

Article

Suscetibilidade à Erosão da Bacia Hidrográfica do Rio Macumiri - AM com base em Análise Multicritério e Álgebra de Mapas em Ambiente SIG

Ivy de Araújo Alves¹, Rodrigo Couto Alves², Alex Martins Ramos³

¹ Graduado em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal do Amazonas. ORCID: 0000-0003-1978-9462. E-mail: ivy.alves@ufam.edu.br

² Doutor em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade. Docente na Universidade Federal do Amazonas. ORCID: 0000-0002-7452-9455. E-mail: rcouto@ufam.edu.br

³ Doutor em Engenharia Química. Docente na Universidade Federal do Amazonas. ORCID: 0009-0005-1464-6624. E-mail: alexmartins@ufam.edu.br

RESUMO

A erosão do solo constitui um dos principais processos de degradação ambiental em bacias hidrográficas tropicais, sendo fortemente condicionada por fatores naturais e pelo uso da terra. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo identificar áreas com suscetibilidade à erosão laminar na bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri, localizada no estado do Amazonas - Brasil, por meio da modelagem espacial em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A metodologia foi estruturada em duas etapas: diagnóstico ambiental da bacia e aplicação de análise multicritério de apoio à decisão, integrando variáveis de pedologia, de declividade e uso e cobertura da terra. Os dados foram processados no software QGIS, utilizando álgebra de mapas e técnicas de geoprocessamento, com atribuição de pesos e notas às variáveis conforme sua influência no processo erosivo. Os resultados indicaram predominância de suscetibilidade média à erosão, associada principalmente a áreas com declividades intermediárias e cobertura florestal, enquanto áreas de alta suscetibilidade foram espacialmente restritas e relacionadas a condições naturais específicas, como solos arenosos e maior inclinação do terreno. A análise evidenciou que a cobertura vegetal exerce papel fundamental na mitigação dos processos erosivos, mesmo em ambientes naturalmente frágeis. Conclui-se que a integração entre análise multicritério e álgebra de mapas em ambiente SIG mostrou-se eficiente na identificação de áreas vulneráveis, fornecendo subsídios técnicos relevantes para o planejamento ambiental e a gestão sustentável de bacias hidrográficas amazônicas.

Palavras-chave: análise multicritério; erosão do solo; geoprocessamento; modelagem espacial; vulnerabilidade ambiental.

ABSTRACT

Soil erosion is a major environmental degradation process in tropical watersheds, strongly influenced by natural factors and land use dynamics. In this context, the present study aimed to identify areas susceptible to laminar erosion in the Macumiri Stream basin, located in Amazonas State – Brazil, through spatial modeling using a Geographic Information System. The methodology was structured in two main stages: environmental diagnosis of the watershed and application of a multicriteria decision analysis integrating soil properties, slope, and land use/land cover variables. Data processing was conducted in QGIS using map algebra and geoprocessing techniques, with weighted criteria assigned according to their relative influence on erosion processes. The results revealed a predominance of moderate erosion susceptibility, mainly associated with intermediate slope gradients and forested areas, while high-susceptibility zones were spatially limited and linked to specific natural conditions such as sandy soils and steeper terrain. The analysis highlighted the critical role of vegetation cover in mitigating soil loss, even in inherently fragile environments. It is concluded that the integration of multicriteria analysis and map algebra within a GIS framework is an effective approach for



Submissão: 28/09/2024



Aceite: 22/05/2026



Publicação: 18/06/2026



identifying erosion-prone areas, providing robust technical support for environmental planning and sustainable watershed management in Amazonian regions.

Keywords: multicriteria analysis; soil erosion; geoprocessing; spatial modeling; environmental vulnerability.

Introdução

A erosão do solo constitui um dos principais processos de degradação ambiental em escala global, afetando diretamente a estabilidade dos ecossistemas e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Esse processo, especialmente em sua forma laminar, promove a remoção gradual das camadas superficiais do solo, comprometendo suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Estudos recentes apontam que a intensificação da erosão está associada às mudanças no uso da terra e à variabilidade climática, o que amplia sua magnitude e complexidade espacial (Borrelli et al. 2017; Hidalgo et al. 2025; Stefanuto et al. 2026). Nesse contexto, a compreensão dos fatores condicionantes da erosão torna-se essencial para subsidiar estratégias de manejo e conservação ambiental (Mandal e Roy 2024).

Em ambientes tropicais, como a Amazônia, os processos erosivos apresentam características particulares decorrentes da combinação entre elevada pluviosidade, solos altamente intemperizados e dinâmicas intensas de uso da terra. Essas condições favorecem a ocorrência de erosão hídrica, especialmente em áreas submetidas à remoção da cobertura vegetal (Bueno 2024; Colares et al. 2022; Lense et al. 2021). Além disso, a variabilidade espaço-temporal da erosividade das chuvas exerce papel determinante na intensificação desses processos, conforme evidenciado por Silva et al. (2020), que destacam a complexidade dos padrões erosivos na região amazônica. Dessa forma, a análise da suscetibilidade à erosão em bacias hidrográficas amazônicas exige abordagens integradas que considerem tais especificidades (Alves 2026; Baía et al. 2026; Colares et al. 2022; Lense et al. 2021).

A dinâmica do uso e cobertura da terra tem sido amplamente reconhecida como um dos principais fatores condicionantes da erosão do solo. Alterações como desmatamento, expansão agrícola e ocupação desordenada modificam significativamente a estrutura do solo e os padrões de escoamento superficial (Justino et al. 2025; MapBiomass 2024). Essas mudanças reduzem a infiltração de água e aumentam a energia do escoamento, intensificando a perda de solo por erosão laminar (Bueno 2024; Lense et al. 2021; Yakhlefoune et al. 2025; Yin et al. 2025). Nesse sentido, a análise integrada dessas variáveis torna-se fundamental para a compreensão dos processos erosivos em bacias hidrográficas, especialmente em regiões de fronteira agrícola.

O avanço das geotecnologias tem possibilitado uma análise mais precisa e integrada dos processos ambientais, destacando-se o uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Essas ferramentas permitem a integração e o processamento de múltiplas variáveis espaciais, favorecendo a modelagem da suscetibilidade à erosão em diferentes escalas (Longley et al. 2021; Viana et al. 2019). Nesse contexto, Fonseca e Filho (2023) evidenciam a relevância do SIG na análise geomorfológica aplicada, demonstrando sua eficiência na representação espacial de processos erosivos. Assim, o uso de SIG tem se consolidado como uma abordagem essencial para estudos ambientais em bacias hidrográficas (Wag e Manekar 2023).

Dentre as abordagens utilizadas na modelagem da suscetibilidade à erosão, destacam-se os métodos de análise multicritério, que permitem a integração de diferentes fatores condicionantes com base em sua relevância relativa. Técnicas como o Analytical Hierarchy Process (AHP) e a Sobreposição Pareada têm sido amplamente aplicadas, apresentando resultados consistentes na identificação de áreas vulneráveis (Alharbi 2024; Lira et al. 2022; Riquetiti et al. 2023; Silva 2025; Yuan 2022). Estudos desenvolvidos por Arabameri et al. (2018; 2019; 2020) demonstram a eficiência dessas abordagens na modelagem espacial da erosão, evidenciando sua capacidade de integrar variáveis como declividade, solos e uso da terra. Dessa forma, a análise multicritério se configura como uma ferramenta robusta no apoio à tomada de decisão em planejamento ambiental (Islam et al. 2022).



A álgebra de mapas representa uma etapa fundamental na integração das variáveis em ambiente SIG, permitindo a combinação matemática de diferentes camadas temáticas. Essa técnica possibilita a geração de modelos espaciais sintéticos, baseados na atribuição de pesos e valores às variáveis consideradas (Miranda 2019; Santos 2020). Quando associada à análise multicritério, a álgebra de mapas amplia a capacidade de representação espacial dos processos erosivos, tornando os modelos mais consistentes e aplicáveis (Arabameri et al. 2020; Fonseca e Filho 2023). Desta forma, sua aplicação tem se consolidado como um dos principais avanços metodológicos na modelagem ambiental contemporânea através da aplicação de técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG (Wang et al. 2021).

Apesar dos avanços na modelagem da suscetibilidade à erosão, ainda existem lacunas importantes no contexto amazônico, especialmente no que se refere à aplicação integrada de métodos multicritério e álgebra de mapas em bacias hidrográficas de menor escala. Muitos estudos concentram-se em outras regiões ou utilizam abordagens isoladas, sem considerar a complexidade dos fatores ambientais locais (Costa et al. 2020; Neto et al. 2025). Além disso, a escassez de dados detalhados e a limitada aplicação de modelos integrados dificultam a compreensão dos padrões espaciais de erosão na Amazônia (Colares et al. 2022; Silva et al. 2020; Justino et al. 2025). Nesse sentido, há uma demanda por estudos que avancem na integração metodológica e na análise espacial desses processos.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo identificar áreas com potencial à erosão laminar na bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri, localizada na calha do baixo rio Solimões, no estado do Amazonas, por meio da elaboração de um mapa de suscetibilidade à erosão utilizando técnicas de SIG. Ao integrar análise multicritério e álgebra de mapas, este trabalho busca contribuir para o avanço metodológico na modelagem de processos erosivos em ambientes tropicais, além de fornecer subsídios para o planejamento ambiental e a gestão sustentável dos recursos naturais na região amazônica (Arabameri et al. 2020; Fonseca e Filho 2023).

Metodologia

A metodologia proposta no presente estudo foi desenvolvida em duas etapas: i) Realização do diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica; e ii) Aplicação e modelagem do Método Multicritério de Apoio à Tomada de Decisão.

A Figura 1 apresenta o fluxograma simplificado da metodologia proposta.

