

*Artigo de Pesquisa*

# Suscetibilidade de Bacias Hidrográficas a Inundações em Zonas de Contato entre Faixas Montanhosas e Planícies Litorâneas: contribuições de índices morfométricos na região tropical atlântica no Sudeste do Brasil

## *Susceptibility of River Basins to Flooding in Contact Zones Between Mountain Ranges and Coastal Plains: contributions of morphometric indices in the tropical Atlantic region of Southeastern Brazil*

Marcus Vinícius Oliveira Sartório <sup>1</sup> e Antônio Pereira Magalhães Júnior <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, Brasil. [marcus.sartorio@gmail.com](mailto:marcus.sartorio@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1307-8782>

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, Brasil.  
[antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com](mailto:antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5327-3729>

Recebido: 17/02/2025; Aceito: 02/06/2026; Publicado: 21/06/2026

**Resumo:** A análise de parâmetros morfométricos tem sido amplamente empregada para avaliar a suscetibilidade a eventos de inundação; contudo, em grandes escalas, tende a homogeneizar e generalizar os resultados, ocultando diferenças locais relevantes. Este artigo tem como objetivo investigar a suscetibilidade a inundações por meio de quinze parâmetros morfométricos aplicados em ambiente SIG, em escalas que abrangem bacias e sub-bacias até a sexta ordem, situadas na faixa Mantiqueira setentrional/planície litorânea do Espírito Santo. A abordagem metodológica possibilitou análises comparativas e maior detalhamento da suscetibilidade morfométrica, além de oferecer uma compreensão regional mais consistente. Complementarmente, os resultados foram relacionados ao regime pluvial por meio do modelo global de precipitação CHELSA 1.2, o que permitiu identificar sub-bacias mais críticas. As análises evidenciam a relevância de parâmetros como área, amplitude altimétrica, perímetro e declividade do canal principal na definição de áreas mais suscetíveis a inundações. Em bacias montanhosas e de pequenas dimensões, tais características podem ser mais determinantes que a própria precipitação na intensificação do escoamento superficial. A análise em nível de sub-bacia revelou padrões locais de suscetibilidade, destacando a concentração de áreas críticas no médio e baixo curso da bacia do rio Santa Maria e a ampla distribuição na bacia do rio Jucu, além da assimetria observada na margem direita dos canais principais de ambas.

**Palavras-chave:** Hidrogeomorfologia; Hidrogeografia; Geomorfologia quantitativa; Morfometria de drenagem.

**Abstract:** The analysis of morphometric parameters has been widely employed to assess flood susceptibility; however, at broader scales, it tends to homogenize and generalize results, concealing relevant local differences. This study aims to investigate flood susceptibility using fifteen morphometric parameters in a GIS environment, at scales ranging from basins and sub-basins up to the sixth order, located in the northern Mantiqueira range/coastal plain of Espírito Santo, Brazil. The methodological approach enabled comparative analyses and a more detailed assessment of morphometric susceptibility, while also providing a more consistent regional comprehension. Additionally, the results were related to the rainfall regime using the CHELSA 1.2 global precipitation model, which allowed for the identification of more critical sub-basins. The analyses highlight the relevance of parameters such as area, altimetric amplitude, perimeter, and main channel slope in

defining areas more susceptible to flooding. In mountainous and small-sized basins, such characteristics may be more determinant than precipitation itself in intensifying surface runoff. The sub-basin level analysis revealed local susceptibility patterns, emphasizing the concentration of critical areas in the middle and lower courses of the Santa Maria River basin and the widespread distribution in the Jucu River basin, as well as the asymmetry observed on the right margin of the main channels of both basins.

**Keywords:** Hydrogeomorphology; Hydrogeography; Quantitative geomorphology; Drainage morphometry.

## 1. Introdução

As inundações são as maiores causadoras de desastres naturais em bacias costeiras, tanto em nível nacional quanto mundial (WMO, 2016; UNDRR, 2020). São também nas planícies fluviais e em áreas costeiras nas quais há uma tendência de expansão de concentrações humanas (Small; Nicholls, 2003; Rentschler et al., 2022), o que, somado à suscetibilidade natural desses ambientes às inundações, os torna particularmente sujeitos a riscos e danos. A intensidade e a frequência de chuvas são frequentemente apontadas como fatores decisivos na origem de inundações, associados aos fenômenos climáticos extremos que denotam oscilações climáticas nas últimas décadas (IPCC, 2021; UNDRR, 2020). Por outro lado, a dinâmica destes eventos está associada à configuração morfométrica das bacias hidrográficas, motivando a proposição de parâmetros quantitativos amplamente estudados desde a década de 1940, como nos trabalhos de Horton (1945) e Strahler (1952). Nesse contexto, a análise das propriedades morfométricas dos sistemas fluviais torna-se essencial para compreender como diferentes bacias respondem hidrológicamente a eventos pluviométricos, permitindo relacionar a forma e a estrutura da rede de drenagem à magnitude e à velocidade das cheias (Borga et al., 2008).

Na equação de risco, a suscetibilidade ao desenvolvimento destes eventos tem avançado de modo significativo com as técnicas de geoprocessamento aplicadas a estudos morfométricos, haja vista que nas últimas décadas acumulou-se uma vasta literatura sobre o papel que a morfometria fluvial desempenha frente à ocorrência e intensidade de inundações. Trabalhos como os de Ozdemir e Bird (2009), Romshoo, Bhat e Rashid (2012), Bhatt e Ahmed (2014), Abuzied et al. (2016), Fenta et al. (2017), Bhat et al. (2019) e Alam, Ahmed e Sammonds (2021) demonstram como a morfometria fluvial tem avançado diante das novas tecnologias de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

Contudo, a análise morfométrica de bacias hidrográficas em macroescala impõe severas limitações analíticas, uma vez que bacias muito extensas tendem a ocultar importantes diferenças hidrogeomorfológicas que favorecem, localmente, o desenvolvimento destes eventos. A heterogeneidade inerente a esses grandes sistemas hídricos dificulta a representação precisa dos processos hidrológicos e morfométricos, fazendo com que as variáveis morfométricas assumam valores médios e generalizados que não refletem a verdadeira dinâmica de setores específicos (Mendiondo; Tucci, 1997; Sirangelo, 2014). Tal limitação de escala incorre em uma generalização da suscetibilidade a inundações, visto que a análise de uma bacia principal que drena litologias e relevos variados camufla a diversidade dos valores críticos frequentemente encontrados em seus canais de menor ordem. Para contornar este viés, a literatura científica indica que o detalhamento da análise na escala de sub-bacias e microbacias é fundamental. Isso se deve ao fato de que essas áreas drenam substratos mais homogêneos, atuam como as principais alimentadoras dos macrossistemas fluviais e refletem com maior fidelidade a vulnerabilidade a eventos extremos (Pinto et al, 2016; Cherem, 2008).

