

## ANÁLISE HIERÁRQUICA APLICADA À EROÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SERGIPE (SE)

### HIERARCHICAL ANALYSIS APPLIED TO SOIL EROSION IN THE SERGIPE RIVER HYDROGRAPHIC BASIN (SE)

José Alves Bezerra Neto<sup>a</sup>, Paulo Sérgio de Rezende Nascimento<sup>a</sup>, Glauber Vinícius Pinto de Barros<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal de Sergipe - UFS

[josebezerra.eng@gmail.com](mailto:josebezerra.eng@gmail.com), [psrn.geologia@gmail.com](mailto:psrn.geologia@gmail.com), [glauber.barros@hotmail.com](mailto:glauber.barros@hotmail.com)

Submissão: 16 de maio de 2022

Aceitação: 17 de agosto de 2022

#### Resumo

A erosão dos solos é um processo geológico-geomorfológico natural, porém a deflagração e a intensificação decorrente da ação antrópica, como o desmatamento, acentua e acelera a perda da quantidade e fertilidade do solo, agravando o assoreamento dos corpos hídricos. As geotecnologias, como o sensoriamento remoto e o geoprocessamento, minimizam o tempo e os custos para a análise espacial da vulnerabilidade à erosão do solo. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi aplicar a análise multicriterial e a álgebra de mapa para espacializar e hierarquizar as áreas suscetíveis e vulneráveis à erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (SE). O principal procedimento técnico foi o Processo Analítico Hierárquico (AHP), considerando cinco fatores: erodibilidade do solo, declividade, hipsometria, erosividade da chuva e uso e cobertura do solo. Os resultados obtidos mostraram que a área de estudo apresenta, predominantemente, baixa a média suscetibilidade à erosão, correspondendo a 40 e 35% da extensão total da bacia. Já a vulnerabilidade se mostrou mais agravante, com maior expressividade da classe de alta vulnerabilidade erosiva, ocupando uma área de aproximadamente 58,2% na região central da bacia hidrográfica. Esse resultado é decorrente da conversão da vegetação natural em atividades agropecuárias e retratou a acentuada e adversa interferência humana quanto os processos erosivos na área de estudo. Como medidas de controle e gestão do solo e dos recursos hídricos, recomenda-se um programa conservacionista associado à recuperação de remanescentes florestais de forma a minimizar os impactos ambientais negativos dos processos erosivos e proteger a qualidade da água de corpos hídricos dessa bacia.

**Palavras-chave:** Erosão hídrica; gestão do solo-água, processo analítico hierárquico.

#### Abstract

Soil erosion is a natural geological-geomorphological process, but the deflagration and intensification resulting from anthropic action, such as deforestation, accentuates and accelerates the loss of soil quantity and fertility, aggravating the siltation of water bodies. Geotechnologies such as remote sensing and geoprocessing minimize time and costs for spatial analysis of vulnerability to soil erosion. Thus, the aim of this study was to apply multicriterial analysis and map algebra to spatialize and rank the areas susceptible and vulnerable to water erosion in the Sergipe River Watershed (SE). The main technical procedure was the Analytical Hierarchical Process (AHP), considering five factors: soil erodibility, slope, hypsometry, rain erosivity and land use and cover. The results obtained showed that the study area has predominantly low to medium susceptibility to erosion, corresponding to 40 and 35% of the total extension of the basin. Vulnerability, on the other hand, proved to be more aggravating, with greater expressiveness of the high erosive vulnerability class, occupying an area of approximately 58.2% in the central region of the hydrographic basin. This result is due to the conversion of natural vegetation into agricultural activities and portrayed the accentuated and adverse human interference with erosion processes in the study area. As measures for the control and management of soil and water resources, it would recommend a conservation program associated with the recovery of forest remnants in order to minimize the negative environmental impacts of erosion processes and protect the water quality of water bodies in this basin.

**Keywords:** Water erosion; soil-water management, hierarchical analytical process.

## INTRODUÇÃO

A erosão é o processo no qual ocorre a desagregação, o arraste e a sedimentação das partículas que constituem o solo. Os processos erosivos são condicionados pelo tipo de rocha/solo, precipitação, declividade, altimetria e estrutura estratificada da vegetação. No Brasil, a erosão hídrica é o principal processo de deterioração da estrutura da rocha e do solo (AVANZI *et al.*, 2013; CÂNDIDO *et al.*, 2014), em decorrência do clima tropical com precipitação abundante e sazonal durante o ano. É um dos principais processos responsáveis pela degradação do solo (ELLISON, 1947; MEDEIROS *et al.*, 2021), tanto na perda do horizonte fértil (erosão laminar) como na perda dos horizontes subjacentes (erosão linear).

Conseqüentemente, a erosão provoca uma redução significativa da produtividade agropecuária e da capacidade de armazenar carbono, nutrientes e água, empobrecendo o solo e degradando e/ou inviabilizando o agroecossistema (BRADY, 1989; HERNANI; SILVA, 1999; TRINDAE-SANTOS; CASTRO, 2021). A erosão transporta e acumula sedimentos e agrotóxicos nos rios, lagos e reservatórios, causando o assoreamento e a contaminação desses corpos d'água, ocasionando a perda da biodiversidade e a vida útil. Dessa forma, os impactos ambientais da erosão do solo ocasionam impactos socioeconômicos deletérios, que exercem pressão sobre o meio ambiente (FRANÇA *et al.*, 2020; LISBOA; BARROS; NASCIMENTO, 2020; SANTOS; NASCIMENTO, 2020), com destaque ao processo de assoreamento numa bacia hidrográfica.

De acordo com *International Strategy for Disaster Reduction - ISDR* (2004), a susceptibilidade e a vulnerabilidade aos desastres naturais representam a predisponência intrínseca e a aceleração decorrente da apropriação da superfície terrestre pelo homem, respectivamente. Esta definição pode ser estendida para a erosão do solo, em Serafim e Bonetti (2017) A vulnerabilidade à erosão e inundação costeira foi obtida pela integração da suscetibilidade, composta por variáveis do meio físico e capacidade adaptativa, representada pelas variáveis socioeconômicas. Silva *et al.* (2021) relacionam a suscetibilidade à erosão aos fatores

naturais e a vulnerabilidade à erosão, ao uso e ocupação do solo, como empregado nesse artigo.

Nesta seara, a susceptibilidade à erosão e ao assoreamento ocorrem em intensidades distintas, condicionadas por características específicas à bacia hidrográfica, como os tipos de rochas, solos, relevos e vegetação (QUEIROZ *et al.*, 2021; SCHWARZ, 1997) e a distribuição, quantidade e intensidade da chuva (MEDEIROS *et al.*, 2021). Por sua vez, a vulnerabilidade erosiva está relacionada com os riscos gerados à sociedade pela intensificação dos processos geológico-pedológico-geomorfológicos pela interação adversa do homem com o meio (LIMA *et al.*, 2021; SMITH, 2004).

Uma das maneiras eficientes para a mitigar os impactos erosivos é a seleção de áreas prioritárias para a conservação da vegetação nativa e recuperação do solo erodido, definindo a potencialidade à erosão hídrica e as restrições do uso e ocupação do solo (GUIMARÃES; SANTOS, 2007; SANTOS; NASCIMENTO, 2019). Dessa forma, conhecer as características intrínsecas do meio físico é fundamental para subsidiar estudos ambientais e procedimentos técnicos de minimização da degradação ambiental ocasionada pelos processos erosivos. Alguns modelos de simulação da erosão dos solos, sem a necessidade de um grande volume de dados primários quantitativos, surgiram para atender demandas de gerenciamento e tomada de decisão têm ganhado campo nas ciências ambientais por sua praticidade e proximidade de resultados dos modelos matemáticos (RUSSO; CAMANHO, 2015; CALDAS *et al.*, 2019). Diversos autores destacam a relevância da utilização do método *Analytic Hierachy Process* (AHP) como suporte à tomada de decisão, com múltiplos critérios com variáveis hierárquicas de solução, em bacias hidrográficas.

As ferramentas de geoprocessamento favorecem a tomada de decisões, pois delimitam de forma precisa a localização de áreas com suscetibilidade e vulnerabilidade erosiva. Toniolo *et al.* (2021) e Queiroz *et al.* (2021) destacam a importância dessas ferramentas quando a abrangência se dá ao nível de bacias hidrográficas. Quando associados às ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possuem um grande potencial de aplicabilidade na análise e identificação de áreas de suscetibilidade

e vulnerabilidade à erosão. Dessa forma, é importante destacar que, uma das principais funcionalidades dos SIG é a integração de dados em diversos formatos e escalas (CÂMARA; CARVALHO, 2004). Os SIG estão cada vez mais robustos na análise espacial e multicriterial (MERCHANT; NARUMALANI, 2009; LIBÓRIO *et al.*, 2020), fornecendo ferramentas para a generalização cartográfica que permite alterar o nível de percepção do dado geográfico e compatibilizar a representação cartográfica com a escala (AMARO *et al.*, 2021; NASCIMENTO, 2015).

Sabendo da função da cobertura vegetal para a proteção do solo e controle da erosão, uma das premissas desse trabalho é que o desmatamento para a implantação da agricultura extensiva, pecuária intensiva e expansão urbana, é o principal desencadeador e intensificador da erosão acelerada ou antrópica da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (BHRS). A bacia é a mais intensamente ocupada e urbanizada no Estado de Sergipe (FIGUEIREDO; MAROTI, 2011). Outra premissa está relacionada com os fatores predisponentes para determinar a suscetibilidade à erosão: intensidade da chuva, densidade de drenagem, amplitude altimétrica e declividade. Há variados trabalhos que empregaram similarmente esses fatores, os mais recentes podem ser destacados: Martins; Bergmann e Schmidt (2021); Franco *et al.* (2021); Santos; Nascimento (2021); Soares; Martins (2021); Santos, Nascimento e Barros, (2020); Souza *et al.* (2020); Carvalho *et al.* (2019).

Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo foi aplicar a análise multicritério empregando o método AHP para delimitar as áreas de suscetibilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (SE), visando obter um diagnóstico capaz de auxiliar futuras políticas públicas e tomadas de decisões com foco na gestão ambiental adequada da bacia. Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos: (i) elaborar o Banco de Dados Georreferenciados para aplicação do método AHP a partir da confecção dos mapas temáticos de erodibilidade, declividade, hipsometria, precipitação e uso e cobertura do solo; (ii) confeccionar os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade erosiva através da álgebra de mapas; e por fim, (iii) avaliar as potencialidades e fragilidades ambientais da bacia através das características do meio biofísico e antrópico.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

A área de estudo deste trabalho é a Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (BHRS), que se estende por uma região de 3.673 Km<sup>2</sup>, representando 16,7% do território sergipano (Figura 1). A BHRS, em decorrência da importância socioeconômica e ambiental para o Estado de Sergipe, foi escolhida como a unidade geoambiental de estudo. É importante ressaltar que na área de estudo estão inseridos 26 municípios, constituindo uma região mais populosa e de maior destaque econômico estadual, como por exemplo, a capital Aracaju, São Cristóvão, Nossa Senhora do Socorro e Itabaiana.

O rio Sergipe possui uma extensão de aproximadamente 210 Km, desde a sua nascente no município de Nossa Senhora da Glória até desaguar no Oceano Atlântico no município de Aracaju. Os principais afluentes pela margem esquerda são os Rios Pomonga, Parnamirim, Ganhamoroba e Cágado; e pela margem direita, os Rios Poxim, Sal, Contiguiba, Jacarecica, Morcego, Jacoca, Campanha, Lajes e Melancia. Os rios Poxim e Jacarecica são os principais responsáveis pelo abastecimento da população urbana e rural dos municípios de Aracaju e Riachuelo, respectivamente (SERGIPE, 2013).