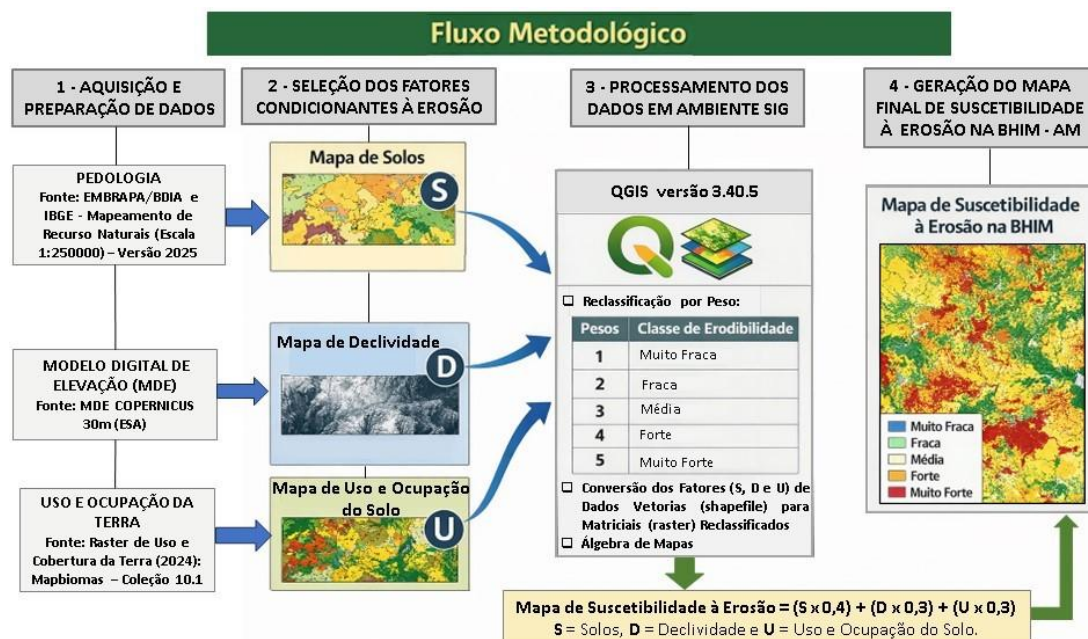


Figura 1: Fluxograma simplificado da metodologia proposta. Fonte: Autores



Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri, localizada zona rural do município de Manacapuru/AM (Figura 2), que se encontra na 7ª sub-região no médio rio Amazonas (ANA 2026). Sua sede municipal encontra-se à margem esquerda do Rio Solimões, na confluência com a foz do pequeno rio que dá nome ao município, localizada nas coordenadas 60° 36' 55,378" Oeste e 3° 17' 23 " Sul. O município de Manacapuru, possui uma área territorial de aproximadamente 7.336,58 km² (IBGE 2026). A BHIM faz parte da calha do baixo Rio Solimões, possui uma área total calculada dentro do software QGIS versão 3.40.5 Bratislava em aproximadamente 562,94 km², que corresponde a 7,67% do território municipal e o rio principal da bacia possui uma extensão estimada em aproximadamente 42,50 km a partir do enxutório da bacia.

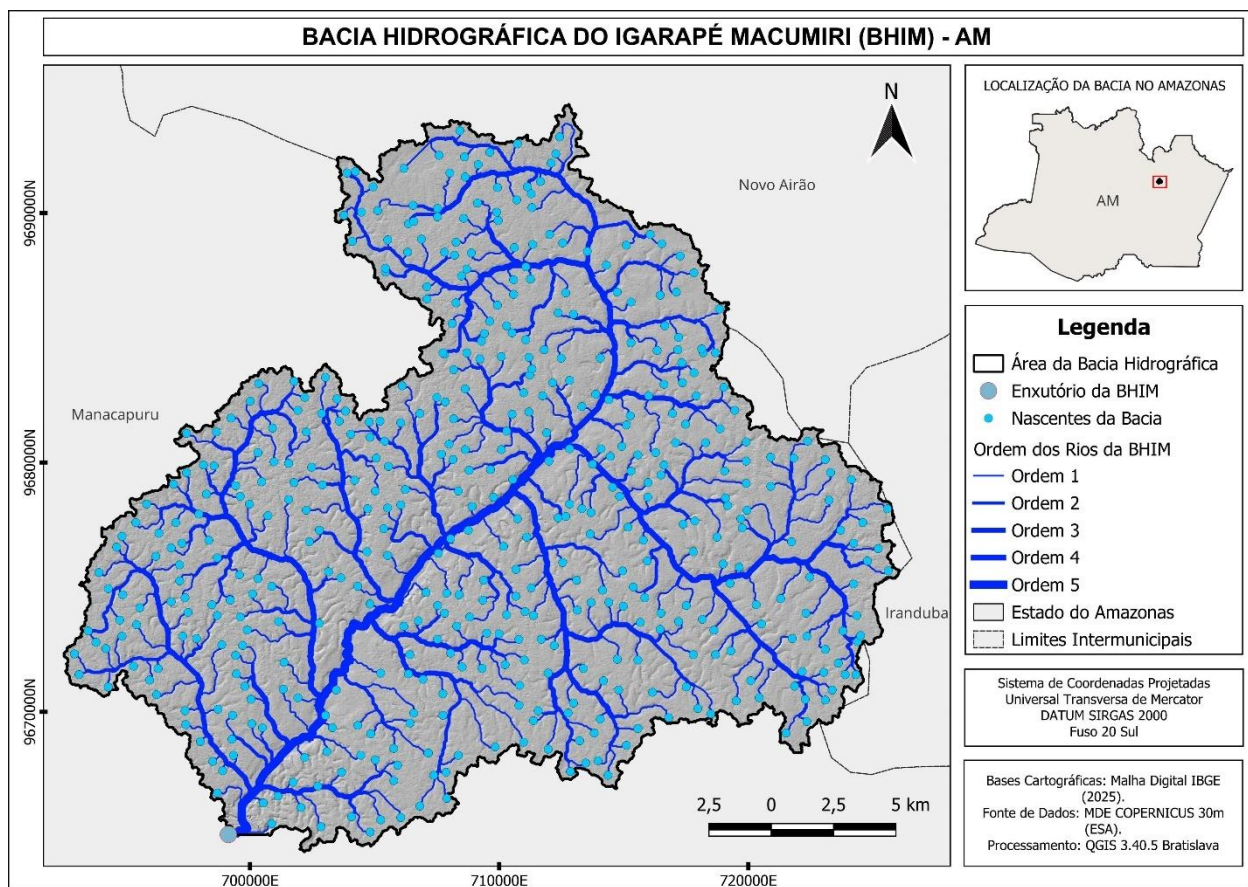


Figura 2: Localização da bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri/AM. Fonte: Autores.

Diagnóstico ambiental da bacia

O diagnóstico ambiental da BHIM foi realizado de modo a identificar os principais problemas ambientais na qualidade da água gerados pelo uso e ocupação do solo com relação ao índice de fragilidade ambiental. Para isso, os principais fatores analisados no diagnóstico da fragilidade ambiental com relação a perda natural do solo, foram: uso e ocupação do solo; declividade e a pedologia.

Para o diagnóstico ambiental da BHIM adotou-se cada componente do método de geração de áreas com potencial à erosão laminar a através do cômputo da fragilidade ambiental na bacia. Tendo em vista o seu caráter empírico, o método de geração de áreas com potencial à erosão laminar, neste estudo, funcionou como um roteiro para identificação das inter-relações dos subcomponentes com o componente do meio ambiente (Figura 3). Para cada subcomponente foram aplicadas metodologias científicas consolidadas (Crepani 2001; Guerra et al. 2007; Ross 2023; Xaviel et al. 2010; Silva e Machado 2014), a fim de obter resultados consistentes na



identificação dos impactos sobre a qualidade da água superficial da BHIM ocasionados pela vulnerabilidade natural a perda de solo.

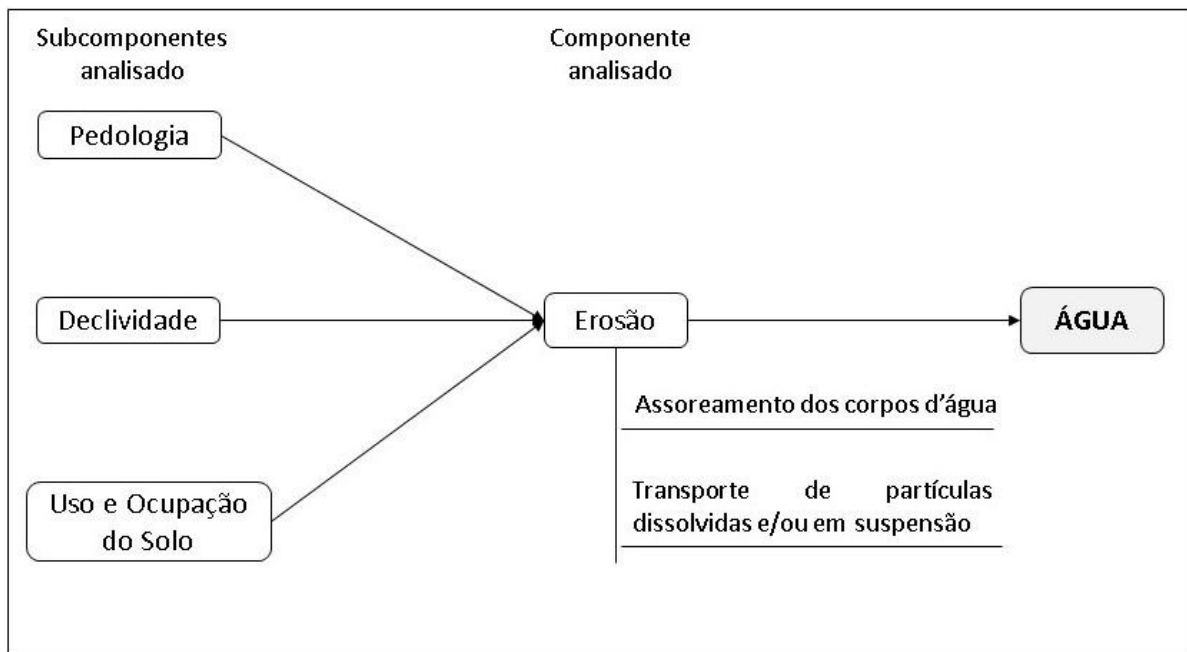


Figura 3: Diagrama de causa e efeito dos subcomponentes e componente analisados no diagnóstico ambiental da bacia do Igarapé Macumiri e suas implicações na qualidade da água. Fonte: Autores.

Erosão

Neste estudo, a identificação de áreas com potencial à erosão laminar na bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri - Amazonas, foi por meio da geração do mapa de suscetibilidade à erosão. Para a elaboração deste mapa, seguiu-se a metodologia descrita por Silva e Machado (2014), que se utiliza da análise multicritério. Sendo, que este tipo de análise permite realizar a investigação combinada de diferentes variáveis para gerar um mapa síntese.

As variáveis adotadas para este trabalho foram os subcomponentes: declividade, pedologia e uso e ocupação do Solo. A elaboração dos mapas e o cruzamento das informações foram realizados por meio do software QGIS versão 3.40.5 Bratislava (64 bits) lançamento de longa duração (LTR) (QGIS 2026).