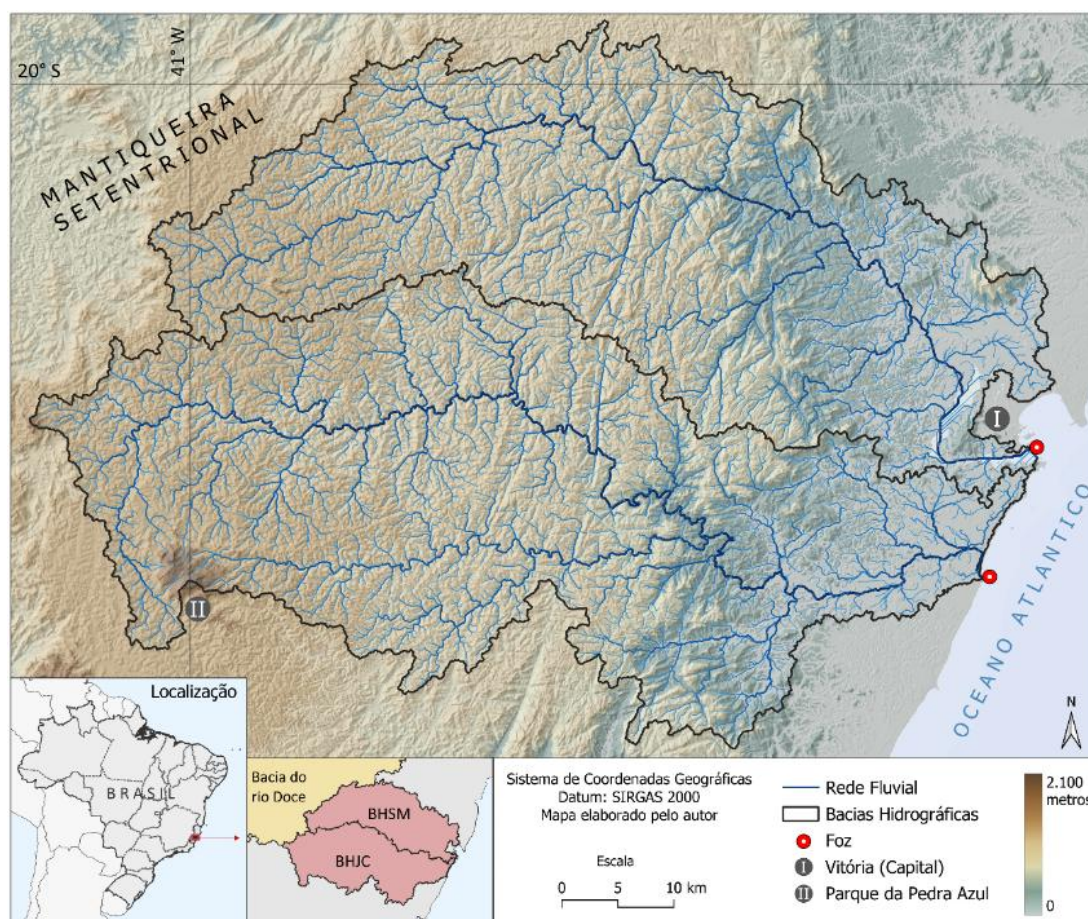
Nesse sentido, este artigo tem como objetivo investigar a suscetibilidade a inundações em bacias hidrográficas de escalas espaciais variadas situadas entre o sistema montanhoso da Serra da Mantiqueira e a planície litorânea da região Sudeste do Brasil, a partir de parâmetros morfométricos. Essa abordagem permitiu realizar análises comparativas, aprofundar o detalhamento da suscetibilidade morfométrica e ampliar a compreensão regional de uma área sensivelmente afetada por esses eventos. De forma complementar, a suscetibilidade morfométrica foi relacionada ao regime pluvial por meio do modelo global de precipitação CHELSA 1.2 (Karger et al., 2017), visando identificar as sub-bacias mais críticas.

As bacias costeiras da faixa Mantiqueira setentrional/planície litorânea, região Sudeste do Brasil, são zonas preferenciais para inundações intensas e recorrentes, com regime pluviométrico sazonal e uma forte influência orográfica (Nascimento, 2017). Algumas inundações históricas datam de 1922, 1938, 1940, 1960 e 1979, quando a ocupação urbana ainda era tímida nas margens fluviais e planícies costeiras da área. Os eventos mais recentes, bem

documentados em 1997, 2008, 2013, 2020 e 2024, já encontraram ambientes com elevada vulnerabilidade natural e riscos importantes em função da forte expansão urbana nas últimas décadas (Silva, 2010; D'Alcântara, 2012; Deina; Coelho, 2015; INMET, 2024). Embora existam estudos pontuais sobre bacias na área de estudo, são escassos os trabalhos que, em escala regional, realizam análises comparativas da dinâmica hidrogeomorfológica, o que gera lacunas e evidencia a necessidade de investigações que aprofundem a compreensão dos fatores naturais e antropogênicos que influenciam a dinâmica fluvial dessa região.

## 2. Área de Estudo

A área de interesse corresponde a duas bacias de sexta ordem: Rio Santa Maria (BHSM), com 1791,2km<sup>2</sup> e Rio Jucu (BHJC), com 2129,4km<sup>2</sup>, localizadas no litoral centro-sul do estado do Espírito Santo, mesorregião hidrográfica Atlântico Sudeste (Figura 1). As bacias possuem uma amplitude altimétrica que alcança 1889m em sua porção mais ocidental, com eixos de drenagem alinhados a NW-SE, drenando diretamente para o oceano, e divisores de drenagem situados na porção setentrional da Serra da Mantiqueira. No reverso das bacias encontra-se a porção meridional da bacia do rio Doce que drena uma área de 83.400km<sup>2</sup> e limita as bacias costeiras de forma que os divisores de drenagem se encontram posicionados em sentido paralelo à linha de costa a uma distância média de 84km. Esta característica tem influência decisiva no comportamento hidrológico, formando bacias litorâneas com volumes reduzidos de vazão se comparados a outras bacias circundantes.