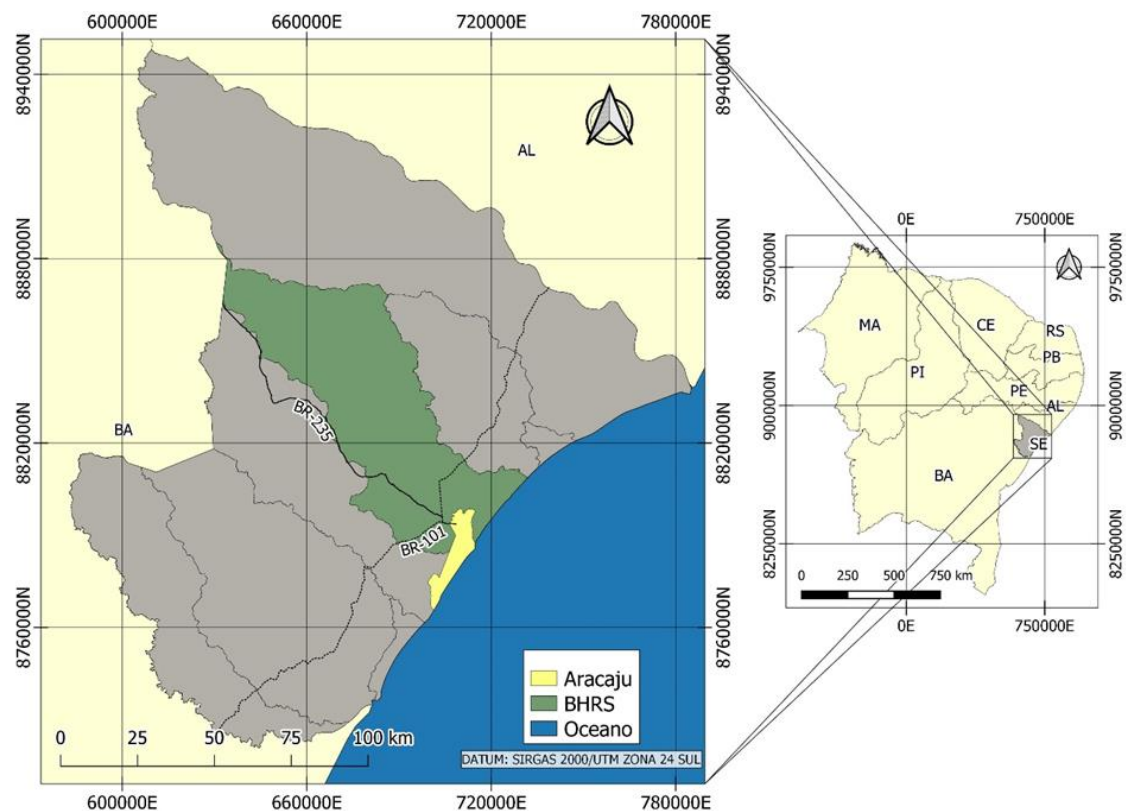
### Material

Os materiais utilizados para a realização desse estudo foram:

- i) Dados temáticos digitais do Atlas Digital da Secretária de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH, 2021);
- ii) Dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) - Modelo Digital de Elevação (MDE) - do Projeto Topodata, com resolução espacial de 30 metros (1 arco-segundo), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011; VALERIANO; ROSSETTI, 2012);
- iii) Dados matriciais de estimativas de precipitação diário e mensal, computados por vários satélites (principalmente o *Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM – USA/Japão), em uma grade com espaçamento de 0,1° x 0,1° (aproximadamente 10 x 10 km) do aplicativo Giovanni da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), desenvolvido

- pelos *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)* (HUFFMAN *et al.*, 2019);
- iv) Dados matriciais da Sexta Coleção do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura do Solo no Brasil (MapBiomas) de 2020, desenvolvidos e operados a partir da plataforma *Google Earth Engine (GEE)* para gerar uma série histórica de mapas anuais de uso e cobertura do solo do Brasil (SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2020);
- v) Programas de geoprocessamento *SPRING* – versão 5.5.6 (CÂMARA *et al.*, 1996) desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do INPE e *QGIS (Versão 3.14)* da *Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)* de Código Aberto segundo a Licença Pública Geral (GNU) (*QGIS Development Core Team*, 2020).

**Figura 1: Mapa de localização e acesso à área de estudo**



Fonte: Os autores (2022).

## Método

O primeiro procedimento realizado foi a aquisição dos dados supracitados e consecutiva importação para o Banco de Dados Georreferenciados (BDG) gerado no *software* QGIS. O BDG foi confeccionado no Sistema de Coordenadas UTM, Datum Sirgas-2000, Zona 24 Sul. Em seguida foi produzido o mapa de localização e acesso à área de estudo.

É importante ressaltar que os dados temáticos digitais dos arquivos vetoriais (*shapefiles*) da SEMARH que apresentaram problemas de integridade foram corrigidos manual e automaticamente no *SPRING* antes da

importação para o QGIS. Como exemplo de problemas de integridade de dados corrompidos, tem-se linhas duplicadas, polígonos abertos e ausência de topologia.

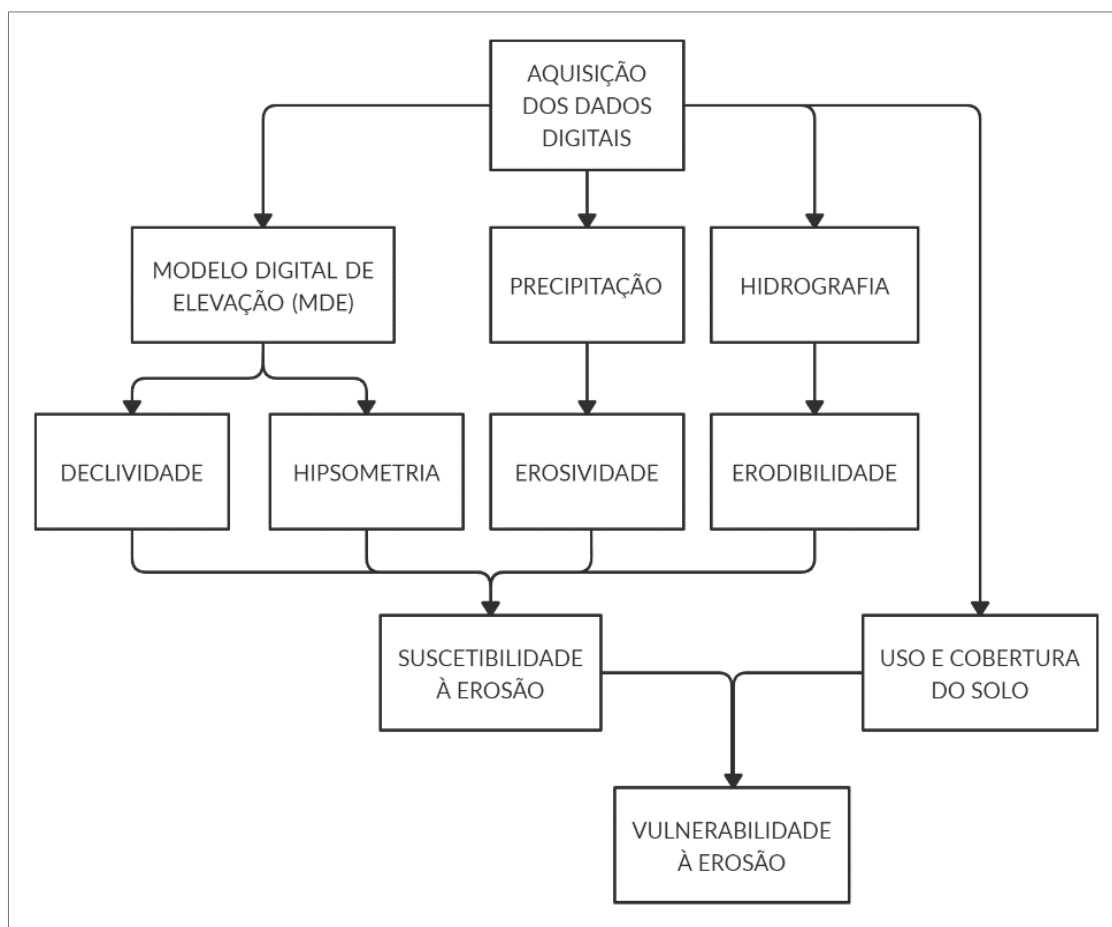
Os principais procedimentos operacionais realizados no presente estudo estão representados na Figura 2. A metodologia aplicada pode ser dividida em duas etapas: a primeira foi a confecção dos mapas temáticos para a aplicação do método de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, como a declividade, hipsometria, erosividade (interpretada como a intensidade de chuva), erodibilidade e o uso e cobertura do solo; e a segunda etapa foi a aplicação do método AHP, propriamente dito.

Dessa forma, foram gerados os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão na BHRS.

A declividade, tem relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética e, portanto, com a velocidade das massas de água em movimento responsáveis pelo escoamento (GUIMARÃES *et al.*, 2008). A amplitude altimétrica está relacionada com o aprofundamento da dissecação e é um indicador da energia potencial para o escoamento (CREPANI *et al.*, 2001).

A intensidade da chuva pode ser compreendida como a quantidade de chuva em um período determinado de tempo e que está relacionada com a perda volumétrica de solo de forma que, quanto maior a intensidade, maior o número e tamanho das gotas d'água, provocando uma maior quantidade de energia cinética (WISCHMETER; SMITH, 1959). As gotas da chuva ao atingirem o solo exposto provocam a fragmentação do solo (*splash*) e, posteriormente o seu arraste através do escoamento superficial e subsuperficial (*runoff*).

**Figura 2: Fluxograma dos processos operacionais**



Fonte: Os autores (2022).

Segundo Wand e Jones (1995), a densidade de drenagem é um dos mais relevantes parâmetros para análise de dissecação do relevo. Essa última está diretamente ligada à porosidade e à permeabilidade do solo e da rocha. A relação é inversamente proporcional; quanto maior a densidade de drenagem, maior é a impermeabilidade do terreno. Consequentemente, maiores são os escoamentos superficiais (HORTON, 1945), consequentemente, maiores as

erosões do tipo laminar (escoamento superficial difuso) e linear (escoamento concentrado superficial e subsuperficial – *piping*).

Para a confecção do mapa de erodibilidade, realizou-se a análise quantitativa da rede de drenagem da BHRS, baseada nos procedimentos realizados por Santos, Nascimento e Barros (2020); Santos; Nascimento (2021). Dessa forma, aplicou-se o interpolador Kernel para delimitar, de forma objetiva, as concentrações das densidades

de drenagem fluvial. O interpolador Kernel estima o evento, em toda a área, de forma não-paramétrica, mesmo onde não tenha nenhuma ocorrência, produzindo uma superfície suave e representativa da densidade de drenagem. As abordagens teóricas detalhadas do interpolador Kernel podem ser vistas em Wand e Jones (1995).

Para aplicação desse método, foi necessário transformar as linhas de drenagem em pontos localizados em um de seus vértices. A densidade de drenagem foi calculada com base no número de pontos de um local utilizando a Função Quártica, que é uma função de estimação com propriedades "convenientes" de suavização do fenômeno. Para o raio de influência que define a vizinhança do ponto a ser interpolado foi adotado um raio 3000 metros, representando bem a distribuição hidrográfica da bacia. O produto gerado é monocromático, onde as áreas brancas e pretas indicam maior e menor densidade de drenagem, respectivamente. No entanto, visando facilitar a interpretação visual, foi realizada uma classificação colorida, utilizando intervalos fixos para cada classe de densidade de drenagem (SANTOS; NASCIMENTO, 2019), gerando cinco classes.

A partir dos dados SRTM foram realizados os mapas de declividade e hipsometria. As classes hipsométricas foram definidas entre 0 e 750 m, cujos valores de elevação do terreno foram agrupados em cinco classes com intervalo altimétrico de 150 m, considerando as variações do terreno que melhor representam a área de estudo (LOCH, 2006) e o erro vertical que varia de 4 a 6 m (RABUS *et al.*, 2003). As classes altimétricas definidas representam as planícies e tabuleiros costeiros localizadas à jusante da BHRS e as serras residuais e os pediplanos dissecados e rochosos à montante.

As classes de declividade ou clinográficas foram estabelecidas de acordo com a classificação proposta pela EMBRAPA (1999), na qual relaciona a morfometria com a morfografia do relevo. Os aspectos morfométricos descrevem aspectos quantitativos do relevo, enquanto os aspectos morfográficos ou qualitativos representam a descrição da forma e aparência do relevo (FLORENZANO, 2008). Dessa forma, os intervalos das classes de declividade foram: 0 a 3% (relevo plano); 3 a 8% (relevo suave ondulado); 8 a 20% (relevo ondulado); 20 a 45% (relevo forte ondulado) e 45 a 75% (relevo montanhoso).

A erosividade foi obtida considerando que os dados de estimativa de precipitação, gerados pelo

algoritmo IMERG, foram interpretados de maneira linear como a erosividade, pois uma das formas clássicas de representar a erosividade das chuvas é o produto da intensidade da chuva com certa duração pela energia cinética da gota da chuva no local. Embora a energia cinética da chuva desempenhe um papel fundamental nos estudos de erosão do solo, a falta de medidas da energia cinética (MINEO *et al.*, 2019) e o fato de que há pesquisadores que não consideram a energia cinética das gotas da chuva como a força motriz da erosão (FREE, 1960; LAL, 1976; NEARING *et al.*, 2017; LIANG *et al.*, 2020) nortearam a relacionar a erosividade com a intensidade da chuva.

Isto posto, o algoritmo IMERG fornece o produto de precipitação no *site* Giovanni (NASA, 2021). Os dados adquiridos abrangeram o período de 01/01/2010 a 01/01/2020 e com uma resolução temporal mensal. Dessa forma, foi necessário converter o dado matricial (*raster*) em um dado vetorial, com intervalos fixos de 100 mm/ano das isolinhas, cujos arcos e polígonos foram construídos mantendo as suas relações espaciais e topológicas. Nesse processo de conversão, denominado de vetorização, os contornos das isolinhas foram suavizados para atenuar o "efeito de escada", característico da estrutura matricial (NASCIMENTO; GARCIA, 2004).

O mapa de uso e cobertura do solo foi obtido a partir dos dados da Sexta Coleção do MapBiomias em seu site oficial (MAPBIOMAS, 2021). Os dados, disponíveis no formato matricial com Datum WGS-84, cujos pixels apresentam valores numéricos distintos para cada classe. Foram realizadas associações entre as classes temáticas com características semelhantes, a partir da adaptação dos procedimentos realizados por Barros *et al.* (2020) e Santos e Nascimento (2021). O produto gerado foi um mapa de uso e cobertura do solo reclassificado com 6 classes distintas: área urbanizada, florestas, mangue, solo exposto, pastagem e corpos d'água.

Após confeccionar os mapas, foi realizada a atribuição dos pesos para cada classe temática de acordo com o seu grau de relevância quanto à suscetibilidade e à vulnerabilidade erosiva. A atribuição de pesos para os elementos relacionados ao processo erosivo foi baseada em Nascimento (2015), a partir dos fundamentos da ecodinâmica preconizados por Tricart (1977).

Os pesos para cada classe foram distribuídos em cinco intervalos iguais, resultando num quintil, exceto para o uso e cobertura do solo. O quintil é um método estatístico de medida separatriz que

permite cada classe ficar com 20% de seus elementos, de forma que a mediana esteja localizada no centro (NACHETTI; PINTO, 2007; RIBEIRO, 2015). Os valores adotados para cada classe temática encontram-se nas tabelas 1 e 2.

