

Geotecnologias e Inteligência Artificial Aplicadas à Geomorfologia

Organização:

- Paulo Vitor do Nascimento Araújo
 - Silvio Braz de Sousa
-





Geotecnologias e Inteligência Artificial Aplicadas à Geomorfologia

Organização:

- Paulo Vitor do Nascimento Araújo
- Silvio Braz de Sousa

MOSSORÓ- RN, 2026.

UERN



Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Reitora

Cicília Raquel Maia Leite

Vice-Reitor

Francisco Dantas de Medeiros Neto

Diretor da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Francisco Fabiano de Freitas Mendes

Chefe do Setor Executivo da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Jacimária Fonseca de Medeiros

Chefe do Setor de Editoração da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Lindercy Francisco Tomé de Souza Lins

Conselho Editorial das Edições UERN

Andreza Tacyana Félix Carvalho

Francisco Fabiano de Freitas Mendes

Franklin Roberto da Costa

Fernanda Abreu de Oliveira

Gleisson do Carmo Oliveira

Ismênia Gurgel Martins

Jacimária Fonseca de Medeiros

Lindercy Francisco Tomé de Souza Lins

Maria Ione da Silva

Otoniel Fernandes da Silva Júnior

Patrícia Batista Barra

Kalidia Felipe de Lima

Saulo Gomes Batista

Sérgio Luiz Pedrosa Silva

Capa e Diagramação

Gabriela Mabel Alves Vieira

**Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

Geotecnologias e Inteligência Artificial Aplicadas à Geomorfologia-Vol. XIII [recurso eletrônico]. / Paulo Vitor do Nascimento Araújo, Silvio Braz de Sousa (orgs.). – Mossoró, RN: Edições UERN, 2026.

71 p.

ISBN: 978-85-7621-579-0 (E-book).

Coleção: Geomorfologia do Brasil.

1. Geotecnologias aplicados a Geomorfologia. 2. Inteligência Artificial aplicados a Geomorfologia. 3. Geomorfologia - Brasil. I. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. II. Título.

UERN/BC

CDD 551.4

Bibliotecário: Aline Karoline da Silva Araújo CRB 15/ 783

Sumário:



APRESENTAÇÃO.....

05

1.

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE SIMETRIA TOPOGRÁFICA TRANSVERSAL (FSTT) NO SOFTWARE QGIS

Daniel Machado Facury;
Luiz Fernando de Paula Barros
Antônio Pereira Magalhães Júnior.

07

2.

ANÁLISE PRELIMINAR DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL A DESLIZAMENTOS EM MANAUS: UMA ABORDAGEM COM LÓGICA FUZZY

João Cândido André da Silva Neto;
Rogério Ribeiro Marinho.

23

3.

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) E ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE DESLIZAMENTOS USANDO DADOS LIDAR E FOTOGRAMETRIA POR SFM-MVS

Harideva Marturano Egas;
Denilson de Jesus;
Tatiana Sussel Gonçalves Mendes;
Tiago Antonelli;
Marcio R M de Andrade;
Victor Augusto Hilquias Silva Alves;
Daniel Metodiev;
Rodrigo Augusto Stabile;
Diogo Rodrigues Andrade da Silva;
Fernanda Dácio da Costa.

38

4.

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA IDENTIFICAR ÁREAS COM EROÇÃO COSTEIRA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Matheus Maciel da Silva;
Rodrigo de Freitas Amorim;
Heleriany de Medeiros Madeiros;
Silvio Braz de Sousa;
Eduardo Queiroz de Lima.

57



Geomorfologia do Brasil

Apresentação

A **Coleção Geomorfologia do Brasil**, editada pela Edições Uern - EDUERN, reúne contribuições de pesquisadores e pesquisadoras de diferentes regiões do país que apresentaram seus trabalhos no XV Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), realizado em Natal (RN), entre os dias 4 e 8 de agosto de 2025.

Composta por 14 volumes temáticos, a coleção expressa a diversidade e a vitalidade da produção científica brasileira em Geomorfologia, contemplando desde abordagens clássicas até perspectivas inovadoras que integram novas tecnologias, análises ambientais e dimensões sociais da paisagem. Cada livro reflete o compromisso coletivo de fortalecer e divulgar o conhecimento geomorfológico produzido no Brasil, promovendo diálogo entre diferentes áreas e instituições.

... OS VOLUMES QUE COMPÕEM A COLEÇÃO SÃO:



1. Intemperismo, Solos e Paisagem

organizado por Davi do Vale Lopes (UFRN)



2. Processos e Formas de Vertente

organizado por Grace Bungenstab Alves (UFBA)



3. Geomorfologia Fluvial e Lacustre

organizado por José Yure Gomes dos Santos (UFRN)
e Filipe da Silva Peixoto (UERJ)



4. Geomorfologia Costeira, Marinha e Eólica

organizado por Antônio Rodrigues Ximenes Neto (UFRN)



5. Geomorfologia de Áreas Cársticas

organizado por Luiz Eduardo Panisset Travassos (PUC-MG)



6. Geomorfologia Estrutural

organizado por Abner Monteiro Nunes Cordeiro (UFRN)



7. Geomorfologia Ambiental

organizado por Glairton Cardoso Rocha (IFPI)



8. Quantificação de Processos, Modelagem e Geocronologia

organizado por Kleber Carvalho Lima (UPE)
e Everton Vinicius Valezio (UPE)



9. Mapeamento Geomorfológico: Básico e Aplicado

organizado por Rosangela Garrido Machado Botelho (IBGE)



10. Risco Geomorfológico: Diagnóstico, Prevenção e Previsão

organizado por Maria Carolina Villaça Gomes (UERJ)



11. Antropoceno e Geomorfologia Urbana

organizado por Guilherme Borges Fernandez (UFF)
Miguel Felipe (UFJF)
e Maria Luíza de Oliveira Terto



12. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico

organizado por Thiara Oliveira Rabelo (UFRN)
e Luciana Martins Freire (UFPA)



13. Geotecnologias e Inteligência Artificial Aplicadas à Geomorfologia

organizado por Paulo Victor do Nascimento Araújo (IFRN)
e Sílvio Braz de Sousa (UFRN)



14. Ensino de Geomorfologia na Educação Formal e Não Formal

organizado por Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque (UFDFPar)
e José Falcão Sobrinho (UVA)

Mais do que uma coletânea de textos, esta coleção constitui um registro histórico da consolidação da geomorfologia brasileira em múltiplas frentes — teórica, metodológica e aplicada. Esperamos que cada volume inspire novas leituras do relevo, novas formas de pensar a paisagem e novos caminhos de pesquisa comprometidos com a compreensão das dinâmicas da superfície terrestre.

Desejamos a todos uma excelente leitura!

*Jacimária Fonseca de Medeiros, Thaís Guimarães,
e Marco Túlio Mendonça Diniz*

Organizadores da Coleção Geomorfologia do Brasil



DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE SIMETRIA TOPOGRÁFICA TRANSVERSAL (FSTT) NO SOFTWARE QGIS

Daniel Machado Facury¹

Luiz Fernando de Paula Barros²

Antônio Pereira Magalhães Júnior³

PALAVRAS-CHAVE: Índices Morfométricos, Geomorfologia, Alto rio Paranaíba.

RESUMO

O Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) é uma métrica utilizada para a detecção de deslocamentos do canal em relação a uma linha média de uma bacia hidrográfica, apresentando grande utilidade para uma abordagem morfotectônica sobre o relevo de determinada área, podendo apontar, por exemplo, a atuação de basculamento de blocos no condicionamento da rede de drenagem. Este índice é calculado por meio da divisão entre a distância da linha média do eixo longitudinal da bacia hidrográfica até o canal principal e a distância da mesma linha média ao divisor hidrográfico, seguindo uma mesma linha perpendicular à linha média. Valores mais próximos de 1 indicam segmentos mais assimétricos da drenagem. Esta métrica se destaca pois podem ser realizadas diversas medições ao longo de uma mesma bacia hidrográfica, representando possíveis variações. A extração manual desta métrica a partir da vetorização dos elementos de interesse em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é a forma de elaboração mais comum nos estudos realizados no Brasil. Todavia, esta prática demanda muito tempo, reduzindo a quantidade de bacias amostráveis, além de ampliar o efeito da subjetividade sobre o resultado. Dessa forma, o presente artigo teve como objetivo desenvolver e aplicar um modelo para extração automática do FSTT no *software* QGIS, de forma a construir um modelo replicável que possa ser utilizado em *software* gratuito e amplamente utilizado para análises geomorfológicas. O modelo foi construído utilizando-se a ferramenta *Model Designer/Graphical Modeler* do QGIS, que permite a construção de modelos por meio da criação de uma cadeia de diversas ferramentas e seus resultados gerados. As principais etapas consistiram em: 1) preparação dos dados de entrada (extração de bacias e rede de drenagem a partir do Modelo Digital de Elevação *Forest and Buildings Removed Copernicus DEM*); 2) extração das linhas médias das bacias; 3) geração de linhas transversais às linhas médias e geração de pontos na interceptação destas linhas; 4) quebra das linhas transversais nos

¹ Doutorando em Geografia na Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, danielfacury@gmail.com

² Professor Adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, luizbarros@ufmg.br

³ Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com



pontos de interceptação da linha média e da rede de drenagem; 5) cálculo das distâncias entre a linha média da bacia e o canal principal e a linha média da bacia e o divisor hidrográfico; 6) cálculo do FSTT; e 7) representação em mapa e gráficos de acordo com a magnitude e direção das assimetrias encontradas. O modelo foi aplicado a sub-bacias de afluentes dos rios Paranaíba e Espírito Santo, na porção oeste de Minas Gerais. No total, o modelo foi aplicado em 109 sub-bacias, apresentando resultados satisfatórios para todas as bacias avaliadas. Nos casos restantes, foi necessária a realização de alguns ajustes manuais. A aplicação do modelo permitiu a identificação de assimetrias da rede de drenagem de diversos afluentes para noroeste, seguindo uma tendência regional de assimetrias associadas à basculamentos tectônicos, o que sugere uma influência neotectônica na configuração da rede de drenagem da área em estudo.

INTRODUÇÃO

Os índices morfométricos relacionados a aspectos quantitativos do relevo permitem acessar informações sobre influências tectônicas e litoestruturais que afetam a evolução geomorfológica de uma região. Ambientes tropicais úmidos, cujo relevo é formado sobretudo pela atuação de sistemas fluviais, são áreas privilegiadas para o uso destes índices, tendo em vista que, muitas vezes, indicadores sedimentares e morfológicos diretos da atuação neotectônica e/ou do condicionante estrutural podem ser apagados ou suavizados pela ação do intemperismo e pedogênese. Assim, a visualização de fatores condicionantes em planta e padrões de repetição em uma área podem indicar elementos que estejam afetando a rede de drenagem, sendo esta sensível às mudanças causadas por fatores externos ao longo do tempo. O desenvolvimento tecnológico observado a partir da segunda metade do século passado permitiu o aprofundamento e disseminação do uso destes índices, tornando-os comuns em estudos geomorfológicos (Santos *et al.*, 2019; Cherem *et al.*, 2020 Firmino *et al.*, 2022).

Os diversos índices criados podem indicar fatores como os padrões de drenagem, a ocorrência de *knickpoints*, a variação de sinuosidade, o basculamento de blocos tectônicos e a diferença de potencial erosivo de diversos cursos d'água (Santos *et al.*, 2019). Destacam-se aqui os índices como o Fator de Assimetria de Bacias de Drenagem (FABD – Hare; Gardner, 1985) e Fator de Simetria Topográfica Transversa (FSTT – Cox, 1994), que utilizam da (as) simetria de um rio principal em relação à sua bacia hidrográfica para estipular possíveis basculamentos ou condicionantes estruturais que afetam o relevo. O basculamento de blocos se apresenta como um importante condicionante da dinâmica de evolução do relevo no território brasileiro (Saadi, 1991; Saadi, 1995; Furrier *et al.*, 2006; Gontijo-Pascutti *et al.*, 2012; Marques Neto; Archimendes, 2014; Carvalho, 2019; Mesquita *et al.* 2021), sendo que estes índices ganham destaque para sua identificação. Estes índices se destacam para utilização em ambientes tropicais pois são sensíveis à atuação de falhas que estão encobertas por espessas coberturas sedimentares e/ou residuais, dificilmente revelando a geometria da falha em superfície (Cox, 1994).



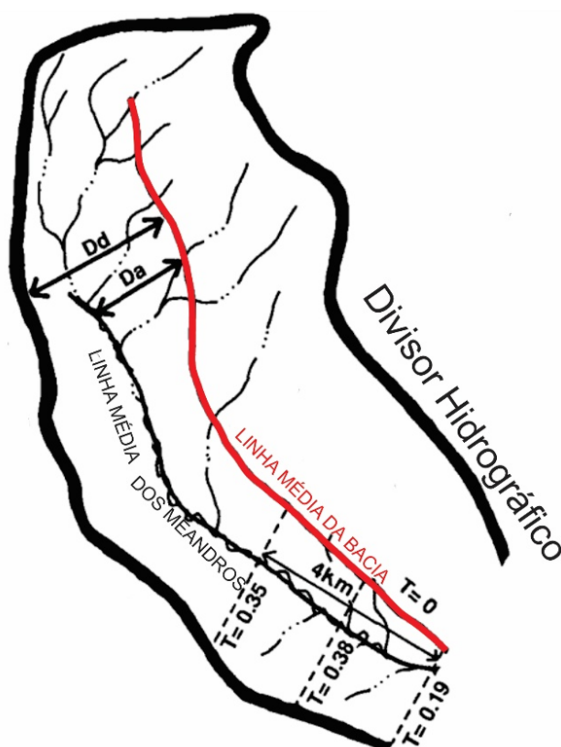
Os dois índices citados se diferenciam pois o FABD (Hare; Garder, 1985) apresenta um único valor para a bacia inteira, enquanto o FSTT (Cox, 1994) permite a visualização de deslocamentos por trechos da drenagem em uma bacia hidrográfica. Assim, o primeiro pode apresentar forte generalização, não revelando a verdadeira assimetria de uma bacia hidrográfica, enquanto o segundo permite visualizar como a assimetria se distribui ao longo de uma bacia hidrográfica, revelando relações com litotipos, estruturas e possíveis condicionantes tectônicas.

O FSTT foi proposto inicialmente por Cox (1994) e é calculado a partir da seguinte equação:

$$T = D_a/D_d$$

Sendo T o valor final do índice, D_a a distância entre a drenagem (linha média dos meandros) e a linha central da bacia e D_d a distância entre o divisor hidrográfico e a linha média da bacia (Fig. 1). O valor T é calculado individualmente para cada transecto perpendicular à rede de drenagem, permitindo a visualização da variação deste valor ao longo da bacia. Valores mais próximos de 1 indicam que a drenagem está mais próxima de um interflúvio e mais distante da linha central da bacia, sendo assim, representa uma bacia assimétrica. Por outro lado, valores mais próximos de 0 indicam que a drenagem está mais próxima da linha média da bacia, apresentando alta simetria.

FIG. 1 – Elementos utilizados para o cálculo do FSTT.



FONTE: Adaptado de Cox (1994).



O FSTT é muito utilizado para estudos da configuração e evolução da rede de drenagem no Brasil, mas apesar de sua simples fórmula para cálculo, é comum que os estudos que o utilizam não sejam claros na forma de obtenção dos elementos necessários (Marçal et. al, 2015; Sordi *et al.*, 2015; Silva; Paes, 2018; Mesquita *et al.*, 2021), ou que o realizem de maneira manual em Sistemas de Informação Geográfica (Santos, 2017; Carvalho, 2019; Guillén *et al.*, 2023). Por um lado, a falta de clareza nos procedimentos para extrair os valores de Da, Dd, da linha média da bacia e dos transectos perpendiculares a ela pode implicar em incoerências na análise dos resultados e dificuldades na replicabilidade do resultado. Por outro, a elaboração manual pode também gerar resultados pouco replicáveis, além de tomar muito tempo, o que pode inviabilizar a geração deste índice para várias bacias e reduzir o número de bacias amostráveis.

Para solucionar esta questão, alguns modelos automáticos para extração do FSTT já foram propostos na literatura, como em Daxberger *et al.* (2014) e Shahzad e Gloaguen (2011), mas estes se restringem a softwares pagos e de código fechado, no caso *ArcGIS* e *Matlab*, respectivamente, e não têm sido utilizados nos estudos no Brasil, com raras exceções (Passarella *et al.*, 2016; Martins; Limoeiro, 2021). Assim, o presente estudo se insere nesta lacuna e tem como objetivo principal desenvolver um modelo para extração automática do FSTT no *software* QGIS, de forma a construir um modelo replicável que possa ser utilizado em *software* gratuito e amplamente utilizado para análises geomorfológicas. De forma complementar, busca aplicar este modelo em uma bacia analisada para avaliar sua performance e possíveis resultados.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a elaboração do modelo proposto, utilizou-se o *software* livre e gratuito QGIS *Desktop* em sua versão 3.14.22. O modelo foi construído utilizando a ferramenta *Model Designer/Graphical Modeler* deste *software* (Graser; Olaya, 2015), que permite encadear diversas ferramentas, dados de entrada e resultados individuais em uma linha lógica representada por meio de um fluxograma. Diversas ferramentas e alguns *plug-ins* foram utilizados e serão apresentados na seção de resultados, de forma a explicar e apresentar o modelo em detalhe.

O modelo desenvolvido foi aplicado em trabalho desenvolvido por Facury (2024). O modelo foi aplicado na bacia do Alto rio Paranaíba, em Minas Gerais, até a confluência do rio Paranaíba com o rio Espírito Santo, incluindo a bacia deste afluente. De posse dos dados gerados, foram realizadas representações gráficas e cartográficas para identificar a magnitude e direção da assimetria, além de gráficos polares no *software* Excel desenvolvidos para apresentar quantitativamente as assimetrias identificadas. Os

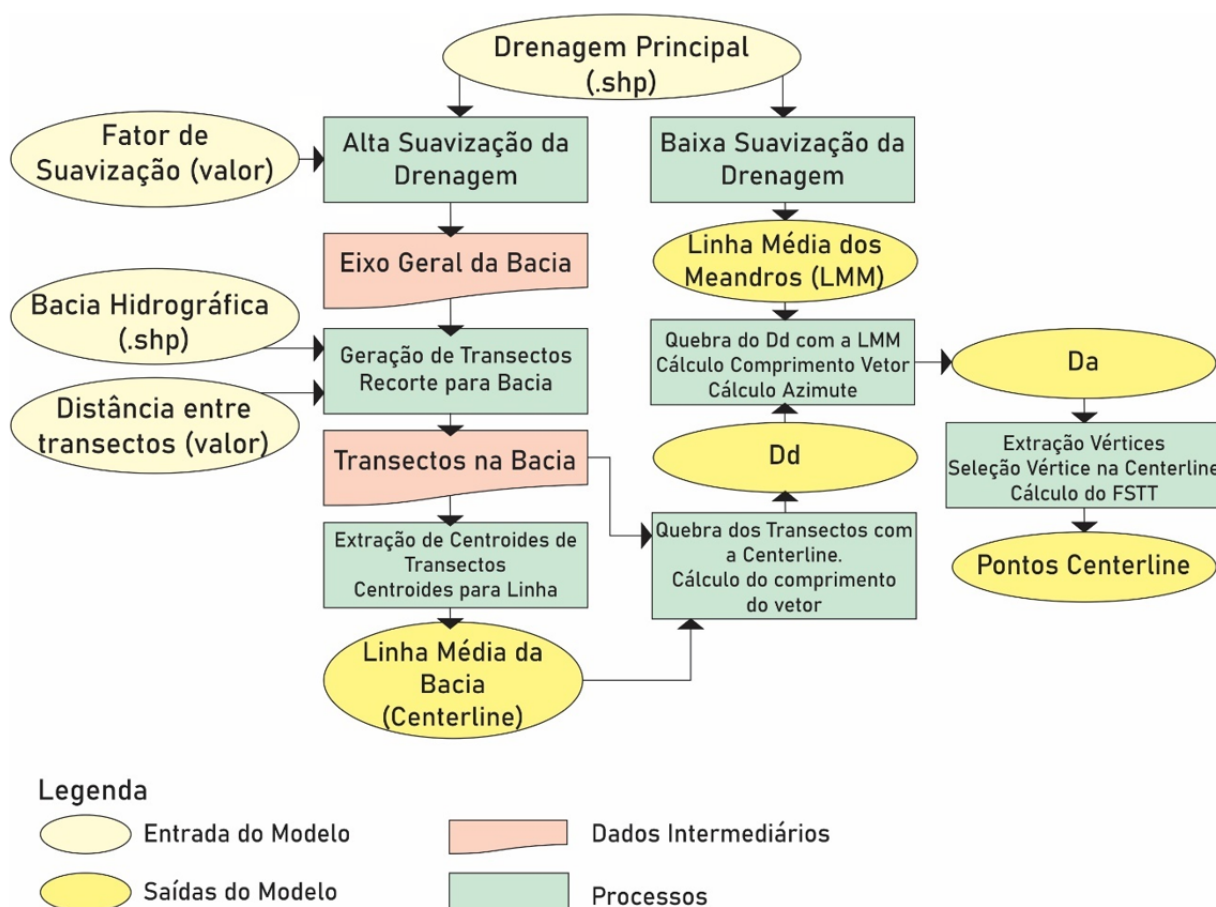


resultados foram comparados com dados levantados em campo, além de informações sobre a litoestrutura da área (Pinho *et al.*, 2010; Dias *et al.*, 2011; Uhlein *et al.*, 2011) e sobre o contexto regional, de forma a identificar possíveis condicionantes tectônicas e/ou estruturais.

DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O modelo desenvolvido necessita de apenas dois arquivos vetoriais de entrada: um polígono da bacia hidrográfica selecionada e um arquivo linear com a drenagem principal da bacia em análise. Estes dados devem estar disponíveis em arquivos *shapefile* separados e com uma única feição em cada e em coordenadas projetadas, seguindo a projeção UTM para melhor funcionamento. (Fig. 3A). A Fig. 2 apresenta um fluxograma simplificado identificando as principais etapas realizadas para elaboração do modelo.

FIG. 2 – Fluxograma simplificado com as etapas do modelo gerado



FONTE: Elaborado pelos autores.

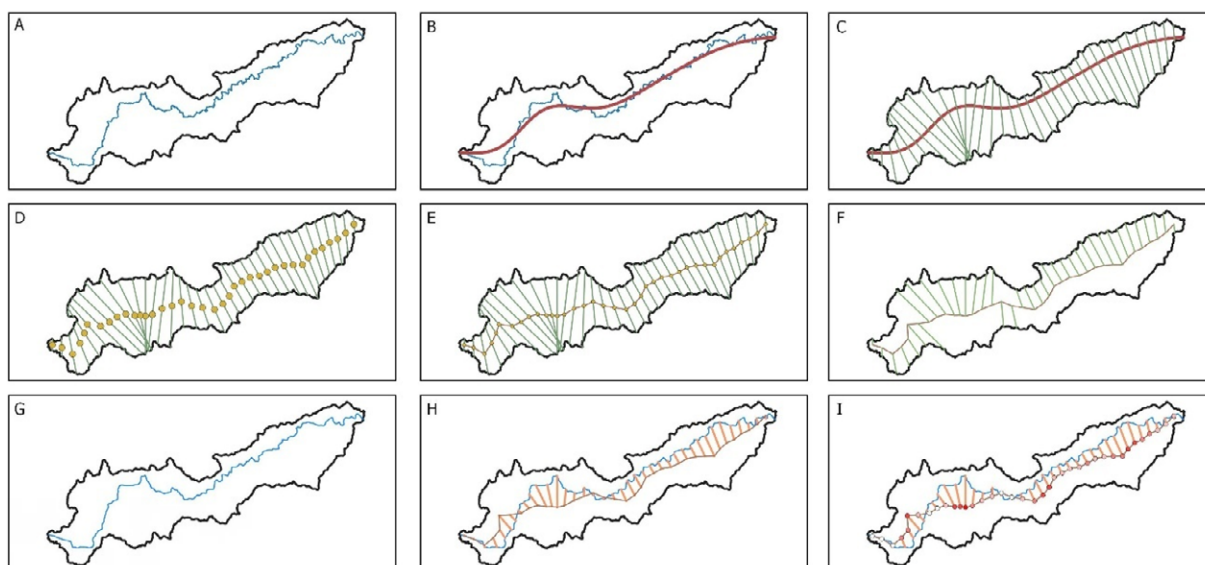
O primeiro passo consiste na geração do Eixo Geral da Bacia a partir de uma suavização da drenagem extremamente elevada, simplificando sobremaneira a drenagem (Fig. 3B), de forma a retirar pequenas mudanças de direção. Para tal, foi



utilizada a ferramenta *Line Smoothing*, disponibilizada pelo plugin SAGA GIS, utilizando o método *Improved SIA Model* e valores pré-definidos de sigma, preservação e iterações. O usuário deve determinar um valor do modelo denominado “Fator de Suavização”, correspondente ao valor de Sensibilidade do modelo utilizado, que é adimensional, varia de 1 a 10 e permite definir o quanto a linha de drenagem inserida será simplificada. Valores maiores devem ser colocados em drenagens com mudanças abruptas de direção, enquanto valores menores em bacias com mudanças menores de direção. O uso de valores baixos de Fator de Suavização em bacias com grandes mudanças de direção podem comprometer o resultado final, enquanto o uso de valores altos em bacias com poucas mudanças pode provocar uma generalização excedente da drenagem.