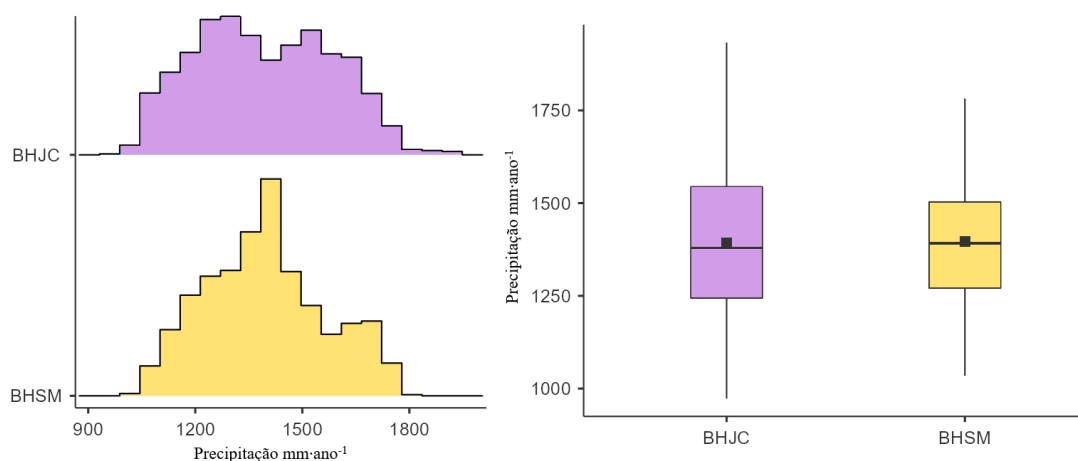
**Figura 1.** Localização das bacias hidrográficas do rio Santa Maria (BHSM) e rio Jucu (BHJC). Mapa elaborado pelo autor.

As bacias estudadas encontram-se inseridas em dois compartimentos geológicos. Um corresponde ao embasamento pré-cambriano constituído por rochas plutônicas e metamórficas, a oeste. O outro refere-se aos depósitos sedimentares cenozoicos que ocorrem nos tabuleiros da Formação Barreiras, de origem neógena (anteriormente incluída no Terciário), e nos depósitos quaternários a jusante das bacias, no litoral e nas planícies fluviais. As cabeceiras das bacias localizam-se no extremo norte da Serra da Mantiqueira, a qual forma um conjunto

montanhoso paralelo à costa sudeste do Brasil (sentido WSE-ENE). A Serra situa-se no contexto de Margem Continental Passiva Elevada, formando uma transição entre a planície costeira e o interior continental (Silva et al. 1987; Calegari et al., 2021). Embora não exista uma escarpa acentuada associada aos divisores da drenagem regional, observa-se uma queda substancial das cotas altimétricas até o nível de base regional, ocorrendo de forma escalonada no embasamento pré-cambriano. Esse embasamento é formado por uma complexa associação de rochas ígneas e metamórficas, relacionadas às faixas móveis brasileiras Araçuaí (Orógeno Araçuaí) e Ribeira (Orógeno Ribeira) (Almeida, 1977).

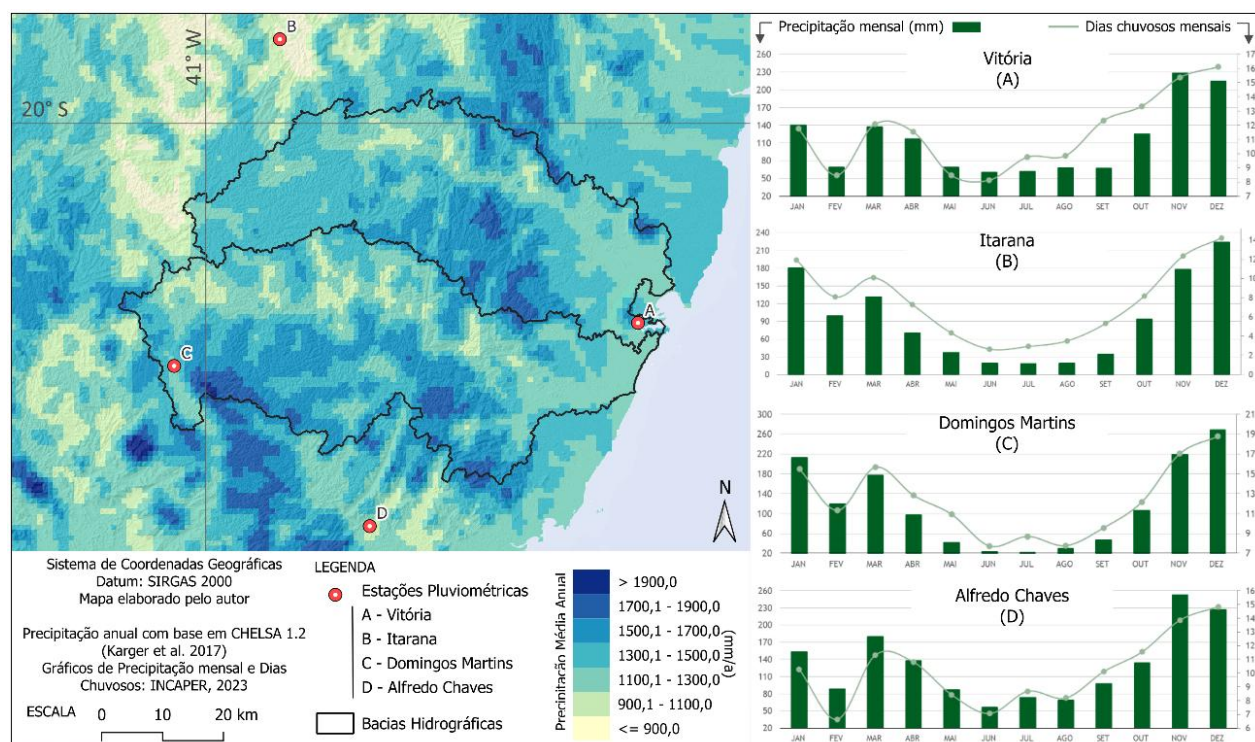
O contraste topográfico entre a zona montanhosa e as planícies litorâneas exerce influência relevante na distribuição e volume de chuva na região, bem como nos regimes fluviais. A Serra da Mantiqueira representa um obstáculo à circulação das frentes polares e de outros mecanismos de circulação atmosférica, aumentando localmente o volume de chuvas (IBGE, 1977; Antongiovanni; Coelho, 2005; Silva et al., 2011).

A precipitação média acumulada anual na área de estudo varia entre 973 e 1933 mm, com média de 1394 mm (Figura 2). As maiores acumulações ocorrem próximas às cabeceiras, com valores em torno de 1400 a 1600 mm·ano<sup>-1</sup>, chegando a superar 1900 mm·ano<sup>-1</sup> na bacia do rio Jucu. Já na porção litorânea, que abrange o baixo curso das bacias, os índices situam-se entre 1100-1300 mm·ano<sup>-1</sup> (Figura 3). No contexto regional, Nunes, Vicente e Candido (2009) apontam que um dos principais problemas enfrentados são as precipitações concentradas associadas à disponibilidade de umidade relativa do ar com influência da maritimidade. A concentração de chuva também pode explicar uma mudança na variabilidade interanual da precipitação na região Sudeste do país, apontada por Vasconcellos (2008) e Carvalho e Jones (2009), que pode resultar em verões mais chuvosos e invernos mais secos, potencializando eventos meteorológicos extremos na área.