A matriz de uso e cobertura do solo passou por uma normalização dos seus valores, para que

seus pesos variem no intervalo de 0 a 1. Os valores próximos a 0 estão associados à pedogênese e os valores próximos a 1, morfogênese, que apresenta condições instáveis e predominância de características intrínsecas desencadeadoras de processos erosivos naturais e/ou intensificados pela atividade antrópica.

**Tabela 1: Pesos para as classes dos fatores utilizados**

Fator				Peso
Declividade (%)	Hipsometria (m)	Erosividade (mm/ano)	Erodibilidade	
0 – 3	0 – 150	630 – 730	Muito baixa	0,2
3 – 8	150 – 300	730 – 830	Baixa	0,4
8 – 20	300 – 450	830 – 930	Média	0,6
20 – 45	450 – 600	930 – 1030	Alta	0,8
45 – 75	600 – 750	1030 – 1130	Muito Alta	1,0

Fonte: Os autores (2022).

**Tabela 2. Pesos para cada classe de uso e cobertura do solo**

Uso e cobertura do solo	Peso
Floresta	0,1
Mangue	0,3
Área Urbanizada	0,5
Pastagem	0,7
Corpos D'água	0,8
Solo Exposto	0,9

Fonte: Os autores (2022).

Depois da atribuição dos pesos para as classes, determinou-se a importância de um fator (mapa temático) em relação ao outro, frente aos processos erosivos, tendo como referência a escala recomendada por Saaty (1994) (Quadro 1). A importância de um fator sobre o outro varia entre 1 e 9. O valor 1 indica a menor importância de um critério em relação ao outro, enquanto o valor 9 constitui a extrema importância. As variáveis de maior importância transmitem sua influência para as variáveis menos importantes, ou seja, níveis hierárquicos mais baixos, que por sua vez, contribuem também com a funcionalidade e coerência nos níveis superiores (SAATY, 2008). Dessa forma, além de ser um algoritmo que resolve problemas, é um processo matemático de objetivar a subjetividade do julgamento individual ou coletiva no processo de decisão.

A partir da escolha dos valores de importância para cada fator, o método AHP informa uma razão de consistência (RC). Essa é utilizada para determinar o grau de coerência, ou seja, indica a probabilidade de que as comparações tenham sido geradas

aleatoriamente. Dessa forma, a razão de consistência deve ser inferior a 0,10 e quando ocorrem valores superiores a este é necessário refazer as comparações (SAATY, 1994). A aplicação do método permite também calcular os pesos estatísticos de cada fator/variável.

Para isso, foi construído uma matriz de comparação pareada, estabelecendo a hierarquia de menos suscetível para o mais suscetível. Cada variável da matriz indica quanto o fator da coluna esquerda é mais relevante em relação à cada fator correspondente na linha do topo (SAATY, 1994) (Tabela 3). Os valores unitários da diagonal apontam que uma variável quando comparada a ela mesma é igualmente importante (SANTOS; LOUZADA; EUGÊNIO, 2010). Os pesos estatísticos são dados pela razão entre a soma de cada linha e o somatório dos valores da coluna a que ele pertence.

A definição da hierarquia foi definida a partir das diferentes escalas dos fatores (mapas temáticos) a partir dos preceitos preconizados por Nascimento e Petta (2008; 2012). De acordo com os autores, os fatores com maiores escalas

possuem maior influência na modelagem da suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão. Dessa forma, os fatores erodibilidade (escala 1:50.000) e erosividade (escala 1:1.000.000) são os fatores extremos, com maior e menor influência no processo erosivo, respectivamente. Os fatores

declividade e hipsometria possuem escala de 1:100.000, no entanto, a declividade é mais importante do que a hipsometria, segundo Franco *et al.* (2021) na avaliação do processo erosivo e de movimento de massa (escorregamento).

**Quadro 1: Comparações do AHP**

Intensidade de Importância	Definição	Descrição
1	Mesma importância	Importância igual. As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	Importância moderada. A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	Importância moderada essencial. A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Importância demonstrada. Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	Importância extrema. A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

**Tabela 3. Matriz de comparação pareada**

Fator	Erosividade	Hipsometria	Declividade	Erodibilidade	Pesos Estatísticos (W)
Erosividade	1,000	0,333	0,200	0,143	0,058
Hipsometria	3,000	1,000	0,500	0,250	0,164
Declividade	5,000	2,000	1,000	0,500	0,294
Erodibilidade	7,000	4,000	2,000	1,000	0,484

Fonte: Os autores (2022).

Santos, Nascimento e Barros (2020) empregaram a mesma hierarquia para o mapeamento da fragilidade ambiental à erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba. França *et al.* (2009); Sampaio e Brandalize (2018); Santos e Nascimento (2020) também utilizaram dados de diferentes fontes e escalas para aplicação do método AHP no zoneamento da fragilidade ambiental potencial e emergente de ecossistemas naturais e antropizados.

Estabelecidos os pesos de cada variável, verificou-se o autovetor,  $\lambda_{\text{máx}}$  (autovalor) e a razão de consistência. O autovalor máximo é calculado através multiplicação da matriz de comparação pelo vetor coluna W, seguido da divisão desse novo vetor encontrado, AW, pelo primeiro vetor W (Equação 1):

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[A]w_i}{w_i} \quad (1)$$



Onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$  : Autovalor máximo;

$[A]_{W_i}$  : Matriz resultante do produto entre a matriz de comparação pareada pela matriz dos pesos calculados;

$W_i$  : Pesos calculados.

Assim, foi possível chegar ao seguinte resultado:

$$A_w = \begin{pmatrix} 1 & 0,333 & 0,2 & 0,143 \\ 3 & 1 & 0,5 & 0,25 \\ 5 & 2 & 1 & 0,5 \\ 7 & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,058 \\ 0,164 \\ 0,294 \\ 0,484 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,241 \\ 0,606 \\ 1,154 \\ 2,134 \end{pmatrix}$$

Sabendo o valor de  $A_w$  foi então calculado o  $\lambda_{M\acute{A}X}$ , resultando em:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[A]_{W_i}}{W_i} = \frac{1}{4} \left( \frac{0,241}{0,058} + \frac{0,606}{0,164} + \frac{1,154}{0,294} + \frac{2,134}{0,484} \right) = 4,045$$

A partir dos valores calculados pode-se determinar o Índice de Consistência (IC), dada pela Equação 2. Sendo  $n$  o número de variáveis utilizadas, neste caso  $n = 4$ .

$$IC = \left( \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \right) = \left( \frac{4,045 - 4}{4 - 1} \right) = 0,015 \quad (2)$$

A razão de consistência (RC) (Equação 3) é dada pela divisão entre o índice de consistência (IC) e a índice randômico (IR). O Índice Randômico (IR) é derivado de uma amostra de 500 matrizes recíprocas geradas de forma aleatória. O IR utiliza

uma escala de 9 pontos e é extraído da tabela de valores para matrizes quadradas de ordem  $n$  (Tabela 4).

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,015}{0,90} = 0,017 \quad (3)$$

Ao aplicar o método AHP, obteve-se o resultado de 0,017 para a razão de consistência, e 4,045 para o  $\lambda_{m\acute{a}x}$ . Assim, comprovando que os pesos adotados estão coerentes e podem ser utilizados para a confecção do mapa de suscetibilidade erosiva (Tabela 5).

**Tabela 4. Valores de IR para matrizes quadradas de ordem  $n$**

$n$	3	4	5	6	7	8	9
IR	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

**Tabela 5: Pesos dos fatores utilizadas para geração do mapa de suscetibilidade à erosão**

Fator	Pesos estatísticos (W)
Erosividade	0,058
Hipsometria	0,164
Declividade	0,294
Erodibilidade	0,484

Fonte: Os autores (2022).

Diante dos valores determinados, foi possível confeccionar o mapa de suscetibilidade erosiva através da álgebra dos mapas de erodibilidade (K),

declividade (D), hipsometria (H) e erosividade (P) (equação 4).

$$S.E = (K * 0,484) + (D * 0,294) + (H * 0,164) + (P * 0,058) \quad (4)$$

Sabendo dos impactos negativos sobre o meio ambiente devido as ações antrópicas, bem

como, a síntese de pesquisas de outros estudos sobre os impactos da sociedade na BHRS. O

mapa de vulnerabilidade foi construído a partir da associação do mapa de suscetibilidade à erosão e o mapa de uso e cobertura do solo. Dessa forma, foi considerado então que a vulnerabilidade é dada da seguinte forma (Equação 5). Os pesos utilizados foram baseados no empirismo, procedimento adotado por Santos e Nascimento (2020). A atribuição dos pesos é um fator determinante no resultado final, podendo conduzir a resultados variados, ou mesmo divergentes em função desta atribuição (CALDERANO *et al.*, 2018). Esta discrepância é associada à multidisciplinaridade dos especialistas (MARTINS *et al.* 2021). Nesse sentido, a escala dos dados de erosividade, hipsometria, declividade, erodibilidade e uso e cobertura do solo nortearam a definição dos pesos, tornando-o método AHP menos subjetivo.

$$V.E = (S.E * 0,65) + (U.C.S) \quad (5)$$

Os procedimentos realizados neste estudo resultaram nos mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos na BHRS, ambos classificados em muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Erodibilidade

Como a relação entre a densidade de drenagem e a permeabilidade do solo/rocha é inversamente proporcional, as regiões com maiores concentrações de drenagem representam a maior impermeabilidade da superfície terrestre, provocando assim uma taxa de escoamento superficial maior (DOBOS *et al.* 2000; MAFRA *et al.* 2020). Dessa forma, os processos erosivos são intensificados, e conseqüentemente a deposição de sedimentos nos corpos d'água também aumentam.

Diante disso, a erodibilidade neste estudo foi determinada pela análise da densidade de drenagem. Inicialmente, através da análise visual da rede hidrográfica, foi possível constatar a distribuição heterogênea das linhas de drenagem, sendo possível mensurar esta distribuição de forma quantitativa a partir do processo de interpolação Kernel. A geoespacialização, em faixas fixas, da imagem gerada pelo interpolador permitiu a compartimentação da BHRS em cinco classes de densidade de drenagem: muito alta, alta, média, baixa e muito baixa (Figura 3).

As áreas com erodibilidade muito alta e alta

estão distribuídas na parte central e Norte da bacia com direção noroeste, as quais correspondem a 14,2% da área total da BHRS (Tabela 7). Isto indica um maior grau de dissecação do terreno decorrente da concentração de escoamentos, provocando incisões sobre o terreno (sulcos, ravinas e voçorocas). Essas áreas são formadas por materiais consolidados (rochas) e/ou inconsolidados (solo) de baixa permeabilidade, ocasionando processos erosivos laminar e/ou linear. As erosões laminar e linear carregam o horizonte superficial fértil do solo e as camadas subjacentes do solo por incisões verticais ao perfil do solo que degradam o ambiente agrícola e os corpos d'água.

A classe de baixa erodibilidade está distribuída por toda a bacia, no entanto, sua maior concentração se encontra na região Sul, com uma área correspondente a 36,1% da BHRS. As classes baixa e muito baixa erodibilidade representam 57,5%. É importante destacar que a classe de média erodibilidade é bastante significativa, tanto em termos percentuais como em tendência de se tornar alta erodibilidade. Dessa forma, medidas de proteção de solo, como reflorestamento e recomposição da mata ciliar, devem ser tomadas para impedir o aumento da potencialidade erosiva, pois a supressão da vegetação natural e/ou a manutenção de solos expostos em áreas suscetíveis à erosão afetam a dinâmica do fluxo e do potencial hídrico.

### Declividade

A estabilidade de uma encosta está diretamente relacionada ao ângulo formado entre esse talude e um plano horizontal. Quanto maior esse ângulo, menos estável é esse terreno (MEIRELLES *et al.*, 2018). Nesse sentido, a declividade desencadeia diretamente a ocorrência de processos erosivos e de movimentos de massa, principalmente nas encostas mais íngremes, devido à maior gravidade atuante (BISPO *et al.*, 2009; VENANCIO *et al.*, 2013).