A partir do Eixo Geral da Bacia, são gerados transectos equidistantes, utilizando a ferramenta *Transects by Distance*, disponibilizada pelo plugin *Geometric Attributes*. Os transectos são recortados para a bacia a partir da ferramenta Recortar (Fig. 3C). Depois, são gerados centroides localizados na metade dos transectos, a partir da ferramenta Centroide (Fig. 3D). Estes centroides são transformados em uma linha com a ferramenta Pontos para Linhas (Fig. 3E). Esta linha corresponde à linha central da bacia, pois atravessa, em toda a extensão da bacia, exatamente o ponto central, que dividiria a bacia em trechos simétricos para cada transecto. Esta linha, denominada Linha Média da Bacia ou *Centerline*, é um dos resultados iniciais gerados pelo modelo. Antes da definição da Linha Média da Bacia são realizados diversos pequenos procedimentos para impedir erros nesta etapa, que não serão detalhados no texto mas podem ser visualizados no modelo disponibilizado.

FIG. 3 – Etapas de geração do modelo: arquivos de entrada (A), definição do eixo geral da bacia (B), transectos da bacia (C), centroides dos transectos (D), Linha Média da Bacia (E), Dd (F), linha média dos meandros (G), Da (H) e FSTT calculado (I).



FONTE: Elaborado pelos autores.



Depois, procede-se à quebra dos Transectos gerados anteriormente com a Linha Média da Bacia, utilizando-se da ferramenta Linhas com Quebra. Este procedimento permite o cálculo do Dd a partir da obtenção da extensão do segmento do transecto seccionado com a ferramenta Calculadora de Campo. Exclui-se o segmento do transecto que não intersecciona a drenagem, resultando no arquivo gerado na Fig. 3F, que consiste no resultado Dd do modelo.

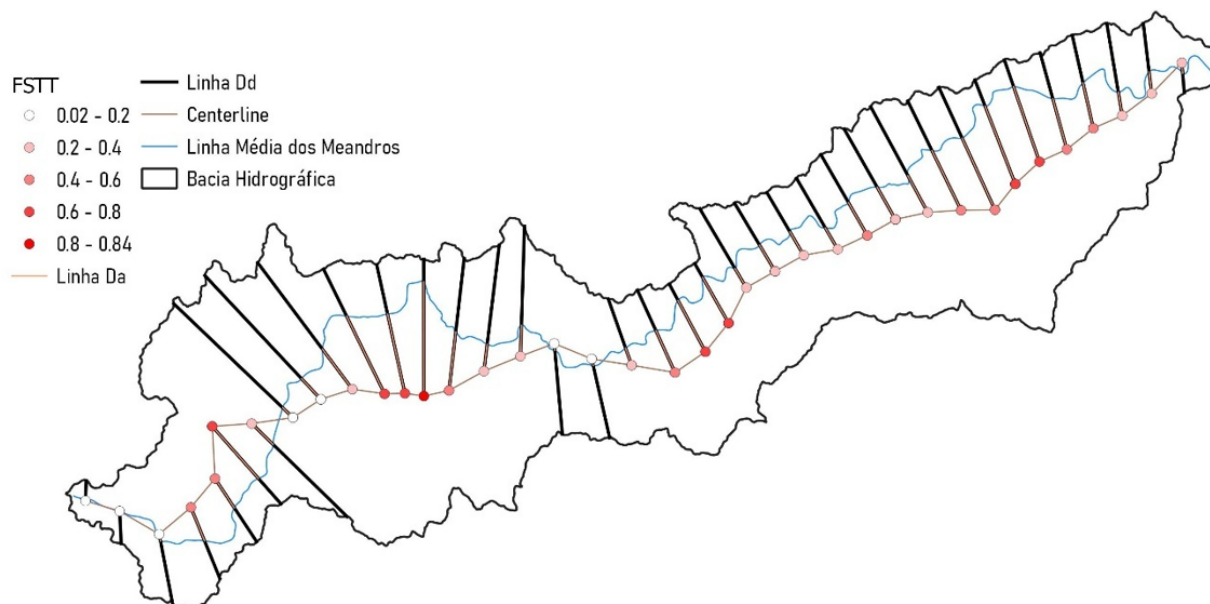
Realiza-se a extração da Linha Média dos Meandros (Fig. 3G), conforme sugerido por Cox (1994), utilizando-se novamente a ferramenta *Line Smoothing* do *plugin* SAGA GIS, utilizando o método *Improved SIA Model* e valores pré-definidos de sigma, preservação e iterações. Posteriormente, aplica-se novamente a ferramenta Quebras com Linha, de forma a segmentar a linha Dd, obtida anteriormente, com a Linha Média dos Meandros (Fig. 3H). Este procedimento permite a identificação do segmento representativo do Da, que corresponde à extensão deste segmento obtida a partir da ferramenta Calculadora de Campo. Nesta ferramenta obtém-se também a direção do transecto em graus a partir do comando Azimute. Assim, a tabela de atributos do arquivo gerado já contém os valores de Dd, Da e da direção de cada segmento Da, o que possibilita o cálculo do FSTT utilizando-se novamente a Calculadora de Campo. O arquivo gerado “Da” já contém o cálculo do FSTT em sua tabela de atributos, sendo um dos arquivos finais gerados pelo modelo.

Depois, realiza-se a transformação do arquivo linear Da em um arquivo pontual a partir da ferramenta Extrair Vértices. Seleciona-se o ponto que intercepta a Linha Central da Bacia (*Centerline*) e descarta-se campos da tabela de atributos sem função para o resultado. Isso permite a obtenção do resultado “Pontos *Centerline*”, que conta com o valor do FSTT e o azimute em um arquivo pontual, que permite melhor representação. A Fig. 4 apresenta os resultados gerados pelo modelo.

O modelo pode ser aplicado em uma bacia hidrográfica única ou, ainda, em diversas bacias hidrográficas. Para isso, é necessário utilizar a opção “Executar Processo em Lote”, tendo como base arquivos vetoriais *shapefile* separados de cada bacia hidrográfica em uma pasta e da drenagem em outra. Mantenha os arquivos de bacia hidrográfica e drenagem com o mesmo nome ou código. Sugere-se que se utilize a ferramenta Dividir uma Camada Vetorial para separar um arquivo *shapefile* multifeição em diversos arquivos *shapefile*.



FIG. 4 – Resultados do modelo.



FONTE: Elaborado pelos autores.

A execução da ferramenta se dá a partir do arquivo MODEL3, disponibilizado para download no site do Grupo de Pesquisa RIVUS: <https://rivusufmg.wixsite.com/home/general-1>. A Fig. 5 apresenta a ferramenta em sua apresentação no *software* QGIS. Nos campos “Bacia” e “Drenagem”, deve-se inserir a bacia hidrográfica e a drenagem principal da bacia que serão utilizadas. No campo “Fator de Suavização”, deve-se inserir um valor entre 1 e 15 (o padrão é 5), de forma a representar o nível de simplificação necessário para a drenagem. Conforme apresentado, em caso de bacias com abruptas mudanças de direção da drenagem, recomenda-se a utilização de valores mais elevados. O campo “Distância entre os Transectos” deve ser preenchido com o valor em metros para intervalos desejados entre os transectos. Podem ser realizados testes para o melhor ajuste dos valores às bacias selecionadas. Os resultados do modelo, conforme apresentados na figura anterior, podem ser salvos em arquivos definitivos ou temporário.



FIG. 5 – Resultados do modelo.

FONTE: Elaborado pelos autores.

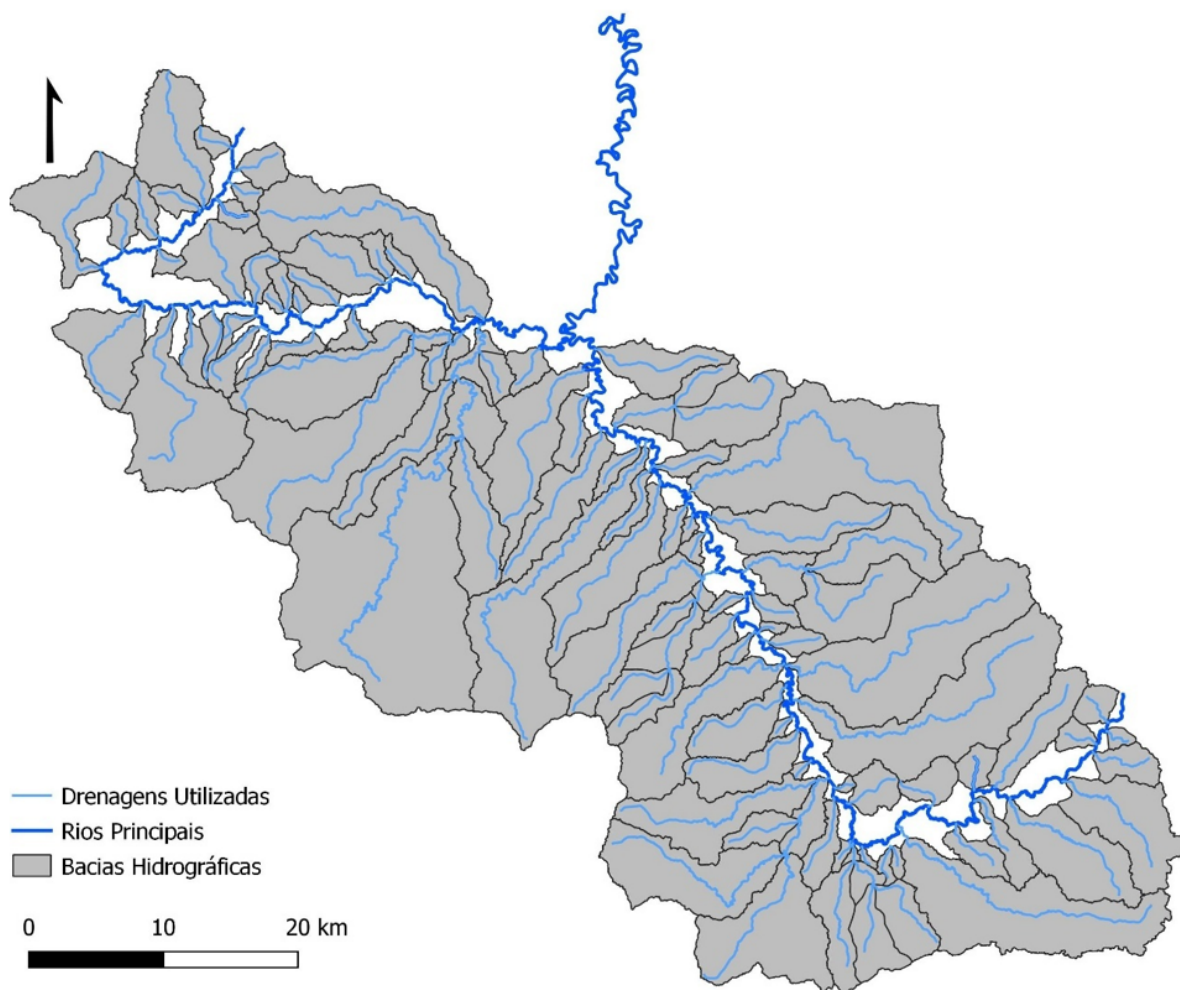
APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo foi aplicado em 109 bacias hidrográficas de afluentes dos rios Paranaíba e Espírito Santo (Fig. 6), localizados na região do Alto Paranaíba – Triângulo Mineiro do Estado de Minas Gerais. As bacias analisadas apresentavam área total entre 1 e 200 km². O Fator de Suavização utilizado foi de 4, com distância entre os transectos de 500 metros.

A região é marcada pela ocorrência de quartzitos e filitos proterozóicos do Grupo Canastra em sua área serrana da porção ocidental, além de pelitos neoproterozoicos do Grupo Bambuí que ocupam o piso da depressão do rio Paranaíba na porção central. Por fim, arenitos e tufitos cretáceos dos Grupos Mata da Corda e Areado assentados sobre as rochas do Grupo Bambuí, constituem a base para a formação de chapadas nos interflúvios orientais da bacia do rio Paranaíba (Facury, 2024).



FIG. 6 – Bacias hidrográficas e drenagens principais utilizadas para aplicação do modelo.



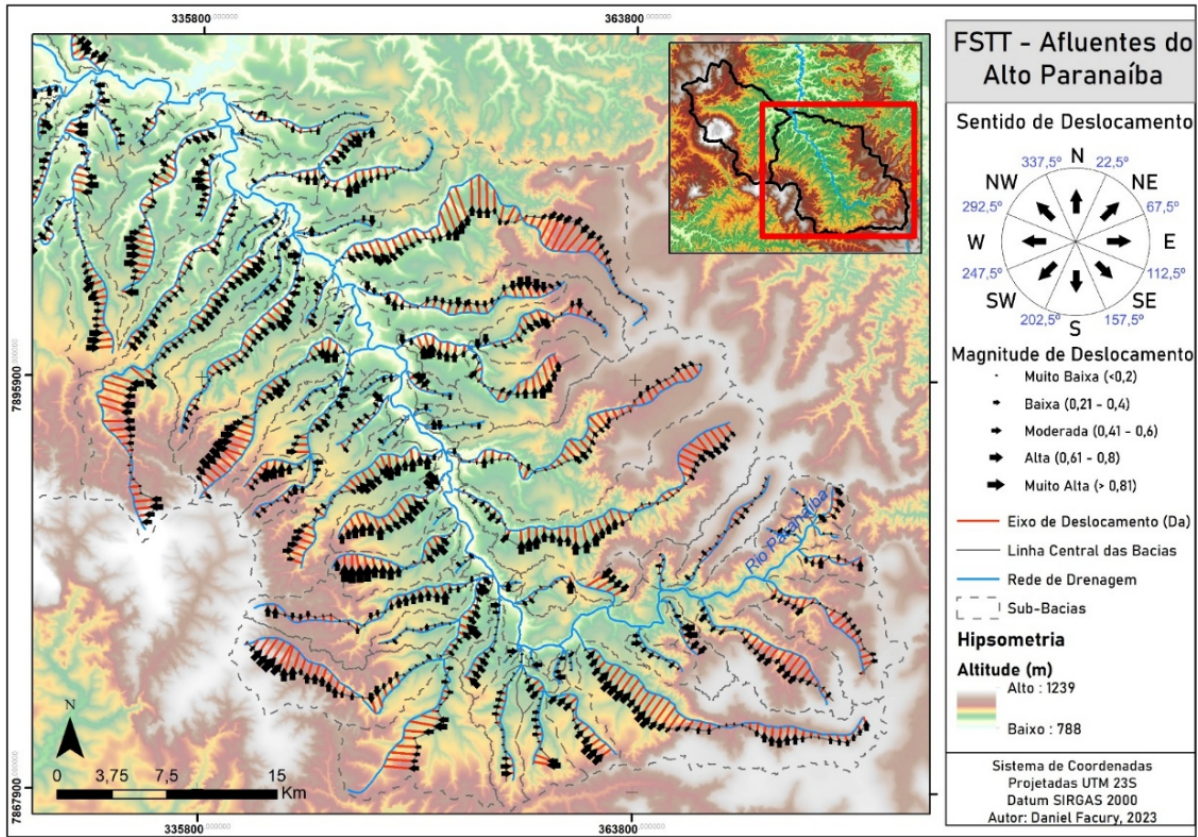
FONTE: Elaborado pelos autores.

Os resultados obtidos foram satisfatórios para todas as bacias analisadas, sendo que o modelo aplicado não apresentou erros ou resultados incoerentes em seu desempenho. Os dados gerados foram representados com destaque para os Pontos ao longo das *Centerlines*. Estes foram representados como setas rotacionadas para os pontos cardeais e colaterais conforme o ângulo de azimute apresentado, além de variação de tamanho conforme a magnitude do deslocamento encontrado (Fig. 7). Esta representação permitiu a visualização da variação destes resultados nas bacias estudadas.

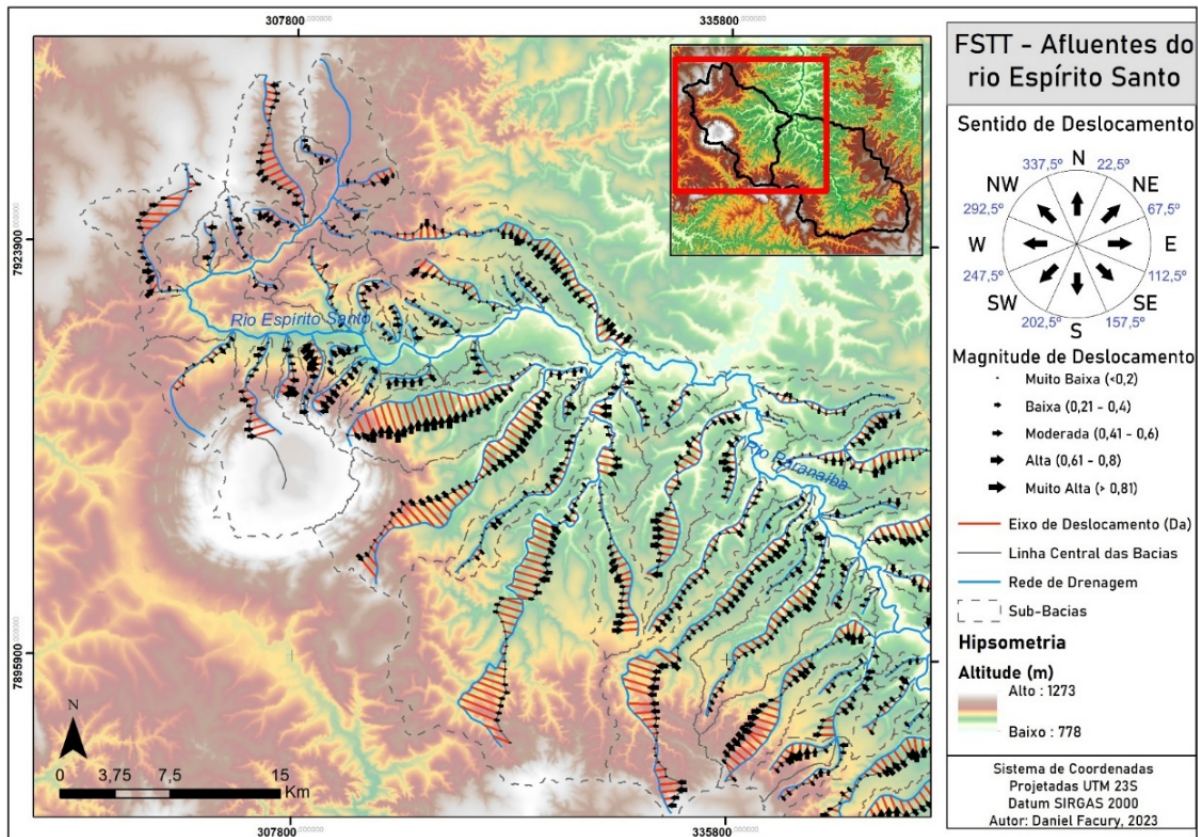


FIG. 7 – Fator de Simetria Topográfica Transversal dos afluentes dos rios Paranaíba (A) e Espírito Santo (B).

(A)



(B)

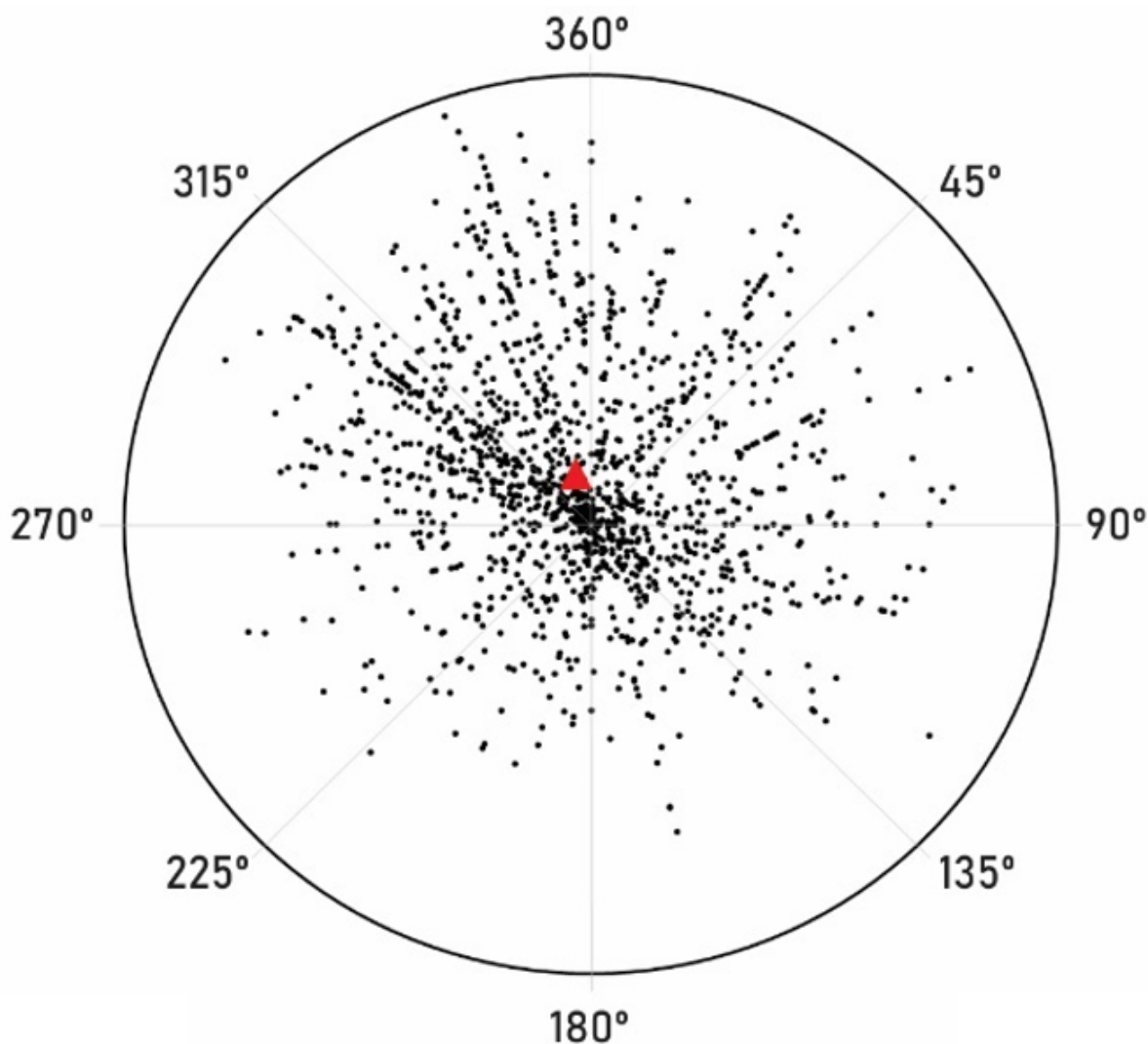


FONTE: Facury, 2024.



Os valores obtidos para o FSTT foram representados graficamente por meio da elaboração de um gráfico polar (Fig. 8). Neste gráfico, cada ponto preto indica uma medida em pontos equidistantes em 500 metros na linha média da bacia. Quanto mais próximo das bordas do círculo, maior a magnitude de assimetria, quanto mais perto do centro, mais próximo de 0. O triângulo vermelho indica os valores médios.

FIG. 8 – Gráfico polar indicando o sentido e a magnitude da assimetria.



FONTE: Facury, 2024.