**Figura 2.** Distribuição da precipitação média anual para os anos de 1979 e 2013 extraída de CHELSA v1.2 (Karger et al. 2017) para BHSM e BHJC. À esquerda são apresentados os histogramas de frequência e à direita os boxplots com indicação dos intervalos interquartis, média e mediana.





**Figura 3.** Mapa de precipitação média anual com base em CHELSA 1.2 (Karger et al., 2017) e precipitação média mensal e dias chuvosos mensais em estações pluviométricas na área de estudo INCAPER (2023) – Gráficos das séries históricas do período de 1984 a 2014. Mapa elaborado pelo autor.

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Análise morfométrica

Desde os primeiros estudos de Horton (1945), Strahler (1952), Miller (1953) e Schumm (1956), muitos pesquisadores se debruçaram sobre os principais parâmetros que influenciam na hidrodinâmica das bacias. De maneira ampla, as bacias hidrográficas são o recorte de análise mais adequado para análises geomorfológicas, integrando os processos de vertente, planícies e cursos fluviais (Christofolletti, 1999; Magalhães Júnior; Lopes, 2022), os quais podem ser avaliados quantitativamente a partir de seus atributos e de suas relações.

Os parâmetros morfométricos abrangem uma série de análises que partem de duas escalas temporais distintas. A primeira corresponde a análises de longo termo da gênese e evolução das bacias (milhares/milhões de anos), a exemplo de seu condicionamento litoestrutural e tectônico, e de capturas fluviais, responsáveis pela esculturação do relevo. A segunda ordem temporal abrange análises da caracterização da dinâmica fluvial recente/atual com vistas ao entendimento de como a morfologia atua nos eventos hidrológicos que ocorrem nas mesmas. Esta segunda é a escala abordada neste artigo, considerando parâmetros que se relacionam mais estreitamente com a dinâmica atual das inundações.

Mesmo que a aplicação de parâmetros morfométricos na investigação de inundações fluviais esteja operacional há mais de meio século, não há na literatura um consenso de quantos parâmetros devem ser utilizados pelos pesquisadores para avaliar com maior precisão o potencial de inundação em bacias, o que torna difícil a comparação entre estudos, mesmo que estes tratem de uma mesma área (Adnan et al., 2020). Entretanto, uma das etapas críticas na escolha dos parâmetros, conforme destacado por Tehrany, Jones e Shabani (2019), é a seleção dos fatores condicionantes mais relevantes e influentes na geração de inundações. Isso porque, como observado nos estudos de Abdel-Fattar et al. (2017) e Shen et al. (2017), a redundância não decorre da abundância de parâmetros em si, mas do emprego de parâmetros redundantes dentro de um mesmo estudo.

Contudo, há alguns parâmetros fundamentais que revelam uma interdependência entre características da rede de drenagem, respostas hidrológicas e suscetibilidade natural a inundações. Um dos parâmetros basilares é a hierarquia fluvial (Strahler, 1952) que envolve a classificação dos cursos d'água conforme a hierarquia dos tributários. Com base na hierarquização é possível identificar e mapear bacias de cada ordem de canal, favorecendo

uma setorização capaz de indicar áreas com maior ou menor suscetibilidade morfométrica a inundações em diferentes escalas. Também foi conforme a classificação de Strahler (1952) que os demais parâmetros foram extraídos e calculados.

A partir da revisão bibliográfica sobre a temática, foram elencados 15 atributos e parâmetros (Quadro 1) a fim de compreender a suscetibilidade morfométrica a inundações nas bacias, derivando os valores destes parâmetros através da aplicação de diferentes procedimentos matemáticos em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Os valores obtidos para os parâmetros  $Isp$  e  $Tc$  estão inversamente relacionados ao potencial de gerar inundações enquanto os demais estão diretamente relacionados.

**Quadro 1.** Atributos e parâmetros morfométricos relacionados com o desenvolvimento de inundações selecionados para a presente análise.

| Atributo / Parâmetro                           | Expressão / Unidade de medida         | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Referência                           |
|------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Hierarquia Fluvial (Hf)                        | 1, 2, 3 ... n                         | Indica o grau de ramificação dos canais da bacia segundo Strahler (1952). Possui relação direta com a capacidade de escoamento das águas e é fundamental para identificar sub-bacias. A extração dos parâmetros e atributos está condicionada à hierarquia fluvial.                                                                                    | Strahler (1952)                      |
| Número total de canais (Nc)                    | $Nc = N1 + N2... + Nn$                | Atributo linear que indica o número total de canais da bacia conforme Hf.                                                                                                                                                                                                                                                                              | Horton (1945)                        |
| Frequência de canais de primeira ordem (Fc1)   | $Fc1 = \frac{Nc1}{Nc}$                | Parâmetro que relaciona o número de canais de primeira ordem ao número total de canais da bacia, onde Fc corresponde à frequência de canais. Segundo Morisawa (1962), o elevado número de canais de primeira ordem reflete um rápido fluxo de água para fora da bacia. Nc1 = Número absoluto de canais de primeira ordem; Nc = Número total de canais. | Morisawa (1962)                      |
| Comprimento do canal principal (Lp)            | [km]                                  | Atributo linear que indica a distância da nascente mais a montante da bacia até a foz, seguindo o traçado do canal.                                                                                                                                                                                                                                    | Schumm (1956)                        |
| Comprimento total dos canais (Lt)              | $Lt = L1 + L2... + Ln$                | Atributo linear que corresponde a soma do comprimento de todos os canais da bacia, onde L é o comprimento.                                                                                                                                                                                                                                             | Horton (1945)                        |
| Índice de sinuosidade do canal principal (Isp) | $Isp = \frac{Lp}{Dv}$                 | Parâmetro que relaciona o comprimento do canal principal (Lp) e a distância vetorial (euclidiana) entre os pontos extremos do mesmo (Dv). Corresponde a uma das formas de representar o controle estrutural e litológico sobre a drenagem, assim como a energia.                                                                                       | Christofolletti (1980)               |
| Área da bacia (A)                              | [km <sup>2</sup> ]                    | Atributo que corresponde a toda a área da bacia desde a divisão de drenagem até o exultório.                                                                                                                                                                                                                                                           | Schumm (1956)                        |
| Perímetro da bacia (P)                         | [km]                                  | Atributo que corresponde ao comprimento total do limite da bacia de drenagem.                                                                                                                                                                                                                                                                          | Horton (1945)                        |
| Fator de Forma (Kf)                            | $Kf = \frac{A}{Lp^2}$                 | Parâmetro que corresponde à razão entre a área da bacia e o quadrado de seu comprimento axial, onde A corresponde à área total da bacia e Lp é o comprimento do canal principal da bacia. Kf é um índice adimensional.                                                                                                                                 | Horton (1932)                        |
| Coefficiente de Compacidade (Kc)               | $Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$ | Parâmetro que relaciona a forma da bacia à de um círculo de área equivalente. Kc é um índice adimensional, no qual quanto mais próximo de 1, mais arredondada é a bacia e quanto mais distante, mais alongada. P = Perímetro; A = Área.                                                                                                                | Schumm (1956)                        |
| Densidade Hidrológica (Dh)                     | $Dh = \frac{Nc}{A}$                   | Parâmetro que corresponde a relação entre o número de canais e a área da bacia hidrográfica. É um indicador da resposta hidrológica à formação de escoamento superficial, de forma que altos valores de Dh indicam, segundo Patton e Baker (1976), alto escoamento superficial. Nc = Número de canais; A = Área.                                       | Horton (1945); Patton e Baker (1976) |
| Densidade de Drenagem (Dd)                     | $Dd = \frac{Lt}{A}$                   | Parâmetro que relaciona o comprimento total dos canais à área da bacia hidrográfica. Valores elevados de Dd constituem um importante indicador de maior volume de escoamento superficial e de picos de inundação (Horton, 1932). Lt = Comprimento total dos canais; A = Área.                                                                          | Horton (1932, 1945)                  |