Considerando o método multicritério, foram definidos pesos (0 - 100%) para cada subcomponente analisado de modo a diferenciar o grau de importância e correlação com o componente analisado em questão - erosão (suscetibilidade à erosão), e notas (1 a 5) para cada componente de legenda, de maneira que quanto maior a nota, maior a suscetibilidade erosiva (1: muito baixa; 2: baixa; 3: média; 4: alta; 5: muito alta), da mesma forma que sugerido por Silva e Machado (2014). O mapa final de suscetibilidade à erosão foi elaborado a partir do cruzamento dos parâmetros (álgebra de mapas) estabelecidos para os subcomponentes.

Para isso, o primeiro passo foi a geração do mapa pedológico da bacia hidrográfica, por meio do mapa pedológico do Brasil na escala 1:25000 disponível na base de dados do (IBGE, 2026). Demarchi e Zimback (2014), ressaltam que o mapa pedológico é muito importante na análise da suscetibilidade natural à erosão laminar, pois, o conhecimento dos tipos de solo, de suas propriedades e características hidrológicas, torna possível realizar análises de inferências acerca da suscetibilidade erosiva.

De acordo com Xavier et al. (2010), alguns solos são mais favoráveis à erosão que outros, mesmo quando apresentam algumas características em comum, como a declividade, a precipitação, a cobertura vegetal e as



práticas de controle de erosão serem iguais. As diferenças à suscetibilidade dão-se pelas propriedades intrínsecas ao solo, sendo referida como grau de erodibilidade do solo. Guerra et al. (2007) e Ross (2023) apontam que cada tipo de solo está associado à um grau de erodibilidade específico, variando em 5 classes de erodibilidade, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Classes de erodibilidade, importância dos tipos de solos na ocorrência de processos erosivos e notas estabelecidas para os componentes das unidades pedológicas.

Classe de Erodibilidade	Unidades Pedológicas	Peso (1 a 5)
I – Muito Fraco	Latossolo Roxo; Latossolo Vermelho Escuro e Vermelho Amarelo de Textura Argilosa; Solos Hidromórficos em Relevo Plano; Gleissolos; Planossolos; Organossolos; Neossolos Quartzarênico em Relevo Plano.	1
II – Fraco	Latossolo Amarelo e Vermelho Amarelo de Textura Média Argilosa; Terra Roxa Estruturada; Latossolo Vermelho Escuro.	2
III – Médio	Argissolos Vermelho Amarelo e Argissolo Vermelho Escuro; Textura Argilosa; Latossolo Vermelho Amarelo; Textura Argilosa e Média; Latossolo Vermelho Amarelo; Terra Bruna.	3
IV – Forte	Argissolo Vermelho Amarelo não abrupto; textura média-argilosa e média; Cambissolos; Argissolos Vermelho Amarelo de textura médio-arenosa; Plintossolos.	4
V – Muito Forte	Cambissolos; Neossolos Litólicos; Argissolos Vermelho Amarelo e Vermelho Escuro Abruptos, textura arenosa-média; Neossolos Quartzarênicos em relevos suave-ondulado e ondulado.	5

Fonte: Adaptado de Guerra et al. (2007), Ross (2023), Xavier et al. (2010).

Posteriormente, procedeu-se à caracterização pedológica da BHIM, utilizando dados provenientes do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA, 2025) e do Mapeamento de Recursos Naturais do IBGE (2025), na escala 1:250.000. O mapa pedológico original foi reclassificado com base nos índices de erodibilidade específicos para as classes de solos identificadas na região da bacia, permitindo a espacialização do potencial erosivo intrínseco de cada unidade de mapeamento.

Após a determinação das classes de erodibilidade dos solos da área de estudo, procedeu-se à elaboração do mapeamento de declividade. Para tanto, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (DEM) do projeto Copernicus GLO-30, com resolução espacial de 30 metros, obtido junto à Agência Espacial Europeia (ESA 2026). O processamento dos dados altimétricos foi realizado no ambiente do software QGIS versão 3.40.5 Bratislava, mediante a aplicação do algoritmo de análise raster (Raster > Análise > Declividade), o qual permitiu a derivação da inclinação do terreno em valores percentuais, fundamentais para a subsequente modelagem da perda de solo.

Em seguida, a declividade foi estratificada em cinco intervalos de classe, correlacionados aos respectivos graus de potencialidade erosiva (Tabela 2). Essa etapa de reclassificação foi executada no ambiente SIG QGIS, mediante o emprego do algoritmo r.reclass integrado ao módulo GRASS GIS. O procedimento seguiu a sintaxe específica para regras de reclassificação (Figura 4), permitindo a conversão dos dados contínuos de inclinação em categorias discretas de vulnerabilidade ambiental.



Tabela 2: Classes de Declividade, grau de erodibilidade e notas estabelecidas para os intervalos da declividade.

Declividade	Grau de Potencialidade Erosiva	Peso (1 a 5)
0 – 3%	Muito Fraca	1
3 – 8%	Fraca	2
8 – 12%	Média	3
12 – 20%	Forte	4
>20%	Muito Forte	5

Fonte: Adaptado de Xavier et al. (2010).

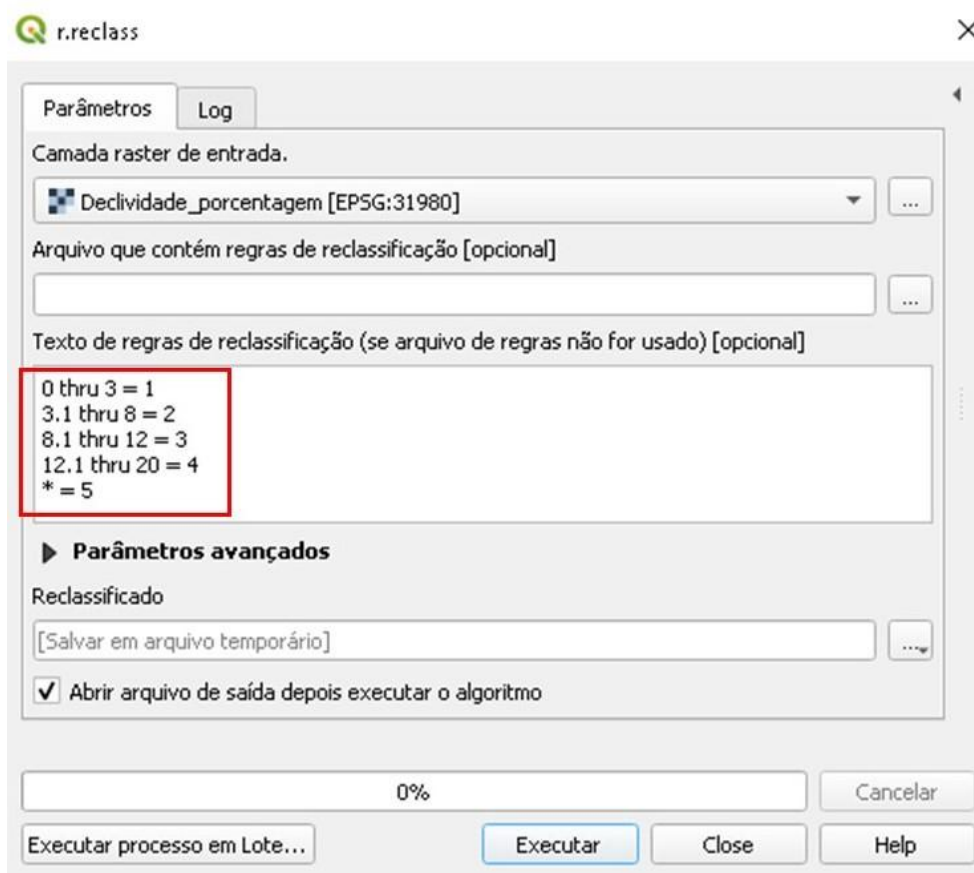


Figura 4: Texto de regras de reclassificação executadas no QGIS. Fonte: Autores.

Subsequentemente, elaborou-se o mapa temático de uso e cobertura da terra da BHIM. Para tanto, utilizou-se o dado raster da Coleção 10.1 do projeto MapBiomias (referente ao ano de 2024), com o tratamento geoespacial conduzido no software QGIS 3.40.5 Bratislava (MAPBIOMAS 2026). A discretização das classes permitiu a identificação e a espacialização dos diferentes usos da terra na área de estudo. A análise da vulnerabilidade aos processos erosivos associada ao uso do solo foi fundamentada nos critérios estabelecidos por Ross (1994) e Guerra et al. (2007), conforme sistematizado na Tabela 3.



Tabela 3: Classes de erodibilidade para o uso e ocupação do solo e notas estabelecidas para cada classe.

Classes	Uso e Ocupação	Peso (1 a 5)
1 – Muito Forte	Áreas desmatadas; solo exposto; agricultura não-conservacionista; cobertura vegetal de baixo porte, com intensa atividade antrópica.	5
2 – Forte	Culturas de ciclo longo com baixa densidade; culturas de ciclo curto; cobertura vegetal de baixo e médio porte; com atividade antrópica moderada.	4
3 – Médio	Cultivos de ciclos longos; pastagens com baixo pisoteio de gado; silvicultura; cobertura vegetal de baixo e médio porte, com atividade antrópica muito reduzida.	3
4 – Fraco	Formações arbustivas naturais; matas secundárias; cerrados e capoeiras; cobertura vegetal de porte alto a médio, com atividade antrópica muito reduzida.	2
5 – Muito Fraco	Florestas e matas naturais com biodiversidade, espelhos d'água e várzeas, cujo potencial erosivo pode ser considerado nulo.	1

Fonte: Adaptado de Guerra et al. (2007), Ross (2023), Xavier et al. (2010).

Após a elaboração dos mapas temáticos, procedeu-se à atribuição de pesos às variáveis e aos respectivos subcomponentes analisados. Os pesos intravariáveis, que discriminam a influência de cada classe interna, estão detalhados na Tabela 4. Complementarmente, a Tabela 5 apresenta os pesos ponderados adotados para cada fator analisado, refletindo a importância relativa de cada variável na composição do modelo final de vulnerabilidade.

Tabela 4: Notas estabelecidas para as variáveis dos subcomponentes analisados.

Subcomponente analisado	Variáveis do subcomponente analisado	Peso (1 a 5)
Pedologia	Espodossolo Humilúvico Hidro-Hiperespesso de textura arenosa em relevo plano	5
	Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico de textura indiscriminada em relevo plano	1
	Latossolo Amarelo Ácrico de textura muito argilosa em relevo suave ondulado	2
Declividade	0-3%	1
	3-8%	2
	8-12%	3
	12-20%	4
	>20%	5
Uso e Ocupação do Solo	Formação Florestal - cobertura vegetal de porte alto a médio, com atividade antrópica muito reduzida	1
	Floresta Alagável	1
	Campo Alagado e Área Pantanosa	1
	Formação Campestre	1
	Pastagem	2
	Áreas não vegetadas	5
	Corpo D'água	Máscara (NoData)

Fonte: Autores.