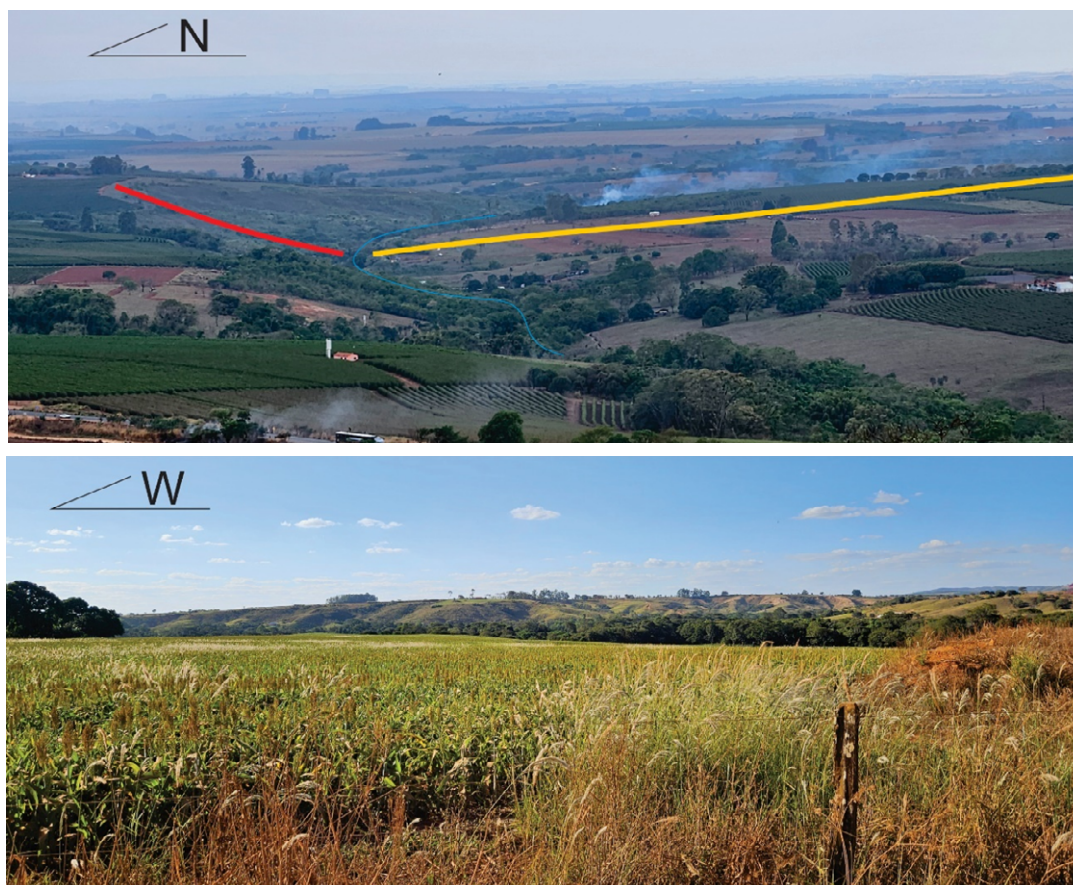
A aplicação do modelo na área estudada permitiu a identificação de assimetrias nas bacias hidrográficas com direção preferencial N-NNW. Isso indica que as drenagens, que apresentam direção predominante leste-oeste, estão mais deslocadas para as vertentes nortes em comparação com as vertentes sul. Este fator pode ser visualizado nos mapas representados na Fig. 7, mas também no gráfico da Fig. 8 e também em variações nas características de vertentes vistas em campo (Fig. 9). A média de deslocamento, apesar de próxima em relação ao centro do gráfico polar, apresenta valores semelhantes ao



encontrado por Ma *et al.* (2019) em regiões tectonicamente ativas do Planalto Tibetano, sendo interpretados neste caso como respostas a taxas diferentes de soerguimento de blocos.

Nota-se que a ocorrência de assimetrias em bacias hidrográficas pode estar relacionada a processos neotectônicos ou à condicionantes litoestruturais. Todavia, as estruturas da área, destacadas por amplas dobras de eixo Norte-Sul (Pinho *et al.*, 2010; Dias *et al.*, 2011; Uhlein *et al.*, 2011), não explicam esta possível assimetria. Assim, Facury (2024) propõe que esta assimetria esteja relacionada com basculamentos de blocos atuantes na região durante o último e mais recente evento de incisão de drenagem, promovendo importantes assimetrias de vertentes na área. Estas assimetrias já haviam sido observadas anteriormente por Saadi (1991) em relação a possíveis basculamentos em topos de chapadas na região, com direção coincidente ao encontrado em Facury (2024). Estas assimetrias apresentam o mesmo sentido aproximado do adernamento de grandes blocos tectônicos do sudeste brasileiro, afetando desde a Serra da Mantiqueira até parte norte da Serra da Canastra (Gontijo-Pascutti *et al.*, 2012), nas proximidades da área estudada. Assim, é possível que as assimetrias encontradas na escala local analisada tenham relação com eventos regionais de basculamento de blocos no interior do Brasil.

FIG. 9 – Assimetria em vertentes vista de campo.



FONTE: Facury, 2024.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversos índices morfométricos têm sido utilizados para estudos da evolução do relevo em geomorfologia. Dentre eles, destacam-se os índices de assimetria que possibilitam a identificação de basculamento de blocos e condicionamento litoestrutural da drenagem. O FSTT se destaca pois permite visualizar esta mudança ao longo de bacias hidrográficas, o que possibilita melhor comparação de fatores. Sua aplicação, todavia, têm sido realizadas de formas diversas e sem padronização, o que pode ocasionar inconsistências.

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo para extração automática deste índice no QGIS versão 3.22, chegando a resultados satisfatórios para todas as bacias utilizadas como teste para aplicação do índice. O modelo necessita de apenas dois arquivos vetoriais: a bacia hidrográfica e a drenagem de interesse, resultando em arquivos vetoriais com todos os parâmetros envolvidos no cálculo do FSTT. A aplicação permitiu identificar assimetrias na região do Alto rio Paranaíba, confirmado observações realizadas em escala regional por outros autores.

A disponibilização do modelo desenvolvido em um *software* livre e gratuito se apresenta como importante estratégia no avanço do conhecimento, permitindo futuras edições, sugestões, críticas e melhorias no modelo então gerado. Ademais, este modelo melhora a replicabilidade dos resultados de estudos em geomorfologia, tornando os procedimentos metodológicos mais transparentes e padronizados. O modelo ainda carece de testes em bacias de grandes proporções, tendo em vista que as bacias utilizadas como teste apresentavam áreas de até 200 km².

Agradecimentos:

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. À FAPEMIG -Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo financiamento dos projetos APQ 00511-21 e APQ 00770-24. Ao CNPq, pela bolsa de doutorado. Aos integrantes do grupo de pesquisa RIVUS -Geomorfologia e Recursos Hídricos (UFMG).



REFERÊNCIAS

- CARVALHO, A. **O papel dos processos fluviais na evolução do modelado do relevo na Bacia do Rio Paraúna, Serra do Espinhaço Meridional - MG.** 2019. 235 f. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019
- CHEREM, L. F. S.; FARIA, S. D.; ZANCOPÉ, M. H. C.; SORDI, M. V.; NUNES, E. D.; ROSA, L. E. Análise morfométrica em bacias hidrográficas. In: MAGALHÃES JR.; BARROS, L. F. P. **Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais.** 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. Cap 7
- COX, R. T. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics. An example from the Mississippi Embayment. **Geological Sciences Building**, Missouri, v. 106, p. 571-581, 1994.
- DAXBERGER, H.; DALUMPINES, R.; SCOTT, D. M.; RILLER, U. The ValleyMorph Tool: An automated extraction tool for transverse topographic symmetry (T-) factor and valley width to valley height (Vf-) ratio. **Computers & Geosciences**, v. 70, p. 154-163, 2014.
- DIAS, P. H. A.; CHAVES, M. L. S. C.; ANDRADE, K. W.; NOCE, C. M. **Projeto Alto Paranaíba - Folha São Gotardo.** SE.23-Y-D-I. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- FACURY, D. M. **Evolução Neocenoica do relevo no Oeste de Minas Gerais: Compreensões a partir do Alto rio Paranaíba.** 2024. 230 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.
- FIRMINO, I. G.; VARGAS, K. B.; FORTES, E. Controle Tectono-Estrutural dos sistemas de drenagem: revisão literária e propostas metodológicas. In: CARVALHO JR.; O. A.; GOMES, M. C. V.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. (Eds.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira.** Brasília: UNB, 2022. Cap. 8
- FURRIER, M.; ARAÚJO, M. E.; MENESES, L. F. Geomorfologia e a Tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 6, n. 2, p. 61-70, 2006.
- GONTIJO-PASCUTTI, A. H. F.; HASUI, Y.; SANTOS, M.; SOARES JR., A. V.; SOUZA, I. A. As Serras do Mar e da Mantiqueira. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil.** São Paulo: Beca, 2012. Cap. 23b.
- GRASER, A.; OLAYA, V. Processing: A Python Framework for the Seamless Integration of Geoprocessing Tools in QGIS. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, p. 2219-2245, 2015.
- GUILLEN, A. J. Z.; NOLASCO, M. C.; CASTRO, P. T. A.. Modelagem dos níveis de base fluviais da bacia do rio Jacuípe, nordeste semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 3, e2358, 2023.
- HARE, P. W.; GARDNER, I. W. Geomorphic Indicators of Vertical Neotectonism along Converging Plate Margins. In: Annual Binghamton Geomorphology Symposium, 15., 1985, Boston. **Proceedings...** Boston: Allen and Unwin, 1985, p. 123-134.
- HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letter**, v. 17, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f
- MA, Z.; PENG, T.; FENG, Z.; LI, M.; LI, X.; GUO, B.; LI, J.; CHUNHUI, S. Assymetrical river valleys and their tectonic significance in the Maxianshan area, NE Tibetan Plateau. **Geomorphology**, v. 329, p. 70-80, 2019.
- MARÇAL, M. S.; RAMOS, R. R. C.; SESSA, J. C.; FEVRIER, P. V. R. Sedimentação fluvial Quaternária do Vale do Alto Curso do rio Macaé, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, p. 449-467, 2015.
- MARQUES NETO, R.; PEREZ FILHO, A. Evidências de atividade neotectônica nos maciços alcalinos de Itatiaia e Passa Quatro, sul de Minas Gerais. **GeoUSP: espaço e tempo**, v. 18, n. 2, p. 416-430, 2014.
- MARTINS, F. P.; LIMOEIRO, B. F.. Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) e Fator de Assimetria de Bacia de Drenagem (FABD) aplicados ao médio Tocantins, MA/TO. In: Fernanda Pereira Martins; Leonardo Batista Pedroso; Rildo Aparecido Costa. (Org.). **Geografia em Foco: teorias e práticas.** 1ed. Curitiba: Editora Bagai, 2021. p. 35-45.
- MESQUITA, A. F.; VIEIRA, V. R. A.; ARAB, P. B.; BRUCH, A. F.; ALVES, T. N.. Aspectos Morfoestruturais Da Margem Costeira Do Extremo Sul Da Bahia (Brasil): Implicações Neotectônicas Na Evolução Geomorfológica Costeira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 1, p. 47-64, 2021.



PINHO, J. M. M.; FÉBOLI, W. L.; SIGNORELLI, N. (Eds.). **Projeto Vazante – Paracatu, Estado de Minas Gerais e Goiás**: texto explicativo. Belo Horizonte: CPRM, 2017. 356 p., 12 mapas geológicos escala 1:100.000.

SAADI, A. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais** (Tensões Intraplaca, Descontinuidades Crustais e Morfogênese). 1991. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991

SANTOS, D. A. R.; MORAIS, F. Assimetria de bacias hidrográficas e influências litoestruturais na geomorfologia do rio Formoso, TO. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 18, n. 61, p. 180-199, 2017.

SANTOS, M.; LADEIRA, F. S. B.; BATEZELLI, A. Indicadores geomórficos aplicados à investigação de deformação tectônica: uma revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1564>

SHAHZAD, F.; GLOAGUEN, R. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. **Computers & Geosciences**, v. 37, p. 261-271, 2011.

SILVA, T. M.; PAES, T. V. Parâmetros morfométricos aplicados a análise tectono-erosiva em bacias de drenagem. **GeoUERJ**, v. 33, 2018.

SOARES, S. P.; LADEIRA, F. S. B.; LIESENBERG, V.. Morfometria Da Bacia Do Rio São João, Mg: Uma Proposta De Entendimento Dos Limites E Da Dinâmica Das Superfícies Erosivas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, p. 241-252, 2016.

SORDI, M. V.; SALGADO, A. A. R.; PAISANI, J. C. Evolução Do Relevo Em Áreas De Tríplíce Divisor De Águas Regional - O Caso Do Planalto De Santa Catarina: Uma Análise Morfoestrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 4, p. 579-592, 2015.

UHLEIN, A.; FREITAS, A. M.; CRUZ, A. B.; SILVA, W. F.; CAXITO, F. A.; MOREIRA, G. C.. **Projeto Alto Paranaíba - Folha Carmo do Paranaíba**. SE.23-Y-B-IV. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: UFMG, 2011.



ANÁLISE PRELIMINAR DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL A DESLIZAMENTOS EM MANAUS: UMA ABORDAGEM COM LÓGICA FUZZY

João Cândido André da Silva Neto¹

Rogério Ribeiro Marinho²

PALAVRAS-CHAVE: Vulnerabilidade; Deslizamento; Lógica Fuzzy; Manaus; Amazonas.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a vulnerabilidade ambiental a deslizamentos em Manaus. A vulnerabilidade ambiental pode ser definida como a probabilidade de áreas apresentarem diferentes graus de suscetibilidade a deslizamentos frente o processo de ocupação humana, considerando a configuração atual da paisagem e a interação de fatores como relevo dissecado, ocupação humana precária, ausência de infraestrutura, alta pluviosidade, erodibilidade dos solos e suscetibilidade litológica. A metodologia consistiu na caracterização físico-ambiental da área, utilizando dados bibliográficos da Embrapa e dados do IBGE, Mapeamento Geológico do Amazonas, dados geomorfométricos do FABDEM (declividade e hipsometria), plataforma MapBiomas (uso da terra e cobertura vegetal) e dados CHIRPS 2.0 (erosividade das chuvas). Foram considerados ainda as distâncias dos canais de drenagens e da presença de favelas. Os dados foram processados e analisados espacialmente a partir de álgebra de mapas implementadas com lógica Fuzzy (operador Gamma $\gamma = 0.8$). Os resultados indicaram que a vulnerabilidade a deslizamentos em Manaus se distribui em 3,6% da área com grau Muito Baixo, 13,7% com grau Baixo, 58,6% com grau Moderado, 22,9% com grau Alto e 1,2% com grau Muito Alto. A maior parte da área apresenta vulnerabilidade moderada a alta, evidenciando a necessidade de medidas preventivas e de gestão deste território.

¹ Professor do Departamento e Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, joaocandido@ufam.edu.br

² Professor do Departamento e Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, rogeo@ufam.edu.br



INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, a floresta Amazônica tem passado um processo gradativo e desigual de desmatamento, e aumentado continuamente desde 1991, variando de acordo com as mudanças relacionadas às forças econômicas, marcado pela substituição das áreas de florestas por áreas com atividades agropecuárias e de exploração madeireira e expansão das cidades (FEARNSIDE, 2005; 2006).

A transformação de sistemas naturais em sistemas antrópicos, pode resultar em diversos problemas de ordem socioambiental, como perda de biodiversidade, intensificação dos processos erosivos, surgimento de áreas de risco à população residente das periferias, poluição das águas, assoreamento dos rios, entre outros relacionados aos processos de apropriação da natureza.

Assim, o uso da terra pode ser entendido como um importante elemento na alteração das paisagens naturais, pois permite analisar o espaço geográfico sob uma dimensão que contempla os elementos naturais e tecnificados, socioeconômicos e culturais.

Em Manaus a capital do Estado do Amazonas, assim como as principais metrópoles brasileiras, tem-se observados nas últimas três décadas crescimento populacional exponencial (IBGE, 2024), associado a um intenso processo de expansão urbana, e consequentemente ocupação de novas áreas para habitação, que muitas vezes ocorrem de modo inadequado, não respeitando as limitantes físico-ambientais, associados à ausência de infraestrutura adequada e saneamento básico.

Destaca-se a importância de Manaus pela sua função na hierarquia urbana no cenário regional, nacional, global, devido ao intenso fluxo de pessoas e bens, que circulam aeroportos, rodovias e rios, ligados ao polo industrial e à zona de livre comércio de Manaus (OLIVEIRA, 2003; SOUZA, 2016).

Cabe enfatizar ainda os problemas recorrentes das ocupações, muitas vezes em áreas de risco, observa-se periodicamente episódios de movimentos de massa normalmente por deslizamentos, principalmente durante período chuvoso, que muitas vezes resultam em tragédias anunciadas, resultando na perda de vida de cidadãos em situação de vulnerabilidade socioeconômica. Conforme noticiado no início do ano de 2025 pelos veículos de comunicação (MATTOS, 2025), entre 2020 a 2025, treze pessoas perderam a vida na cidade de Manaus, em decorrência de movimentos de massas em áreas de risco, entre elas, sete crianças.

O crescimento das cidades, o avanço do desmatamento, e apropriação da natureza pode levar à situação de perturbações em ambientes naturais, como as paisagens Amazônicas, que constituem habitats naturais vulneráveis, cujo processo de resiliência das



comunidades biológicas muitas vezes são dificultadas pela perda de suas características originais, e sua recuperação pode levar séculos, ou não ocorrer naturalmente, devido à ruptura de sua dinâmica natural (ALBAGLI, 2001).

Nesse contexto, a vulnerabilidade ambiental pode ser compreendida ao analisarmos as rupturas intensificadas pela ação humana sobre a natureza. Esse processo resulta em uma reorganização das formas espaciais que se concretizam na paisagem, com potencial para afetar diretamente as comunidades que nela habitam.

Segundo o CEMADEN (2022), as atividades humanas como cortes em talude, aterros, depósitos de lixo, modificações na drenagem, retirada de cobertura vegetal e ocupações inadequadas, entre outras, têm aumentado a vulnerabilidade das encostas para a formação desses processos de deslizamentos.

Assim, ao analisarmos a cidade de Manaus, que tem uma população residente de 2.063.689 pessoas, onde encontra-se a quarta maior favela do Brasil segundo dados do Censo do IBGE (2025), cabe destacar que na capital amazonense associado ao crescimento populacional nas últimas três décadas, tem se verificado um intenso processo de expansão urbana, e conseqüentemente ocupação de novas áreas para habitação, onde observa-se episódios de movimentos de massa, durante período chuvoso.

O presente trabalho teve como objetivo analisar a vulnerabilidade ambiental a deslizamentos em Manaus. A vulnerabilidade ambiental pode ser definida como a probabilidade de áreas apresentarem diferentes graus de suscetibilidade a deslizamentos frente o processo de ocupação humana, considerando a configuração atual da paisagem e a interação de fatores como relevo dissecado, ocupação humana precária, ausência de infraestrutura, alta pluviosidade, erodibilidade dos solos e suscetibilidade litológica.

Nessa perspectiva, a vulnerabilidade ambiental aqui é entendida como prováveis áreas que apresentam maior ou menor grau, de acordo com as configurações atuais dessas paisagens, em desencadear episódios, ao longo do tempo, de inundações ou aos movimentos de massa como deslizamento. As interações das variáveis como o relevo fortemente dissecado que associado à ocupação humana com precária e/ou ausência de infraestrutura, associados e aos altos índices pluviométricos proporciona um maior escoamento superficial, e associado à erodibilidade dos solos e suscetibilidade litológicas, podem desencadear o aceleração dos processos morfodinâmicos, como os processos erosivos de diferentes intensidades e movimentos de massa.

A vulnerabilidade da paisagem pode ser compreendida como a possibilidade para análise de rupturas potencializadas pela atuação da sociedade na natureza, tendo



como resultado uma nova organização das formas espaciais que se materializam na paisagem, podendo impactar diretamente as populações que ali vivem (SILVA NETO e ALEIXO, 2016).

Compreende-se que vulnerabilidade da paisagem com a conjuntura de uma determinada área, associada às perturbações das condições específicas, normalmente relacionadas ao processo de apropriação da natureza por meio do uso da terra, assim, refletindo na alteração das qualidades iniciais dos atributos da paisagem (SILVA NETO, 2014).

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

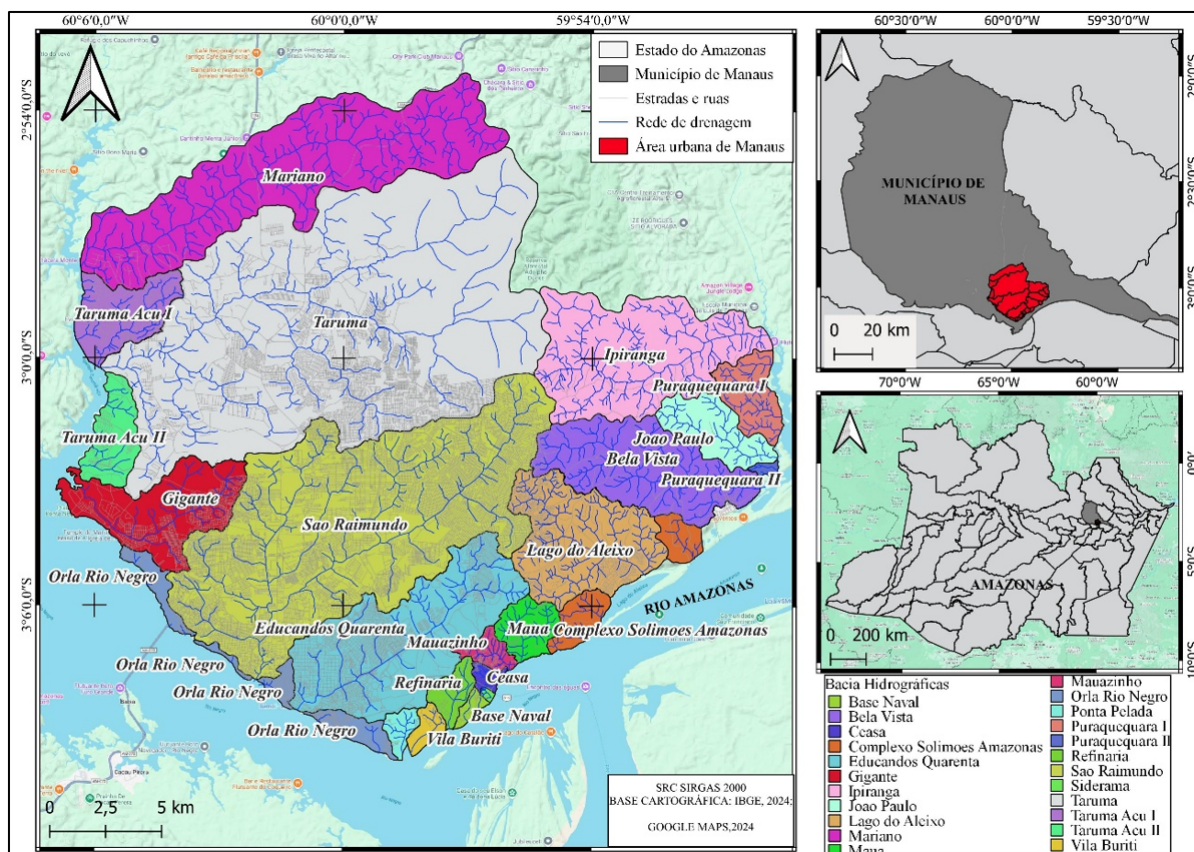
O município de Manaus tem uma população residente de 2.063.689 pessoas, aproximadamente 99% da população de Manaus reside na área urbana, e 1.151.828 de pessoas morando em favelas, cerca de 55% da população, segundo dados do Censo de 2022 do IBGE, informações divulgadas em 2025. Destaca-se ainda que em Manaus apresenta 62,4% de domicílios apresentam esgotamento sanitário, 23,9% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 26,3% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (IBGE, 2025).

A área de estudo expressa representativas configurações das paisagens com suas dinâmicas ambientais, potencialidades e problemas infraestruturais do ponto de vista da implementação de políticas públicas e intensificação dos tipos de uso do solo urbano.

A cidade de Manaus está inseridas em região de clima equatorial em que apresenta precipitações de 2.300 mm em média por ano (ALEIXO, et al. 2023), situam-se em unidade geomorfológicas da Planície Amazônica e Planalto Dissecado dos rios Negro-Uatumã, assentadas em unidades litológicas da Formação Alter do chão, que caracterizam-se por arenitos, siltitos e conglomerados, sendo os arenitos avermelhados e esbranquiçados, demonstrando granulometria fina a média, com frações micro conglomeráticas, Aluviões Holocênicos, que caracterizam-se por depósitos inconsolidados das acumulações mais expressivas que ocorrem nas planícies dos rios maiores, e Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica, constituída respectivamente do topo para base de zona argilosa caulinítica, zona bauxítica com concreções e lentes gibsíticas, zona ferruginosa concrecionária, zona pisolítica nodular; capeamento argiloso (Latosolos), no topo (IBGE, 2024) (Figura 1).



FIGURA 1: Localização da área de estudo.



FONTE: Organizado pelos autores, 2025.

Quanto aos tipos de solos caracterizam-se por apresentar predominantemente Latossolos-amarelo em ambas bacias, diferenciando-as pela ocorrência de Neossolos Flúvico e Neossolo Quartzarênico e Gleissolos Háplicos (IBGE, 2024).