|                            |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Amplitude altimétrica (H)  | $H = h_{max} - h_{min}$                         | Atributo que corresponde à diferença entre a altitude máxima e a mínima da bacia, utilizado para calcular, dentre outros parâmetros, o índice de rugosidade. $h_{max}$ = elevação máxima; $h_{min}$ = elevação mínima.                                                                                                                                                            | Schumm (1956)         |
| Razão de Relevo (Rr)       | $Rr = \frac{H}{Lp}$                             | Parâmetro que corresponde à relação entre a amplitude altimétrica da bacia (H) e a extensão do canal principal da mesma (Lp). É um importante indicador do escoamento superficial da bacia, do gradiente dos canais e da declividade, que irão influenciar no comportamento hidrológico.                                                                                          | Schumm (1956)         |
| Índice de rugosidade (Ir)  | $Ir = H * Dd$                                   | Parâmetro que corresponde ao produto adimensional da densidade de drenagem (Dd) e do relevo, representado pela amplitude altimétrica (H). Indica a declividade das vertentes e a transmissividade hidráulica (Costa, 1987). O Ir é alto nas bacias com declives acentuados, favorecendo a erosão, picos rápidos de escoamento e inundações repentinas.                            | Patton e Baker (1976) |
| Tempo de concentração (Tc) | $Tc = \left(0,87 \frac{Lp^3}{H}\right)^{0,385}$ | Parâmetro que corresponde ao tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento em um determinado ponto exutório (Kirpich, 1940). Tc é um parâmetro fundamental para calcular o pico de descarga potencial, em que valores altos de Tc implicam baixa probabilidade de picos de descarga. Lp = Comprimento do canal principal; H = Amplitude altimétrica. | Kirpich, 1940         |

### 3.2. Processamento do MDE e extração das sub-bacias

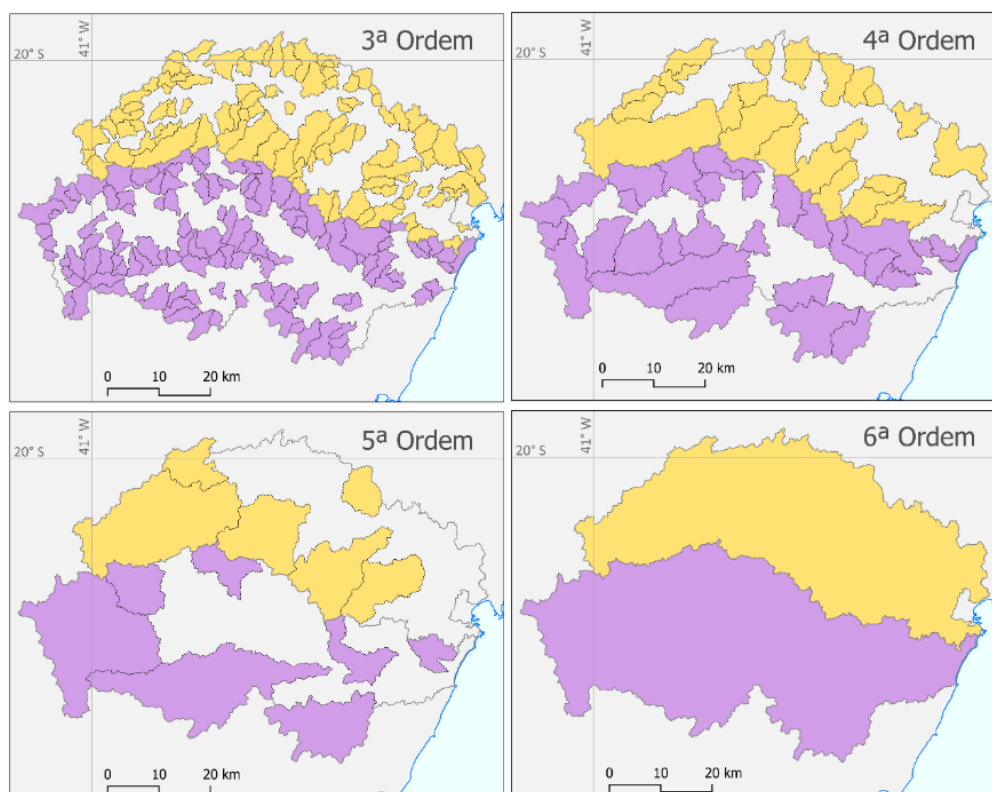
Foram utilizadas técnicas de análise topográfica em Modelo Digital de Elevação (MDE) para extrair informações quantitativas da configuração morfométrica dos sistemas fluviais. O modelo utilizado foi o Copernicus-DEM, obtido por meio da plataforma online da European Commission – PANDA com dados do projeto TanDEM-X em resolução espacial de 1ArcSec. A escolha deste MDE se justifica por sua maior acurácia diante de outros modelos de 1 arco de segundo, comparados por Guth e Geoffroy (2021).

A confecção dos mapas foi realizada por meio do software QGIS 3.22, de distribuição livre *Open Source*, em sistema de coordenadas UTM e Datum de referência SIRGAS 2000, fuso 24k. Também foi utilizado o conjunto de ferramentas do *TopoToolbox 2.4*, um pacote de ferramentas para análise topográfica quantitativa desenvolvido para ambiente MATLAB (Schwanghart; Scherler, 2014).