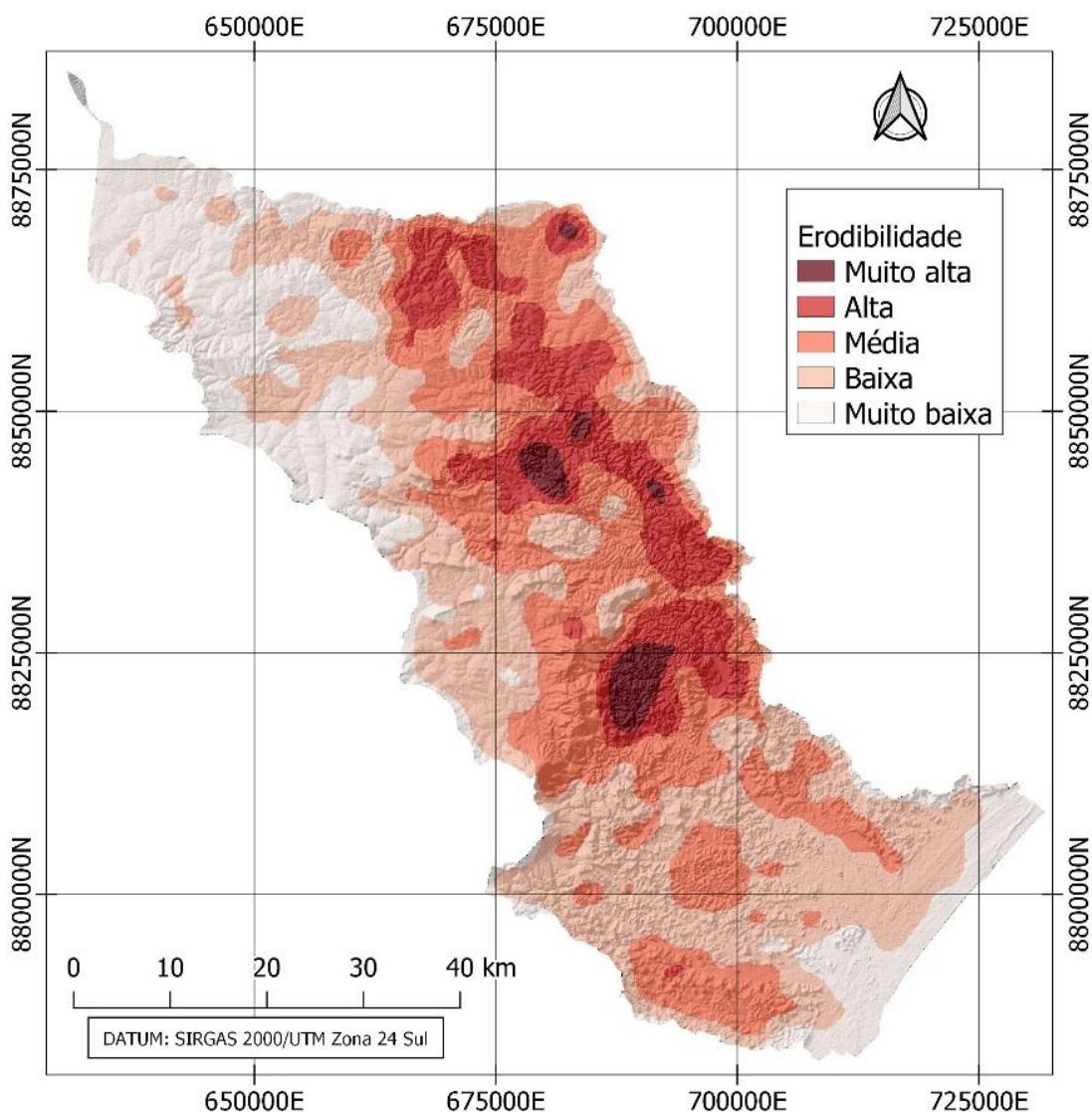
Dessa forma, quanto maior a declividade, mais rápido é a transformação da energia potencial em energia cinética, acarretando numa maior velocidade de escoamento da água, assim aumentando sua capacidade de transporte dos sedimentos. Nesses relevos acentuados, como o escoamento superficial é maior, prevalecem os processos morfogenéticos, como a erosão e escorregamento (LEPSCH, 1983; NASCIMENTO, 2015). Por outro lado, a infiltração da água no solo e subsolo é facilitada em relevos planos a

suavemente ondulados, já que há uma menor energia hidráulica capaz de carrear os sedimentos, predominando os processos pedogenéticos (NASCIMENTO; GARCIA, 2004; NASCIMENTO; PETTA, 2008).

Conforme a Figura 4, a classe de declividade 3 a 8% é a de maior ocorrência, com cerca de 44,9% da área, com maior concentração na região

Norte, Noroeste e Sudeste. A classe de 0 a 3% é a segunda de maior ocorrência, correspondendo a uma área de aproximadamente 27% da bacia e com maior concentração na região Noroeste e Sudeste (faixa litorânea). Nessas áreas, os processos pedogenéticos são predominantes, indicando estabilidade com relação aos processos erosivos.

**Figura 3: Mapa de erodibilidade do solo/rocha na BHRS.**



Fonte: Os autores (2022).

**Tabela 7: Área correspondente a cada classe de erodibilidade**

Erodibilidade	Área (ha)	Área (%)
Muito alta	7.429,444	2,011
Alta	45.033,735	12,192
Média	104.384,553	28,260
Baixa	133.237,854	36,072
Muito baixa	79.285,343	21,465
Total	369.370,929	100,000

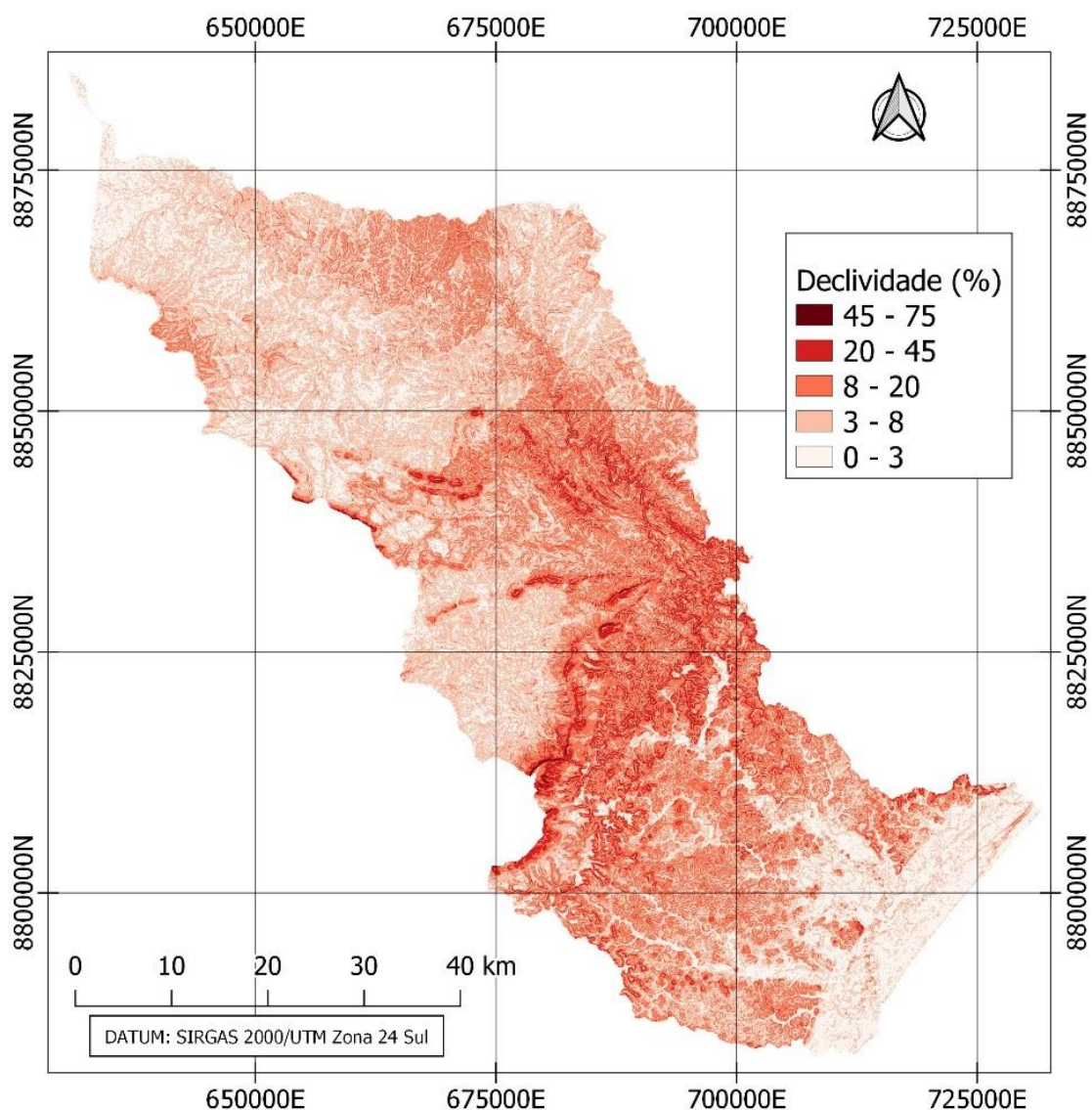
Fonte: Os autores (2022).

A região correspondente a declividade de 8 a 20% ocupa cerca de 26,8% da extensão da bacia, ocorrem principalmente na porção central e Sul. Já as classes de 20 a 45% e 45 a 75% se concentram no interior da bacia, principalmente na parte central, e possuem uma área equivalente a 5,3% e 0,1% do território da BHRS, respectivamente. Essa tendência geral de um aumento da declividade para interior da bacia também foi relatada por Caldas *et al.* (2019) nos divisores de água principais. Vale ressaltar que o maior valor de declividade encontrado na bacia foi de 65%.

A curva de nível é uma das várias técnicas de

controle da erosão com a função de diminuir a velocidade do defluxo superficial em áreas agrícolas declivosas. Baldassarini e Nunes (2016) propõem a utilização de barramentos de bambu e sacarias de rafia como técnica de baixo custo para a redução da energia cinética em encostas agrícolas íngremes, propiciando a contenção do transporte de sedimentos e assoreamento dos cursos d'água. Técnicas de custo elevado, como por exemplo, os gabiões e as mantas vegetais são frequentemente utilizados (THOMA, 2020), mas são procedimentos normalmente empregados em áreas urbanas e periurbanas.

**Figura 4: Mapa de declividade da BHRS.**



Fonte: Os autores (2022).

### Hipsometria

As altitudes da BHRS variam de 0 a 660 metros em toda a extensão da bacia, e segundo Pôssa e Ventorini (2015), a amplitude altimétrica

potencializa o escoamento superficial e subsuperficial (CREPANI *et al.* 2001; SANTANA *et al.*, 2020). A água da chuva ao escoar para uma região de menor altitude transforma a sua energia potencial em cinética, ocorrendo também a

dissipação da energia, explicada pela segunda lei da termodinâmica (LORITZ *et al.*, 2019). A velocidade de transformação entre essas formas de energia depende principalmente da declividade da encosta (STRAHLER, 1952; PRASHANTH *et al.*, 2022). Quanto maior a altitude, maior será a energia potencial associada a água da chuva, que após iniciar seu escoamento se transforma em energia cinética com potencial para causar o arraste de sedimentos e assorear lagos e reservatórios situados em áreas de menor declive. Em situações de alta altitude, declividade e precipitação formam-se as enxurradas que ocasionam danos ambientais e perdas socioeconômicas de maiores proporções (BYUN *et al.*, 2015; EL-MAGD *et al.*, 2021).

A área de estudo apresentou as seguintes altitudes (Figura 5): 0 – 150 e 150 – 300 metros correspondente a 40,5% e 54,2% da área total da bacia, respectivamente; e uma altitude 300 – 450 metros correspondente a 5,2%. As áreas com altitudes acima de 450 metros são consideradas insignificantes, representando apenas 0,16% da área total da bacia.

Analisando a figura 5, é possível observar que as regiões de maior altitude estão localizadas à montante da BHRS, com exceção de uma pequena área na parte Centro-oeste, localização da Serra de Itabaiana. É esperado que nessas regiões ocorram um maior transporte de sedimentos, visto que são regiões que apresentam maior acúmulo de energia potencial, proporcionando maior velocidade de escoamento superficial das águas da chuva, prevalecendo os processos morfogenéticos. Já nas regiões mais baixas, a jusante da BHRS, é esperado uma maior suscetibilidade ao depósito de sedimentos, onde prevalece os processos pedogenéticos (SANTOS; NASCIMENTO, 2019).

### Erosividade

Com os dados matriciais gerados pelo algoritmo IMERG pela equipe do GPM foi possível elaborar o mapa de erosividade com os valores de precipitação média anual, delimitados em faixas fixas dentro do limite da BHRS (Figura 6). Entre os fatores de risco à erosão do solo, a erosividade da chuva é apontada como um fator mais dinâmico durante o ano (KIEFER *et al.*, 2021). Dessa forma, a distribuição temporal da chuva deve ser frequentemente combinada com a hipsometria, declividade e erodibilidade, que são considerados como fatores estáticos, pois não se experimentam mudanças consideráveis em um longo período de

tempo. Souza e Paula (2019) concluíram que a combinação de relevos com grande variação topográfica, altas declividades, associadas a precipitações geralmente intensas são condições favoráveis ao aumento do escoamento superficial e das forças de desagregação e transporte das partículas de solo.

A maior intensidade pluviométrica ocorre na região litorânea, com uma precipitação média entre 1030 a 1130 mm/ano e 930 a 1030 mm/ano, correspondendo a 5,5% e 24,9% da área total da bacia, respectivamente. Em seguida, na região do agreste, a precipitação é entre 830 a 930 mm/ano (25,6%). Na região do semiárido, a precipitação varia entre 730 a 830 mm/ano e 630 a 730 mm/ano, ocupando uma área correspondente a 33,2% e 10,8% da bacia.

Ao analisar conjuntamente a hipsometria (Figura 5) e a precipitação (Figura 6), nota-se que à medida que a altitude aumenta, a intensidade pluviométrica diminui, o que implica em um tempo maior para atingir a saturação do solo, bem como, uma velocidade de escoamento menor, favorecendo a infiltração, prevalecendo, dessa forma, os processos pedogenéticos. Esse cenário ocorre quando as precipitações são espaçadas no tempo. No entanto, a ocorrência de chuva no semiárido, normalmente são concentradas em um período de tempo muito curto e com grande volume de precipitação. Nessa situação, ocasionam as enxurradas, cujo escoamento muito rápido intensificam a erosão laminar e linear, a inundação e alagamento e os movimentos de massa, como escorregamento e corrida de detritos.