MATERIAIS E MÉTODOS

A aquisição de dados para presente proposta utilizará modelos digitais de elevação (MDE) da FABDEM Copernicus, que resultaram em informações sobre altitude e declividade, além de informações morfométricas da bacia.

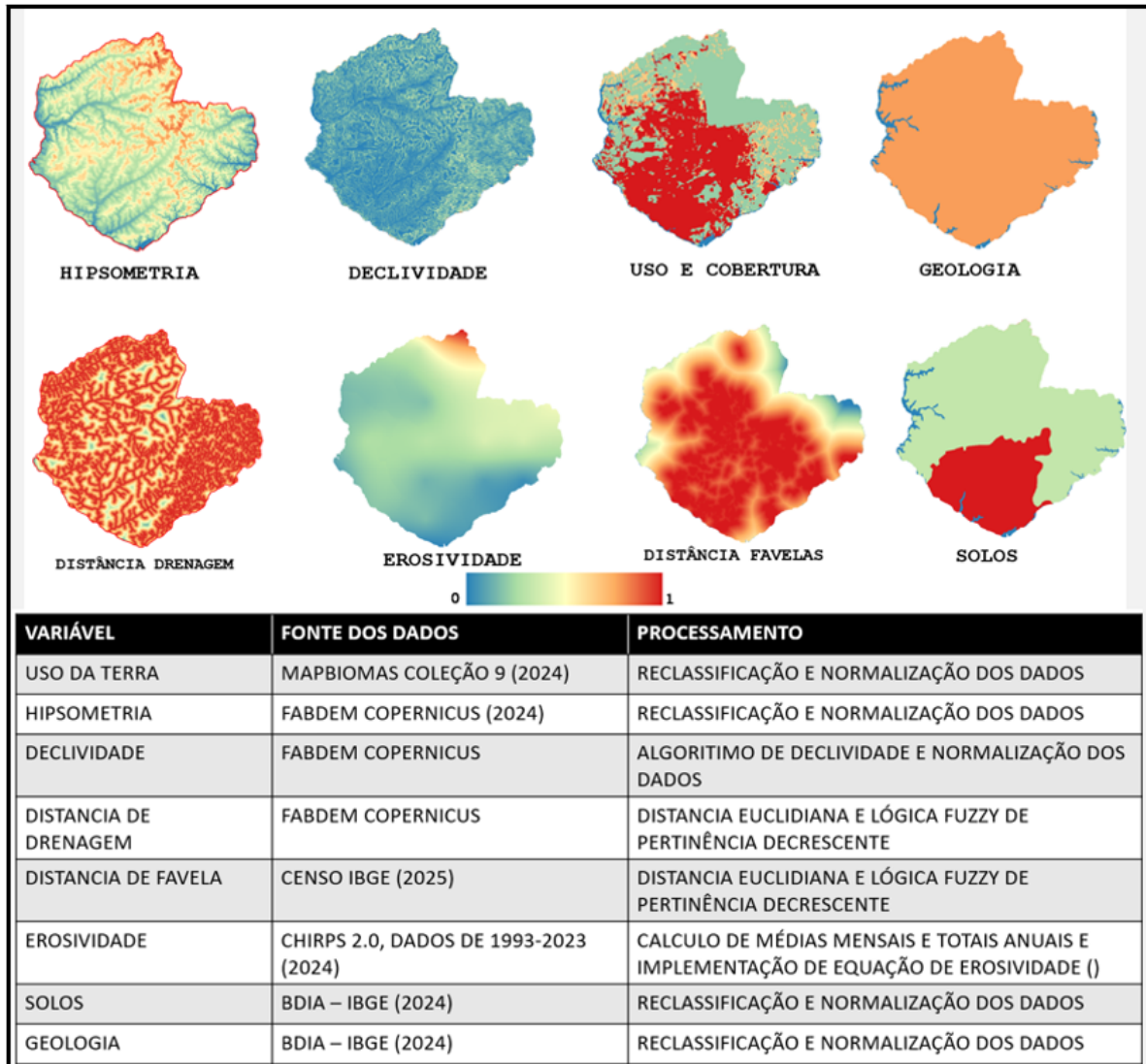
A aquisição de dados para presente proposta utilizará modelos digitais de elevação (MDE) da FABDEM Copernicus, que resultaram em informações sobre altitude e declividade, além de informações morfométricas da bacia.

A caracterização físico-ambiental da área de interesse, foi realizada a partir de consulta e compilação de material bibliográficos da Embrapa (2006), em banco de dados disponíveis do IBGE (2024) e Mapeamento Geológico do Estado do Amazonas (CPRM - 2004).



As informações geológicas foram compiladas do Mapeamento Geológico do Estado do Amazonas (CPRM, 2004), enquanto os dados pedológicos solos consultados e compilados dos Bancos de dados de Informações Ambientais (Bdia) do IBGE (2024) (Figura 2).

FIGURA 2: Variáveis utilizadas na matriz de vulnerabilidade à deslizamento.



FONTE: Organizado pelos autores, 2025.

Quanto às variáveis climáticas foi elaborado o índice de erosividade das chuvas a partir dos dados CHIRPS (Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations), que constituem conjuntos de dados de precipitação obtidos a partir de observações locais e remotas, em que se calculará para área de interesse as médias mensais e anuais de precipitação, e posteriormente implementada as Equações (Figura 3) proposta por Barbosa, Blanco e Melo (2015) conforme Lima et al. (2023).



$$EI = 25,31 * \left(\frac{r^2}{P}\right) + 496,56 \quad (1)$$

Onde:

EI= média mensal do índice de Erosividade (MJ/ha.mm);

r = média mensal de precipitação (mm);

P = média anual de precipitação, (mm).

Para calcular a erosividade anual (R), somaram-se os índices mensais ao longo da série histórica 1993 a 2023 (equação 2).

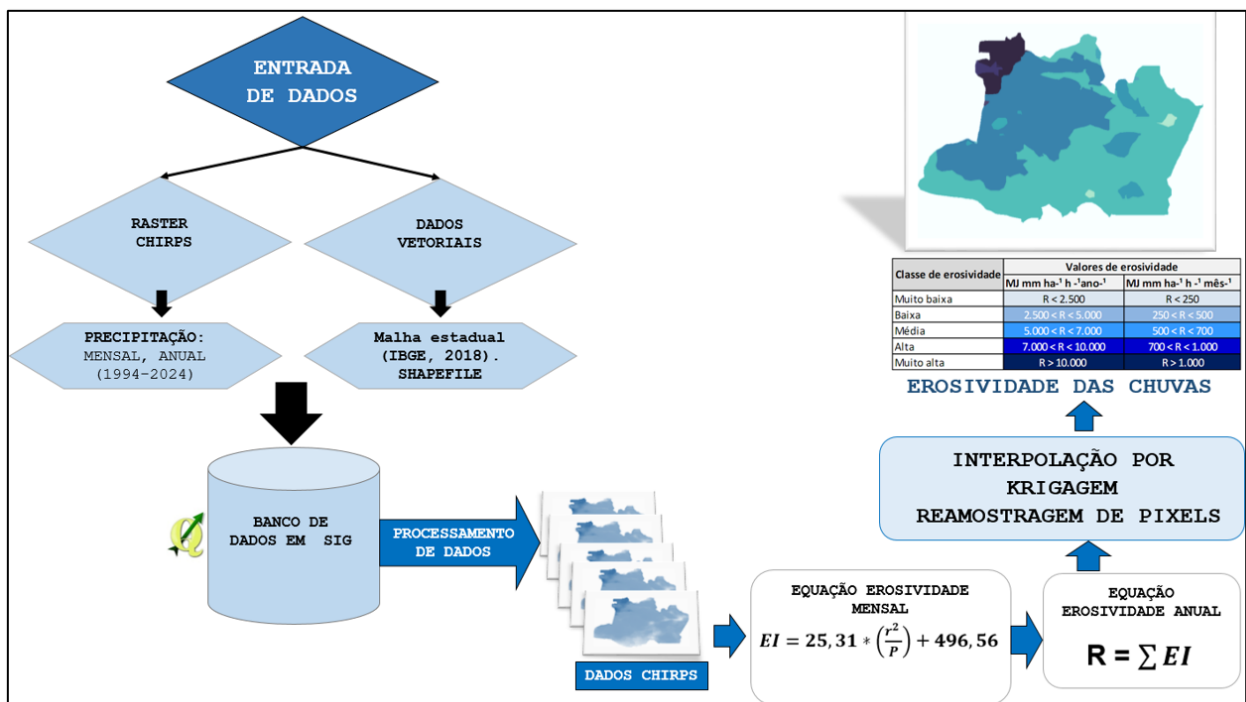
$$R = \sum EI \quad (2)$$

Onde:

R = erosividade da chuva (MJ/ha.mm/ano);

EI = média mensal do índice de Erosividade.

FIGURA 3- Fluxograma para elaboração da erosividade das chuvas.



ORGANIZAÇÃO: autores, 2025.

Para se identificar os tipos de usos da terra e cobertura vegetal. Foram utilizados dados de uso da terra da plataforma do MapBiomas Coleção 8.

Após o processamento e análise dos dados de uso da terra, foram implementadas a análise espacial de dados geográficos a partir da ponderação das classes de cada variável,



posteriormente implementada a álgebra de mapas, integrando as variáveis analisadas para compor uma matriz de vulnerabilidade da paisagem, adaptada da metodologia de Crepani et al. (2008).

A ponderação das variáveis no caso da geologia, foi considerado grau de coesão das rochas, quanto aos tipos de solos é considerado a capacidade de um determinado solo resistir à erosão (Crepani, et al. 2008). Para as variáveis do relevo foram consideradas declividade e altitude, em que se considera a variação altimétricas e inclinação da vertente na capacidade em favorecer o escoamento superficial ou a infiltração da água, possibilitando remoção ou acúmulo de detritos (SILVA NETO, 2013).

As matrizes de vulnerabilidade à perda de solos resultarão da integração de variáveis de cenários de uso da terra, geologia, solos, erosividade e relevo, elaboradas a partir da análise espacial em Sistema de Informações Geográficas, utilizando software QGIS 3.26. Para isso, foram implementadas álgebra de mapas utilizando operadores Gamma (γ) por meio do método Fuzzy, uma ferramenta que permite organizar e estruturar de forma racional as correlação de variáveis (CÂMARA, et al., 2001).

É importante destacar o processo de validação dos dados observados por meio de incursões em campo, principalmente no que tange o uso da terra e os graus de vulnerabilidade, que consistiu em visitas em áreas pilotos que foram definidas no decorrer da pesquisa.

Quanto à variável climática foi considerada a erosividade das chuvas em que se estabelece graus de vulnerabilidade conforme a avaliação numérica do valor médio anual da chuva do local, expresso em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ano⁻¹, em que é estabelecida Vulnerabilidade Muito Baixa: <2500; Baixa: 2500-5000; Moderada: 5000-7000; Alta: 7000-10000; e Muito Alta: > 10000 (CARVALHO, 1994; SILVA NETO e ALEIXO, 2020).

O uso da terra e cobertura vegetal, considerou-se a intensidade das intervenções antrópicas e de densidade, presença ou não de cobertura vegetal (Quadro 1).



QUADRO 01: Ponderação das variáveis.

PONDERAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA VULNERABILIDADE AMBIENTAL AO DESLIZAMENTO		
GEOLOGIA	GRAU VULNERABILIDADE	CLASSE
Formação Alter do Chão	0,80	Alta
Depósitos Aluvionares	1,00	Muito Alta
SOLOS	GRAU VULNERABILIDADE	CLASSE
Latossolo	0,60	Moderada
Neossolo	1,00	Muito Alta
EROSIVIDADE	GRAU VULNERABILIDADE	CLASSE
$R > 10000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	1,00	Muito Alta
$R < 10000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	0,80	Alta
DECLIVIDADE	GRAU VULNERABILIDADE	CLASSE
45%	1,00	Muito Alta
20–45%	0,80	Alta
8–20%	0,60	Moderada
3–8%	0,40	Baixa
< 3%	0,20	Muito Baixa
HIPSOMETRIA	GRAU VULNERABILIDADE	CLASSE
< 100 m	1,00	Muito Alta
80–100 m	0,80	Alta
60–80 m	0,60	Moderada
30–60 m	0,40	Baixa
30 m	0,20	Muito Baixa
USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL	GRAU VULNERABILIDADE	CLASSE
Área não Vegetada	1,00	Muito Alta
Agropecuária	0,80	Alta
Vegetação Herbácea e Arbustiva	0,60	Moderada
Floresta	0,20	Muito Baixa
Corpo D'água	0,10	Muito Baixa

ORGANIZAÇÃO: Autores, 2025

Para as distâncias euclidianas considerou-se quanto mais próximo do alvo analisado, seja canais de drenagem ou habitações com favelas, maior o grau de vulnerabilidade ambiental ao fenômeno analisado, seja ele deslizamento, inversamente, as áreas mais distantes representam ambientes menos vulneráveis, ou com grau de vulnerabilidade baixa ou muito baixa.

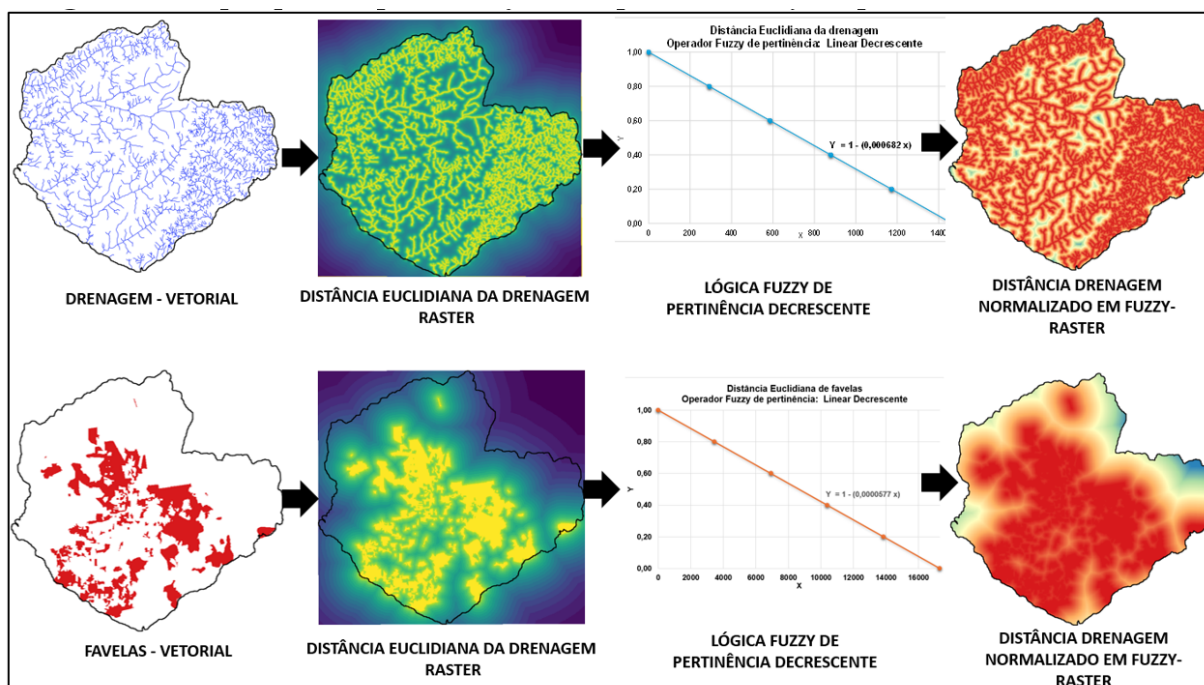


A escolha da variável de áreas com favelas, foi considerado por esse tipo de moradia, além de revelar a precariedade das condições dos domicílios, pode indicar que os condicionantes antrópicos como esgotamento sanitário inadequado, presença de fossas rudimentares e ausência de galerias pluviais, podem favorecer a concentração de fluxos de água nas encostas e favorecer a ocorrência de deslizamentos e inundações (IBGE, 2018).

Para expressar a relação topológica de distâncias, utilizou-se a distância euclidiana e a implementação de lógica Fuzzy, pode ser definido com o valor '1.0', quando as distâncias de um determinado fenômeno, quanto mais próximo do fenômeno, a partir da distância euclidiana, maior a compatibilidade em que condiz com a hipótese de maior grau de vulnerabilidade ambiental ao fenômeno analisado, nesse caso deslizamento, inversamente, as áreas com valores próximos '0.0' representa ambientes estáveis de acordo com a variável analisada.

Na figura a seguir (Figura 4), observa-se a pertinência linear decrescente para distâncias euclidianas às rede de drenagens e habitações definidas como favelas ou comunidades urbanas.

FIGURA 4- Etapas para implementação do operador Fuzzy de pertinência decrescente.



ORG: autores, 2025.

Após o processamento e análise dos dados, se implementou as álgebras de mapas utilizando-se o método Fuzzy com operador Gamma ($\gamma = 0.8$), para realizar a integração das variáveis analisadas, que resultou na matriz de vulnerabilidade ambiental.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A transformação de sistemas naturais em sistemas antropizados, pode resultar em diversos problemas de ordem socioambiental, como perda de biodiversidade, intensificação dos processos erosivos, surgimento de áreas de risco à população residente das periferias, poluição das águas, assoreamento dos rios, entre outros relacionados aos processos de apropriação da natureza.

A análise da Vulnerabilidade Ambiental a deslizamentos nas bacias hidrográficas urbanas de Manaus, foi dividida em quatro classes: Muito Baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta, em que foram atribuídos valores com intervalos entre 0.0 a 0.2; 0.2 a 0.4; 0.4 a 0.6; 0.6 a 0.8; e 0.8 a 1.0, respectivamente.

Quanto à Vulnerabilidade Ambiental a deslizamentos, verifica-se o predomínio do grau de Vulnerabilidade Moderada, compreendendo mais da metade da área estudada, cerca de 59%. Isso sugere que uma parte significativa de Manaus apresenta grau de Vulnerabilidade que exigem atenção e medidas de prevenção, visto que esses graus de vulnerabilidade apresentam um estágio de transição entre vulnerabilidade baixa e alta.

Áreas de alta vulnerabilidade são observadas em 23% das áreas das bacias hidrográficas de Manaus, são associadas a Latossolos sobre a Formação Alter do chão, com erosividade das chuvas superiores a $10.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, altitudes acima de 80 metros e declividades que podem superar 20%. Essas áreas são fortemente ocupadas por áreas classificadas pelo IBGE (2024) por Favelas e comunidades urbanas.

Áreas de Muito Alta Vulnerabilidade são observadas em aproximadamente 1% das áreas das bacias hidrográficas de Manaus, distribuídas entre as bacias do São Raimundo, Lago do Aleixo, Mariano Gigante e Bela Vista. Este grau de vulnerabilidade apresentam característica semelhantes da Vulnerabilidade Alta, entretanto, apresenta uma relação topológica direta com as ocorrências das áreas de risco à deslizamentos. (Figura 5).

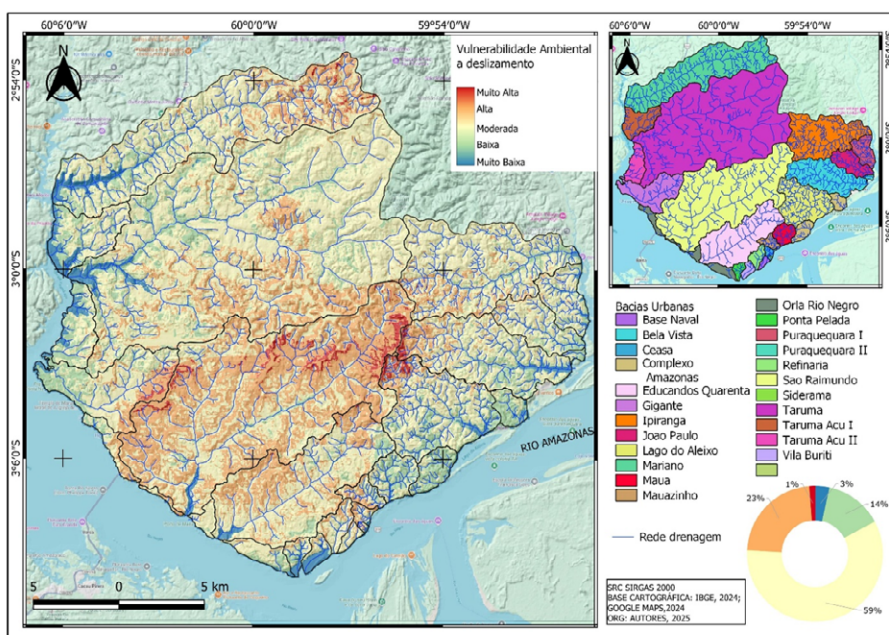


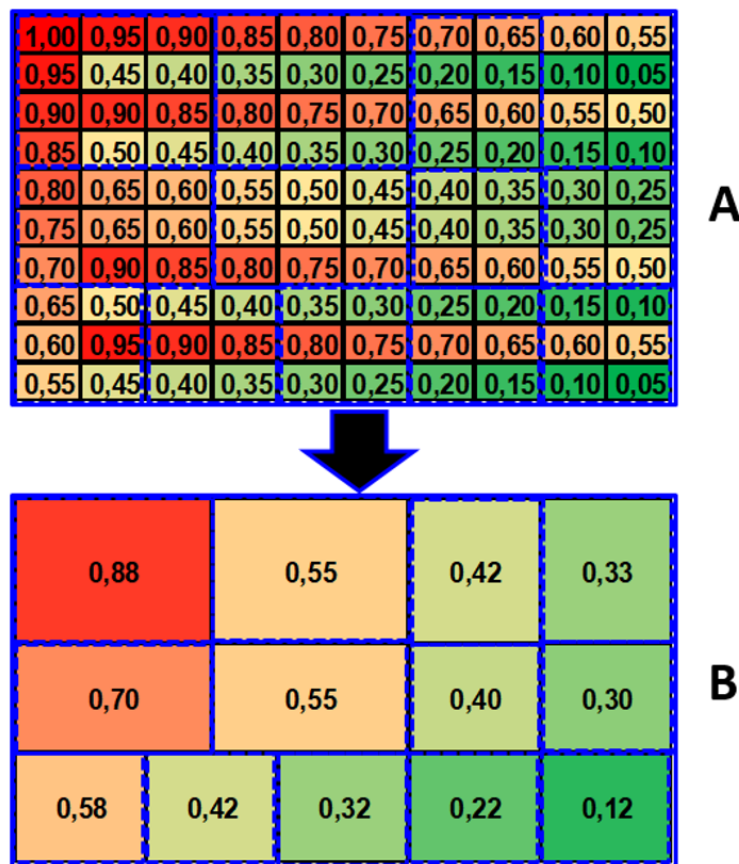
FIGURA 5: Vulnerabilidade Ambiental a deslizamentos em Manaus - AM.

FONTE: Organizado pelos autores, 2025.



Para se analisar as variações dos graus de vulnerabilidade ambiental na bacias hidrográficas em Manaus, realizou-se a análise conjunta das médias e o desvio padrão dos valores obtidos na análise zonal das bacias, visto que na análise zonal da vulnerabilidade média, quanto o desvio padrão, considera-se os valores a partir de uma média aritmética pela área das bacias em metros quadrados. A título de exemplo na figura 6 “A” equivale à distribuição dos graus de vulnerabilidade por pixels, e “B” corresponde à distribuição zonal das médias de vulnerabilidade por polígonos ou zonas, no presente trabalho correspondem às áreas das bacias. (Figura 6).

FIGURA 6: Exemplo de análise zonal da média de vulnerabilidade por área.



ORGANIZAÇÃO: autores, 2025.

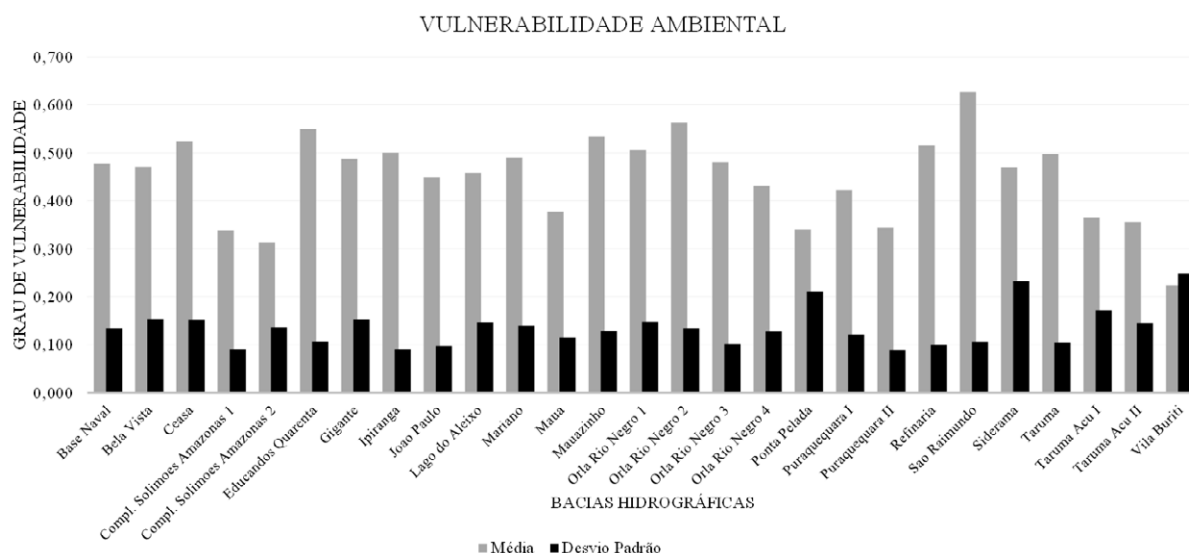
A análise zonal indicou a presença de uma distribuição assimétrica em determinadas bacias, com ocorrência simultânea de valores extremamente baixos e elevados, o que influencia diretamente na média aritmética dos índices de vulnerabilidade. Além disso, a proximidade entre os valores menores de média e desvio padrão, apontam para uma distribuição mais homogênea da vulnerabilidade nas bacias hidrográficas e relativa homogeneidade quanto às variáveis que integram a vulnerabilidade.