Para tornar o MDE hidrológicamente consistente foi realizada uma rotina de pré-processamento no *TopoToolbox 2.4*, com algoritmo ‘*carve*’ que busca remover depressões espúrias ou regiões planas que dificultam a correta delimitação da área de contribuição a montante e compromete todas as etapas subsequentes de extração das métricas. A seguir foi aplicado o algoritmo ‘*imposemin*’ [0,0001], tornando a drenagem derivada monotonicamente decrescente ao longo do perfil longitudinal dos rios. Ainda nesse sentido, optou-se por utilizar o MDE Copernicus com valores não discretizados.

A delimitação do perímetro da bacia de drenagem foi realizada utilizando-se o algoritmo do *TopoToolbox 2.4* ‘*drainagebasins*’ que determina bacias de drenagem com base em uma matriz de direção de fluxo. A partir deste dado foi gerada uma matriz de ordem de fluxo ‘*streamorder*’, o que permitiu gerar bacias com base na classificação de ordem de seu canal principal, conforme a hierarquia de Strahler (1952). A saída deste algoritmo gerou bacias e sub-bacias (Figura 4) que, por sua vez, possibilitou a quantificação de diversos atributos, a exemplo da área e do relevo das bacias e sub-bacias de até sexta ordem.

Neste estudo, as bacias de primeira e segunda ordens não foram consideradas devido a três fatores: a) baixa frequência de inundações em bacias de cabeceira; b) dificuldade de se obter os dados significativos para os parâmetros em bacias de extensão areal e de drenagem de poucos m<sup>2</sup> e; c) a limitação da escala dos dados extraídos do MDE de 1 ArcSec.



**Figura 4.** Distribuição das bacias e sub-bacias da área de estudo classificadas de terceira à sexta ordem segundo hierarquia de Strahler (1952). Mapa elaborado pelo autor.

### 3.3. Extração das métricas, tratamento estatístico e definição das classes de suscetibilidade

Para identificar a suscetibilidade morfométrica foram extraídos diversos atributos que, correlacionados entre si e com o relevo, geraram os parâmetros morfométricos das bacias e sub-bacias (Quadro 1). A extração dos atributos hipsométricos como a altitude máxima ( $h_{max}$ ), mínima ( $h_{min}$ ) e a amplitude altimétrica ( $H$ ) foi realizada com o algoritmo 'Estatísticas Zonais' no QGIS 3.22, sobre o MDE pré-processado e hidrologicamente consistente. Os canais principais das bacias foram extraídos com o algoritmo 'trunk' do *TopoToolbox* 2.4, com base na classificação hierárquica da bacia, gerando, deste modo, canais principais para cada sub-bacia até a sexta ordem.

A comparação de valores absolutos de cada parâmetro em diferentes bacias ou sub-bacias pode gerar inconsistências nos resultados, devido a particularidades de cada sistema e ao uso de diferentes escalas. Para uma comparação consistente, os valores derivados dos parâmetros morfométricos escolhidos, correspondentes a cada bacia hidrográfica, foram convertidos para uma nova escala de avaliação da suscetibilidade.

Para a escolha do número de classes, cada parâmetro foi inicialmente submetido a uma análise exploratória de dados como teste de distribuição normal para identificar o comportamento da distribuição dos dados. Com base na análise, foram identificadas a tendência central (média e mediana) e a dispersão (intervalo, quartis do conjunto de dados, variância e desvio padrão como medidas de dispersão). Este procedimento possibilitou entender o comportamento da distribuição dos dados de cada parâmetro a fim de se realizar a escolha do critério de classificação em escalas e do número de classes mais adequado.

Como resultado da análise de distribuição realizada no software *Jamovi* 2.3.28 (2022), utilizando o teste de *Shapiro-Wilk* (Shapiro; Wilk, 1965), dentre os 15 parâmetros, apenas  $Fc1$  apresentou distribuição normal em bacias de terceira ordem. Em bacias de quarta ordem, apenas  $H$ ,  $Fc1$ ,  $Kc$  e  $Ir$  indicaram uma distribuição normal, enquanto para as bacias de quinta ordem todos os parâmetros morfométricos indicaram  $p$ -valor  $> 0,05$ , o que já era esperado devido à limitação de testes de normalidade para amostras pequenas (Razali; Wah, 2011). O teste de normalidade não foi aplicado nas bacias de sexta ordem (Tabela 1).



**Tabela 1.** Distribuição dos dados morfométricos obtidos para bacias de terceira a quinta ordem. Valores p de significância de normalidade extraídos por meio do teste de *Shapiro-Wilk*. Destaque para os valores com distribuição normal.

| Bacias / Parâmetros | A       | P       | H       | Lp      | Isp     | Nc      | Lt      | FcI   | Kc      | Kf      | Dd      | Dh      | Rr      | Ir      | Tc      |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 3ª ordem            | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | 0,006 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| 4ª ordem            | < 0,001 | < 0,001 | 0,117   | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | 0,063 | 0,423   | 0,002   | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | 0,046   | < 0,001 |
| 5ª ordem            | 0,008   | 0,145   | 0,095   | 0,047   | 0,874   | 0,005   | 0,007   | 0,031 | 0,811   | 0,342   | 0,006   | 0,129   | 0,018   | 0,092   | 0,077   |

Com base nestes testes, em que a maior parte dos dados apresenta  $p$ -valor  $< 0,005$ , definiu-se que a mediana e os intervalos interquartis são as medidas de dispersão mais adequadas para avaliar o conjunto de dados obtidos, de modo que as classes são ajustadas de acordo com o quartil correspondente. Com o número de intervalos e os valores-limite identificados, foi realizada a classificação de cada intervalo conforme o seu grau relativo de suscetibilidade. Para tanto, foi necessário verificar como cada parâmetro se relaciona - positivamente ou negativamente - frente ao potencial de gerar inundações, de modo que cada valor esteja associado a uma escala de pontos:

a) muito alta = 4; b) alta = 3; c) média = 2; d) baixa = 1

Por fim, o valor cumulativo das pontuações individuais de cada parâmetro de acordo com a escala supracitada foi utilizado para avaliar o grau de suscetibilidade morfométrica da bacia. Assim, o valor mínimo de pontos que cada bacia pode alcançar é igual a 'n' parâmetros avaliados, enquanto o máximo é 'n' x 4, considerando ainda que cada parâmetro possui o mesmo peso.