Tabela 5: Subcomponentes analisados e respectivos pesos.

Subcomponente analisado	Peso (0 - 100%)
Pedologia	40
Declividade	30
Uso e Ocupação do Solo	30

Fonte: Adaptado de Silva e Machado (2014).

Definidos os pesos ponderados atribuídos a cada variável conforme sua importância relativa no processo erosivo, aplicou-se o método de álgebra de mapas (Equação 1) por meio da calculadora raster do QGIS, visando a geração do mapa final de suscetibilidade à erosão. Este procedimento fundamenta-se no processamento de variáveis organizadas em estruturas matriciais, as quais permitem a integração de múltiplos critérios geográficos para a modelagem de fenômenos ambientais complexos (Santos et al. 2020). O mesmo destaca ainda, que a eficácia dessa técnica reside na capacidade de associar valores quantitativos a cada célula da grade operacional, buscando facilitar a tomada de decisão no manejo de bacias hidrográficas. Conforme salientam Ferreira e Bolfe (2022), a integração de dados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) confere ao pesquisador a autonomia necessária para ajustar a influência de cada fator ambiental de acordo com as especificidades da área de estudo.

$$E = (S * 0,4) + (D * 0,3) + (U * 0,3) \quad (1)$$

Onde:

E: Suscetibilidade à erosão (produto final);

S: Subcomponente pedologia (Mapa Pedológico);

D: Subcomponente relevo (Mapa de Declividade);

U: Subcomponente uso e cobertura da terra (Mapa de Uso e Ocupação);

Após o cruzamento das informações dos mapas temáticos via álgebra de mapas, os resultados foram estratificados em três classes de potencial à erosão laminar na bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri, fundamentadas nos critérios de Silva e Oliveira (2015):

Classe I – Baixo potencial: Indica que o uso atual do solo é compatível com a suscetibilidade à erosão laminar, apresentando estabilidade ambiental relativa.

Classe II – Médio potencial: Apresenta uso atual do solo moderadamente incompatível com a suscetibilidade local, sendo os processos erosivos passíveis de controle mediante a adoção de práticas conservacionistas adequadas.



Classe III – Alto potencial: Caracteriza-se pelo uso atual do solo altamente incompatível com a fragilidade natural do terreno, apresentando processos erosivos acentuados.

A etapa final consistiu na síntese desses dados para a elaboração do Mapa de Suscetibilidade à Erosão da BHIM, permitindo a espacialização das áreas prioritárias para manejo e conservação.

Resultados e Discussão

Com a aplicação da metodologia proposta, foram obtidos os mapas temáticos referentes a cada variável considerada nesta etapa do diagnóstico. A análise pedológica da Bacia Hidrográfica do Igarapé Macumiri (BHIM) revelou uma paisagem dominada por três unidades pedológicas principais: Latossolo Amarelo (LA), Gleissolo Háptico (GX) e Espodossolo Humilúvico (EK) (Figura 5). A distribuição espacial dessas classes e a quantificação de suas respectivas áreas de influência no potencial erosivo estão sistematizadas na Figura 6 e Tabela 6.

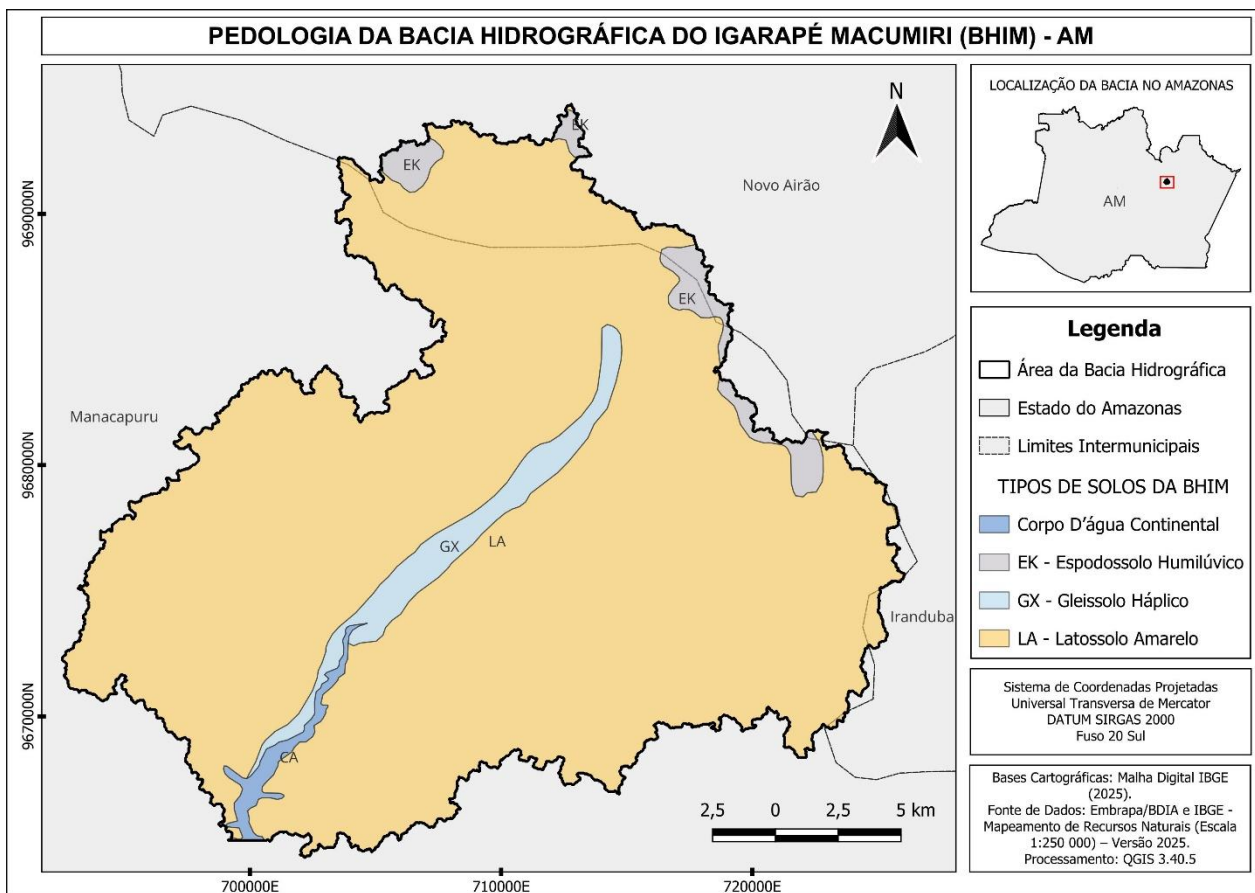


Figura 5: Mapa pedológico da BHIM. Fonte: Autores.

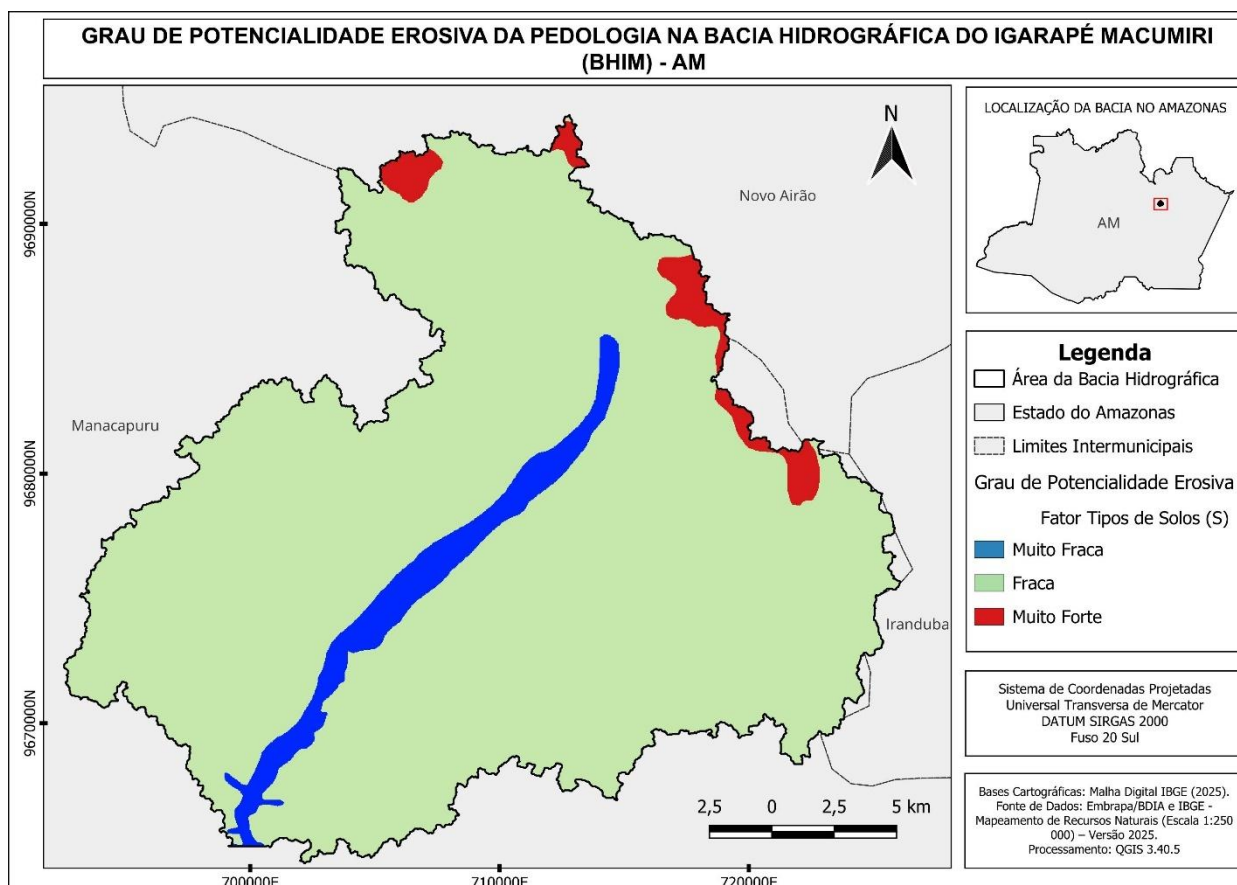


Figura 6: Mapa do grau de potencialidade erosiva do fator pedologia na BHIM. Fonte: Autores

Tabela 6: Percentuais de áreas do grau de potencialidade erosiva do fator pedológico na BHIM.