Observa-se que as bacias com maior média de vulnerabilidade ambiental são: a do São Raimundo, Mauzinho, Educandos Quarenta e Orla Rio Negro, com valores



superiores a 0.53, indicando áreas críticas quanto aos graus de vulnerabilidade e possível exposição a riscos ambientais. Em contrapartida, bacias como Vila Buriti, Complexo Solimões Amazonas, Ponta Pelada, Puraquequara II, Tarumã Açú II, Tarumã Açú I apresentaram as menores médias, inferiores a 0.37, o que pode indicar menor pressão ambiental resultado de fatores como baixa densidade populacional, e menor intensificação de ocupação ou presença de áreas naturais preservadas. O uso da média como medida de tendência central permite identificar as bacias que concentram maior grau de vulnerabilidade em termos absolutos. (Figura 7).

FIGURA 7: Gráfico de análise zonal da média e desvio padrão da vulnerabilidade ambiental por bacia hidrográfica em Manaus.



FONTE: Organizado pelo autores, 2025.

A análise do desvio padrão revela importantes informações sobre a dispersão dos dados em cada bacia. As bacias Ceasa, Gigante, Bela Vista, Taruma Açú I, Ponta Pelada, Siderama e Vila Buriti, que apresentam os maiores desvios padrão, sugerindo heterogeneidade espacial acentuada da vulnerabilidade dentro dessas bacias, com coexistência de áreas de alta e baixa vulnerabilidade. As bacias como Puraquequara II Ipiranga, Complexo Solimões Amazonas, João Paulo, Refinaria, Orla Rio Negro, Tarumã apresentam baixos índice de desvios padrão, indicando maior homogeneidade no grau de vulnerabilidade. A associação entre médias elevadas e altos desvios padrão, como observado por exemplo a bacia Siderama, reforça a necessidade de políticas públicas mais direcionadas e adaptativas, considerando a complexidade e a desigualdade espacial das condições ambientais nessas bacias urbanas.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vulnerabilidade das paisagens, podem contribuir para identificação e prevenção de prováveis áreas de risco associados à ocupação inadequada dessas áreas.

A variação no grau de vulnerabilidade entre as diferentes bacias hidrográficas de Manaus, pode ser atribuída a diferenças na topografia, tipo de solo, cobertura vegetal, e nos processos de ocupação de novas área, muitas vezes ocupações irregulares, que se caracterizam pela ausência ou precaridade de infraestrutura e acesso à serviços básicos.

Os resultados enfatizam a necessidade de atenção e possíveis intervenções para mitigar os riscos ambientais associados aos deslizamentos. As áreas de Alta e Muito Alta Vulnerabilidade demandam ações como monitoramento, planejamento urbano adequado, obras de contenção, educação ambiental e remoção de áreas de risco.

Quanto à análise estatística dessas medidas, portanto, é fundamental para identificar áreas prioritárias para intervenções urbanas e políticas públicas, pois revela não apenas o nível médio de vulnerabilidade, mas também a dispersão e a concentração dos dados dentro de cada unidade hidrográfica. Essa abordagem possibilita um planejamento mais eficaz e direcionado à mitigação de riscos urbanos em Manaus.

Agradecimentos:

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM). À Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação – PROPESP, da Universidade Federal do Amazonas - UFAM. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).



REFERÊNCIAS:

- ALBAGLI, S. **Amazônia: fronteira geopolítica da biodiversidade**. In: Parcerias Estratégicas, nº 12, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia Centro de Estudos Estratégicos, 2001.
- BARBOSA, A. J. S.; BLANCO, C. J. C.; MELO, A. M. Q. de. Determinação do fator energético da chuva (R) para Belém-PA. 2015. In: **Congresso internacional de hidrossedimentologia**, 1., 2015, Porto Alegre, RS. Anais... Porto Alegre, RS: IPH, 2015.
- CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R. S.; BARBOSA, C.; ALMEIDA FILHO, R.; BÖNISCH, S. Técnicas de inferência Geográfica. In: CÂMARA, G. ; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, 2001.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM–Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais. 1994.
- CEMADEN, **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Movimento de Massa**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/paginas/ameacas-naturais/movimento-de-massa> Acesso em 29/12/2024
- CHIRPS: **Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations**. 2024. Disponível em <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/> Acesso em: 11 de dezembro de 2024.
- CREPANI, E; et al. **Zoneamento Ecológico-econômico**. In: FLORENZANO, Teresa G. (Org.) Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais. São Paulo, Oficina de Textos, 2008.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. 2ª Ed. Rio e Janeiro: EMBRAPA, 2006.
- FEARNSIDE, P. M. **Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências**. Megadiversidade. 3, 2005.
- FEARNSIDE P. M. **Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle**. Acta Amazônica; 36(3):395–400. 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro, Diretoria de Geociências - Coordenação de Geografia. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. IBGE BDIA - **Banco de Informações Ambientais**. 2024. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/> acesso em 30 de outubro de 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas de setores censitários - divisões intramunicipais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- LIMA, E. P.; et al. **Erosividade da chuva do Brasil**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento 286. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023.
- MATOS, T. Mais de 20 famílias sofreram soterramento em Manaus; sete crianças morreram. **Revista cenário**, 2025. Disponível em: <https://revistacenarium.com.br/mais-de-20-familias-sofreram-soterramento-em-manaus-sete-criancas-morreram/> acesso em: 21/01/2025.
- OLIVEIRA, J. A. (2003). **Manaus de 1920–1967: a cidade doce e dura em excesso**. Valer Editora.
- SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do Rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Geografia** (Londrina), 22(1), 2013.
- SILVA NETO, J. C. A. Zoneamento ambiental como subsídio para o ordenamento do território da bacia hidrográfica do rio Salobra, Serra da Bodoquena – MS. **R. Ra’e Ga** - Curitiba, v.31, p.119-142, Dez/2014.
- SILVA NETO, J. C. A; ALEIXO, N. C. R. Análise Temporal da vulnerabilidade da paisagem à perda dos solos na bacia hidrográfica do Rio Salobra- Serra da Bodoquena, Mato Grosso Do Sul. **Formação (Online)**, [S. l.], v. 2, n. 23, 2016.
- SILVA NETO, J. C. A; ALEIXO, N. C. R. Erosividade da chuva na região do médio Solimões, Amazonas, Brasil. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia-MG v. 21, n. 77 Out/2020.
- SOUZA, L. B. Cidade flutuante: uma Manaus sobre as águas. **URBANA: Revista eletrônica do Centro Interdisciplinar de Estudos sobre a Cidade**, 8(2), 115–146. 2016.



MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) E ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE DESLIZAMENTOS USANDO DADOS LIDAR E FOTOGRAMETRIA POR SFM-MVS

1 Harideva Marturano Egas
2 Denilson de Jesus
3 Tatiana Sussel Gonçalves Mendes
4 Tiago Antonelli
5 Marcio R M de Andrade
6 Victor Augusto Hilquias Silva Alves
7 Daniel Metodiev
8 Rodrigo Augusto Stabile
9 Diogo Rodrigues Andrade da Silva
10 Fernanda Dácio da Costa

PALAVRAS-CHAVE: Topografia de alta resolução; Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT); LiDAR; Structure-from-Motion Multi-View Stereo (SfM-MVS); Morfometria; Modelos 3D

RESUMO

Nas últimas duas décadas, os avanços em sensores, plataformas e técnicas de processamento consolidaram a topografia de alta resolução como uma ferramenta essencial nas geociências, sobretudo no estudo de desastres naturais associados a deslizamentos. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a morfometria do relevo e as cicatrizes de deslizamentos por meio da modelagem tridimensional (3D), integrando dados de fotogrametria digital via *Structure-from-Motion Multi-View Stereo*

- 1 Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Desastres Naturais da Universidade Estadual Paulista (UNESP/CEMADEN). Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) **harideva.egas@unesp.br**
- 2 Mestre em Geociências pela Universidade de São Paulo (USP). Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), **denilson.jesus@sgb.gov.br**
- 3 Doutora em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais da UNESP/CEMADEN, **tatiana.mendes@unesp.br**
- 4 Doutor em Geociências pela Universidade de São Paulo (USP). Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) **tiago.antonelli@cprm.gov.br**
- 5 Doutor em Geografia pela Universidade de São Paulo (USP). Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), **marcio.andrade@cemaden.gov.br**
- 6 Mestre em Geociências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) **victor.alves@cprm.gov.br**
- 7 Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Desastres Naturais da Universidade Estadual Paulista (UNESP/CEMADEN), **d.metodiev@unesp.br**
- 8 Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo (USP). Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), **rodrigo.stabile@cemaden.gov.br**
- 9 Doutor em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), **diogo.rodrigues@cprm.gov.br**
- 10 Mestranda do Curso de Pós-Graduação em Desastres Naturais da Universidade Estadual Paulista (UNESP/CEMADEN), **fernanda.dacio@unesp.br**



(SfM-MVS) e *Light Detection and Ranging* (LiDAR), além de comparar os resultados com abordagens convencionais em 2D (planimétrico) e 2,5D (superfície). A área de estudo compreende a Vila do Sahy, em São Sebastião (SP), fortemente impactada por um evento extremo de precipitação em fevereiro de 2023. A metodologia combinou a estimativa volumétrica direta em ambiente 3D, realizada no software iTwin Capture Modeler, com a análise morfométrica de cicatrizes em 2,5D, no software ArcGIS Pro, a partir de dados LiDAR. Além disso, a inspeção visual em modelos 3D possibilitou identificar feições geomorfológicas relevantes, ampliando a interpretação dos processos associados aos deslizamentos. Foram mapeadas e analisadas 34 cicatrizes de deslizamentos, com espessura média de 1,33 m e volume total mobilizado estimado em aproximadamente 100.205,5 m³, distribuído em uma área impactada total de 62.047 m². A comparação entre métodos evidenciou que as áreas obtidas em 2D foram, em média, 32,6% maiores que as medidas em 3D, enquanto em 2,5D a superestimação alcançou cerca de 61,2%. A aplicação da equação global de Guzzetti et al. (2009) indicou subestimação em volumes <10³ m³ e superestimação acima desse limiar, ressaltando limitações de abordagens globais não calibradas regionalmente, especialmente quando aplicadas as em representações 2D e 2,5D. Conclui-se que a modelagem 3D de alta resolução oferece maior precisão na delimitação das cicatrizes, melhor estimativa volumétrica e maior potencial para subsidiar a análise geomorfológica. Esse nível de detalhamento é particularmente importante para subsidiar ações de gestão e proteção da população local e mapeamento de risco.

INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são fenômenos “naturais” responsáveis por impactos significativos em áreas urbanas e rurais, sendo frequentemente deflagrados por precipitações intensas, de longa duração ou a combinação de ambos, e controlados por fatores geológicos e geomorfológicos (HUNGR; LEROUEIL; PICARELLI, 2014; GUZZETTI ET AL., 2012; GUZZETTI ET AL., 2025). No Brasil, eventos recentes, como os deslizamentos ocorridos no litoral norte do estado de São Paulo, em fevereiro de 2023, e no estado do Rio Grande do Sul, em maio de 2024, destacam a necessidade de abordagens mais precisas para compreender a distribuição espacial e os processos envolvidos nesses eventos catastróficos (ANDRADE ET AL., 2024; STABILE ET AL., 2024; EGAS ET AL., 2024).

Movimentos de massa requerem uma abordagem multidisciplinar para sua compreensão, integrando conhecimentos de geologia, hidrologia, geografia e engenharia. A interação entre os mecanismos que desencadeiam, controlam e moldam esses processos é complexa, demandando uma perspectiva holística para análise e modelagem (ZULHILMI; HAYAKAWA, 2025). No entanto, uma das principais limitações para a modelagem de paisagens e a interpretação geomorfológica decorre da não consideração da tridimensionalidade dos dados analisados, os quais são tradicionalmente avaliados



a partir de observações planimétricas projetadas, desconsiderando a superfície real do terreno. Esse fator pode mascarar a interpretação de variáveis geomorfológicas, especialmente em áreas de relevo acidentado (FERNANDES ET AL., 2012).

Os inventários de deslizamentos desempenham um papel essencial na compreensão da distribuição espacial e temporal desses eventos, possibilitando a identificação de padrões e fatores condicionantes. Essas bases de dados são fundamentais para a análise de suscetibilidade, perigo e risco, além de servirem como referência para modelagem preditiva e planejamento territorial (GUZZETTI ET AL., 2012; VAN WESTEN ET AL., 2006). A precisão dos inventários pode variar conforme a metodologia utilizada, podendo ser baseados em interpretações geomorfológicas, registros históricos ou levantamentos multitemporais. No entanto, uma das limitações recorrentes é a falta de informações detalhadas sobre o tipo e a evolução dos movimentos de massa, o que pode comprometer a acurácia das análises e a eficácia das medidas preventivas (LISSAK ET AL., 2020; BHUYAN ET AL., 2024). Dessa forma, a combinação entre inventários de grande escala e topografia de alta resolução pode representar um avanço na caracterização dos deslizamentos, permitindo um melhor entendimento de suas dinâmicas e impactos.

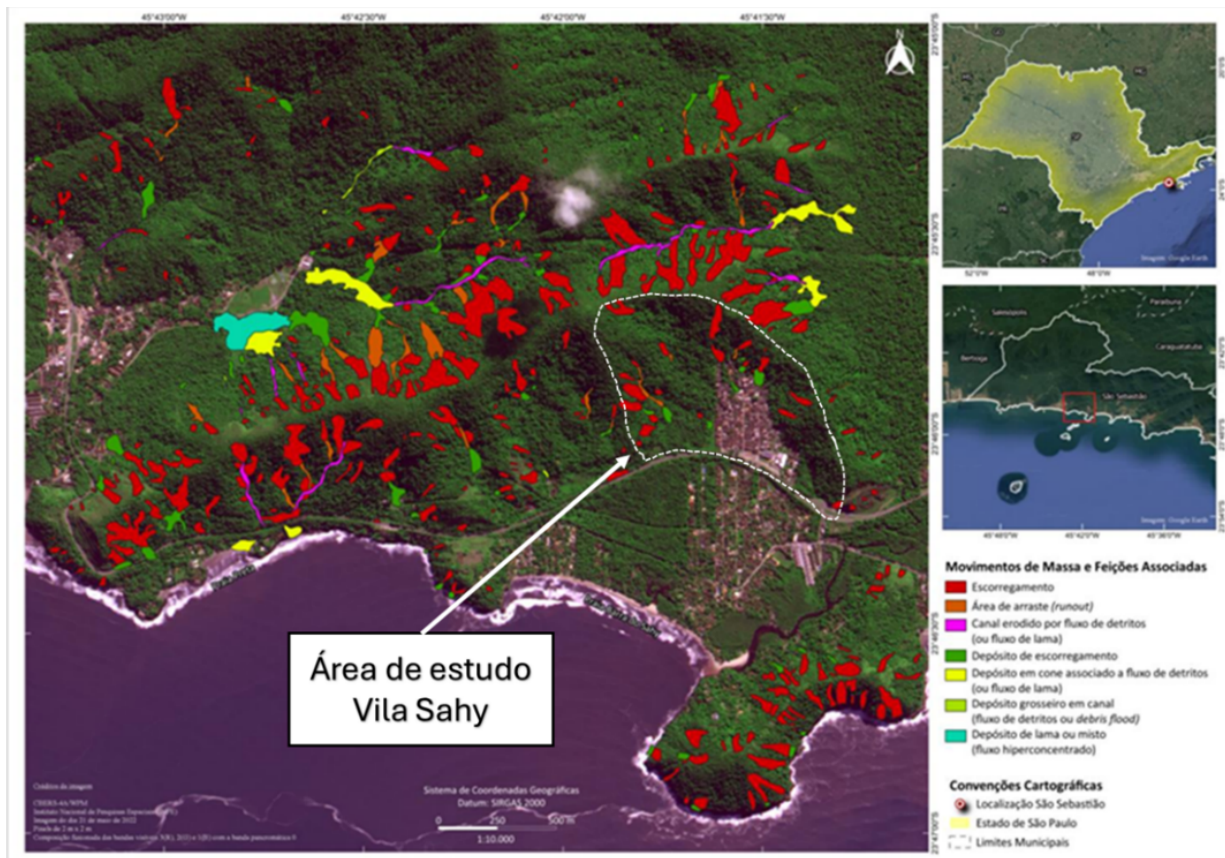
Nas últimas duas décadas, a topografia de alta resolução tem proporcionado novas oportunidades nas Ciências da Terra, graças aos avanços em técnicas, métodos, sensores e plataformas de levantamento. Os dados topográficos de alta resolução podem ser adquiridos por meio de diversas plataformas móveis, como aeronaves, embarcações e veículos terrestres, ou por plataformas fixas, como tripés posicionados no solo. O avanço das técnicas de geoprocessamento e a crescente disponibilidade de dados topográficos de alta resolução, adquiridos por *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e fotogrametria via *Structure-from-Motion Multi-View Stereo* (SfM-MVS), possibilitam a extração de variáveis morfométricas diretamente da superfície real, aprimorando significativamente a análise geomorfológica e a caracterização de deslizamentos (TAROLLI, 2014; PASSALACQUA ET AL., 2015). Essas informações detalhadas permitem um entendimento mais refinado dos padrões de instabilidade e da relação entre a morfologia do relevo e os processos de instabilidade em diferentes escalas.

Modelos espaciais podem ser classificados em diferentes níveis de complexidade. Os modelos planimétricos 2D representam apenas a localização (X, Y) de feições, sem considerar a elevação. Os modelos 2,5D, como os Modelos Digitais de Terreno (MDT) em formato raster, associam a cada coordenada planimétrica um único valor de altitude (Z), sendo amplamente utilizados para representar o relevo. Já os modelos 3D permitem múltiplos valores de elevação para a mesma posição (X, Y), como ocorre em malhas tridimensionais derivadas de nuvens de pontos (LI; ZHU; GOLD, 2005).



Nesse sentido, este estudo tem como objetivo caracterizar a morfometria do relevo e de cicatrizes de deslizamentos por meio da modelagem tridimensional (3D), integrando dados LiDAR e modelos gerados por *Structure-from-Motion* (SfM), além de comparar os resultados com métodos convencionais de mapeamento em 2D e 2,5D. A área de estudo abrange a Vila do Sahy, localizada no município de São Sebastião, no litoral do estado de São Paulo (Fig. 1), que foi severamente impactado por um evento extremo de precipitação entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023. O acumulado pluviométrico ultrapassou 600 mm em apenas 12 horas, desencadeando centenas de movimentos de massa e causando significativos danos à infraestrutura urbana e viária e 64 óbitos (MARENGO ET AL., 2024; COELHO ET AL., 2024A; ANDRADE ET AL., 2024; STABILE ET AL., 2024).

FIGURA 1. Movimentos de massa e feições associadas deflagrados em fevereiro de 2023 em São Sebastião, SP. Este layout contempla a região do Sahy, a mais afetada com impactos sociais pelo desastre.



FONTE: Adaptado de STABILE ET AL. (2024).



MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa integrou técnicas de modelagem 3D e análise morfométrica de alta resolução para caracterização de feições associadas a deslizamentos, a partir de dados obtidos por fotogrametria digital (*Structure-from-Motion Multi-View Stereo* – SfM-MVS) e por sensoriamento remoto ativo a laser (*Light Detection and Ranging* – LiDAR).

Na área de estudo foram realizados dois levantamentos fotográficos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), utilizando os drones DJI Mavic 2 Pro e Mavic 3T, ambos com sensores RGB. As imagens foram processadas nos softwares *Agisoft Metashape* (Agisoft, 2021) e *iTwin Capture Modeler* (Bentley Systems, 2023), resultando em ortomosaicos georreferenciados, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e malhas 3D texturizadas.

Complementarmente, foram empregados dados LiDAR fornecidos pela empresa SAI Brasil, correspondentes a um levantamento realizado em 24 de fevereiro de 2023, imediatamente após o evento. Os produtos entregues (Modelo Digital de Terreno – MDT e MDS) apresentaram elevada qualidade e serviram de base para extração de métricas morfométricas e para comparação com os resultados derivados da fotogrametria.

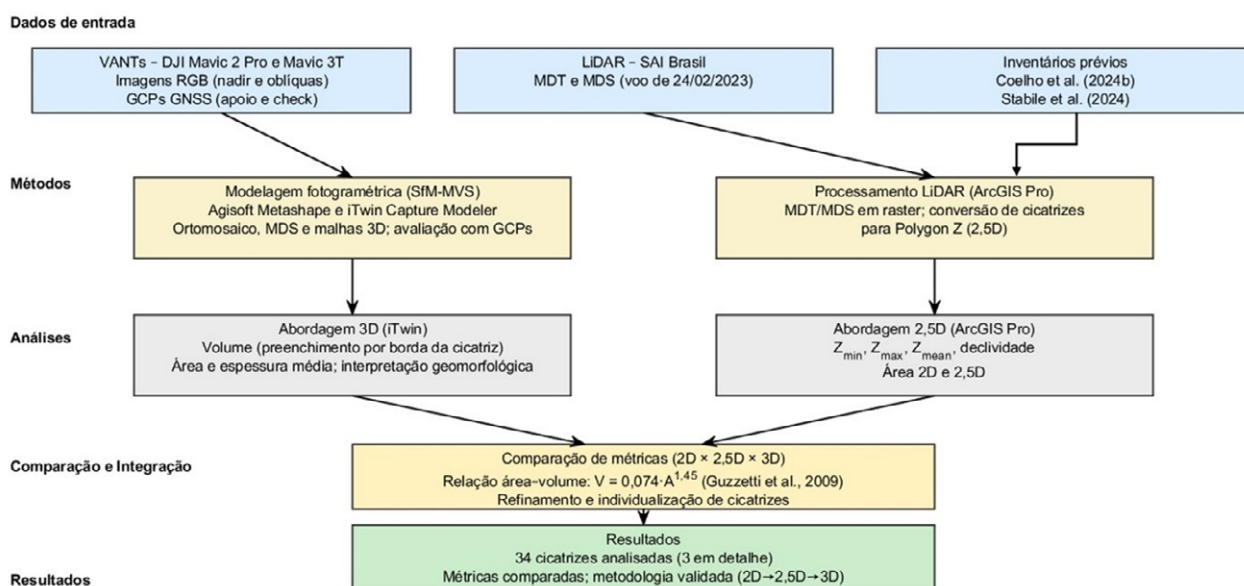
Os dados das cicatrizes de deslizamento foram inicialmente obtidos a partir dos inventários produzidos por Coelho et al. (2024b) e Stabile et al. (2024), que forneceram a base para o mapeamento multiescalar na área de estudo. Essas delimitações foram posteriormente atualizadas e refinadas em setores específicos por meio da análise visual detalhada nas ortofotocartas e nos modelos 3D, permitindo maior precisão nas bordas e a individualização de feições coalescentes, previamente agrupadas em polígonos únicos.

No total, foram identificadas e analisadas 34 cicatrizes na Vila do Sahy. Entre elas, três foram selecionadas como exemplos para demonstrar a extração das variáveis morfométricas, incluindo a estimativa dos volumes mobilizados e a descrição detalhada de aspectos geomorfológicos.

O conjunto de etapas metodológicas está sintetizado no fluxograma da Fig. 2, que ilustra desde a aquisição dos dados até as análises comparativas integrando abordagens 2D, 2,5D e 3D.



FIGURA 2. Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho.



A modelagem 3D fotogramétrica contou com pontos de controle em solo (Ground Control Points – GCPs), obtidos com receptores GNSS em modo pós-processado (PPK/RTK). Esses pontos foram divididos em apoio, para o georreferenciamento, e check, para avaliação da qualidade dos produtos. O pós-processamento dos GCPs foi essencial para assegurar elevada acurácia posicional e maior fidelidade geométrica aos modelos 3D gerados por SfM-MVS (WANG et al., 2022; ZHANG et al., 2022).