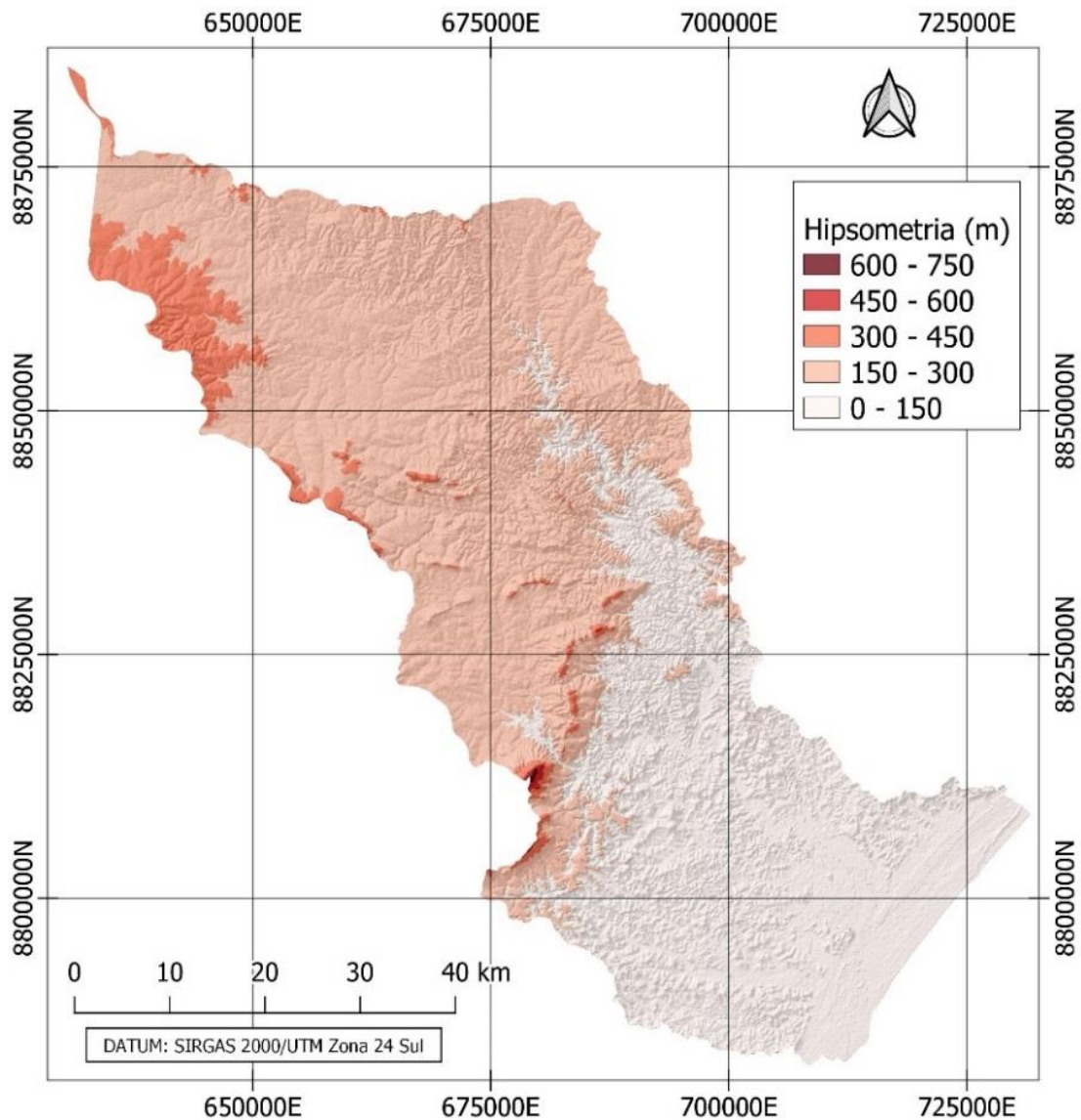
Nas regiões que apresentam intensidade da chuva e hipsometria intermediárias, localizadas na parte central da bacia (agreste), são consideradas áreas potencialmente geradoras de sedimento e de desastres naturais, tendo em vista que essas regiões possuem períodos de chuva mais curtos que o semiárido. Dessa forma, as áreas supracitadas são fontes de sedimentos, que interferem tanto na qualidade da água quanto no tempo de vida útil dos lagos e reservatórios pela deposição do material erodido. À medida que o assoreamento aumenta, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui.

É importante ressaltar que muitos dos lagos são intermitentes (temporários), principalmente na região do semiárido e do agreste. A recorrência de anos de seca aumenta o impacto ambiental e socioeconômico, demandando técnicas de gestão ambiental adequadas, principalmente nas áreas

fontes de sedimentos e nos corpos hídricos suscetíveis ao assoreamento (SANTOS; NASCIMENTO, 2019). À jusante da bacia, área de baixa altimetria e alta precipitação, é recorrente os processos de inundação e alagamento, e ocasionalmente os processos de movimentos de

massa, especificamente os escorregamentos dos arenitos do Grupo Barreiras. É importante ressaltar que os sedimentos transportados, principalmente pelo rio Sergipe, vão se depositar no mar e a dinâmica costeira formam os sedimentos de praia e de dunas.

**Figura 5: Mapa hipsométrico da BHR**



Fonte: Os autores (2022).

### Uso e cobertura do solo

A cobertura do solo pela vegetação nativa é o componente mais importante no controle da erosão hídrica. A vegetação aumenta a agregação do solo e, conseqüentemente, a sua resistência à fragmentação e transporte dos sedimentos. Além de proteger o solo contra a perda de material, o

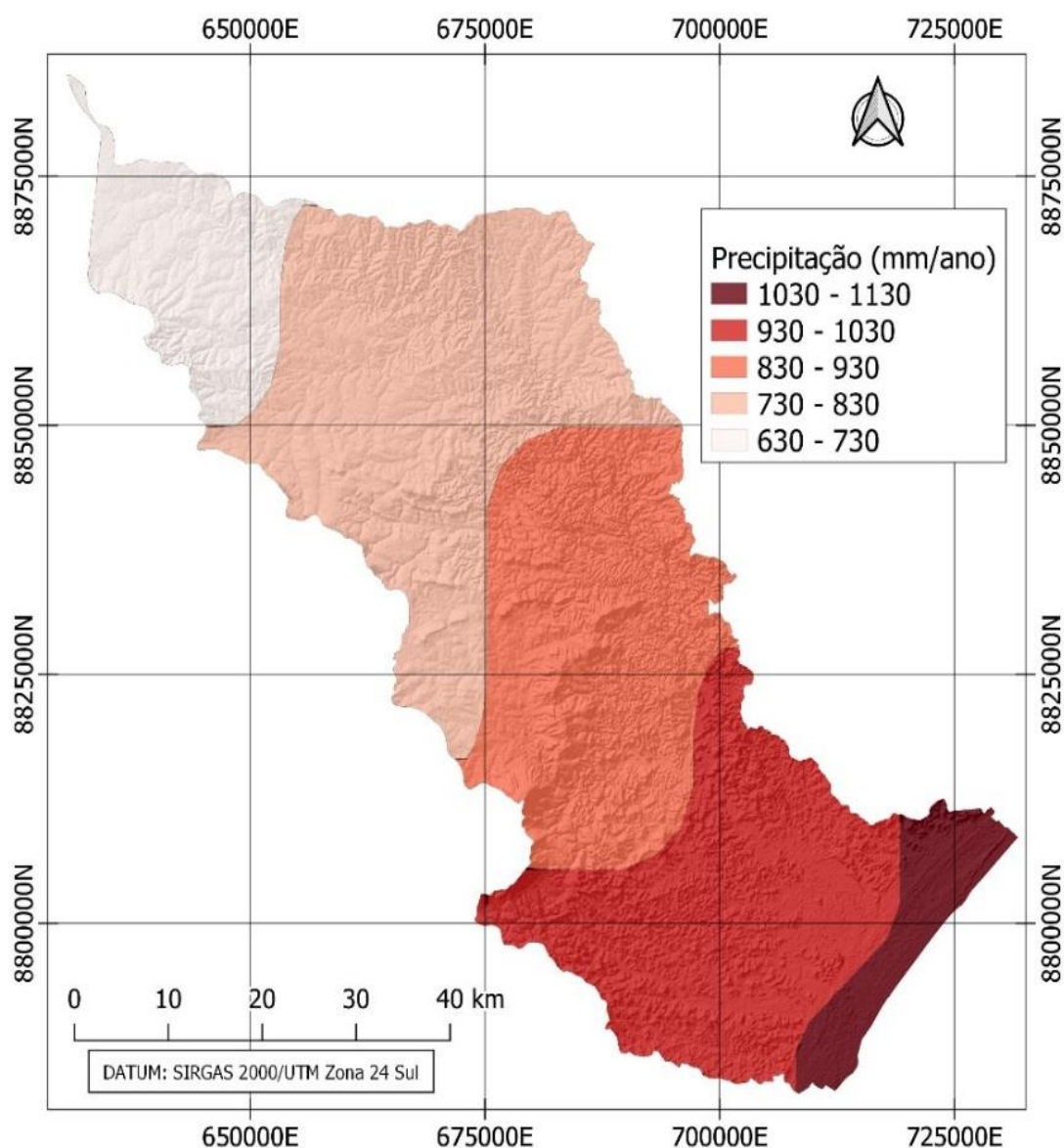
uso adequado do solo e a cobertura vegetal o protegem direta e indiretamente contra os processos modificadores das formas do relevo (morfogênese).

A partir do mapa de uso e cobertura solo (Figura 7) é possível observar as áreas com atuação da ação humana. Percebe-se, principalmente, a baixa concentração da cobertura

vegetal nativa devido a conversão e expansão das áreas de pastagem. Assim, a antropização da BHRS ocasiona a aceleração dos processos erosivos, visto que os solos expostos, desprotegidos pela ausência da vegetação,

recebem o impacto direto das gotas da chuva, causando a fragmentação das partículas do solo/rocha (*splash*), e facilitando o seu carreamento pelo escoamento superficial e subsuperficial (*runoff*).

**Figura 6. Mapa de intensidade pluviométrica na BHRS**



Fonte: Os autores (2022).

Observou-se que a pastagem representa a principal classe de uso do solo na região estudada, ocupando 77,6% da área da bacia. Esta classe está distribuída nos biomas de Mata Atlântica e Caatinga, abrangendo atividades de silvicultura, plantio de cana, lavouras temporárias, dentre outras atividades de agropecuária, principalmente a pastagem para criação de bovinos, ovinos e

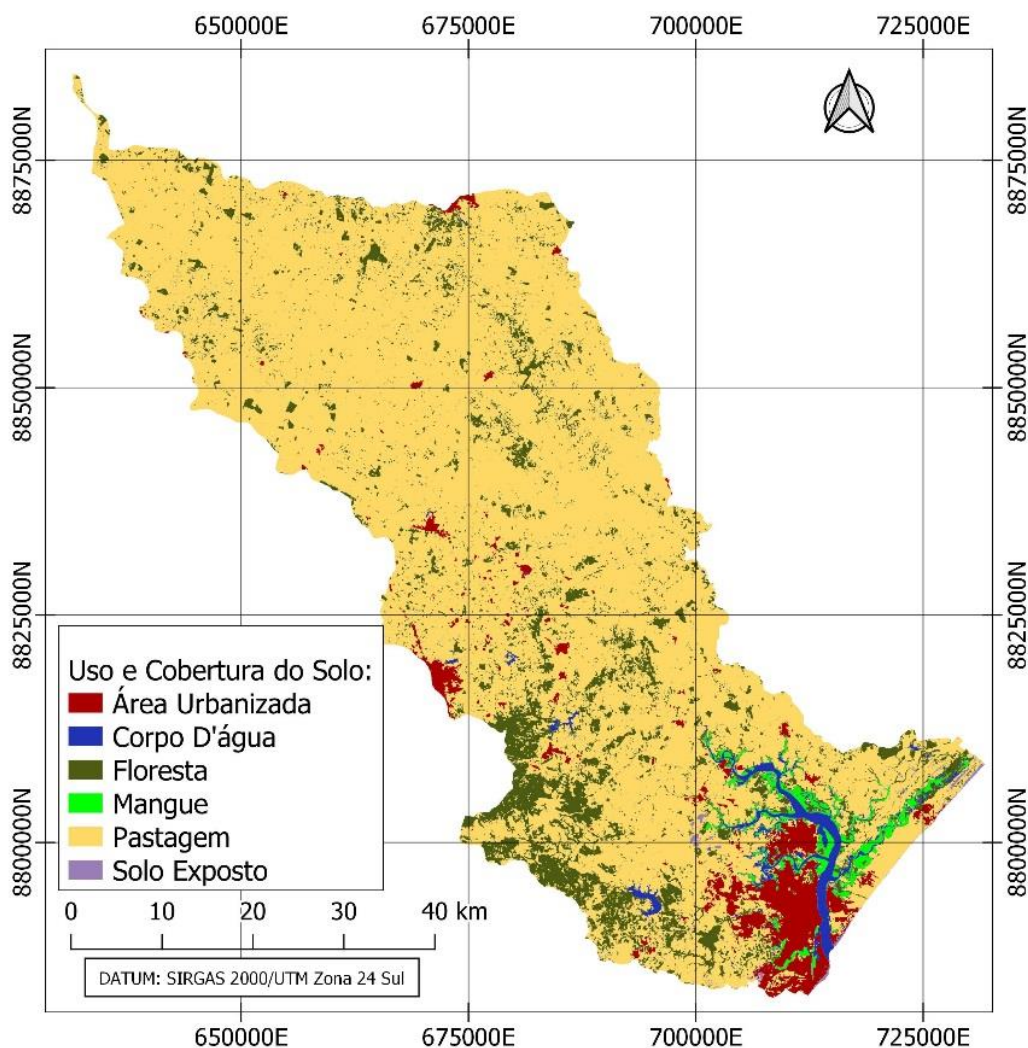
outras espécies. Tal atividade ocasiona, principalmente, a supressão da vegetação nativa e compactação do solo devido ao pastoreio dos animais, de forma que, essa alteração da cobertura vegetal rompe o estado de equilíbrio geodinâmico e acelera os processos erosivos. Dessa forma, o manejo inadequado do solo gera uma série de mudanças físicas, químicas,

biológicas e hidrológicas, provocando o processo de degradação do solo e dos recursos hídricos (BARBOSA *et al.*, 2019). Correa; Barros; Almeida (2016) constataram que solo exposto e pastagem degradada associadas às características geomorfológicas, como a altas declividade e altimetria, resultam na maior sensibilidade aos processos erosivos.