Classe de erodibilidade (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito Fraca	25,84	4,59
Fraca	522,81	92,87
Média	-	-
Forte	-	-
Muito Forte	14,29	2,54
Área Total	562,94	100

Fonte: Autores.

O Latossolo Amarelo (LA) é a classe pedológica dominante na bacia, correspondendo à classe de potencialidade erosiva "Fraca", que abrange a expressiva marca de 92,87% da área total (522,81 km²). Esta predominância confere à bacia uma estabilidade estrutural natural a erosão laminar em grande parte de sua extensão. Conforme apontado por Santos et al. (2018), os Latossolos Amarelos da região amazônica são solos profundos e bem drenados, o que favorece altas taxas de infiltração de água no perfil. Cientificamente, a baixa suscetibilidade observada corrobora os estudos de Couto et al. (2021), que associam a estabilidade desses solos à sua mineralogia e à formação de microagregados, os quais dificultam o desprendimento de partículas pela energia cinética das chuvas (efeito splash), desde que mantida a cobertura vegetal.

Em contraste, as áreas de maior vulnerabilidade estão restritas às porções onde ocorrem os Espodosolos Humilúvicos (EK). Esta unidade foi classificada com potencialidade "Muito Forte", ocupando 2,54% da BHIM (14,29 km²). Embora a área seja territorialmente reduzida, sua relevância ambiental é crítica. A fragilidade



extrema do EK está associada à sua textura arenosa e à baixa coesão entre partículas, propriedades que, segundo Silva e Teixeira (2023), tornam esses solos altamente susceptíveis à erosão hídrica e à formação de processos erosivos acelerados quando submetidos a intervenções antrópicas.

Por fim, a classe de potencialidade "Muito Fraca", vinculada aos Gleissolos Háplicos (GX) nas zonas de várzea, perfaz 4,59% da área (25,84 km²). Esta estabilidade é explicada pelo posicionamento topográfico de convergência de fluxo e pelo regime de saturação hídrica, que minimiza a energia cinética do escoamento superficial direto. Conforme discutido por Arantes et al. (2022) solos hidromórficos tendem a atuar como zonas de retenção, apresentando baixa exportação de sedimentos em bacias sedimentares, tornando essas áreas pedológicas receptoras de sedimentos, e não fontes, o que justifica a classificação de baixa erodibilidade no modelo de álgebra de mapas aplicado (Silva e Ferreira 2022).

A configuração pedológica da BHIM indica que, apesar de mais de 97% da bacia apresentar suscetibilidade de fraca a muito fraca, o manejo dos 2,54% (14,29 km²) de áreas críticas (Muito Forte) é determinante para a manutenção da qualidade hídrica e integridade do solo na região. Uma vez, que a remoção da vegetação nessas áreas críticas pode desencadear processos erosivos irreversíveis, comprometendo a integridade física da bacia e a qualidade dos corpos d'água a jusante.

O relevo da BHIM apresenta uma configuração predominantemente suavizada, típica das superfícies de terra firme e várzeas do Baixo Amazonas, conforme observado no Mapa do Grau de Potencialidade Erosiva do Fator Declividade (Figura 7). Os resultados obtidos da declividade reclassificada em intervalos percentuais de grau de potencialidade erosiva, indicam que as classes de potencialidade erosiva "Muito Fraca" (0-3%) e "Fraca" (3-8%) consolidam a maior parte da área, com 16,08% (90,52 km²) e 50,06% (281,79 km²), respectivamente, de acordo com os dados sistematizados na Tabela 7.

Tabela 7: Percentuais de área para cada grau de potencialidade erosiva da bacia do Igarapé Macumiri.

Declividade (%)	Classe de erodibilidade (%)	Área (km ²)	Área (%)
0 – 3	Muito Fraca	90,52	16,08
3 – 8	Fraca	281,79	50,06
8 – 12	Média	104,53	18,57
12 – 20	Forte	69,02	12,26
>20	Muito Forte	17,08	3,03
Área Total		562,94	100

Fonte: Autores.

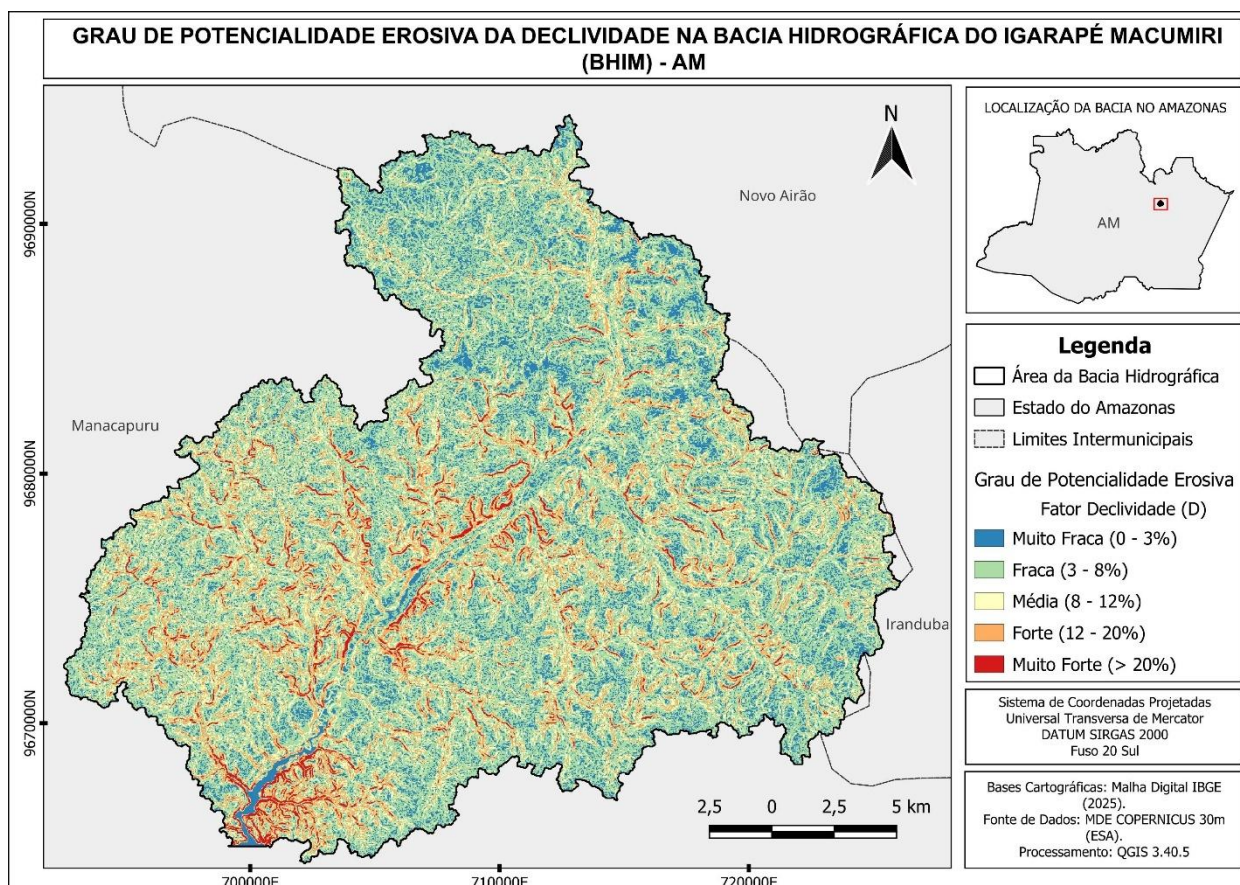


Figura 7: Mapa do grau de potencialidade erosiva do fator declividade na BHIM. Fonte: Autores.

Sob a ótica da dinâmica hidrossedimentológica, a predominância de declividades inferiores a 8% na BHIM favorece a infiltração da água no solo em detrimento do escoamento superficial (runoff). Conforme salientado por Colares et al. (2022) e Neto et al. (2025), em estudos na bacia amazônica, áreas com topografia plana a suave-ondulada funcionam como reguladores do ciclo hidrológico, minimizando a velocidade de transporte de sedimentos para os corpos hídricos. No entanto, o relevo suave não anula o risco erosivo se houver desmatamento, uma vez que a energia cinética das precipitações tropicais intensas pode desencadear o selamento superficial.

Por outro lado, a partir da análise da Tabela 7, é possível denotar que as áreas com declividade acima de 12% (classes Forte e Muito Forte) representam 15,29% da bacia (86,1 km²). Embora territorialmente menores, essas zonas de encostas e interflúvios mais movimentados, espacializadas na Figura 7, possuem implicações críticas para o ecossistema aquático. Segundo Santos et al. (2023), o aumento da inclinação do terreno eleva exponencialmente a capacidade de transporte do fluxo hídrico. Em eventos de chuvas extremas, comuns na região, essas encostas tornam-se as principais fontes de carga sólida para o Igarapé Macumiri.

A implicação direta desse processo na água é o aumento da turbidez e do aporte de nutrientes e agrotóxicos (se houver agricultura) para os canais de drenagem. Trabalhos similares realizados por Silva e Teixeira (2023) na Amazônia Ocidental demonstram que bacias com taludes acentuados apresentam picos de sedimentação que podem levar ao assoreamento de igarapés de baixa ordem, alterando o habitat da ictiofauna e a qualidade da água para consumo das populações ribeirinhas. A ocorrência de relevos estruturais e colinas na BHIM, mesmo que em apenas 3,03% da área na classe "Muito Forte", exige atenção especial em termos de Áreas de Preservação Permanente (APP), pois são esses locais que determinam a integridade hidrossedimentológica da bacia a jusante.



A dinâmica do uso e cobertura da terra na BHIM reflete um elevado estado de conservação natural, conforme espacializado no Mapa de Uso e Ocupação do Solo (Figura 8). A bacia é caracterizada pela dominância absoluta de Formação Florestal, fitofisionomia de porte alto a médio com atividade antrópica reduzida, além de Floresta Alagável e Campo Alagado. De acordo com Gomes et al. (2021), a manutenção dessa matriz florestal densa em bacias amazônicas é vital para a regulação do ciclo hidrológico, pois o dossel atua na interceptação da precipitação, reduzindo a energia de impacto direto no solo. Complementarmente, Salomão (2015) salientam que a diversidade de estratos vegetais, como as áreas pantanosas identificadas na BHIM, funciona como zonas de retenção natural de um terreno contra a erosão, impedindo que sedimentos e detritos alcancem a calha principal dos afluentes.