As missões seguiram padrões recomendados de sobreposição (75% longitudinal e 65% lateral) e, no caso do Mavic 2 Pro, incluíram imagens oblíquas para otimizar a representação de feições verticais e inclinadas. A resolução espacial final variou entre 3,46 cm/pixel (Mavic 2 Pro) e 4,26 cm/pixel (Mavic 3T).

Os parâmetros técnicos dos levantamentos fotogramétricos realizados na Vila Sahy estão resumidos na Tabela 1, que evidencia a resolução centimétrica dos produtos e a acurácia alcançada com o uso de GCPs.



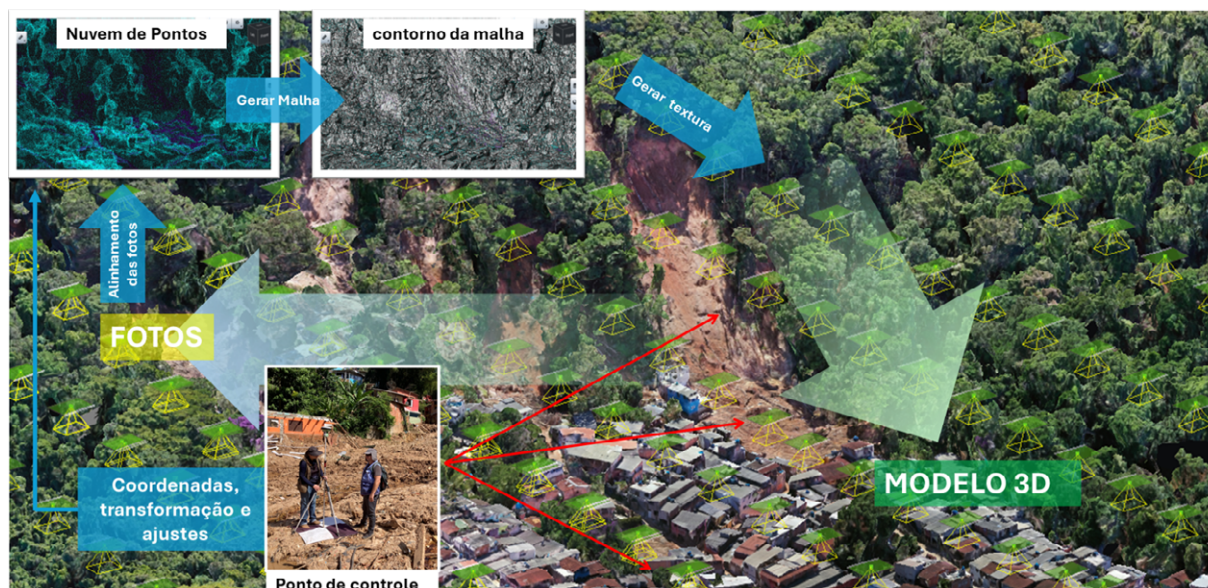
TABELA 1 – Parâmetros dos levantamentos fotogramétricos realizados na Vila Sahy (São Sebastião/SP), processados com SfM-MVS no Agisoft Metashape.

PARÂMETRO	MAVIC 2 PRO (23/03/2023)	MAVIC 3T (22/11/2023)
Número total de imagens	619	2.033
Tipo de imagem	Nadir e oblíquas	Apenas nadir
Altura de voo média	160 m	117 m
Resolução espacial (GSD)	3,46 cm/pixel	4,26 cm/pixel
Área de cobertura	1,03 km ²	1,03 km ²
Pontos de controle (GCPs)	11 (7 de apoio + 4 de check)	12 (7 de apoio + 5 de check)
Erro total de georreferenciamento	11,18 cm	27,37 cm
Densidade da nuvem de pontos	~443 milhões de pontos	~78 milhões de pontos
Erro de reprojeção RMS	0,167 (1,372 pixels)	0,208 (1,690 pixels)
Tempo de processamento (dense cloud)	3h43min	2h58min
Software utilizado	Agisoft Metashape Pro 1.7.4	Agisoft Metashape Pro 2.1.0
Equipamento	Intel i7-9700 / 15,84 GB RAM / GPU Radeon RX550	Xeon W-2223 / 31,69 GB RAM / GPU Quadro P2200

Além do processamento realizado no software Agisoft Metashape, os dados obtidos com o DJI Mavic 2 Pro também foram processados no software iTwin Capture Modeler (Bentley Systems), o que possibilitou uma abordagem alternativa para a modelagem 3D (Fig. 3). Nesse ambiente, os modelos foram gerados diretamente no formato 3MX, permitindo integração com plataformas de visualização e análise 3D, como o MicroStation e o Descartes (Bentley System). Para fins de interoperabilidade e uso em outras aplicações, os arquivos também foram exportados nos formatos OBJ e FBX, assegurando compatibilidade com ambientes SIG, softwares de modelagem 3D e plataformas web.



FIGURA 3. Etapas para a geração de um modelo 3D no software iTwin Capture Modeler (Bentley Systems – versão acadêmica). Nesta figura já é possível visualizar os deslizamentos que causaram impacto significativos.



Com os modelos 2,5D e 3D gerados, foram realizadas três abordagens principais:

1. *Estimativa volumétrica direta em ambiente 3D*
As malhas tridimensionais geradas no software iTwin Capture Modeler foram utilizadas para cálculo volumétrico das cicatrizes de deslizamento. A metodologia envolveu a interpolação de uma superfície a partir das bordas da cicatriz e o cálculo do volume (*fill*), representando o material removido da encosta. O processamento foi realizado com distância de amostragem de 0,50 m (*sampling distance*), assegurando coerência com a resolução do modelo fotogramétrico reconstruído. Essa abordagem em ambiente 3D foi aplicada individualmente para cada feição e permitiu estimar, além do volume, a área da cicatriz com maior precisão e a espessura média do material removido;
2. *Análise morfométrica no ambiente ArcGIS Pro*
A partir do MDT dos dados LiDAR, os polígonos das cicatrizes foram representados como feições 2,5D (Polygon Z), atribuindo valores de Z. Sobre essas geometrias foram calculadas variáveis morfométricas como elevação mínima (Z_{min}), máxima (Z_{max}) e média (Z_{mean}), declividade média, área em 2D (planimétrica) e 2,5D (área real de superfície), perímetro e comprimento da feição (Length3D). Essas métricas foram obtidas com base em ferramentas de análise espacial e de geometria 3D disponíveis no ArcGIS Pro; e,
3. *Identificação e descrição de feições geomorfológicas relevantes:* A análise visual em ambiente 3D possibilitou identificar e descrever feições geomorfológicas



de destaque, tais como lineamentos geológicos, canais fluviais (talwegues), formas de encosta, vales suspensos, degraus e a textura da superfície de ruptura, fornecendo subsídios importantes para a interpretação dos processos envolvido

A reconstrução da topografia pré-ruptura por meio da técnica de diferença de superfícies é considerada mais precisa para estimativas volumétricas, pois permite comparar MDT obtidos antes e depois dos deslizamentos. No entanto, a aplicação dessa abordagem é frequentemente inviabilizada pela ausência de dados altimétricos de alta resolução anteriores ao evento. Em estudos como o de Araújo et al. (2023), que contou com dados LiDAR pré-evento, foi possível aplicar essa técnica com maior fidelidade. Já em contextos em que tais dados não estão disponíveis, a utilização da borda da cicatriz como referência da superfície original constitui a alternativa mais viável para estimativas pós-desastre.

Para fins de comparação, os volumes estimados no *iTwin Capture Modeler* foram confrontados com os valores previstos pela relação global área–volume proposta por Guzzetti et al. (2009), expressa pela Eq. (1):

$$\text{Equação: } V = 0,074 \cdot A^{1,45} \quad (1)$$

A proposta metodológica adotada priorizou a transição da visualização bidimensional (2D) e em superfície (2,5D) para um ambiente totalmente 3D, ampliando a capacidade de interpretação e caracterização dos processos associados aos deslizamentos. A análise imersiva e a extração direta de variáveis a partir das malhas renderizadas possibilitaram uma leitura mais realista da geometria das cicatrizes, contribuindo para a compreensão de sua forma e dinâmica, bem como medições mais precisas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A extração de parâmetros morfométricos das cicatrizes em modelos 3D de alta resolução foi comparada com dados de mapeamentos anteriores realizados em 2D e 2,5D, evidenciando diferenças significativas. Além disso, a análise tridimensional possibilitou a caracterização detalhada do relevo, com identificação de alinhamentos e estruturas, reforçando o potencial das interpretações em ambiente 3D. Nesse contexto, a modelagem das cicatrizes de deslizamentos na Vila do Sahy permitiu estabelecer uma comparação entre diferentes plataformas de processamento (Fig. 4), destacando-se o software *iTwin Capture Modeler* pela maior fidelidade na representação das feições



do terreno e das edificações impactadas. A Fig. 4 ilustra ainda os diferentes setores do deslizamento — área de ruptura, zona de transporte e setor de deposição — incluindo o impacto direto em uma edificação residencial, onde foram registrados múltiplos óbitos.

FIGURA 4. Comparação entre modelos 3D da cicatriz de deslizamento na Vila Sahy (São Sebastião/SP) gerados por diferentes plataformas de modelagem. (A) Modelo 3D obtido no software iTwin Capture Modeler, com maior realismo na representação das edificações e feições do terreno, resultado do uso de imagens oblíquas e correção de cores por algoritmos de aprendizado de máquina. (B) Modelo gerado no software Agisoft Metashape, com menor precisão na definição das superfícies e estruturas construídas.



A partir da análise das feições de deslizamento projetadas tridimensionalmente no software iTwin Capture Modeler (total de 34 cicatrizes na Vila do Sahy) foi estimado um volume total mobilizado de aproximadamente $100.205,5 \text{ m}^3$, distribuído em uma área impactada total de 62.047 m^2 . A espessura média das cicatrizes é de aproximadamente 1,3 m, com mediana próxima (1,37 m), indicando uma distribuição relativamente simétrica. A maioria dos valores (50% centrais) está entre 0,8 m e 1,8 m, mas há variação de 0,34 m até 2,28 m. Esse intervalo sugere que, embora existam cicatrizes mais rasas, predominam espessuras na faixa de 1 a 2 m, coerente com observações de deslizamentos rasos típicos em áreas tropicais úmidas.

Os cálculos consideraram apenas a área efetiva de ruptura e transporte, excluindo setores de deposição distal. Essa abordagem foi viabilizada pela maior precisão na definição das bordas e pela interpretação geomorfológica direta realizada sobre os modelos 3D texturizados. A visualização imersiva e a capacidade de mensuração direta nas malhas tridimensionais permitiram uma delimitação mais fiel das cicatrizes, superando as limitações inerentes à visualização 2D ou baseada em MDT (2,5D).

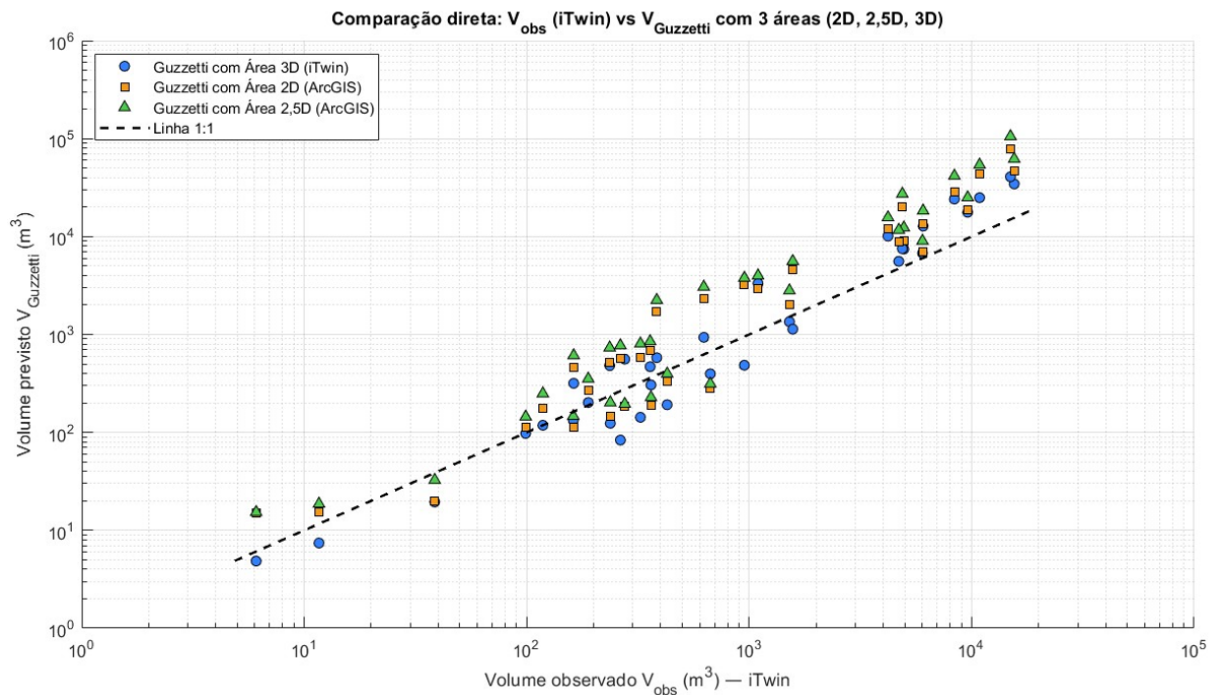


A área total das cicatrizes variou conforme o método utilizado: aproximadamente 82.305,9 m² no mapeamento 2D planimétrico, 100.039,2 m² no cálculo de superfície 2,5D do ArcGIS e 62.047,0 m² no modelo 3D gerado no iTwin Capture Modeler. Comparativamente, o mapeamento 2D superestimou em cerca de 32,6% a área em relação ao iTwin, enquanto o 2,5D apresentou a maior discrepância, com 61,2% de superestimação, devido ter incorporado a superfície. Essas diferenças refletem a tendência de métodos convencionais incorporarem áreas de deposição ou extrapolar limites em terrenos com relevo acidentado e cobertura vegetal. Em contraste, a abordagem 3D do iTwin concentra-se nas áreas efetivamente de ruptura e transporte, fornecendo delimitações mais restritivas e estimativas mais consistentes com os volumes mobilizados. Observa-se ainda que a discrepância entre os métodos aumenta conforme a área das cicatrizes cresce, sendo mais pronunciada nos deslizamentos de maior porte.

Usando a relação global proposta por Guzzetti *et al* (2009) baseado na área, onde , os volumes estimados apresentaram comportamento distinto conforme a área dos deslizamentos (Fig. 5). Nos deslizamentos de menor porte (até aproximadamente), a equação resultou em subestimação pontual, com valores previstos abaixo do observado no iTwin Capture Modeler. Entretanto, a partir de volumes superiores a m³, verificou-se um padrão consistente de superestimação, com discrepâncias crescentes nos eventos de maior magnitude. Esse viés foi mais evidente quando utilizadas as áreas 2D e, sobretudo, 2,5D, que ampliam as estimativas em relação à área iTwin. A relação de Guzzetti, embora sujeita a discrepâncias locais, mostrou boa concordância global com os dados, reproduzindo a tendência de aumento dos volumes em função da área e ressaltando a necessidade de calibração regional.



FIGURA 5. Comparação entre os volumes observados no iTwin Capture Modeler (3D) e os volumes previstos pela equação de Guzzetti et al. (2009), a partir das áreas medidas em 2D (quadrados), 2,5D de superfície (triângulos) e 3D iTwin (círculos). A linha tracejada indica a igualdade previsto–observado, evidenciando subestimação em volumes $<10^3 \text{ m}^3$ e superestimação crescente acima desse limiar.



A partir da análise global das 34 cicatrizes mapeadas, foram selecionados três deslizamentos (Fig. 6) representativos para uma avaliação mais detalhada das diferenças entre os métodos (Tabela 2). A comparação entre os resultados em 2D, 2,5D e 3D (iTwin Capture Modeler) evidenciou discrepâncias relevantes na delimitação das cicatrizes, enquanto as áreas obtidas em 2,5D (ArcGIS Pro) tendem a superestimar em relação ao iTwin. A modelagem 3D permitiu estimar também volumes e espessuras médias, acrescentando informações essenciais sobre a magnitude dos processos. Além disso, os parâmetros morfométricos analisados — área, declividade média e elevações (Z_{\min} , Z_{\max} e Z_{mean}) — reforçam a maior consistência da abordagem 3D na caracterização das feições.



TABELA 2 – Comparação das análises de três deslizamentos a partir dos dados 2D e 2,5D (ArcGIS Pro) e 3D (iTwin Capture Modeler).

PARÂMETRO	DESLIZ_MATA (1)	DESLIZ_COALESCENTE (2)	DESLIZ_BACIA_SUSPensa (3)
Área - iTwin (m ²)	2.636.288	4.093.521	6.344,127
Área 2D – ArcGIS Pro (m ²)	2688,785	4.271.424	7.145,942
Área 2,5D – ArcGIS Pro (m ²)	3221,456	5.254,913	9.249,263
Volume do deslizamento (m ³) – iTwin	6.015.364	6.054.863	6.344,127
Espessura média (m)	2,28	1,48	1,31
Elevação mínima (m) (Z_min)	13,64	20,58	149,71
Elevação máxima (m) (Z_max)	87,99	104,66	265,33
Elevação média (m) (Z_mean)	46,01	57,32	205,50
Declividade média (Avg_Slope)	36,28	35,60	40,24

No primeiro caso, classificado como deslizamento em mata (desliz_mata, representado como 1 na Fig. 6), a área medida em ambiente 3D (iTwin) foi de 2.636,3 m², enquanto no mapeamento 2D planimétrico (ArcGIS Pro) resultou em 2.688,8 m² (+1,99%) e no cálculo de superfície 2,5D (ArcGIS Pro) atingiu 3.221,5 m² (+22,20%). O resultado reflete a maior precisão da modelagem 3D no iTwin, que restringe o polígono ao contorno efetivo da cicatriz, enquanto as abordagens 2D e especialmente 2,5D tendem a superestimar. O volume mobilizado estimado no iTwin foi de 6.015,36 m³, com espessura média de 2,28 m, indicando uma movimentação expressiva de material mesmo em uma área relativamente compacta.

Outro deslizamento em análise, do tipo coalescente em área urbana (desliz_coalescente, representado como 2 na Fig. 6, também mostrado na Fig. 4), que resultou



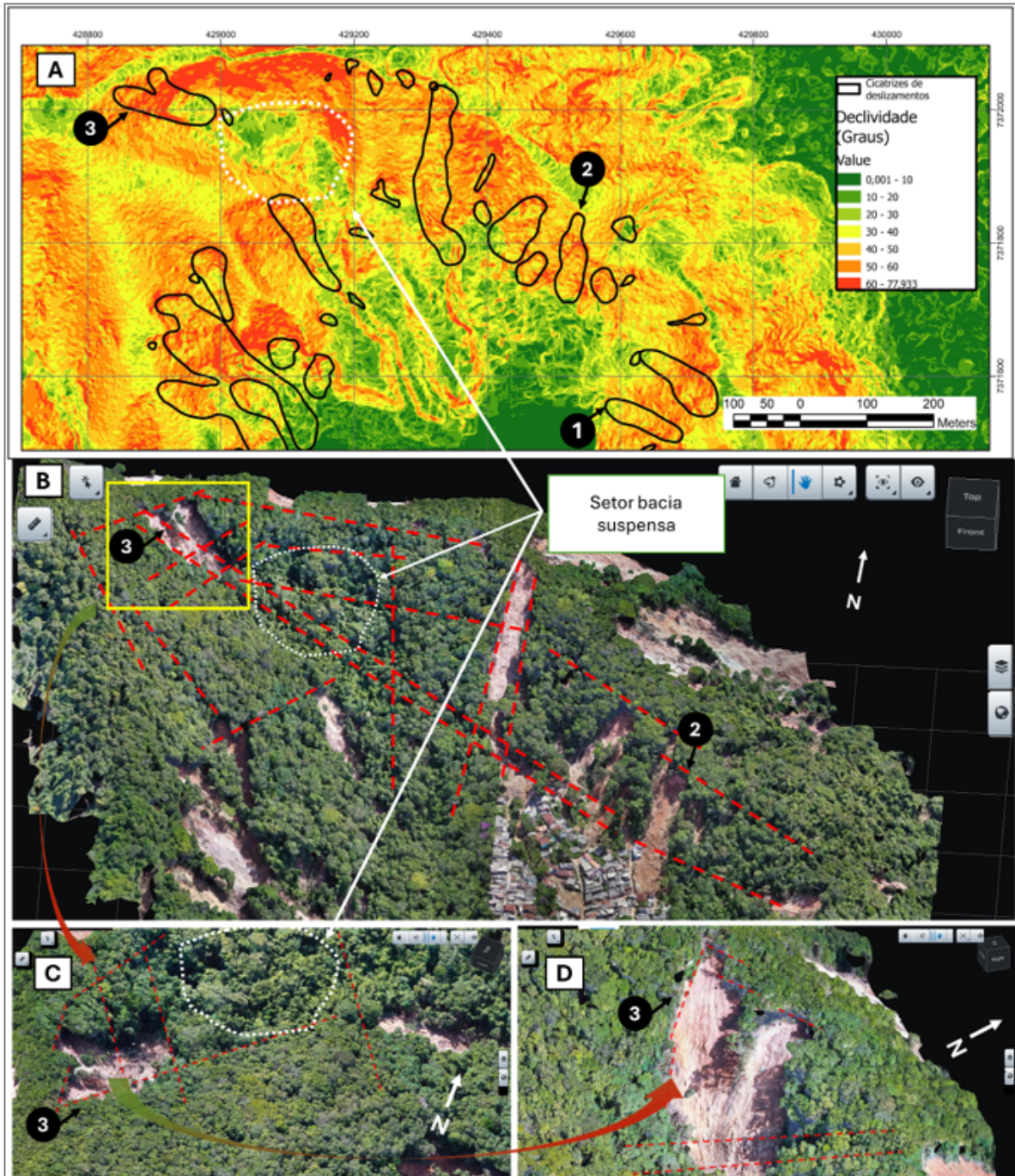
em dezenas de vítimas. A área delimitada em ambiente 3D (iTwin) foi de 4.093,5 m², enquanto no mapeamento 2D planimétrico (ArcGIS Pro) atingiu 4.271,4 m² (+4,35%) e no cálculo de superfície 2,5D (ArcGIS Pro) chegou a 5.254,9 m² (+28,37%). Apesar da proximidade entre os valores 2D e iTwin, a modelagem tridimensional permitiu identificar feições coalescentes anteriormente mascaradas em produtos bidimensionais, revelando compartimentos erosivos conectados e zonas compartilhadas de transporte. O volume total estimado no iTwin foi de 6.054,86 m³, com espessura média de 1,48 m.

Para o terceiro deslizamento em análise, classificado como bacia suspensa (desliz_bacia_suspensa, representado como 3 na Fig. 6), a área obtida em ambiente 3D (iTwin) foi de 6.344,1 m², enquanto no mapeamento 2D planimétrico (ArcGIS Pro) resultou em 7.145,9 m² (+12,64%) e no cálculo de superfície 2,5D (ArcGIS Pro) chegou a 9.249,3 m² (+45,79%). Esse padrão reforça a tendência de superestimação das cicatrizes mapeadas em abordagens 2D e, principalmente, 2,5D, especialmente em áreas com ambiguidades topográficas. O volume mobilizado estimado no iTwin foi de 6.344,1 m³, com espessura média de 1,31 m, refletindo a profundidade e complexidade do processo erosivo envolvido.

A análise visual em ambiente 3D destas feições possibilitou também a identificação e descrição de feições geomorfológicas relevantes, como alinhamentos estruturais, degraus de ruptura e canais de escoamento (talwegues), os quais contribuíram significativamente para a interpretação dos processos associados aos movimentos de massa. Na Fig. 6, observa-se, por meio da integração entre os dados de declividade e o modelo 3D, um controle estrutural evidente na porção oeste da bacia, onde se configura uma bacia suspensa. Essa feição geomorfológica parece ter funcionado como uma barreira natural, marcada por uma quebra de declividade que estabelece um nível de base local, interrompendo o fluxo do deslizamento e impedindo sua propagação para setores mais baixos da encosta.



FIGURA 6: Interpretação geomorfológica de parte das encostas da Vila Sahy. (A) Mapa de declividade (MDT – LiDAR) com sobreposição dos polígonos de cicatrizes. Em destaque: *desliz_mata* (1), *desliz_coalescente* (2) e *desliz_bacia_suspensa* (3); (B) Relevo apresentando escalonamentos e bacia suspensa no alto da bacia por condicionantes estruturais. As linhas vermelhas tracejadas representam lineamentos geológico-estruturais; (C) e (D) detalhe em pontos de vista diferentes do deslizamento 3 que não se desenvolveu encosta abaixo pela condição de um barramento natural em uma bacia suspensa.