As áreas de florestas são muito menores que as de pastagem, correspondendo a 14,6% da área total da bacia e distribuídas ao longo de toda a sua

extensão, no entanto, sua maior concentração ocorre na região Sudoeste. A escassa vegetação natural indica um alto potencial a degradação ambiental. Dessa forma, torna-se fundamental a recuperação dessas áreas com reflorestamento, principalmente as regiões próximas aos cursos d'água (recomposição da mata ciliar), que são Áreas de Proteção Permanente (APP), capazes de reter grande parte dos sedimentos carregados pela ação água antes de atingir os corpos hídricos.

**Figura 7: Mapa de uso e cobertura do solo na BHRS**



Fonte: Os autores (2022).

### Suscetibilidade à erosão

A partir da integração dos mapas de erodibilidade, declividade, hipsometria e erosividade foi possível confeccionar o mapa de suscetibilidade à erosão, seguindo a álgebra de mapas, como mostra a equação 5, descrita na metodologia. O produto gerado, foi reclassificado

em cinco classes de suscetibilidade à erosão (Figura 8).

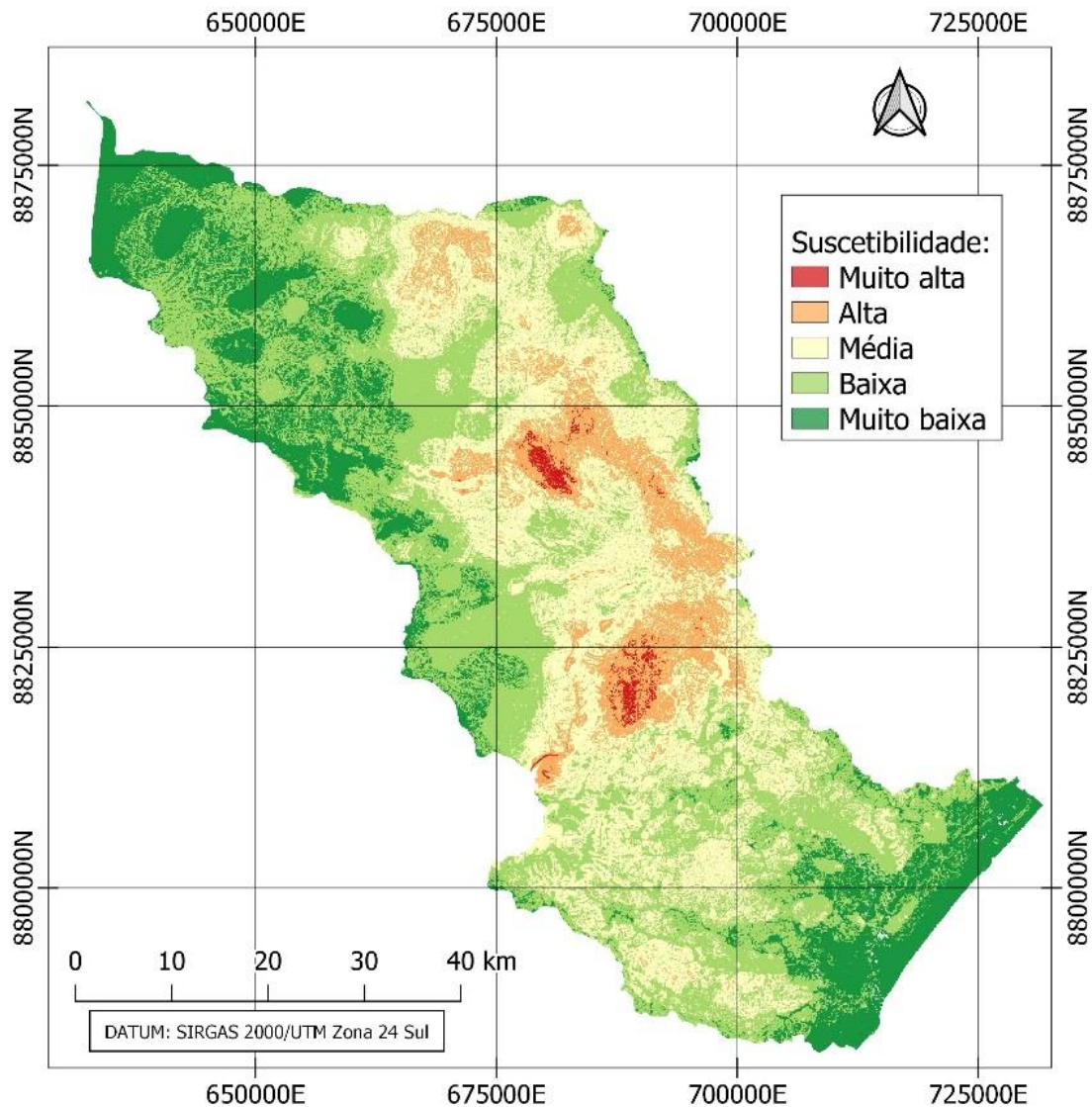
É possível notar que as áreas de muito alta e alta suscetibilidade à erosão estão distribuídas na região central e Norte da BHRS, principalmente nos municípios de São Miguel do Aleixo, Malhador e Santa Rosa de Lima. Essa distribuição se assemelha como o mapa de erodibilidade,



mostrando a coerência do resultado, já que este foi considerado o fator com maior influência à erosão neste estudo. Estas duas classes correspondem a 9,8% da extensão da bacia, sendo a classe muito alta quase inexpressiva, equivalente apenas a 0,7%. É importante que estas áreas sejam

mantidas sem a intervenção antrópica, ou que exerçam baixa influência nos processos erosivos, caso necessário, que seja realizada o reflorestamento da floresta e recomposição da mata ciliar para garantir o melhor controle da erosão.

**Figura 8: Mapa de suscetibilidade à erosão na BHRS.**



Fonte: Os autores (2022).

A área de média suscetibilidade corresponde a 30,5% da extensão total da bacia e está distribuída ao longo do seu território, desde a região Norte até a região Sul, com maior concentração na região central. É possível notar na sua geoespacialização, a influência da classe de média erodibilidade e da declividade relativamente mais acentuada.

As regiões de baixa e muito baixa suscetibilidade estão distribuídas por toda

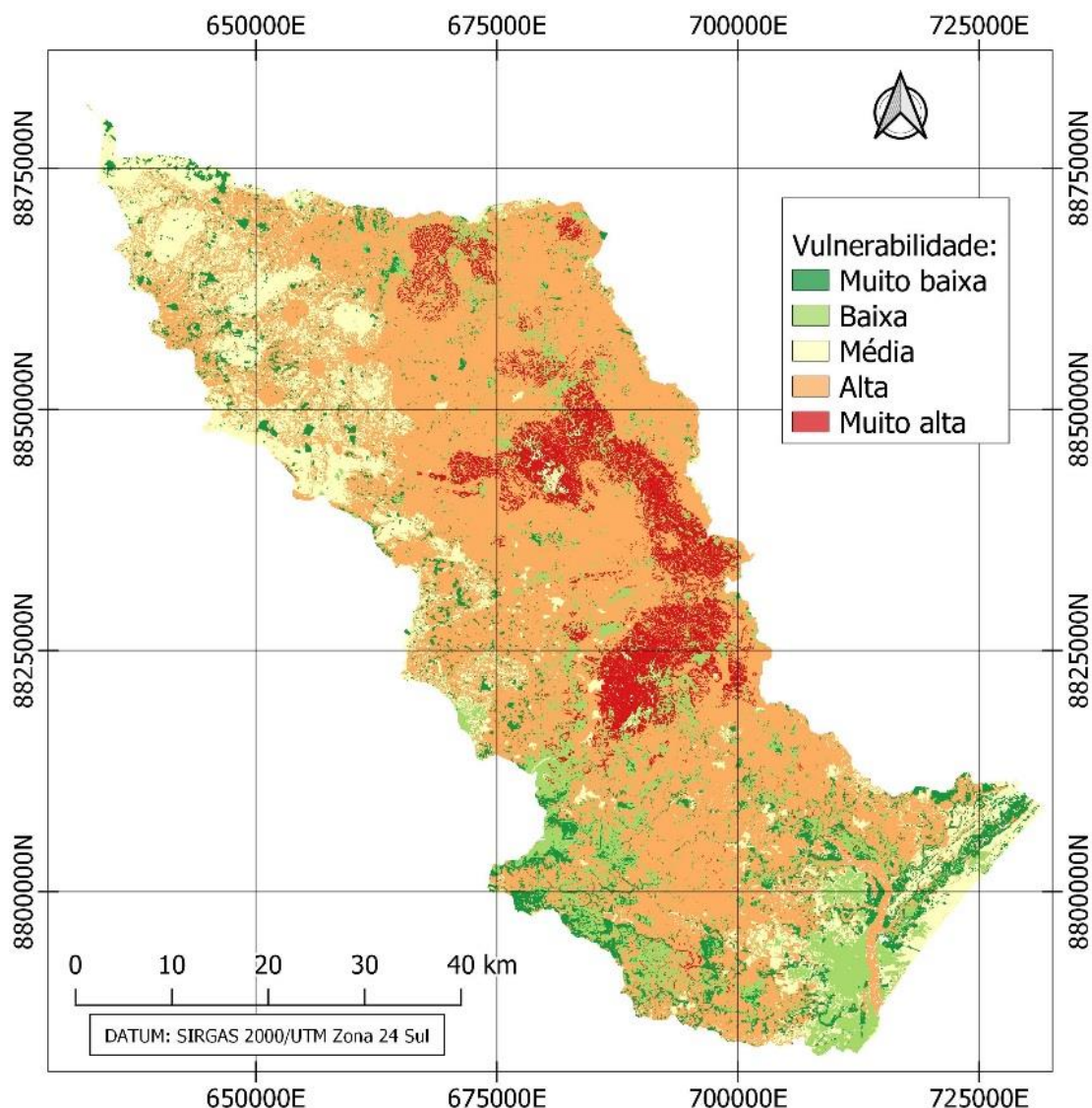
extensão, no entanto se concentram às “margens” da bacia, principalmente na região Sudeste e Noroeste. As duas classes correspondem a 40% e 19,7% do território, respectivamente. Estas áreas estão localizadas em regiões predominantemente de baixa erodibilidade, baixa declividade e entre baixa à média hipsometria. Dessa forma, indicando que estas áreas são favoráveis ao acúmulo de sedimentos gerados nas regiões de maior suscetibilidade erosiva.

### Vulnerabilidade à erosão

A vulnerabilidade aos processos exógenos está associada a interação da sociedade com meio ambiente. Dessa forma, foi realizada uma

integração do mapa de suscetibilidade erosiva com o de uso e cobertura do solo, conforme a equação 6 descrita na metodologia. O produto gerado foi reclassificado em cinco classes de vulnerabilidade erosiva (Figura 9).

**Figura 9. Mapa de vulnerabilidade à erosão na BHRS**



Fonte: Os autores (2022).

A classe de alta vulnerabilidade é a que apresenta maior extensão (58,2%), ocupando mais da metade da área total da bacia. Esse resultado foi obtido, principalmente, devido às grandes áreas de pastagem ao longo da bacia, o que intensifica ainda mais os processos erosivos. Dessa forma, torna-se necessário realizar medidas quanto ao uso adequado do solo, como pastagens manejadas adequadamente considerando as

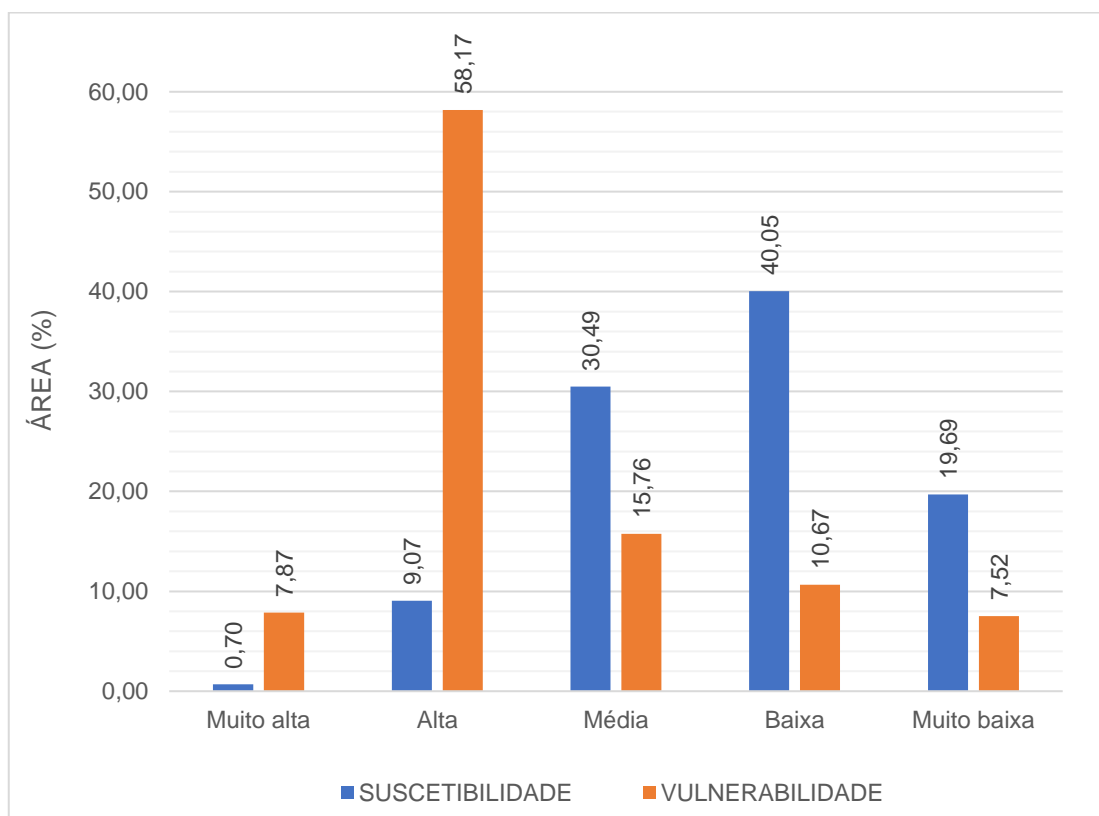
características individuais de cada terreno, rotação de culturas, calagem dos solos, recomposição da mata ciliar, reflorestamento, entre outras formas de controlar a erosão. A agricultura é recomendada para os ambientes com potencialidades baixas a muito baixas aos processos erosivos. Já os solos expostos necessitam de manejos com cobertura adequada como forma de evitar a perda excessiva de solo (RIBEIRO *et al.*, 2016).