As bacias foram rotuladas com um código de identificação de forma a facilitar a visualização dos resultados para bacias de ordem inferior onde o primeiro número corresponde à ordem da bacia conforme Strahler (1952), seguido do nome da bacia principal: "SM" para BHSM e "JC" para BHJC. Por fim, seguiu-se a numeração em ordem sequencial, conforme é apresentado a seguir:

Bacia  
5SM01  
Ordem N° sequencial

### 3.4. Integração dos dados de precipitação

Após o mapeamento da suscetibilidade morfométrica, foi realizada a integração de novas camadas de informações referentes à precipitação e à localização das comunidades urbanas e rurais, formando uma composição mais detalhada das sub-bacias consideradas de maior risco. Tal composição se deu a partir da sobreposição dos valores de precipitação média para cada sub-bacia ao mapeamento de suscetibilidade morfométrica, de modo que o resultado da suscetibilidade a inundações considerasse o valor da classe de suscetibilidade morfométrica e o valor da classe de precipitação. Seguindo o mesmo ajuste de classes utilizado para os parâmetros morfométricos, as quatro classes de precipitação foram definidas com base nos valores mínimo e máximo, e nos quartis e intervalos interquartis da área de estudo.

Para este fim, foram utilizados os dados do modelo CHLSA V1.2 - *Climatologies at High resolution for the Earth Land Surface Areas*, um conjunto de dados climáticos globais de alta resolução referente à série histórica de 1979 a 2013, disponibilizado em formato *raster* com resolução espacial de 30 ArcSec (KARGER et al., 2017). Como a base de dados original disponibiliza as normais climatológicas em médias mensais, as doze camadas foram somadas por meio da ferramenta de Álgebra de Mapas (*Raster Calculator*) no *software* QGIS 3.22, gerando uma nova superfície matricial representativa da precipitação média acumulada anual. Por fim, para a extração do valor médio de precipitação correspondente à área de drenagem de cada sub-bacia específica, empregou-se o algoritmo de Estatísticas Zonais (*Zonal Statistics*), permitindo a tabulação cruzada e a integração com os índices morfométricos.

#### 4. Resultados e discussão

##### 4.1. Suscetibilidade morfométrica em bacias de sexta ordem

As BHSM e BHJC possuem importantes similaridades hidrográficas por apresentarem condições geológico-geomorfológicas semelhantes (Tabela 2).

**Tabela 2.** Atributos básicos das bacias hidrográficas dos rios Santa Maria e Jucu.

| Atributos                 | BHSM    | BHJC    |
|---------------------------|---------|---------|
| Área (km <sup>2</sup> )   | 1791,21 | 2129,46 |
| Perímetro (km)            | 466,39  | 483,88  |
| Canal principal (km)      | 143,22  | 172,51  |
| Diferença altimétrica (m) | 1446,27 | 1889,10 |
| Nº segmentos de rios      | 2354    | 2771    |
| Nº segmentos 1ª ordem     | 1812    | 2142    |
| Nº segmentos 2ª ordem     | 419     | 477     |
| Nº segmentos 3ª ordem     | 93      | 114     |
| Nº segmentos 4ª ordem     | 23      | 30      |
| Nº segmentos 5ª ordem     | 6       | 7       |
| Nº segmentos 6ª ordem     | 1       | 1       |

As cabeceiras dos cursos d'água principais situam-se no relevo montanhoso da porção setentrional da Serra da Mantiqueira, drenando, também, os Patamares Escalonados do Sul Capixaba, em direção predominante NW-SE, e a planície costeira nos baixos cursos. A BHJC destaca-se em relação à BHSM por possuir um maior número de parâmetros favoráveis ao desenvolvimento de inundações (Tabela 3). A BHJC possui uma área 18,9% maior do que a BHSM, o que impactou diretamente parâmetros associados à sua dimensão, como *A*, *P*, *Lp*, *Nc* e *Lt*, tornando-a mais suscetível a inundações.

Em termos absolutos, ambas as bacias possuem características topográficas propensas à formação de inundações, haja vista a declividade acentuada associada a indicadores que apontam alto escoamento superficial (*Dh* e *Dd*) e tempo de concentração dos fluxos (*Kf* e *Kc*), além do histórico de inundações extremas recorrentes.

**Tabela 3.** Atributos e parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas dos rios Santa Maria e Jucu. Destaque em cinza para parâmetros mais favoráveis ao desenvolvimento de inundações, com base nas definições apresentadas no Quadro 1.

| Parâmetro | <i>A</i> | <i>P</i> | <i>H</i> | <i>Lp</i> | <i>Isp</i> | <i>Nc</i> | <i>Lt</i> | <i>Fcl</i> | <i>Kc</i> | <i>Kf</i> | <i>Dd</i> | <i>Dh</i> | <i>Rr</i> | <i>Ir</i> | <i>Tc</i> |
|-----------|----------|----------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| BHSM      | 1791,21  | 466,391  | 1446,27  | 143,22    | 1,919      | 2354      | 2523,81   | 0,770      | 3,086     | 0,087     | 1,409     | 1,314     | 0,010     | 2,038     | 17,791    |
| BHJC      | 2129,46  | 483,886  | 1889,10  | 172,51    | 2,294      | 2771      | 3005,45   | 0,773      | 2,936     | 0,072     | 1,411     | 1,301     | 0,011     | 2,666     | 19,901    |

A análise de parâmetros em bacias de sexta ordem incorre, no entanto, em uma homogeneização e generalização de sua suscetibilidade a inundações, ocultando diferenças internas que podem ocorrer devido às diferenças hidrogeomorfológicas ao longo das bacias. Deste modo, a partir da classificação hierárquica da drenagem das BHSM e BHJC, foram obtidas 3941 sub-bacias de primeira ordem, 896 de segunda ordem, 207 de terceira ordem, 53 de quarta ordem e 13 sub-bacias de quinta ordem (Tabela 4). Contudo, para fins de análise da suscetibilidade morfométrica, conforme apresentado na metodologia deste artigo, não foram analisados os parâmetros das sub-bacias de primeira e segunda ordem.