Esses resultados demonstram que o mapeamento direto sobre modelos 3D de alta resolução proporciona maior confiabilidade na quantificação morfométrica dos



deslizamentos. Além disso, evidencia-se que medições 2D e 2,5D convencionais podem mascarar a ocorrência de processos coalescentes, especialmente em ambientes urbanos e sob vegetação, dificultando a compreensão espacial e volumétrica dos eventos

Visualização 3D interativa

Como parte dos resultados, o modelo 3D gerado a partir do levantamento fotogramétrico com o drone DJI Mavic 2 Pro foi publicado na plataforma Sketchfab, permitindo uma visualização interativa e acessível da área de estudo. O modelo está disponível no link: Modelo 3D Vila Sahy, São Sebastião, SP - 3D model by egas.harideva (@egas.harideva) [4ed7ad3]. Nele, os três deslizamentos analisados em detalhe neste trabalho estão devidamente sinalizados, favorecendo a compreensão espacial das feições morfológicas. Embora haja certa degradação visual em função da conversão do arquivo para visualização online, a ferramenta oferece uma alternativa eficaz para interpretação e disseminação dos resultados em ambientes técnico-científicos e educacionais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de modelos 3D de alta resolução — oriundos de técnicas como a fotogrametria por SfM-MVS e o LiDAR — permite uma análise qualitativa e quantitativa riquíssima, especialmente quando associada a parâmetros geomorfométricos clássicos (ex. declividade, volume e forma). Neste trabalho, cálculos precisos foram realizados e comparados entre abordagens 2D, 2,5D e 3D, evidenciando as diferenças e vantagens da modelagem tridimensional. Argumenta-se, assim, que a leitura geomorfológica 3D, orientada por fundamentos técnicos sólidos, pode ser reveladora e otimizar trabalhos de campo

Cabe salientar que o cálculo volumétrico realizado no software iTwin Capture Modeler baseia-se na geração de uma superfície de referência superior interpolada a partir da borda da cicatriz. A partir dela, estima-se o volume de preenchimento, que representa a remoção de material abaixo da superfície de referência, correspondente ao volume erodido. No entanto, essa superfície nem sempre reflete com precisão o relevo original anterior ao evento. Métodos mais robustos, como os *Digital Elevation Models of Difference (DoDs)*, que comparam modelos topográficos obtidos antes e depois da ruptura, seriam ideais para estimativas mais acuradas. Contudo, como não há levantamentos prévios em escala de detalhe disponíveis para a área de estudo, essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados. Ainda assim, o método adotado se mostra viável e útil em contextos semelhantes, especialmente quando dados anteriores à ruptura não estão disponíveis.



A análise e modelagem 3D realizada neste estudo proporcionaram uma visualização mais precisa e uma interpretação mais qualificada dos dados, otimizando o planejamento de trabalhos de campo — aspecto especialmente relevante em áreas de risco. Embora o trabalho de campo permaneça essencial, o uso de modelos 3D de alta resolução contribui significativamente para a identificação e caracterização de parâmetros morfométricos e geológico-estruturais, aprimorando a delimitação de feições associadas a processos de movimentos de massa e potencializando a compreensão do ambiente geodinâmico. Esse nível de detalhamento é particularmente importante para subsidiar ações de gestão e proteção da população local e mapeamento de risco.

Além disso, a integração de modelos 3D com ferramentas de Realidade Virtual representa uma perspectiva promissora para futuras aplicações. Essa abordagem poderá ampliar as possibilidades de visualização e interpretação espacial, contribuindo para o entendimento mais aprofundado da dinâmica dos deslizamentos e de sua interação com variáveis ambientais.

Agradecimentos:

Os autores agradecem ao Projeto Rede Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (REMADEN) financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e à empresa SAI Brasil, pela disponibilização dos dados LiDAR.

Financiamento: Financiadora de Estudos e Projetos (REMADEN/REDEGEO) Projeto MCTI/FINEP/FNDCT 01.16.0068.00).



REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7*. Agisoft LLC, 2021. Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf. Acesso em: 31 ago. 2025.
- ANDRADE, Márcio Roberto Magalhães; STABILE, Rodrigo Augusto; EGAS, Harideva Marturano; MENDES, Tatiana Silva Guimarães; METHODIEV, Dimitar; CAMARINHA, Pedro Ivo. Spatial analysis of mass movements observed in the disaster of the Northern Coast of São Paulo State, Brazil (2023). In: *17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and 2nd Latin-American Regional Conference of the IAEG*, 2024, La Serena. Anais... La Serena: s.n., 2024.
- ARAÚJO, João Paulo de Carvalho; BARELLA, César Falcão; ZÊZERE, José Luís; FERNANDES, Nelson Ferreira. Implementação de uma topografia pré-ruptura na predição estatística bivariada de escorregamentos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 3, e2305, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2305>.
- BENTLEY SYSTEMS. *iTwin Capture Modeler – Reality Modeling Software*. Bentley Systems, 2023. Disponível em: <https://www.bentley.com/software/itwin-capture/>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- BHUYAN, K.; RANA, K.; FERRER, J. V.; COTTON, F.; OZTURK, U.; CATANI, F.; MALIK, N. Landslide topology uncovers failure movements. *Nature Communications*, v. 15, p. 2633, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46741-7>.
- COELHO, Rodrigo Daltoé; VIANA, Cícero Dias; DIAS, Vinicius; GROHMANN, Carlos H. Landslides during the summer 2023 event in São Sebastião, southeastern Brazil: Spatial dataset. *Brazilian Journal of Geology*, v. 54, n. 2, e20240006, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202420240006>.
- COELHO, Rodrigo Daltoé; GROHMANN, Carlos H.; VIANA, Cícero Dias; DIAS, Vinicius. *Landslides of the 2023 summer event of São Sebastião, southeastern Brazil* [Data set]. Zenodo, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11120078>.
- EGAS, Harideva Marturano; STABILE, Rodrigo Augusto; ANDRADE, Márcio Roberto Magalhães; MICHEL, Gabriel Pereira; ARAÚJO, João Paulo de Carvalho; MICHEL, Rodrigo de Lima; MENDES, Tatiana Silva Guimarães; NERY, Tullius Dias; PAULA, Daniel S.; RECKZIEGEL, Eduardo W.; GONÇALVES, Daniel A. Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. *Landslides*, v. 1, p. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02410-w>.
- FERNANDES, M. C.; AVELAR, A. S.; MENEZES, P. M. L.; COELHO NETTO, A. L. Comparação do uso de superfície real e planimétrica para análises do índice de eficiência de drenagem: um estudo de caso no maciço da Tijuca - RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 1, 2012. Disponível em: <http://www.ugb.org.br>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- GUZZETTI, F.; MELILLO, M.; MONDINI, A. C. Landslide predictions through combined rainfall threshold models. *Landslides*, v. 22, p. 137–147, 2025. DOI: [10.1007/s10346-024-02340-7](https://doi.org/10.1007/s10346-024-02340-7)
- GUZZETTI, F.; MONDINI, A. C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K.-T. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, v. 112, n. 1–2, p. 42–66, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>.
- GUZZETTI, Fausto; ARDIZZONE, Francesca; CARDINALI, Mauro; ROSSI, Mauro; VALIGI, Daniela. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 279, n. 3–4, p. 222–229, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.005>.
- HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, v. 11, p. 167–194, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- LI, Zhilin; ZHU, Qing; GOLD, Christopher. *Digital terrain modeling: principles and methodology*. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- LISSAK, C.; BARTSCH, A.; DE MICHELE, M. Remote sensing for assessing landslides and associated hazards. *Surveys in Geophysics*, v. 41, p. 1391–1435, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09609-1>.
- MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; SELUCHI, Marcelo E.; CAMARINHA, Pedro I.; DOLIF, Giovanni; SPERLING, Vinicius B.; ALCÂNTARA, Enner H.; RAMOS, Andrea M.; ANDRADE, Marcio M.; STABILE, Rodrigo A.; MANTOVANI, José; PARK, Edward; ALVALA, Regina C.; MORAES, Osvaldo L.; NOBRE, Carlos A.; GONCALVES, Demerval. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in



the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards*, v. 120, p. 7997–8024, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06558-5>.

PASSALACQUA, P.; BELMONT, P.; STALEY, D. M.; SIMLEY, J. D.; ARROWSMITH, J. R.; BODE, C. A.; CROSBY, C.; DELONG, S. B.; GLENN, N. F.; KELLY, S. A.; LAGUE, D.; SANGIREDDY, H.; SCHAFFRATH, K.; TARBOTON, D. G.; WASKLEWICZ, T.; WHEATON, J. M. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review. *Earth-Science Reviews*, v. 148, p. 174–193, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.012>.

STABILE, Rodrigo Augusto; YOUSSEF, Pedro de Paiva; KÖRTING, Thales Sehn; LANA, Julio Cesar; NAMIKAWA, Laércio Massaru; NERY, Tullius Dias; OLIVEIRA, Alisson Cleiton de; KÖNIG, Tèhrie. Desastre em São Sebastião-SP: mapeamento dos processos de movimentos de massa deflagrados em fevereiro de 2023. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 4., 2024. Anais [...]. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2024. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/241/IV-END0002-2-1-20240812-125019.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2025.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, v. 216, p. 295–312, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.008>.

VAN WESTEN, C.; VAN ASCH, T.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 65, p. 167–184, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>.

WANG, W.; ZHAO, W.; CHAI, B.; DU, J.; TANG, L.; YI, X. Discontinuity interpretation and identification of potential rockfalls for high-steep slopes based on UAV nap-of-the-object photogrammetry. *Computers & Geosciences*, v. 166, 105191, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105191>.

ZHANG, W.; ZHAO, X.; PAN, X.; WEI, M.; YAN, J.; CHEN, J. Characterization of high and steep slopes and 3D rockfall statistical kinematic analysis for Kangyuqu area, China. *Engineering Geology*, v. 308, 106807, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106807>.

ZHAO, J.; WALLGRÜN, J. O.; LAFEMINA, P. C.; NORMANDEAU, J.; KLIPPEL, A. Harnessing the power of immersive virtual reality: Visualization and analysis of 3D earth science data sets. *Geo-spatial Information Science*, v. 22, n. 4, p. 237–250, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1621544>.

ZULHILMI, A.; HAYAKAWA, Y. S. Immersive virtual reality fieldwork investigation of a landslide in Hokkaido, Japan. *Environmental Earth Sciences*, v. 84, p. 21, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-12013-2>.



PROPOSTA METODOLÓGICA PARA IDENTIFICAR ÁREAS COM EROSÃO COSTEIRA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Matheus Maciel da Silva ¹

Rodrigo de Freitas Amorim ²

Heleriany de Medeiros Madeiros ³

Silvio Braz de Sousa ⁴

Eduardo Queiroz de Lima ⁵

PALAVRAS-CHAVE: Erosão costeira, Inteligência Artificial - IA, LLM (Large Language Models).

RESUMO

Os procedimentos metodológicos amplamente utilizados para identificação de áreas com erosão costeira são baseados nas análises de imagens de satélites e medição de parâmetros morfodinâmicos, demandando tempo, equipamentos e mão de obra especializada. Logo, uma resposta rápida que direcione pesquisas mais aprofundadas constitui um desafio metodológico ser superado. Nesse sentido, o uso de ferramentas de inteligência artificial como a aplicação de LLM (*Large Language Models*), surge como uma alternativa de baixo custo e rápida aplicação para delimitar áreas críticas, onde a erosão costeira tem gerados impactos e prejuízos à sociedade. Desta forma, o presente trabalho propõe uma abordagem metodológica, com o uso de ferramentas LLM aplicadas em dados obtidos, a partir da API de busca automatizada do Google para identificar praias, no Estado do Rio Grande do Norte, onde são recorrentes os problemas de erosão costeira, através da identificação de notícias sobre o tema. A metodologia consistiu-se na execução de Script baseado em Python, construído no ambiente virtual Visual Studio Code – VSCode versão 1.99.3 com auxílio da LLM disponibilizada pela OpenAI, a partir de seu *chatbot ChatGPT*, utilizando os modelos o4-mini-high, o4-mini e GPT-4o. O script teve como funções a aplicação da ferramenta *Google Custom Search* API, que permite a realização de consultas automatizadas utilizando o buscador Google; o agrupamento das consultas em planilhas e cópias dos

- 1** Mestre em Geografia pelo Curso de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGe – UFRN), matheussmaciel@outlook.com
- 2** Professor adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DGE-UFRN). Docente permanente do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGe – UFRN), rodrigo.freitas@ufrn.br
- 3** Doutoranda do Curso de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - (PPGe – UFRN), profahelerianymedeiros@gmail.com
- 4** Professor adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DGE-UFRN). Docente permanente do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGe – UFRN), silvio.braz@ufrn.br
- 5** Doutor em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (PPGEO - UFG) e Técnico de Laboratório (Área: Geoprocessamento) da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), eduardo.lima@unifap.br



endereços virtuais em formato pdf e tratamento dos dados utilizando a LLM *Deepseek*. As consultas foram realizadas entre os dias 13 e 18 de abril de 2025, e utilizaram como palavras-chaves os termos “Erosão costeira” e “Rio Grande do Norte”. Os dados obtidos foram processados utilizando o *Deepseek*, instalada em servidor local por meio do uso do software LM Studio 0.3.14 (Build 5). O modelo foi alimentado com trecho de pdfs obtidos a partir do uso do script em *Python*, com aplicação de filtros de relevância e associação com a erosão costeira. A construção do código resultou em diversos erros lógicos de programação, que foram ajustados no decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Dentre os erros mais recorrentes, pode-se citar falhas de comunicação entre o script e o software LM Studio, a incapacidade do modelo de lidar com prompts de tamanho maior que 4096 tokens, a necessidade de separação de arquivos em pdf para uma leitura mais precisa pelo modelo, e erros comuns de programação, como tipos de arquivo, problemas na interface gráfica etc. As consultas geraram 278 links, os quais foram acessados, baixados e convertidos para pdf, posteriormente, com sucesso, 235 arquivos. A partir do processamento com o *Deepseek*, foram retornados 94 endereços virtuais, dos quais, 16 endereços corresponderam a localidades no Rio Grande do Norte, onde a Praia de Ponta Negra, localizada em Natal-RN, foi citada 8 vezes e a Praia de Pipa, em Tibau do Sul, 5 vezes com episódios de erosão costeira. A utilização de LLM apresenta potencial para auxiliar nos estudos da Geomorfologia Costeira, onde os levantamentos podem direcionar as pesquisas, como emprego das metodologias necessárias para compreender os parâmetros morfodinâmicos.

INTRODUÇÃO

A erosão costeira é um fenômeno estudado em todo o planeta Terra e se constitui como um dos processos mais perceptíveis na alteração das feições costeiras, assim como um dos problemas mais enfrentados na gestão de zonas litorâneas, em todo o mundo, provocando transformações abruptas nas paisagens. As variações no nível do mar, na altura e direção das ondas têm reverberado neste processo, ocasionando o desequilíbrio no balanço sedimentar das faixas de praia. O barramento de sedimentos, que ocorre devido a interferência humana também se constitui como um fator decisivo nesse desequilíbrio. As consequências desse desequilíbrio se refletem no aumento de inundações temporárias e permanentes em áreas baixas, a aceleração da erosão, a modificação de áreas úmidas e a intrusão de água salgada estão entre os principais impactos da elevação do nível do mar (Wong *et al.*, 2014)

Estudos apontam que nos últimos 100 anos, até 70% das praias arenosas ao redor do mundo estão em processo de recuo, enquanto as poucas que ainda apresentam acreção tendem, eventualmente, a estabilizar ou recuar (Leatherman, 1983; Nordstrom, 2000; Anthoff *et al.*, 2006; Hinkel *et al.*, 2013; Bird, 2016).

Para além do exposto, cerca de 52% dos litorais do mundo são compostos por costas altas, onde predominam falésias marinhas, com a retração dessas feições sendo observada em 33% dos países (Young & Carilli, 2019). Em uma investigação correlata,



(Luijendijk *et al.*, 2018) observaram o recuo de 0,5 metros por ano em 24% das praias arenosas em várias localidades do planeta, com 28% em estado de acreção e 48% permanecem estabilizadas.

No Brasil, estudos sobre erosão costeira são de particular importância, tendo em vista que cerca de 51,1% da população urbana vive ao longo do litoral (IBGE, 2023). Logo, o aprofundamento dos estudos acerca da temática são fundamentais para organizar e direcionar o processo de urbanização no litoral, principalmente em áreas próximas às faixas de praia.

Os estudos sobre o processo de erosão costeira, nos últimos anos, ganharam um enfoque adicional, considerando as repercussões das mudanças climáticas antropogênicas nesse processo natural. Observa-se que os fenômenos climáticos amplificam os riscos de desastres naturais (Brasil, 2013; Muehe, 2018). Algumas estimativas apontam que o aumento do nível do mar terá como consequência inundações mais frequentes e permanentes, além de intensificar a erosão costeira (Cai *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2014; IPCC, 2022). Logo, a região Nordeste do Brasil, caracterizada por uma geomorfologia costeira diversa, com presença de falésias, praias arenosas, planícies de maré e estuários, é especialmente vulnerável aos efeitos do aumento do nível do mar.

Em relação a realidade do Nordeste do país, observa-se a necessidade de ampliação de pesquisas voltadas para o emprego de modelos que possam trazer à tona os impactos advindos das mudanças climáticas em áreas costeiras, considerando a intensificação desse fenômeno e o aumento da migração populacional para essas áreas (IPCC, 2022). Embora as avaliações globais sobre o impacto da elevação do nível do mar em geral tenham como maior foco nas inundações temporárias e permanentes em áreas baixas, as mudanças erosivas representam um risco da mesma magnitude (Hinkel *et al.*, 2013; Mentaschi *et al.*, 2018). Projeções indicam que até o final do século XXI, as perdas globais de terras em decorrência dos efeitos da erosão costeira podem alcançar entre 6.000 km² e 17.000 km², com consequente impacto na vida de milhões de pessoas e causando altos prejuízos econômicos (Hinkel *et al.*, 2013). Nesta mesma linha, Mentaschi *et al.* (2018) identificaram perdas de aproximadamente 28.000 km² de terra em zonas costeiras entre 1984 e 2015, o que corresponde ao dobro das áreas que sofreram acreção.

O uso de inteligência artificial tem se destacado em diversas áreas, com destaque, em especial, nos trabalhos da área da saúde (Mondillo *et al.*, 2025; Temsah *et al.*, 2025; Tordjman *et al.*, 2025).

Em relação à geomorfologia costeira, é possível aplicar a utilização de diversos *softwares* compatíveis para estimar o avanço ou recuo das linhas de costa, e realizar



predições para mitigar os efeitos da erosão costeira (Pang *et al.*, 2023). No entanto, considerando uso de inteligência artificial aplicado à Geomorfologia e áreas correlatas, em especial a utilização de Modelos de linguagem de grande escala, em inglês, *Large Language Models* - (LLM's), ainda são incipientes, não havendo publicações que façam a aplicação da técnica empregada no presente trabalho.

Desta forma, com base nas experiências supracitadas, o presente trabalho busca propor a utilização de ferramentas baseadas no uso de inteligência artificial, mais especificamente, de LLM's, em conjunto com outras técnicas disponíveis a partir do uso de ferramentas de tecnologia, para identificar a ocorrência de episódios de erosão costeira no litoral do RN com base em notícias encontradas na *internet*.

ÁREA DE ESTUDO

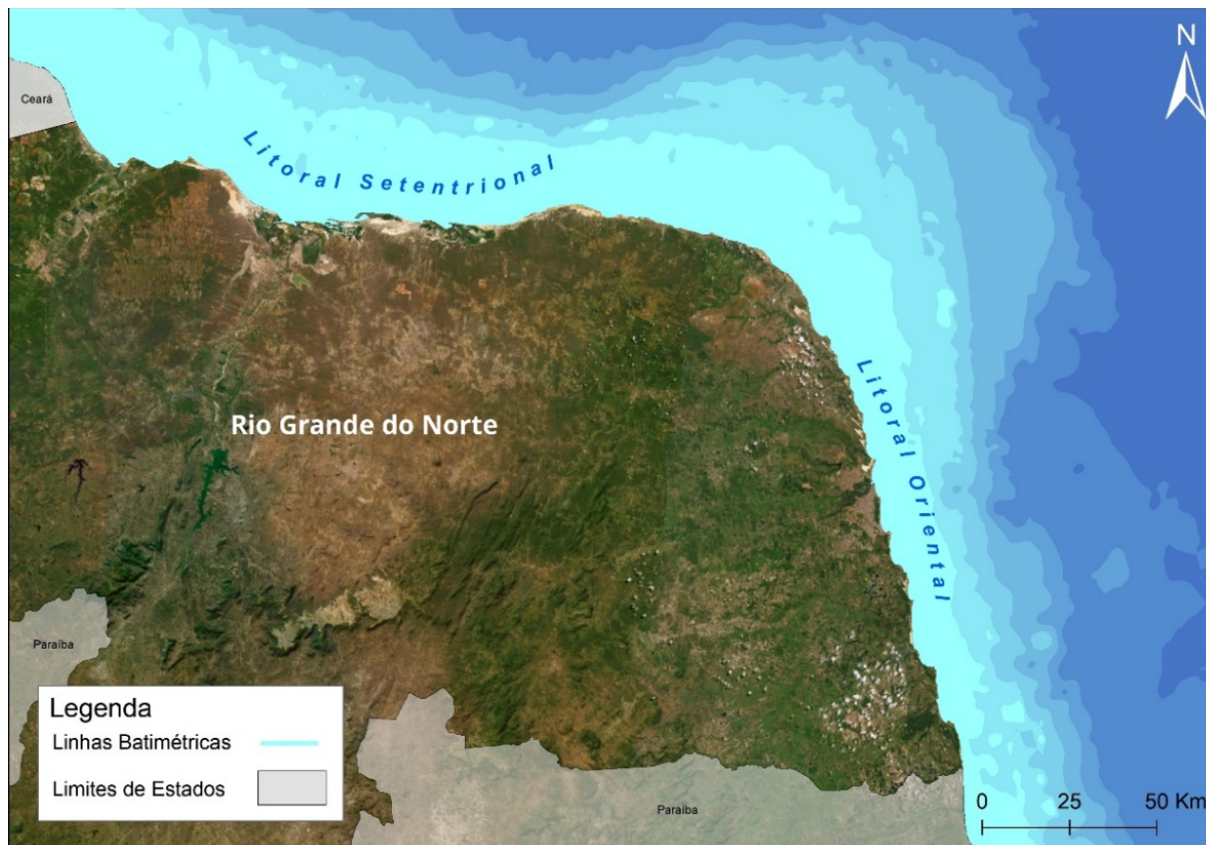
O litoral do Rio Grande do Norte apresenta 410 km de extensão e, nele, são encontrados, na maioria de sua limitação, praias arenosas em 72% de sua totalidade e falésias ativas da Formação Barreiras, sendo 26% do total (Muehe, 2018).

Devido a diferentes características, sejam climáticas ou tectônicas, com atuação no funcionamento da dinâmica dos ventos e nos elementos oceânicos, adota-se uma subdivisão para o litoral do estado, com base na direção da linha de costa, sendo, na parte cuja direção seja norte-sul, litoral oriental, e o que compreende a direção leste-oeste, o litoral setentrional (Muehe, 2018).

Em relação aos aspectos geomorfológicos, os elementos do relevo com maior preponderância são a planície, os tabuleiros costeiros, rochas praias (beachrocks) e os campos duna. Em relação à Geologia, a faixa do litoral do RN é composta por rochas sedimentares do Cretáceo, com cobertura de rochas da Formação Barreiras e sedimentos do Quaternário (Mabesoone & Alheiros, 1988; Martins *et al.*, 2014; Muehe, 2018; Camara *et al.*, 2019).



FIGURA 1. Localização da área de estudo.



FONTE: Autores (2025)

O litoral oriental tem suas limitações, ao norte, pelo Cabo Calcanhar, localizado no município de Touros e, ao sul, pela praia do Sagi, no município de Baía Formosa, que faz divisa com a Paraíba. Este litoral tem como principal elemento morfológico várias baías em forma de zeta com processos erosivos relacionados a comportamentos de refração e difração de ondas, explicados pela atuação de processos erosivos diferenciais da Formação Barreiras, e da direção preponderante da ocorrência das ondas. Verifica-se, além do exposto, a presença ampla de campos dunares parabólicos recobertos por vegetação característica, praias arenosas, complexos lagunares, arenitos de praia ou *beachrocks* e planícies estuarinas (Muehe, 2018).