As áreas de média vulnerabilidade à erosão representam a transição entre a baixa e alta vulnerabilidade aos processos erosivos. A sua distribuição se dá, principalmente, na região Noroeste e uma parcela no Sudeste, com uma área de 15,8% da extensão total da bacia. São meios delicados e potenciais aos processos exógenos indesejáveis, como a erosão, transformando-os em meios instáveis. Já os meios estáveis são representados pelas classes de baixa e muito baixa vulnerabilidade, sendo caracterizados pela sua cobertura vegetal e baixo a moderado grau de dissecação ou erodibilidade. Estas duas classes somadas representam 18,2% da área total da bacia e estão distribuídas, em sua maioria, na região Sul.

O gráfico apresentado na Figura 10 traça uma comparativo entre as classes de suscetibilidade e vulnerabilidade erosiva, sendo possível perceber a influência do uso e cobertura do solo na

aceleração dos processos exógenos. As áreas com maior grau de vulnerabilidade, representadas pela classe muito alta, estão localizadas, em sua maior parte, na região central da bacia. Com destaque aos municípios de Ribeirópolis, São Miguel do Aleixo, Nossa Senhora das Dores, Divina Pastora, Santa Rosa de Lima e Malhador. Essas são regiões que apresentam alta erodibilidade, maiores declividades, moderada precipitação e hipsometria. Essas áreas correspondem a 7,9% da extensão total da bacia, que apesar de representar uma parcela relativamente pequena, necessitam de um manejo adequado. Isto porque que há uma maior potencialidade à erosão nessas regiões, conseqüentemente, essas são as áreas de maior prioridade à adoção de medidas mitigadoras e compensatórias, como por exemplo, o reflorestamento da floresta e recomposição da mata ciliar.

**Figura 10. Áreas por classe de suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão.**



Fonte: Os autores (2022).

É importante ressaltar que o método *Analytic Hierachy Process* (AHP) como suporte à tomada de decisão, com múltiplos critérios com variáveis hierárquicas de solução. Cabe ao decisor, a

ponderação adequada na escolha do fator que receberá o maior ou menor peso com relação à sua importância na tomada de decisão (RAFFO, 2012; REIS; LÖBLER, 2012). No entanto, a

precisão dos pesos não é uma condição fundamental, mas um valor estimado, pois pela teoria de autovalores, o julgamento do decisor pode causar uma pequena perturbação em torno de um autovalor simples, mas o autovalor principal ainda é recíproco (SAATY, 2008; SAATY, 1994). No processo de decisão é fundamental definir e avaliar as alternativas e os critérios relevantes do problema e determinar a avaliação global de cada alternativa (SAATY; SHANG, 2011). As variáveis de maior importância transmitem a sua maior influência para as variáveis menos importantes, em níveis hierárquicos inferiores, que por sua vez contribuem também com a funcionalidade e coerência nos níveis superiores

### CONCLUSÃO

A utilização de geotecnologias torna-se cada vez mais importante no desenvolvimento de diferentes trabalhos voltados as áreas de risco ambiental. As integrações de dados, como álgebras de mapas e análise multicriterial, geram informações espaciais, que possibilitam análises mais detalhadas dos agentes desencadeadores e intensificadores de diversos processos de degradação ambiental, dentre eles a erosão e o assoreamento.

Os produtos cartográficos gerados através dos procedimentos adotados no presente estudo demonstram um bom resultado, sendo capazes de traduzir a realidade ambiental da BHRS de forma simples e de fácil interpretação. Assim, pode-se concluir que:

- A aplicação da metodologia AHP somada a álgebra de mapas para elaboração do mapeamento, tanto da suscetibilidade quanto da vulnerabilidade aos processos erosivos, se mostraram eficazes. Permitindo identificar as áreas prioritárias a recuperação e preservação das suas características de cobertura vegetal;
- A vegetação nativa é fundamental na estabilização das encostas, no equilíbrio dos mananciais, na proteção dos solos, na dinâmica externa e interna das águas e possibilita uma melhor capacidade de suporte das pastagens e atividades agrícolas manejadas;
- As áreas com a manutenção da cobertura vegetal permaneceram com baixo grau de potencialidade à erosão. Assim, a exploração humana dos recursos naturais, principalmente devido a diminuição das áreas de floresta para a expansão das áreas de pastagem, interfere no equilíbrio dinâmico da BHRS de forma negativa, aumentando a vulnerabilidade aos processos geológicos exógenos;
- É importante evitar a transição entre os meios de baixa para alta vulnerabilidade erosiva, a partir, por exemplo, da adoção de práticas conservacionistas e sustentáveis, como implantação de sistemas agroflorestais, preservação e recomposição da cobertura vegetal ciliar e reflorestamento com espécies nativas. Além da minimização da degradação do solo, essas contramedidas são ações eficazes na para a melhoria da qualidade e quantidade hídrica superficial. Portanto, é importante a ação conjunta entre envolvimento político, agricultores, profissionais especializados e a população em geral;
- A zona central da bacia é uma área problemática devido à intensa atividade pastoreia somado aos solos de alta erodibilidade, declividade moderada e moderada/alta erosividade. Essa região necessita de maior atenção quanto ao manejo e uso adequado do solo, já que possui altíssima vulnerabilidade a erosão, pois a erosão acelerada normalmente se inicia a partir da conversão da vegetação nativa em pastagem e compactação dos horizontes superficiais do solo pelo pisoteio do gado;
- Os produtos cartográficos, gerados neste estudo, podem ser considerados documentos técnicos capazes de auxiliar e dar subsídio a técnicas adequadas de manejo, uso e ocupação do solo, uso dos recursos hídricos, identificação de áreas prioritárias para recuperação e/ou criação de unidades de conservação;
- A aplicação do modelo deve ser utilizada nas fases de diagnóstico, pois não substitui as verificações de campo quando forem tomadas as decisões de forma pontual, destacando, portanto, as áreas que merecem atenção especial. A metodologia aplicada possibilita a utilização constante de novos dados temáticos, escalas de detalhe e mapeamentos de campo.

## REFERÊNCIAS

- AMARO, V. E.; CARVALHO, R. C.; MATOS, M. F. A.; INGUNZA, M. D. P. D.; SCUDELARI, A. C. Avaliação da suscetibilidade do solo à erosão nas falésias do litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n.1, p. 3 – 25, 2021.
- AVANZI JC, SILVA MLN, CURI N, NORTON LD, PESKOW S, MARTINS SG. Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic Forest. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 5, p. 427-434, 2013.
- BALDASSARINI, J. S.; NUNES, J. O. R. Recuperação de áreas degradadas por erosão hídrica em propriedades rurais nos municípios de Getulina e Vera Cruz-SP. **Geografia**, v. 41, n. 3, p. 447 - 465, 2016.
- BARBOSA, A. M. F.; OLIVEIRA A. R.; SILVA L. C. S.; SOUZA R. M.; SANTOS, S. S. C. Bacias hidrográficas e os conflitos pelos usos das águas no estado de Sergipe. **Confins**, v. 40, p. 34 – 45, 2019.
- BARROS, G. V. P.; GOMES, H. B.; SANTOS, F. S.; CRUZ, M. A. S.; NASCIMENTO, P. S. R.; COSTA, R. L.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. S. Eficiência de redes neurais artificiais na classificação de uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba - SE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, p. 823 - 833, 2020
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS L. F.; MONKE E. J. ANSWERS: A Model for Watershed Planning. **Transactions of the ASAE**, v. 23, p. 938 – 944, 1980.
- BISPO, P. C.; ALMEIDA, C. M.; VALERIANO, M. M.; MEDEIRO, J. S.; CREPANI, E. Avaliação da suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião-SP com o uso de técnicas de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais [...]** São José dos Campos: INPE, p. 3583 - 3590, 2009.
- BLACKBURN W.H. et al. The WEPP Model and Its Applicability for Predicting Erosion on Rangelands. In: SSSA Special Publication [Internet]. Soil Science Society of America, 1994. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssaspecialpubl/variabilityinra/11>.
- BRADY, N. C. Erosão do solo e seu controle. In: FIGUEIREDO FILHO, A. B. N. (Org.). **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.
- BYUN J.; HEIMSATH, A. M., SEONG, Y. B.; LEE, S. Y. Erosion of a high-altitude, low-relief area on the Korean Peninsula: implications for its development **processes and evolution**. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 13, p. 1730 – 1745, 2015.
- CALDAS, V. I. S. P.; SILVA A. S.; SANTOS, J. P. C. 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**, v.12, n.4, p. 1415-1430, 2019.
- CALDERANO, F. B.; POLIVANOV, H.; CARVALHO J. W. D.; CHAGAS, C. D. S.; CALDERANO, S. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de regiões tropicais montanhosas com suporte de SIG. **Revista de Geografia**. v. 35, p. 269 – 288, 2018.
- CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. Análise espacial de eventos. In: DRUCK, S; CARVALHO, S. M CÂMARA, G.; MONTEIRO, M, A. V. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004, Cap. 2.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: integrating Remote Sensing and GIS with object-oriented data modelling. **Computer and Graphics**. v.15, n.6, p.13 - 22, 1996.
- CÂNDIDO MC, SILVA ML, CURI N, BATISTA PVC. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na Bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 1565 – 1575, 2014.
- CARVALHO, A. P. P.; GUERRERO, J. V. R.; SILVA, E. V. E.; PINTO, M. J. R.; VAZ, R. M. G. F. C.; Pereira, C. T.; Lorandi, R.; Lollo, J. A.; Moschini, L. E. Fragilidade ambiental à erosão em uma Bacia Hidrográfica antropizada no Nordeste do Estado de São Paulo, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, p. 7 – 18, 2019.
- CORREA, A. C. B.; BARROS, A. C. M.; ALMEIDA, J. D. M. Revisitando os Altos Pelados: desertificação e os processos superficiais na Bacia do Riacho Grande-PB. **Revista de Geografia**, v. 33, n. 4, p. 334 – 355, 2016
- COSTA JUNIOR, C.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono total e  $\delta^{13}C$  em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1241 - 1252, 2011.
- 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, 2001,103p.
- DOBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M.F.;

BIEHL, L.; HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. **Geoderma**, v. 97, p. 367 – 391, 2000.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; 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. 103p.

EL-MAGD, S. A. A.; ORABI, H., ALI, S. A.; PARVIN, F.; PHAM, Q. B. An integrated approach for evaluating the flash flood risk and potential erosion using the hydrologic indices and morpho-tectonic parameters. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n., p. 693 – 710, 2021.

ELLISON, W. D. Soil Erosion Studies. **Soil Science Society of America Journal**, v.12, p. 479 - 484, 1947.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

FIGUEIREDO, A. V. A.; MAROTI, P. S. Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe - significado, identidade e escolha de usos a partir da percepção dos membros do comitê (gestão 2008-2010). **Revista Eletrônica do Prodepa**, v. 7, n.2, p. 22 - 41, 2011.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FRANÇA, M. V.; MEDEIROS, R. M.; ARAÚJO, W. R.; HOLANDA, R. M. Variabilidade dos índices de aridez e aplicabilidade da equação de perda de solo no município de Amparo de São Francisco - Sergipe, Brasil. **Research Society and Development**, v. 9, n. 10, p. 1-25, 2020.

FRANÇA, L. C. J.; MUCIDA, D. P.; MORAIS, M. S.; CATUZZO, H.; ABEGÃO, J. L. R., PEREIRA, I. M. Zoneamento da fragilidade ambiental de ecossistemas naturais e antropizados por meio de avaliação multicritério. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 589-599, 2019.

FRANCO, L. S.; FIGUEIREDO, F. T.; GOMES, P. V. O.; ARAÚJO, I. B. A. Análises hierárquica e de regressão linear aplicadas aos mapeamentos de suscetibilidade e de risco aos movimentos de massa (Bairro Cidade Nova, Aracaju – SE, Brasil). **Geologia USP**, v. 21, n. 3, p. 85 - 107, 2021.

FREE, C. R. Erosion characteristics of rainfall. **Agricultural Engineering**, v. 41, p. 447 – 449, 1960.

FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; CASTRO, N. E. A.; CARDOSO, D. P.; DIAS, A. C.; CARVALHO, G. J.

Modelagem da proteção do solo por plantas de cobertura no sul de Minas Gerais. **Agroambiente**, v. 6, n. 2, p. 117-123, 2012.