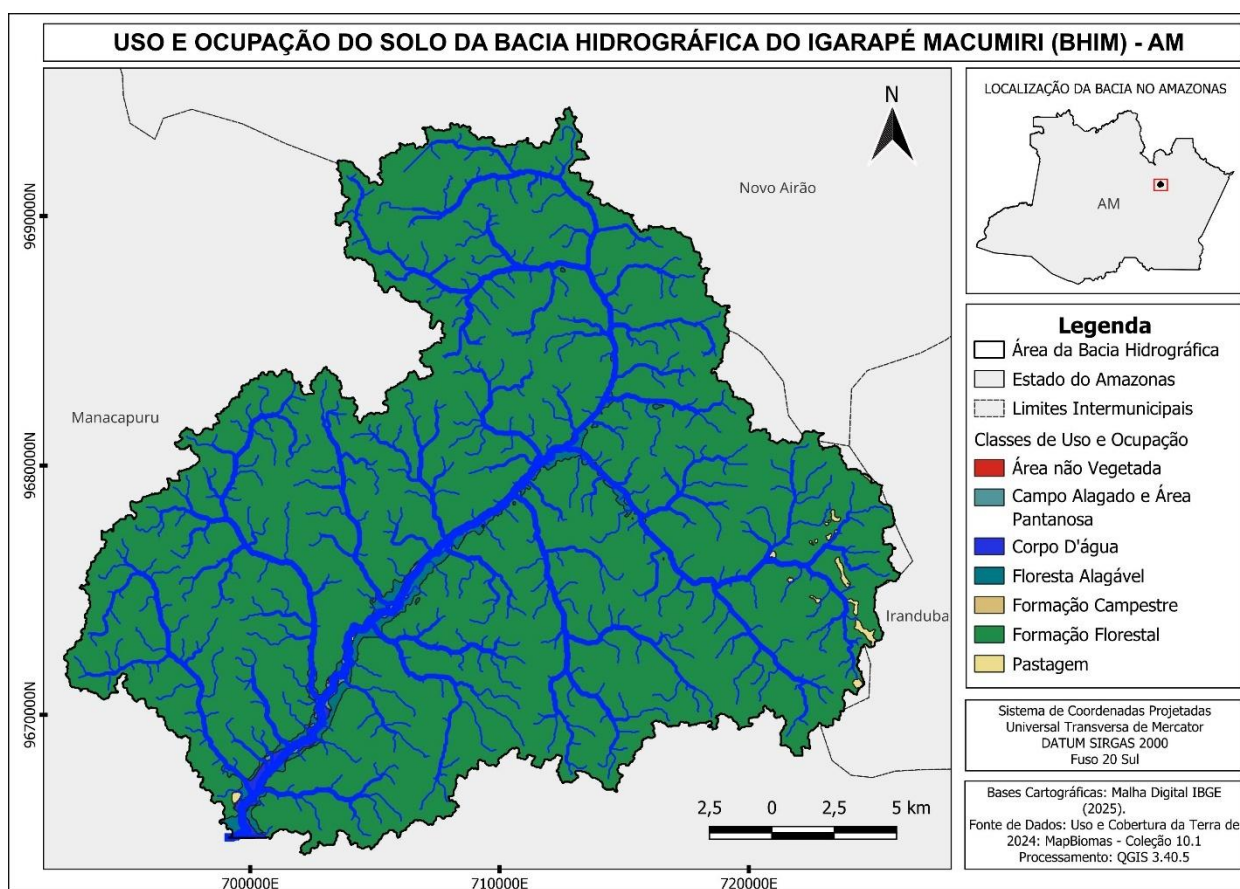


Figura 8: Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri. Fonte: Autores.

A espacialização da vulnerabilidade intrínseca a esses usos é apresentada no Mapa do Grau de Potencialidade Erosiva do Fator Uso da Terra (Figura 9), onde a integração de dados demonstra que a bacia possui uma proteção mecânica robusta. Os resultados quantificados na Tabela 9 ratificam essa condição, indicando que a classe de potencialidade "Muito Fraca" consolida 99,75% da área total (561,75 km²).

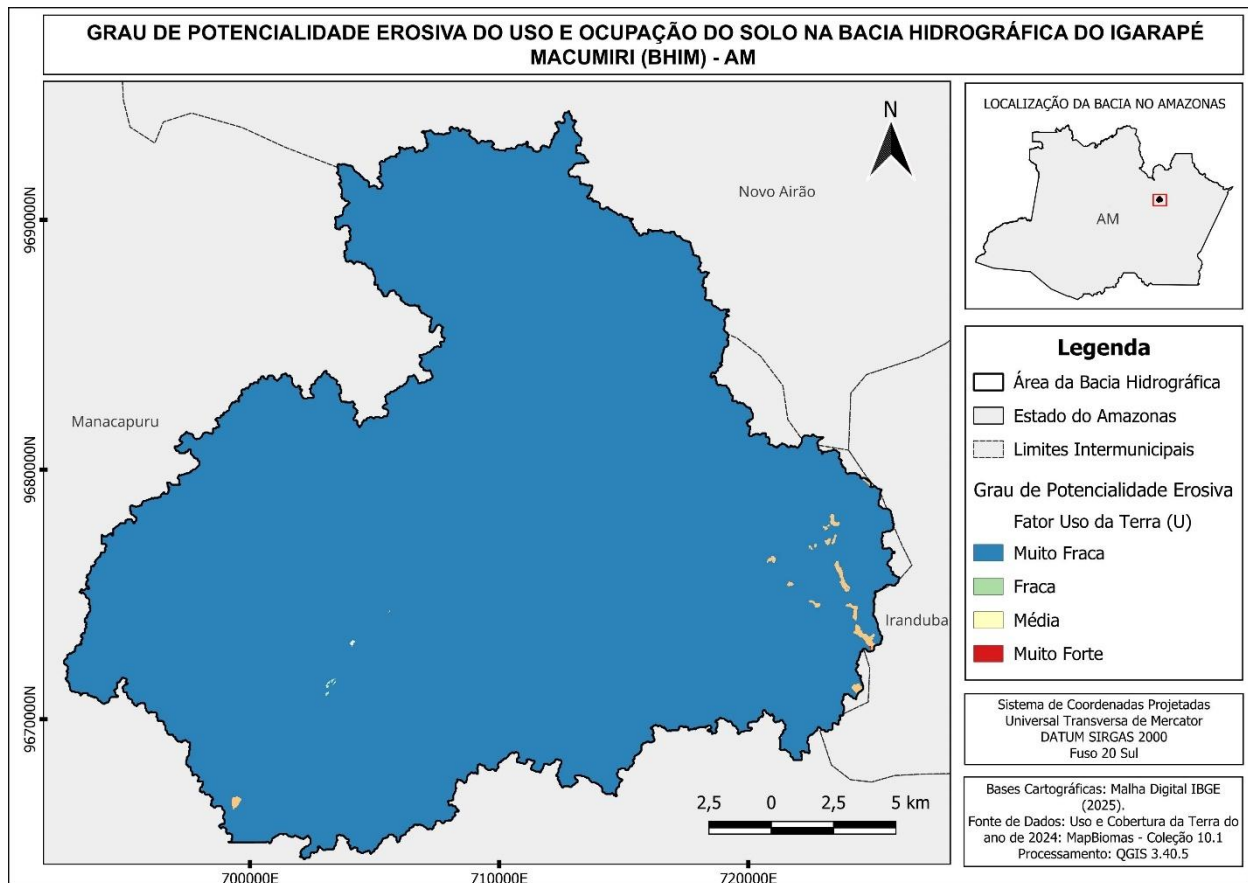


Figura 9: Mapa do grau de potencialidade erosiva do fator uso e ocupação do solo na BHIM. Fonte: Autores.

Tabela 8: Classes de áreas para o grau de potencialidade erosiva do fator uso e ocupação da terra na BHIM.

Uso e Ocupação da Terra	Classe de erodibilidade (%)	Área (km ²)	Área (%)
Formação Florestal; Floresta			
Alagável; Campo Alagado e Área Pantanosa.	Muito Fraca	561,53	99,75
Formação Campestre	Fraca	0,05	0,01
Pastagem	Média	1,36	0,24
-	Forte	-	-
Áreas não vegetadas	Muito Forte	0,01	0,0014
Área Total		562,94	100

Fonte: Autores.

Segundo Bueno (2024), bacias com este perfil de cobertura vegetal preservada operam como reguladores naturais de carga sólida, minimizando a exportação de sedimentos. Santos et al. (2023) reforçam esta análise ao enfatizar que a densidade do sistema radicular da vegetação nativa em áreas de floresta amazônica aumenta significativamente a coesão do solo, o que garante a estabilidade das margens e a manutenção de baixos níveis de turbidez na água, além de diminuir substancialmente o volume e a velocidade das enxurradas, dissipando a energia do escoamento e desacelerando processos erosivos. Essa dinâmica minimiza o transporte de sedimentos em suspensão, garantindo que o Igarapé Macumiri mantenha baixos níveis de turbidez e uma composição química estável.



Por outro lado, as pressões antrópicas, embora territorialmente inexpressivas, localizam-se em pontos sensíveis da bacia. As áreas de Pastagem abrangem 1,36 km² (0,24%) e as Áreas Não Vegetadas apenas 0,01 km² (0,0014%), sendo classificadas com potencialidade erosiva Média e Muito Forte, respectivamente. Conforme discutido por Santos et al. (2023), a conversão da floresta para pastagem altera significativamente o balanço hídrico, elevando o escoamento superficial (runoff) e o risco de aporte de nutrientes para o sistema hídrico. As implicações para a qualidade da água nesses setores críticos são severas; Silva e Teixeira (2023) advertem que mesmo pequenas manchas de solo exposto podem atuar como aceleradores da degradação de igarapés de baixa ordem, promovendo o assoreamento e comprometendo a potabilidade da água para as comunidades ribeirinhas. Portanto, a preservação da integridade florestal observada é o principal baluarte para a sustentabilidade hidrossedimentológica da bacia a jusante.

O mapa de suscetibilidade à erosão gerado a partir da álgebra de mapas, está apresentado na Figura 10.