No litoral setentrional, que abrange o trecho entre o Município de Tibau, na porção noroeste, até o município de Touros na porção leste, as dunas são em sua maioria barcanas e barcanóides. Este litoral tem ao longo de sua extensão compartimentos de relevo variado, como dunas submersas, sistemas de ilhas barreiras, praias arenosas, praias lamosas, pontais arenosos, estuários, *beachrocks*, vales incisos e banco de recifes de corais (Testa & Bosence, 1998; Camara *et al.*, 2019).

As falésias têm ocorrência nos afloramentos dos litótipos da Formação Barreiras ou depósitos quaternários costeiros, onde há a presença de escarpas íngremes. As



falésias de Ponta do Mel em Areia Branca, Barra de Tabatinga em Nísia Floresta e Pipa em Tibau do Sul tem maior destaque, chegando até os 30 metros de altura com escarpas íngremes e sem a presença de vegetação. Esse tipo de feição é altamente susceptível aos efeitos da erosão costeira, haja vista que o regime de meso-maré atribui um cenário de erosão ativa, com um recuo erosivo frequente da escarpa frente à abrasão marinha (Maia *et al.*, 2022).

O litoral, como um todo, apresenta marcante variabilidade interanual, com maior destaque na precipitação, com anos extremamente secos e outros chuvosos. Os sistemas atmosféricos que atuam na faixa litorânea do RN são o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que, a partir das alterações sazonais de intensidade e localização, interfere na dinâmica climática da região. Os ventos relacionados aos sistemas de pressão supracitados são, para a extremidade norte do ASAS, os alísios de sudeste, na extremidade sul do ASAN, os alísios de nordeste, com velocidades médias de 6,7 cm/s e amplitude entre 2,6 a 13,4 cm/s (Cavalcanti *et al.*, 2009).

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho propõe uma abordagem metodológica, com o uso de ferramentas LLM's aplicadas em dados obtidos, a partir da *Application Programming Interface* (API) ou Programação de Aplicações (em português) de busca automatizada do *Google* para identificar praias, no Estado do Rio Grande do Norte, onde são recorrentes os problemas de erosão costeira, através da identificação de notícias sobre o tema. Os procedimentos metodológicos envolveram a construção e execução de *script* baseado em *Python*, executado no ambiente virtual *Visual Studio Code* – VSCode versão 1.99.3 com auxílio da LLM disponibilizada pela *OpenAI*, a partir de seu *chatbot ChatGPT*, utilizando os modelos o4-mini-high, o4-mini e GPT-4o.

O *script* teve como funções a aplicação da ferramenta de API *Google Custom Search* API, que permite a realização de consultas automatizadas utilizando o buscador *Google*; o agrupamento das consultas em planilhas e cópias dos endereços virtuais em formato pdf e tratamento dos dados utilizando a LLM *Deepseek*. As consultas foram realizadas entre os dias 13 e 18 de abril de 2025, e utilizaram como palavras-chaves os termos “Erosão costeira” e “Rio Grande do Norte”. Os dados obtidos foram processados utilizando o *Deepseek*, instalada em servidor local por meio do uso do software *LM Studio* 0.3.14 (Build 5).

O modelo analisou trechos de pdfs obtidos com o script em *Python*, a partir da aplicação de filtros de relevância e associação com a erosão costeira. A construção do código resultou em diversos erros lógicos de programação, que foram ajustados no



decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Dentre os erros mais recorrentes, pode-se citar falhas de comunicação entre o *script* e o *software* LM *Studio*, a incapacidade do modelo de lidar com *prompts* de tamanho maior que 4096 tokens, a necessidade de separação de arquivos em pdf para uma leitura mais precisa pelo modelo, e erros comuns de programação, como tipos de arquivo, problemas na interface gráfica etc.

O primeiro procedimento adotado foi escolher a linguagem de programação mais adequada para alcançar o objetivo proposto, dentre a linguagem baseada em R e *Python*. Optou-se por construir um *script* em *Python*, considerando sua maior versatilidade, maior gama de ferramentas disponíveis, maior aplicabilidade para *Machine Learning* e suporte crescente (Bajuk, 2019).

Com a linguagem de programação definida, procedeu-se com a construção do código, que foi elaborado para ter duas funções principais, a primeira caracterizou-se em realizar consultas automatizadas com os termos “Erosão Costeira” e “Rio Grande do Norte”, fazendo uso da *Google Custom Search API*, cuja operação permite fazer consultas com palavras-chave específicas de forma automatizada. Essa ferramenta tem um limite diário de 100 consultas.

Para que os resultados de cada pesquisa não fossem repetidos, o código gerou um registro com todos os resultados obtidos, e, em cada nova pesquisa, a busca iniciava-se sempre com a continuação a partir do ultimo endereço identificado, no intuito de se evitar duplicações e aumentar a confiança dos resultados. Além disso, cada link identificado pela API foi acessado e salvo, respectivamente, em pdf como backup, permitindo realizar-se uma verificação do teor do site e identificar possíveis informações inconsistentes. A segunda parte do código consistiu em implementar a API do *Deepseek*, utilizando a LLM de mesmo nome, para realizar uma análise automatizada dos dados obtidos nas consultas. Essa etapa foi a mais complicada no desenvolvimento do trabalho, considerando que essa LLM teve recente liberação ao grande público, e necessitou ser configurada especificamente para o objetivo proposto, o que levou a necessidade de se entender e operar a ferramenta do zero, o que demanda tempo.



FIGURA 2. Prompts utilizados no Deepseek.

```
scriptGPT.py X
C:\Users\mathe\Documents\Matheus\SINAGEO\TRABALHO COMPLETO\Script> scriptGPT.py > ...
280 def instudio_chat(
281     prompt: str,
282     model: str = MODEL_CHAT,
283     max_tokens: int = 512,
284     system_content: str = None
285 ) -> str:
286     """
287     Envia um prompt ao modelo LM Studio e retorna a resposta gerada.
288
289     Parâmetros:
290     - prompt: o texto que você quer que o modelo processe (string).
291     - model: o identificador do modelo a ser usado (padrão: MODEL_CHAT).
292     - max_tokens: número máximo de tokens na resposta (padrão: 512).
293     - system_content: mensagem de sistema customizada (se None, usa padrão).
294
295     Retorna:
296     - string limpa com o conteúdo da resposta do modelo.
297     - em caso de falha, registra no log e relança a exceção.
298     """
299     # 1) Definir o prompt de sistema
300     system_msg = system_content or (
301         "Você é um assistente especializado em extração de informações de "
302         "notícias de erosão costeira no Rio Grande do Norte. "
303         "Responda apenas o que for solicitado, sem explicações adicionais. "
304         "Sempre em português."
305     )
306
307     try:
308         # 2) Chamada à API local do LM Studio (via OpenAI client)
309         response = client.chat.completions.create(
310             model=model,
311             messages=[
312                 {"role": "system", "content": system_msg},
313                 {"role": "user", "content": prompt}
314             ],
315             max_tokens=max_tokens,
316             temperature=0.0
317         )
318         # 3) Extrai o texto da primeira escolha retornada
319         content = response.choices[0].message.content
320         # 4) Retorna a resposta já "stripada" (sem espaços extras)
321         return content.strip()
```

FONTE: Autores (2025)

Foi solicitado ao *Deepseek*, conforme exemplificado na Fig. 2, que examinasse todos os resultados salvos em planilha, a partir de resumo feito pelo próprio código, usando os pdfs obtidos, e gerasse um arquivo JSON com informações a respeito da relação entre o resultado dentro das planilhas com notícias sobre episódios de erosão costeira no Rio Grande do Norte. Isso foi necessário devido à limitação de input na ferramenta, requerendo haver um ‘fatiamento’ das informações salvas.

O modelo gerou uma tabela contendo apenas as notícias que poderiam se enquadrar como relevante com base nas informações fornecidas anteriormente.

Depois, os resultados foram organizados de forma manual, a partir do uso do *software* de planilhas *Excel* da suíte *Microsoft Office*, para garantir a menor incidência de erros, considerando que, apesar de toda a praticidade e automatização existente, ainda persiste a possibilidade de alucinação e distorção das informações por parte do modelo de Inteligência Artificial.

As pesquisas foram realizadas entre os dias 13 e 18 de abril de 2025, com objetivo de se obter a maior quantidade de endereços virtuais possíveis, considerando o limite diário da API do *Google* para consultas, sendo 100 por dia.

Por fim, utilizou-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG) *ArcMap* versão 10.8 para realizar os procedimentos de georreferenciamento e geoprocessamento com objetivo de representar, por meio de mapas temáticos, as praias identificadas a partir do uso do *script*.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foram capturados 278 resultados, ou seja, endereços virtuais obtidos nas consultas automatizadas realizadas com o código em *Python*, durante o recorte temporal selecionado. A partir desses resultados, foram aplicados os filtros utilizando o *Deepseek*, e o filtro manual.

O modelo retornou uma lista com 93 resultados dentre os 278 fornecidos para análise. Aplicaram-se, aqui, os filtros inseridos por meio de *prompt*, limitando-se a verificar apenas os resultados compatíveis com episódios de erosão costeira.

Após a aplicação do filtro automatizado utilizando, específico para episódios de erosão costeira no Rio Grande do Norte, aplicou-se o filtro manual com base nos parâmetros estabelecidos, e foram elencados um total de 17 itens correlatos com notícias no estado.

TABELA 1: Lista de praias identificadas.

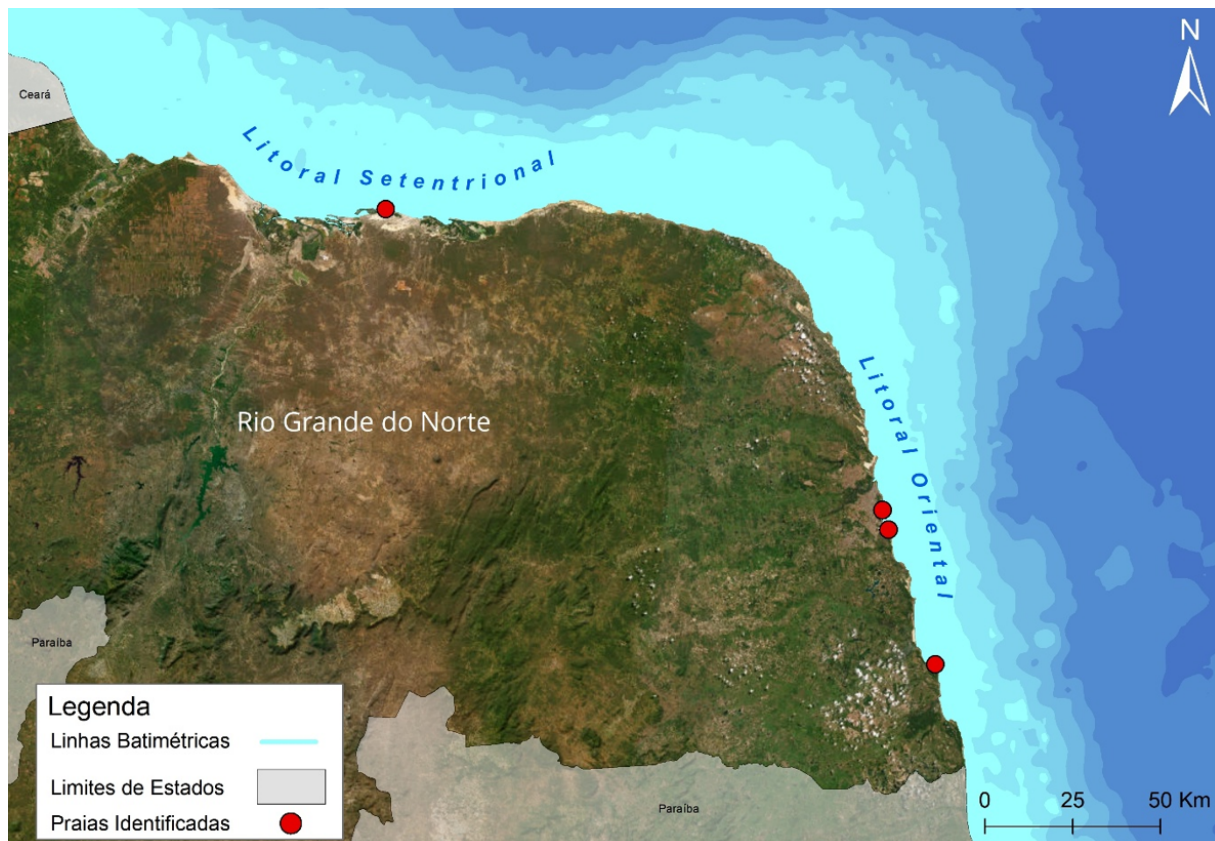
MUNICÍPIO	PRAIA	DATA	TIPO
Tibau do Sul	Pipa	22/04/2021	Notícia
TIBAU DO SUL	-	30/06/2015	Artigo
Rio Grande do Norte	Litoral Setentrional	11/12/2012	Notícia
Natal	Ponta Negra	20/06/2023	Notícia
Natal	Ponta Negra	28/12/2016	Artigo
Tibau do Sul	Pipa	19/01/2024	Notícia
Tibau do Sul	Pipa	17/06/2024	Notícia
Natal	Ponta Negra e Via Costeira	31/05/2023	Trabalho
Natal	Ponta Negra	27/07/2023	Notícia
Macau	Ponta do Tubarão	2012	Trabalho
Tibau do Sul	Pipa	31/01/2022	Notícia
Natal	['Ponta Negra', 'Via Costeira']	31/05/2023	Trabalho
Natal	Ponta Negra	15/07/2012	Notícia
Natal	Ponta Negra	30/09/2023	Notícia
Tibau do Sul	Pipa	23/05/2024	Notícia
Natal	Ponta Negra	01/07/2023	Notícia

FONTE: Autores (2025)

Os resultados, conforme explicitado na Tabela 1, demonstram a necessidade de avanços na área de Inteligência Artificial, principalmente no manuseio de versões mais sofisticadas do *Deepseek*, pois mesmo com os comandos inseridos, o modelo atribuiu “Rio Grande do Norte” à coluna ‘Município’ e “Litoral Setentrional” a coluna ‘Praia’, sendo, então, dados incongruentes.



FIGURA 3: Localização das praias identificadas pelo Deepseek.



FONTE: Autores (2025).

A espacialização dos dados, conforme apresentado na Fig. 3, aponta para uma maior representação de praias, ou episódios de erosão costeira, no litoral oriental, com três pontos identificados, enquanto litoral setentrional teve apenas um ponto identificado.

Apesar do *script*, e, conseqüentemente o *Deepseek* demonstrar a capacidade de realizar os filtros solicitados, houve a necessidade de realização de filtro manual dos dados, corroborando para a necessidade de se aprofundar na metodologia proposta no presente trabalho, a fim de se aprimorar a capacidade do modelo de realizar as tarefas solicitadas.

Além disso, devido às limitações de consultas existentes na API de busca do *Google*, as buscas se restringiram aos termos “Erosão costeira” e “Rio Grande do Norte”, o que apresenta um fator limitante para a pesquisa, não sendo possível a inclusão de novas palavras-chave ou termos de busca. Esse fato tem uma influência nos resultados, considerando que o *script* foi incapaz de identificar outros episódios de erosão costeira.

Realizando-se pesquisas manuais no buscador *Google*, com o termo “Erosão na praia da redinha Natal-RN”, é possível encontrar menção a inclusão da Praia da Redinha em decreto editado pela Prefeitura Municipal de Natal, estendendo o estado



de emergência já declarado no Decreto nº 13.192 para as áreas da Praia de Ponta Negra e Via Costeira, à praia da Redinha, em virtude do avanço dos apontamentos levantados em um relatório da Secretaria Municipal de Defesa Social (SEMDES) apontarem graves riscos na Redinha para a população e identificação de barracas à beira-mar em estado de colapso, colocando em risco a segurança dos ocupantes (NOVO Notícias, 2024).

FIGURA 4: Degradação de bares e restaurantes na Praia da Redinha, 10 de outubro de 2024.



FONTE: Acervo dos autores (2025)

Esse fato demonstra outra limitação da metodologia utilizada. Havendo uma ampliação das técnicas aplicadas no presente trabalho, seria possível a inserção de outras API's, como o Bing Web Search API, disponível na plataforma Azure, da *Microsoft*, e seu buscador no *script* para comparação com os resultados identificados na *Google Custom Search*.

Outro exemplo de limitação da API do *Google* foi a não identificação de episódios de erosão costeira e deslocamento de massa na Praia de Santa Rita, localizada no município de Extremoz – RN e Pipa, localizada no município de Tibau do Sul, evidenciando a limitação da metodologia e do modelo de LLM utilizado.



FIGURA 5: (a) Praia de Santa Rita – Extremoz 15 de setembro de 2024 e
(b) deslocamento de Massa em Pipa – RN / 03 de abril de 2025.



FONTE: Acervo dos autores (2025)

Em ambos os exemplos, a erosão está atuando e, como não gerou fato noticiado, não é possível a captura dos eventos pelas técnicas empregadas. Portanto, verifica-se que a metodologia proposta pode e deve ser utilizada em conjunto com as demais existentes, em especial as mensurações em campo, para abranger o máximo possível as condições de erosão na linha de costa e ampliar a gama de procedimentos de estudos na área.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho constitui-se como primeira etapa no desenvolvido de pesquisa com abordagem de utilização de I.A. com uso de Machine Learning aplicado à análises mais complexas da evolução dos processos costeiros de erosão. À *priori*, pode-se



apontar que o caminho vislumbrado a partir dos resultados identificados é promissor, considerando a aplicação do *Deepseek* no tratamento de dados obtidos pela API do *Google* na identificação de episódios de erosão costeira.

Trata-se de uma abordagem inovadora, pois não há estudos publicados com a utilização da metodologia empregada especificamente para este trabalho, e que pode incentivar novas pesquisas e contribuir para uma nova forma de quantificar e qualificar episódios de erosão costeira não observados das formas convencionais.

Contudo, alguns aspectos devem ser levados em consideração, como a limitação da API em conseguir identificar apenas os episódios noticiados e abordados com as palavras-chave selecionadas, o número de consultas diárias, a própria arquitetura do *Deepseek*, que é uma ferramenta recente e a necessidade de máquinas mais potentes para o manuseio de grande volumes de dados. Além disso, se identifica a importância de se ter o conhecimento do nome das praias explícito nos resultados das buscas para alimentar a Inteligência Artificial para uma recuperação mais precisa de informações com relação às localidades. A partir disso, pode-se pensar a utilização de redes neurais para treino de modelos de inteligência artificial que sejam alimentados especificamente com informações sobre praias e demais localizações de interesse dos pesquisadores.

Espera-se que as próximas etapas relacionadas à metodologia proposta possam envolver o treinamento de ferramentas de Inteligência Artificial mais robustas e sua consequente aplicação em outros tipos de dados, como aqueles obtidos por imagens de satélite, imagens obtidas por drone, LiDAR e outras tecnologias, que, aliados à predição das ferramentas de Inteligência Artificial, podem colaborar para mitigação dos efeitos da erosão costeira e respostas mais rápidas e eficazes aos episódios.



REFERÊNCIAS

- Anthoff, D., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J. & Vafeidis, A.T. (2006). Global and regional exposure to large rises in sea-level: a sensitivity analysis. Tyndall Centre for Climate Change Research. http://www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/twp96.pdf. Acesso em 24 de Setembro de 2024.
- Bajuk, L. (2019). R vs. Python: What's the best language for Data Science? . *posit.co*. <https://posit.co/blog/r-vs-python-what-s-the-best-for-language-for-data-science>. Acesso em 24 de Julho de 2025.
- Bird, E. (2016). Coastal Cliffs: Morphology and Management. Cham: Springer International Publishing. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-29084-3>. Acesso em 24 de Setembro de 2024.
- Brasil. (2013). *Relatório de gestão de gerência costeira 2010-2012: Gerência Costeira*. Brasília.
- Cai, F., Su, X., Liu, J., Li, B. & Lei, G. (2009). Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science Elsevier* **19**, 415–426.
- Camara, M., Scudelari, A., Matos, M., Rabelo, T. & Lima, Z. (2019). Geotecnologias como subsídio para gestão de ambientes costeiros: análise do recuo em falésias/arribas no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil, e suas implicações socioambientais. *GOT - Journal of Geography and Spatial Planning CEGOT - Center of Studies on Geography and Spatial Planning* 53–79.
- Cavalcanti, I.F. de A., Ferreira, N.J., Dias, M.A.F. da S. & Silva, M.G.A.J. da. (2009). Tempo e clima no Brasil. Oficina de Textos.
- Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton, J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., et al. (2013). A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary Change Elsevier* **111**, 150–158.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2023). *Censo Demográfico 2022: População e domicílios. Primeiros resultados*. Rio de Janeiro.
- IPCC, I.P. on C.C. (2022). Summary for Policymakers. *Global Warming of 1.5°C* Cambridge University Press 1–24. <https://www.cambridge.org/core/books/global-warming-of-15c/summary-for-policymakers/31C38E590392F74C7341928B681FF668>. Acesso em 21 de Novembro de 2024.
- Leatherman, S.P. (1983). Shoreline mapping: a comparison of techniques. *Shore and Beach* **51**, 28–33.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G. & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports 2018 8:1* Nature Publishing Group **8**, 1–11. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-24630-6>. Acesso em 24 de Setembro de 2024.
- Mabesoone, J.M. & Alheiros, M.M. (1988). Origem Da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba. *Revista Brasileira De Geociências*.
- Maia, R.P., Amorim, R. de F. & Meireles, A.J.A. (2022). *Falésias: Origem, Evolução, Risco*. Fortaleza: Imprensa Universitária.
- Martins, G., Junior, O.F. dos S. & Castro, V.L.L. de. (2014). O Arcabouço Geológico Subsuperficial na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil: Inferências Pela Interpolação de Dados Litológicos de Poços. *Revista de Geologia* **27**,. <https://periodicos.ufc.br/geologia/article/view/1273>. Acesso em 24 de Julho de 2025.
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M.I., Pekel, J.F., Voukouvalas, E. & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports 2018 8:1* Nature Publishing Group **8**, 1–11. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-30904-w>. Acesso em 24 de Setembro de 2024.
- Mondillo, G., Colosimo, S., Perrotta, A., Frattolillo, V. & Masino, M. (2025). Comparative Evaluation of Advanced AI Reasoning Models in Pediatric Clinical Decision Support: ChatGPT O1 vs. DeepSeek-R1. *medRxiv Cold Spring Harbor Laboratory Press* 2025.01.27.25321169. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.01.27.25321169v1>. Acesso em 19 de Julho de 2025.
- Muehe, D. (2018). *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília,DF: MMA.
- Nordstrom, K.F. (2000). Beaches and Dunes of Developed Coasts. *Beaches and Dunes of Developed Coasts* Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/beaches-and-dunes-of-developed-coasts/4AF5CF3D68AFE98698C151993FCC023D>. Acesso em 24 de Setembro de 2024.



Pang, T., Wang, X., Nawaz, R.A., Keefe, G. & Adekanmbi, T. (2023). Coastal erosion and climate change: A review on coastal-change process and modeling. *Ambio* **52**, 2034–2052. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01901-9>.

Temsah, A., Alhasan, K., Altamimi, I., Jamal, A., Al-Eyadhy, A., Malki, K.H., Temsah, M.-H., Temsah, A., *et al.* (2025). DeepSeek in Healthcare: Revealing Opportunities and Steering Challenges of a New Open-Source Artificial Intelligence Frontier. *Cureus Cureus* **17**,. <https://www.cureus.com/articles/341667-deepseek-in-healthcare-revealing-opportunities-and-steering-challenges-of-a-new-open-source-artificial-intelligence-frontier>. Acesso em 19 de Julho de 2025.

Testa, V. & Bosence, D.W.J. (1998). Carbonate-siliciclastic sedimentation on a high-energy, ocean-facing, tropical ramp, NE Brazil. *Geological Society Special Publication* **149**, 55–71.

Tordjman, M., Liu, Z., Yuce, M., Fauveau, V., Mei, Y., Hadjadj, J., Bolger, I., Almansour, H., *et al.* (2025). Comparative benchmarking of the DeepSeek large language model on medical tasks and clinical reasoning. *Nature Medicine* **2025** Nature Publishing Group 1–6. <https://www.nature.com/articles/s41591-025-03726-3>. Acesso em 19 de Julho de 2025.

Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A., *et al.* (2014). Coastal Systems and Low-Lying Areas. *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects* Cambridge University Press 361–410. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2014-impacts-adaptation-and-vulnerability-part-a-global-and-sectoral-aspects/coastal-systems-and-lowlying-areas/4DOEBBA5B12593931B00B772CD62C517>. Acesso em 24 de Setembro de 2024.

Young, A.P. & Carilli, J.E. (2019). Global distribution of coastal cliffs. *Earth Surface Processes and Landforms* John Wiley & Sons, Ltd **44**, 1309–1316. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/esp.4574>. Acesso em 24 de Setembro de 2024.