GUIMARÃES, L. J. R.; SANTOS, L. J. C. L. Levantamento das áreas potenciais à erosão laminar como suporte à detecção das áreas-fonte ao assoreamento na barragem Piraquara 1. **Revista Eletrônica Geografar**, v. 2, n. 2 p. 172 - 188, 2007.

GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F. **Movimentos de massa**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 23, n. 1, p. 145-154, 1999.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275 – 370, 1945.

HUFFMAN, G. J.; STOCKER E. F.; BOLVIN D. T.; NELKIN E. J.; JACKSON T. A. N. **GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06 (GPM\_3IMERGM)**, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Disponível em: <[https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM\\_3IMERGHH\\_06/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary)>. Acesso em: 14 nov. 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Projeto Topodata. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>. Acessado em 31 mai 2020.

ISDR – International Strategy for Disaster Reduction. **Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Geneva: World Meteorological Organization and the Asian Disaster Reduction Center, 2004.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005, Goiânia. **Anais [...]** São José dos Campos, p. 2203 - 2210 2005.

KIEFER, A. P.; COSTA, R. M.; PETSCH, C.; SCCOTI, A. A. V. Panorama das Alterações nos Padrões de Precipitação e Erosão diante de Mudanças Climáticas: Revisão de Literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n. 3, p. 1724 – 1747, 2021.

LAL, R. Soil erosion in Western Nigeria. **Geoderma**, v. 16, p. 389 – 401, 1976.

- LEPSCH, I. F. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas: SBCS/Ministério da Agricultura, 1983.
- LIBÓRIO, M. P.; MARTINUCI, O. S.; HADA, R. M.; SILVA, F. F. M. Procedimento para compatibilizar mapas em diferentes escalas e o problema da mudança de suporte espacial. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 21, n. 74, p. 126-141, 2020.
- LIANG, Z.; LIU, H.; ZHAO, Y.; WANG, O.; WU, Z.; DENO, L.; GAO, H. Effects of rain intensity, slope angle, and vegetation coverage on the erosion characteristics of Pisha sandstone slopes under simulated rainfall conditions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 17458 – 17467, 2020.
- LIMA, M. T. V.; OLIVEIRA, C. W.; MOURA-FÉ, M. M. Análise multicritério em geoprocessamento como contribuição ao estudo da vulnerabilidade à erosão no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 3156 – 3172, 2021.
- LISBOA, F. T.; BARROS, G. V. P.; NASCIMENTO, P. S. R. Análise da vulnerabilidade ao processo erosivo das encostas: estudo de caso no município de Itaporanga D'Ajuda (SE). **Ciência e Natura**, v. 42, p. 1 – 19, 2020.
- LOCH, R. E. N. **Cartografia**: representação, comunicação e visualização de dados espaciais. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.
- LORITZ, R.; KLEIDON, A.; JACKISCH, C.; WESTHOFF, M.; EHRET, U.; GUPTA, H.; ZEHE, E.: A topographic index explaining hydrological similarity by accounting for the joint controls of runoff formation. **Hydrology Earth System Science**, v. 23, p. 3807 – 3821, 2019.
- MACEDO, M. A.; RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, M. L. G. Diagnóstico da fragilidade física de parque natural utilizando ferramentas de geoprocessamento **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.4, p. 2059 – 2070, 2021.
- MAFRA, R. C.; PINHEIRO, M. M. F.; CICERELLI, R.E.; OSCO, L. P.; ALVES, M. R.; RAMOS, A. Validação de mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina. P. M. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n. 2, p. 564 – 575, 2020.
- MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. **Lançamos a Coleção 6 (1985-2020)**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/lançamentos/>. Acessado em 15 set 2021.
- MARTINS, V. E.; BERGMANN, M. D.; SCHMIDT, M. A. R. Integração de SIG com técnica AHP na identificação de locais com vulnerabilidade a erosão hídrica de uma Micro Bacia Hidrográfica em contexto de Mata Atlântica. **Revista de Geografia**, v. 38, n. 3, p. 136 -153, 2021.
- MEDEIROS, R. M.; FRANÇA, M. V.; HOLANDA, R. M.; SABOYA, L. M. F.; CUNHA FILHO, M; ARAÚJO, W. R. Índice de Erosividade na Bacia Hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba – Paraíba, Brasil. **Society and Development**, v. 10, 17, p. 1 -11, 2021.
- MEIRELLES, E. O.; DOURADO, F.; COSTA, V. C. Análise multicritério para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do Rio Paqueta - RJ. **Geo UERJ**, n. 33, p. 1 - 22, 2018
- MERCHANT, J. W.; NARUMALANI, S. Integrating remote sensing and geographic information. In: WARNER, T. A.; NELLIS, M. D.; FOOD, G. M. **The SAGE Handbook of Remote Sensing**. Thousand Oaks: SAGE Publications Inc. Cap. 18, p. 257-268, 2009.
- MINEO, C.; RIDOLFI, E.; MOCCIA, B.; RUSSO, F.; NAPOLITANO, F. Assessment of rainfall: kinetic-energy-intensity relationships. **Water**, v. 11, p. 1 – 23, 2019.
- NAGHETTI, M. N.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Giovanni**: the bridge between data and Science. Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Acessado em 15 set 2021.
- NASCIMENTO, P. S. R. **Subsídio à gestão ambiental hidroviária: o empreendimento hídrico Santa Maria da Serra**. 2004. 189f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.
- NEARING, M. A.; YIN, S.; BARRELI, P.; POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: na historical review. **Catena**, v. 157, p. 357 – 362, 2017.
- NASCIMENTO, P. S. R. Environmental management of Santa Maria da Serra Waterway System – SP, Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**. v.5, p.63 - 71, 2015
- NASCIMENTO, P. S. R.; GARCIA, G. J. Mapa generalizado semi-automático de declividade realizado pelo Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas (SPRING). **Geoambiente On-Line**, v. 2, p. 1 – 19, 2004.
- NASCIMENTO, P. S. R.; PETTA, R. A. Análise das similaridades das cartas de vulnerabilidade à erosão realizados por dois operadores de álgebras de mapas. **Revista da Escola de Minas**, v.61, p.135 - 140, 2008.

- NASCIMENTO, P. S. R.; PETTA, R. A. Subsídio metodológico para a gestão ambiental hidroviária. **Geonordeste**, v.23, p.66 - 86, 2012.
- PRASHANTH, M.; KUMAR, A.; DHAR, S.; VERMA, O.; GOGOI, K. Hypsometric Analysis for Determining Erosion Proneness of Dehar Watershed, Himachal Himalaya, North India. **Journal of Geosciences Research**, v. 7, n.1, p. 86-94, 2022.
- PÔSSA, E. M. VENTORINI, S. E. Mapeamento digital da Bacia do Córrego do Júlio – São João Del-Rei – MG como suporte ao diagnóstico geoambiental. **Boletim Geográfico**, v. 33, n. 1, p. 64 – 80, 2015
- QGIS Development Core Team. **QGIS Geographic Information System**. A Free and Open Source Geographic Information System 2020. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/>. Acessado em 31 mai 2020.
- QUEIROZ, K. B.; RIBEIRO, G. N.; SILVA, V. F.; SANTOS, D. Potencial natural de erosão e limite de tolerância de perdas de solo na Bacia Hidrográfica do Açude do Namorado, Paraíba. **Revista GEAMA**, v. 7, n. 3, p. 36 – 48, 2021.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 47, p. 241 - 262, 2003.
- RAFFO, J. G. G. O processo analítico hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia–USP**, Volume Especial, p. 26 –37, 2012.
- REIS, E.; LÖBLER, M. L. O processo decisório descrito pelo indivíduo e representado nos Sistemas de Apoio à Decisão. **RAC**, v. 16, n. 3, art. 4, p. 397 - 417, 2012.
- RIBEIRO, T. C. S. C. **Probabilidade e estatística**. Londrina: Educacional, 2015, 232p.
- RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURTI, N.; KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 16-31, 2016.
- RUSSO, R. F. S. M.; CAMANHO, R. Criteria in AHP: A Systematic Review of Literature. **Procedia Computer Science**, v. 55, p. 1123 –1132, 2015.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Science**, v. 1, n. 1, p. 83 – 98, 2008.
- SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9 - 26, 1990.
- SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19-43, set. 1994.
- SAATY, T. L.; SHANG, J. An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-Based Multicriteria Decision Making: prioritizing divergent intangible humane acts. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 703 –715, 2011.
- SAMPAIO, T.; BRANDALIZE, M. C. B. **Cartografia geral, digital e temática**. Curitiba: UFPR, 2018, 210p.
- SANTANA, W. O.; PEREIRA, J. L.; PEREIRA, J. R.; VOLVAPATO, S. B.; BECK, A. J.; LADDWIG, N. I. Suscetibilidade a escorregamentos na Bacia Hidrográfica do Rio Cedro. In: LADDWIG, N. I.; CAMPOS J. B. (Orgs). **Planejamento e gestão territorial: inovação, tecnologia e sustentabilidade**. Criciúma: EDIUNESC, 2020.
- SANTOS, A. R.; LOUZADA, F.L.R.O.; EUGENIO, F.C. **ARCGIS 9.3 total: aplicações para dados espaciais**. Alegre: CAUFES, 2010. 185p.
- SANTOS, L. A. N. **Geoprocessamento aplicado na análise da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba – SE**. 2019. 27f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.
- SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. R. Espacialização da suscetibilidade erosiva a partir da densidade de drenagem pelo interpolador Kernel. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19. Santos, 2019. **Anais...São José dos Campos: INPE**, 2019, p. 27 –30.
- SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. R.; BARROS, G. V. P. Processamento analítico hierárquico no mapeamento da fragilidade ambiental à erosão do solo. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 8, n. 4, p. 275 - 298, 2020.
- SANTOS, M. S.; NASCIMENTO, P. S. R. Análise da suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão hídrica pelo processo analítico hierárquico (AHP). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 9, n. 1, p. 1-19, 2021.
- SCHWARZ, R. A. **Perdas por erosão hídrica em diferentes classes de declividade, sistemas de preparo e níveis de fertilidade do solo na região das Missões – RS**. 1997, 144f. Dissertação (Mestrado em



Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SEMARH. Secretária de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju: SRH, 2021.

SERAFIM, M. B.; BONETTI, J. Vulnerabilidade das praias do Estado de Santa Catarina a eventos de erosão e inundação costeira: proposta metodológica baseada em um índice multicritério. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 8., n. 2, p. 36 – 54, 2017.

SERGIPE. **Bacias Hidrográficas do Estado de Sergipe**. Aracaju: SRH, 2013, 46p.

SILVA, J.R.M.; RODRIGUES, J.A.M.; OLIVEIRA, L.F.C.; VIOLA, M. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.14, n.1, p. 119 - 132, 2021.

SILVA, T. J. R. D.; LEITE, J. C. A.; CAVALCANTI, A. K. G.; DANTAS, J. S.; SOUSA, F. Q.; NASCIMENTO, M. B.; MEDEIROS, J. L. S.; ROCHA NETO, O.; CAMPOS, G. M.; SANTOS, L. C. A. Análise da susceptibilidade à erosão hídrica em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.3, p. 1443 – 1457, 2021.

SMITH, K. **Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster**. New York: Routledge, 2004.

SOARES, C. B. R.; MARTINS, A. P. Análise empírica da fragilidade ambiental na Microrregião Rio Vermelho (GO). **Geosul**, v. 36, n. 80, p.68 - 94, 2021.

SOUZA JÚNIOR, C. M.; SIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 1 – 27, 2020.

SOUZA, D. S. L.; DELLARGINE, F. L.; MIRA, Í. R. C.; SILVA, G. T. G.; SILVA, M. L. Análise e mapeamento da fragilidade ambiental no município de Inconfidentes – MG. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.13, n.5, p. 2269 – 2292, 2020.

SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. Análise de perda do solo por erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Coreaú (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p.491 - 507, 2019.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topograph. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117 – 1141, 1952.

THOMA, A. C.; FERNANDES, E. P.; RODRIGUES, E. F.; SANTOS, L. L.; SILVA, A. C.; PRAT, B. V. Blocos de solo-cimento para contenção de erosão hídrica. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 16, p. 1057 – 1070, 2020.

TONIOLO, B. P.; PAIXÃO, B. M.; SILVA, D. C. C.; MEDEIROS, G. A.; PECHE FILHO, A, RIBEIRO, A. J. Análise espacial da perda de solo por erosão na Bacia Hidrográfica do Jundiá-Mirim – SP. **Revista Brasileira de Desenvolvimento Territorial Sustentável**, v. 7, n. 2, p. 209 – 236, 2021.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE/SUPREN, 1977. 97p.

TRINDADE-SANTOS, M. E.; CASTRO, M. S. Manejo ecológico do solo: chave para o processo de transição agroecológica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 16, n. 1, p. 16 – 27, 2021.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 32, p. 300-309, 2012.

WAND, M.P.; JONES, M.C. **Kernel smoothing**. New York: Chapman & Hall/CRC, 1995. 39p.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. **Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP)**. I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n. 2, p. 801 - 814, 2008.

VENANCIO, A. S.; PANCHER, A. M.; CUNHA, C. M. L.; MACHADO, F. B., SOARES JUNIOR, A. V. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Várzea Paulista (SP) utilizando os sistemas de informação geográfica. **Geociências**, v. 32, n. 1, p. 81 – 92, 2013.

WISCHMETER, W.H. SMITH, D. D. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v.23, n.3, p. 246-149, 1959.

YOUNG, R.A.; ONSTAD, C.A.; BOSCH D.D.; ANDERSON, W.P. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 44, p. 168–73, 1989.