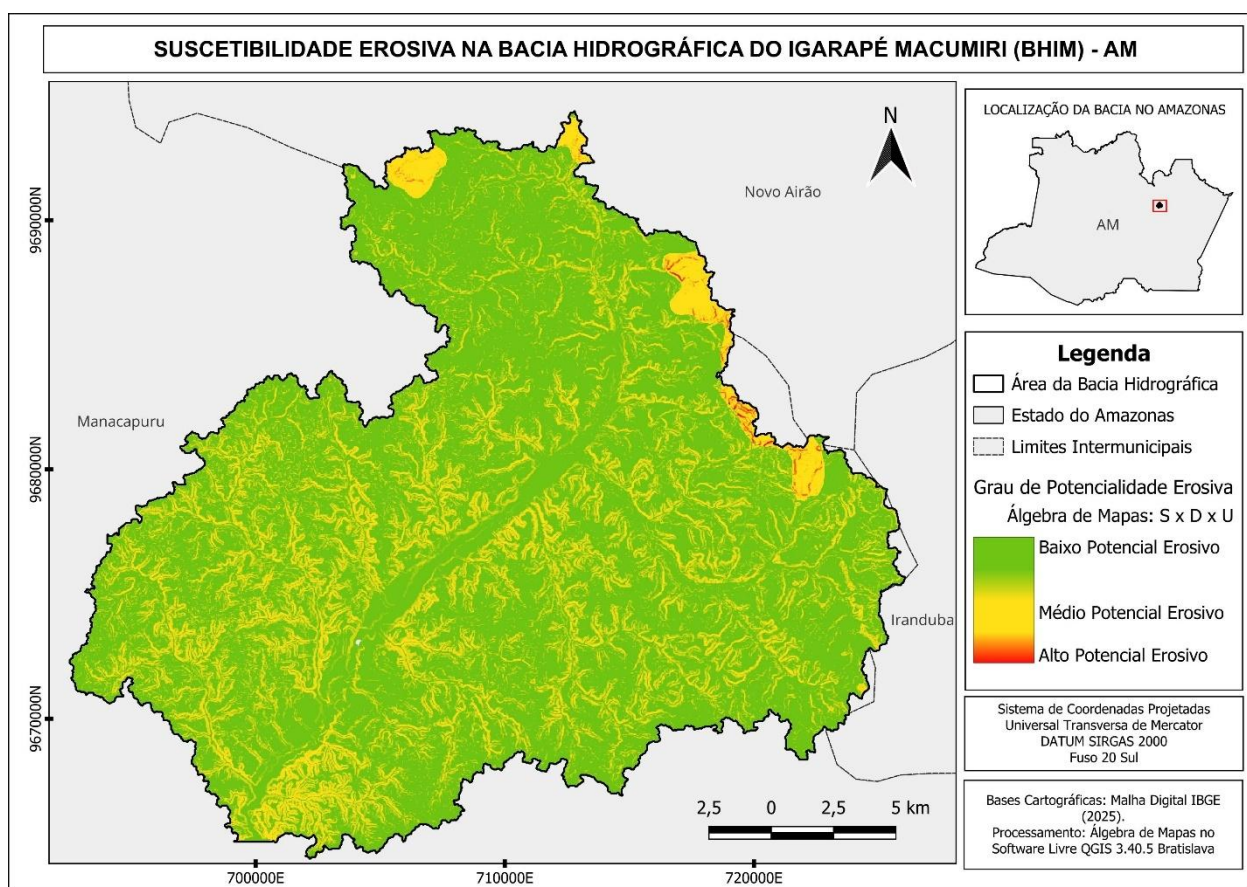


Figura 10. Mapa de suscetibilidade erosiva da BHIM. Fonte: Autores.

Pelo mapa final (Figura 10), verifica-se que grande parte da área pode ser classificada como sendo de baixo potencial à suscetibilidade erosiva. Aproximadamente 65,06% (Tabela 9) da área total da bacia hidrográfica, estão situadas nesta classe de baixo potencial, e isto pode ser explicado pelo fato dessas áreas coincidirem com as áreas de médias declividades encontradas e com as áreas de formação florestal. Em seguida, tem-se uma área de alto potencial erosivo que corresponde a apenas 1,65% da área total.

A área classificada com alto potencial à suscetibilidade erosiva, é desencadeada por fatores naturais, caracterizando uma área com erosão natural de perda do solo, que são ocasionadas devido a bacia apresentar características que a torna naturalmente suscetível à erosão, sem a influência antrópica. Esse tipo de erosão



depende, dentre outros fatores, do escoamento superficial, da presença de vegetação e a inclinação do terreno afetando diretamente a ação da água sobre a superfície da bacia do Igarapé Macumiri.

Tabela 9: Classes de áreas da suscetibilidade erosiva da BHIM.

Classes de suscetibilidade erosiva	Área (km ²)	Área (%)
Baixo Potencial Erosivo	366,25	65,06
Médio Potencial Erosivo	187,42	33,29
Alto Potencial Erosivo	9,27	1,65
Total	562,94	100

Fonte: Autores.

De acordo com Stevaux e Latrubesse (2017) há três tipos principais de erosão, que se diferenciam de acordo com o agente responsável: a água, o vento e o gelo. Esses processos são conhecidos como erosão hídrica, eólica e glacial. No Brasil, onde o clima tropical é predominante, a água é o principal agente de erosão, o que faz da erosão hídrica a mais comum. Os tipos mais frequentes de erosão pela ação da água incluem a erosão laminar, sulcos, ravinas e voçorocas. Na bacia em estudo, os tipos predominantes de erosão observados são a laminar e a erosão em sulcos.

De acordo com Santos et al. (2015), a erosão laminar se refere ao processo de remoção relativamente homogênea de estratos do solo em uma determinada área, sem que haja a formação de sulcos na superfície da bacia hidrográfica. Por outro lado, a erosão em sulcos envolve a remoção do solo por meio de ranhuras e canais, onde se concentra o escoamento superficial da água. Onde, dependendo da periodicidade e profundidade dessas ranhuras, esse tipo de erosão pode ser classificado como ravina ou voçoroca.

Além disso, em relação à vulnerabilidade da bacia à perda de solo, verifica-se que as áreas com maior potencial erosivo representam apenas 1,65% de sua extensão total. Essas áreas concentram-se, majoritariamente, em terrenos sem vegetação com declividades entre 12% e 20% (ou superiores), além de trechos com espodossolo humilúvico de textura arenosa em relevo plano.

Conclusão

O presente estudo teve como objetivo principal identificar e espacializar áreas suscetíveis à erosão laminar na bacia hidrográfica do Igarapé Macumiri, por meio da integração de técnicas de geoprocessamento, análise multicritério e álgebra de mapas em ambiente SIG. Os resultados evidenciaram que a dinâmica erosiva da bacia é predominantemente controlada por fatores naturais, com destaque para a interação entre declividade, características pedológicas e cobertura vegetal.

A predominância de áreas com suscetibilidade baixa a erosão (65,06%) reflete a combinação de relevo suavemente ondulado e cobertura florestal relativamente preservada, indicando um equilíbrio entre fragilidade natural e mecanismos de proteção do solo. Por outro lado, as áreas de maior suscetibilidade, embora espacialmente restritas (1,65%), revelam elevada sensibilidade ambiental, sobretudo em setores com solos arenosos e maior inclinação, configurando zonas prioritárias para monitoramento e conservação.

Do ponto de vista metodológico, a aplicação integrada da análise multicritério e da álgebra de mapas em ambiente SIG demonstrou elevada robustez e capacidade de síntese espacial, permitindo a incorporação de múltiplas variáveis ambientais e a geração de cenários consistentes de vulnerabilidade erosiva. Essa abordagem se destaca pela flexibilidade na atribuição de pesos e pela capacidade de adaptação a diferentes escalas e



contextos ambientais, embora dependa da qualidade dos dados de entrada e da definição criteriosa dos parâmetros, o que constitui uma limitação relevante.

Como contribuição científica, o estudo avança na aplicação integrada de técnicas de modelagem espacial em bacias hidrográficas amazônicas de média escala, preenchendo lacunas relacionadas à escassez de análises sistematizadas nessa região. Ademais, os resultados fornecem subsídios técnicos aplicáveis ao planejamento ambiental, especialmente no que se refere à definição de áreas prioritárias para conservação, manejo do uso do solo e mitigação de processos erosivos.

Do ponto de vista prático, os produtos gerados podem orientar políticas públicas voltadas à gestão territorial, à proteção de recursos hídricos e à manutenção da qualidade ambiental em regiões de elevada sensibilidade ecológica. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a incorporação de variáveis climáticas, como erosividade das chuvas, bem como a validação empírica dos modelos por meio de dados de campo, visando aprimorar a acurácia das análises e ampliar sua aplicabilidade em diferentes contextos ambientais.

Referências

- Alharbi T 2024. "A Weighted Overlay Analysis for Assessing Urban Flood Risks in Arid Lands: A Case Study of Riyadh, Saudi Arabia". *Water* 16 (3): 397. <https://doi.org/10.3390/w16030397>
- Alves AC 2026. Naturalmente complexa, nitidamente fragmentada: sensibilidade da paisagem na bacia hidrográfica do rio Puraquequara, Manaus–Amazonas/Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 180 pp. <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/11586>Bertoni J, Lombardi Neto F 2014. *Conservação do Solo*. 9ª ed. São Paulo: Ícone. 355p.
- Amaral R, Ross JLS 2009. As unidades ecodinâmicas na análise da fragilidade ambiental do parque estadual do Morro do Diabo e entorno, Teodoro Sampaio/SP. *GEOUSP Espaço e Tempo* 13(2):59-78.
- Arabameri A, Pradhan B, Pourghasemi HR, Rezaei K 2018. "Identification of erosion-prone areas using different multi-criteria decision-making techniques and GIS." *Geomatics Natural Hazards and Risk* 9 (1):1129–55. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1513084>.
- Arabameri A, Pradhan B, Rezaei K, Conoscenti K 2019. "Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques." *Catena* 180 (Setembro): 282-297. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.032>
- Arabameri A, Tiefenbacher JP, Blaschke T, Pradhan B, Bui DT 2020. "Morphometric Analysis for Soil Erosion Susceptibility Mapping Using Novel GIS-Based Ensemble Model." *Remote Sensing* 12 (5): 874. <https://doi.org/10.3390/rs12050874>
- Arantes AE 2022. Suscetibilidade à Erosão Laminar e Linear da Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho e a sua Relação com o Uso e Cobertura da Terra em 2012. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15 (6): 3032-3046. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.6.p3032-3046>
- Baía ABC, Iedo Souza Santos, Gilmara Maureline Teles da Silva de Oliveira, Eliane de Castro Coutinho, e Eder Silva de Oliveira. 2026. "Geotecnologias aplicadas ao monitoramento espaço-temporal no território indígena



Anambé, Amazônia Oriental.” *Revista De Geopolítica* 17 (2): e1699. <https://doi.org/10.56238/revgeov17n2-164>.

Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburge K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Oost KV, Montanarella L, Panagos P 2017. “An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion.” *Nature Communications* 8 (1): 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA 2026. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO). Brasília: ANA. Available from: <https://metadados.snirh.gov.br/>. [cited 2026 Feb 7].

