1 ed. INPE, São José dos Campos.
- Da Silva, Í. B., & Mendes, L. M. S., 2019. Mapeamento De Áreas Susceptíveis À Erosão Laminar No Alto Curso Do Rio Banabuiú-CE. *Revista Georaguaiá*, 9(2).
- Domazetović, F., Šiljeg, A., Lončar, N., & Marić, I. (2019). Development of automated multicriteria GIS analysis of gully erosion susceptibility. *Applied Geography*, 112, 102083.
- Francisco, C. N.; Gruber, N. C., 2018. Índices de vegetação obtidos de imagens multiespectrais aplicados na discriminação da cobertura vegetal em relevo montanhoso. *Geo uerj*, (32), 16931.
- Gao, Y. Xie, G. Liu, B. Liu, X., 2015. Duan Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles *Soil Tillage Res.*, 145, pp. 126-134.
- Garosi, Y., M. Shekhabadi, H.R. Pourghasemi, A.A. Besalatpour, C. Conoscenti, and K. Van Oost., 2018. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*. 330: 65–78.
- Gayen, A.; Pourghasemi, H. R.; Saha, S., Keesstra, S.; Bai, S., 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of the total environment*, 668, 124-138.
- Gómez-Gutiérrez, Á.; Conoscenti, C.; Angileri, S. E.; Rotigliano, E.; Schnabel, S., 2015. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. *Natural Hazards*, Berlim. V.79, n.1, p. 291-314.
- Gradim, D. T.; Noce, C. M.; Novo, T. A.; Queiroga, G. N.; Soares, A. C. P.; Oliveira, M. A. S. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2014. *Geologia e recursos minerais da folha Viçosa: estado de Minas Gerais*.
- Disponível:
<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17798?show=full>.
- Guerra, C. A., Rosa, I. M., Valentini, E., Wolf, F., Filipponi, F., Karger, D. N., ... & Eisenhauer, N., 2020. Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landscape Ecology*, v. 35, p 823-842.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., ... & Li, R. (2019). Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a World Heritage site in Southwest China. *Catena*, 183, 104221.
- Keesstra, S., Mol, G., De Leeuw, J., Okx, J., De Cleen, M., & Visser, S., 2018. Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*, 7(4), 133.
- Koppen, W. D., 1936. *Das geographische system der klimat. Handbuch der klimatologie*, 46.
- Mafra, R. C.; Pinheiro, M. M. F.; Cicerelli, R. E.; Prado, L., 2020. Validação de mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v.13, n. 02, p. 564-575.
- Martins, F. B., Gonzaga, G., dos Santos, D. F., & Reboita, M. S., 2018. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1. Disponível: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/60896>
- Mosavi, A., Sajedi-Hosseini, F., Choubin, B., Taramideh, F., Rahi, G., & Dineva, A. A., 2020. Susceptibility mapping of soil water erosion using machine learning models. *Water*, 12(7), 1995.
- Naghbi, S. A.; Pourghasemi, H. R.; Pourtaghi, Z. S., 2015. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Sci Inform*, Berlim, v. 8, p. 171–186.

- Nekhay O.; Arriaza M.; Boerboom L. 2009 Evaluation of soil erosion risk using Analytic Network Process and GIS: a case study from Spanish mountain olive plantations. *J Environ Manage* 90:3091–3104.
- Neto, R. M.; Ferraro, B. V. 2018. Cartografia geomorfológica regional e morfogênese: contribuições metodológicas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(2).
- Noce, C. M.; Romano, A. W.; Pinheiro, C. M.; Mol, V. S.; Pedrosa-Soares, A. C., Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2003. Geologia das folhas Ubá e Muriaé. Projeto Sul de Minas–Etapa I: Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro, Belo Horizonte, COMIG/UFMG/UFRJ/UERJ, cap, 12, 623-659. Acesso: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#col-form-download-tab>
- Pasang, S., & Kubiček, P., 2020. Landslide Susceptibility Mapping Using Statistical Methods along the Asian Highway, Bhutan. *Geosciences*, 10(11), 430.
- Projeto MapBiomias, [v.5]. 2020. Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil: [<https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>] acessado em Agosto de 2020.
- Rahmati, O.; Pourghasemi H.R.; Melesse A., 2016. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, Amsterdã, v. 137, p.360–372.
- Rahmati, O.; Tahmasebipour, N.; Haghizadeh, A.; Pourghasemi, H. R.; Feizizadeh, B., 2017a. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, v. 298, p.118-137.
- Rahmati, O.; Tahmasebipour, N.; Haghizadeh, A.; Pourghasemi, H. R.; Feizizadeh, B., 2017b. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment*, 579, p.913-927.
- Resende, M.; Ker, J. C.; Bahia Filho, A. F. C., 1996. Desenvolvimento sustentado do cerrado. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado, Viçosa (Brasil), Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 169-199.
- Scholes, R.; Montanarella, L.; Brainich, A.; Barger, N.; Brink, B.; Cantele, M.; Erasmus, B.; Fisher, J.; Gardner, T.; Holland, T.G., 2018. Summary for Policymakers of the Thematic assessment Report on Land Degradation and Restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services; IPBES Secretariat: Bonn, Germany, p. 1–31.
- Swets, J. A., 1996. Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: Collected papers. Psychology Press. ISBN 9781138981911.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., Jebur, M. N. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (dt) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in gis. *J. Hydrol.* 2014, 504, 69–79
- Touré, A. A., Tidjani, A. D., Rajot, J. L., Marticorena, B., Bergametti, G., Bouet, C., ... & Garba, Z., 2019. Dynamics of wind erosion and impact of vegetation cover and land use in the Sahel: A case study on sandy dunes in southeastern Niger. *Catena*, 177, 272-285.
- United Nations (2015). Sustainable Development Goals: 17 Goals to transform our world. Available from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>, acessado em 11/2020.
- Valverde, O., 1958. Estudo regional da zona da mata de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia*, 20(1), 1-82.
- Vijith, H., & Dodge-Wan, D., 2019. Modelling terrain erosion susceptibility of logged and regenerated forested region in northern Borneo through the Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS techniques. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 8.
- Voogd, J. H., 1982. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. Delftsche Uitgevers Maatschappij.
- Yesilnacar, E. K., 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey. Ph.D Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne, p 423.

Zakerinejad, R.; Maerker, M., 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully

erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. Nat Hazards, Berlin, v.79, p. 25–50.