Bueno FA 2024. “Estimativa de erosão em área de desflorestamento da Amazônia, Bacia do Baixo Rio Acre.” *Revista Geográfica de América Central* 2 (73): 247-262. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.73-2.9>

Burylo M, Rey F, Mathys N, Dutoit. 2012. “Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion.” *Earth Surf. Process. Landforms* 37 (14): 1463-1470. <https://doi.org/10.1002/esp.3248>

Colares IS, Junior JCF, Rodrigues LS, Maia SA, Wachholz F 2022. “Suscetibilidade do solo à erosão na bacia hidrográfica do rio Tarumã-Açu (Amazonas – Brasil).” *Caminhos De Geografia* 23 (89): 367-89. <https://doi.org/10.14393/RCG238960655>.

Copernicus DEM 2026. GLO-30. Digital Elevation Model Welcome Guest. Available from: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3>. [cited 2026 Feb 20].

Costa DF, Alvarez WP, Herrera JA 2020. “Susceptibilidade erosiva em bacia hidrográfica na Amazônia: exploração da paisagem e soterramento de nascentes na sub-bacia do Jaurucu em Brasil Novo, Pará.” *Revista Geográfica Venezolana* 61 (1): 88-98. ISSN 2244-8853

Couto BOC, Gomes RC, Ferreira LD 2021. “Avaliação da erodibilidade de diferentes horizontes em latossolos por meio da resistência não drenada em campo: Estudo de caso na região do Quadrilátero Ferrífero-MG”. *Geociências* 40 (1): 169-180. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i1.14624>

Crepani E, Medeiros JS; Filho PH; Florenzano TG, Duarte V, Barbosa CCF 2001. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial*. INPE, São José dos Campos-SP, 124 pp.

Demarchi JC, Zimback CRL 2014. “Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas.” *Energia na Agricultura* 29 (2): 102-114. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2014v29n2p102-114>

Embrapa 2025. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Ed. 6 Rev. e Ampl., Embrapa, Brasília-DF, 393 pp.

Ferreira MC, Bolfe EL 2022. *Metodologias de Análise Geoespacial Aplicadas ao Mapeamento de Dados Ambientais*. Ed 1, Appris, Curitiba-PR, 269 pp.

Fonseca EL, Filho EPS 2023. “Análise geomorfológica aplicada ao estudo da suscetibilidade à erosão.” *Revista Brasileira de Geomorfologia* 24 (4): e2314. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i4.2314>



Gomes DJC, Silva LP; Ferreira NS, Lobato RRC, Serrão EAO, Lima AMM 2021). “Impactos climáticos na erosão hídrica do solo para a Amazônia Ocidental.” *Revista Brasileira de Climatologia* 28 (Abril): 242-265. <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14503>

Gomes JVP 2021. *Introdução às Geotecnologias*. Ed. 1, IESDE, Curitiba-PR, 120 pp.

Guerra AJT, da Silva AS, Botelho RGM 2007. *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Ed. 3, Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 339 pp.

Hidalgo N, Pfeiffer M, Gaxiola A 2025. Long-term dynamics of soil water erosion in Chile: interactions between climate variability and land-cover change. *Catena* 259 (Agosto): 109377. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109377>

IBGE 2025. Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA): Pedologia. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Available from: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia/23382-banco-de-informacoes-ambientais.html>. [cited 2026 Feb 6].

IBGE 2025. Base de Dados Espacial da Pedologia do Brasil na Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Available from: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>. [cited 2026 Feb 7].

IBGE 2025. Malha Municipal Digital da Divisão Político-Administrativa Brasileira. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Available from: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. [cited 2026 Feb 2].

IBGE 2026. Cidades. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Available from: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/manacapuru.html>. [cited 2026 Feb 4].

Islam F, Ahmad MN, Janjuhah HT, Ullah M, Islam IU, Kontakiotis G, Skilodimou HD Bathrellos GD 2022. "Modelling and Mapping of Soil Erosion Susceptibility of Murree, Sub-Himalayas Using GIS and RS-Based Models." *Applied Sciences* 12 (23): 12211. <https://doi.org/10.3390/app122312211>

Justino SPT, Silva RBG, Silva RB, Simões D 2025. "Land Use Change and Its Climatic and Vegetation Impacts in the Brazilian Amazon". *Sustainability* 17 (15): 7099. <https://doi.org/10.3390/su17157099>

Lense GHE, Avanzi JC, Parreiras TC, Mincato RM 2021. “Efeito Do Desmatamento Sobre As Taxas De erosão hídrica Na região amazônica.” *Agrária - Revista Brasileira De Ciências Agrárias* 15 (4): 1-7. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8500>.

Lira KCS, Francisco HR; Feiden A 2022. “Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP.” *Sociedade & Natureza* 34 (Fevereiro): p. e62872. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-62872>

Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW 2021. *Geographic information systems and science*. Ed. 4, Wiley, Hoboken-Nova Jersey, 496 pp.



- Mandal D, Roy T. 2024. "Climate Change Impact on Soil Erosion and Land Degradation". In: *Advances in Global Change Research*, (eds.) Pathak H, Chatterjee D, Saurav Saha, Das B. Springer, Singapura, p. 139–61. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7935-6_5.
- MapBiomas 2024. Projeto MapBiomas – Coleção 10.1 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Available from: <https://mapbiomas.org>.
- Miranda JI 2019. *Fundamentos de Sistema de Informações Geográficas*. Ed. 4, Embrapa, Brasília-DF, 400 pp.
- Neto JCAS, Rodrigues DM, Aleixo NCR 2025. "Modelagem ambiental aplicada à simulação de cenários de vulnerabilidade da paisagem na bacia hidrográfica do Igarapé Jarauá, Alvarães, Amazonas." *Revista da ANPEGE* 21 (45): 19320. <https://doi.org/10.5418/ra2025.v21i45.19320>
- Projeto MapBiomas 2026. Coleção 10.1 da Série Anual de Mapas da Cobertura e Uso do Solo no Brasil. Brasil. Available from: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. [cited 2026 Feb 5].
- QGIS Development Team 2026. QGIS Geographic Information System. Version 3.40.5. Bratislava: Open Source Geospatial Foundation Project. Available from: <http://qgis.osgeo.org>. [cited 2026 Jan 28].
- Riquetti NB, Beskow S, Guo L, Mello CR 2023. "Soil erosion assessment in the Amazon basin in the last 60 years of deforestation." *Environmental Research* 236 (2): 116846. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116846>
- Ross JLS 1994. "Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados." *Revista do Departamento de Geografia* (8): 63-74. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
- Ross JLS 2023. *Geomorfologia: ambiente e planejamento*. Ed. 9, Reimp. 6, Contexto, São Paulo, 96 pp.
- Salomão FXT 2015. "Controle e Prevenção dos Processos Erosivos". In: *Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações*, (eds) Guerra AJT, SILVA AS, Botelho RGM. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, p. 229-268.
- Santos HG, Jacomine PKT, Oliveira VA, Lumbrreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araujo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Ed. 5 Rev. e Ampl., Embrapa, Brasília-DF, 355 pp.
- Santos LAN, Nascimento PSZ, Barros GVP 2020. "Processamento analítico hierárquico no mapeamento da fragilidade ambiental à erosão do solo." *Revista Brasileira de Geomática* 8 (4): 275-298. <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v8n4.12635>
- Santos RD, dos Santos HG, Ker JC, dos Anjos LHC, Shimizu SH 2015. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Ed. 7 Rev. e Ampl., Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, 101 pp.
- Silva DSS, Blanco CJC, Junior CSS, Martins WLD 2020. "Modeling of the spatial and temporal dynamics of erosivity in the Amazon." *Modeling Earth Systems and Environment* 6 (Dezembro): 513-523. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00697-6>



Silva GG, Oliveira LN 2015. Análise da susceptibilidade e potencial à erosão laminar no município de São Miguel do Araguaia – GO. In Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. João Pessoa, PB, p. 6511-6518. Available from: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1412.pdf>. [cited 2025 Nov 11].

Silva JVF, Ferreira VO 2022. “Susceptibilidade à erosão laminar na bacia hidrográfica do Ribeirão Douradinho, no Triângulo mineiro.” *Caderno de Geografia* 32 (68): 2318-2962. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2022v32n68p1>

Silva RRP 2025. Susceptibilidade erosiva em bacia hidrográfica do litoral pernambucano: mapeamento e modelagem por meio de técnicas computacionais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 216 pp. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/83583>

Silva VCB, Machado OS 2014. “SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima-Minas Gerais.” *Revista Brasileira de Geografia Física* 31 (2): 66-87. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229090>

Stefanuto BS, Lupinacci CM, Conceição FT, Romero EN, Bonzanini HL, Francos M, Magalhães DM, Andrade RF, Filho AP 2026. “Anthropogenic forcing of gully sidewall erosion: balancing natural susceptibility and land use management in areas with Cuestas relief under tropical climate dynamics in southeastern Brazil.” *Journal of Environmental Management* 404 (Abril): 129305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129305>

Stevaux JC, Latrubesse EM 2017. *Geomorfologia fluvial*. Ed.1, Oficina de Textos, São Paulo, 320 pp.

Viana CM, Abrantes P, Rocha J 2019. “Introductory chapter: Geographic information systems and science”. In: *Geographic information systems and science*, (eds.) Rocha J, Abrantes. IntechOpen, Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, p. 1-19. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86121>

Wag S, Manekar V 2023. “GIS-based morphometric prioritization of watersheds for soil erosion planning: a case study.” *Environ Earth Sci* 82 (443): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11155-z>

Xavier FV, Cunha KL, Silveira A, Salomão FXT 2010. “Análise da susceptibilidade à erosão laminar na bacia do rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando sistemas de informações geográficas.” *Revista Brasileira de Geomorfologia* 11 (2): 51-60. <https://doi.org/10.20502/rbg.v11i2.151>

Yakhlefoune M, Benabbas C, Grecu F, Belkendil A, Kharchi TE, Yacer RN, Elmannai H, Tariq A 2025. “Geospatial Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using RUSLE, AHP, and GIS.” *Hydrological Processes* 39 (9): e70263. <https://doi.org/10.1002/hyp.70263>

Yin C, Bai C, Zhu Y, Shao M, Han X, Qiao J 2025. “Future soil erosion risk in China: Differences in Erosion driven by general and extreme precipitation under climate change.” *Earth's Future* 13 (3): e2024EF005390. <https://doi.org/10.1029/2024EF005390>

Yuan Z, Baohua Wen B, He C, Zhou J, Zhou Z, Xu F 2022. "Application of Multi-Criteria Decision-Making Analysis to Rural Spatial Sustainability Evaluation: A Systematic Review". *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (11): 6572. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116572>