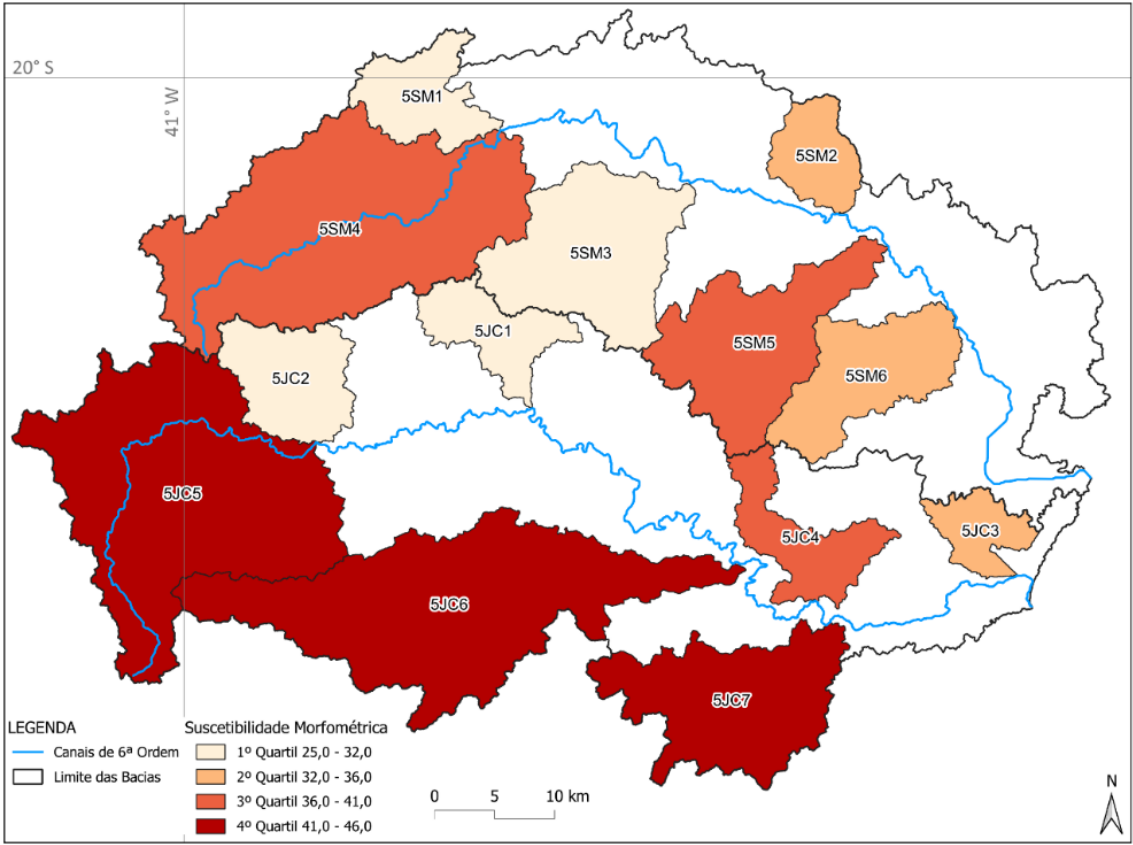
**Tabela 4.** Número de sub-bacias de terceira a sexta ordem e porcentagem da área total da bacia para cada ordem.

|          | BHSM | % da área | BHJC | % da área |
|----------|------|-----------|------|-----------|
| 3ª ordem | 93   | 64,97%    | 114  | 59,48%    |
| 4ª ordem | 23   | 63,53%    | 30   | 73,01%    |
| 5ª ordem | 6    | 56,83%    | 7    | 59,77%    |
| 6ª ordem | 1    | 100%      | 1    | 100%      |

4.2. Suscetibilidade morfométrica em bacias de quinta e quarta ordens

Em bacias de quinta ordem, ocorre uma distinção no padrão de suscetibilidade, em que os valores mais altos concentram-se nos divisores de drenagem a sul da BHJC. Os parâmetros morfométricos *A* (425,1km²; 379,1km²; 182,9km²), *P* (169,1km; 195,8km; 121,6km), *H* (1173,6m; 1836,5m; 901,3m), *Lp* (51,1km; 74,5km; 29,5km), *Nc* (569; 484; 221), *Lt* (584,1km; 528,7km; 257,1km) e *Kc* (2,297; 2,816; 2,518) para as bacias 5JC5, 5JC6 e 5JC7, respectivamente, foram decisivos na determinação de sua suscetibilidade a inundações, colocando-as no quartil superior por possuírem valores cumulativos acima de 41 (Figura 5).

As bacias 5SM4, 5SM5 e 5JC4 pertencem ao terceiro quartil, com valores cumulativos de 39, 35 e 41, respectivamente, seguidas pelas bacias 5SM2, 5SM6 e 5JC3, com 33, 36 e 33, respectivamente. As bacias de quinta ordem com menor suscetibilidade morfométrica a inundações possuem valores cumulativos abaixo de 32: 5SM1, 5SM3, 5JC1 e 5JC2.

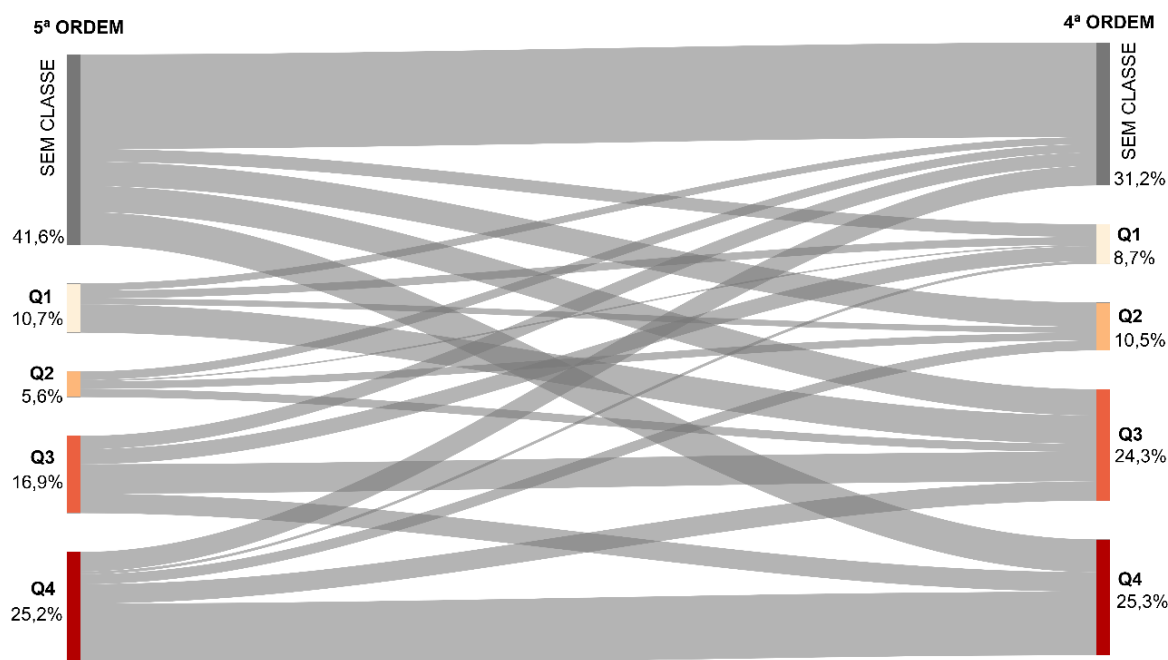


**Figura 5.** Suscetibilidade morfométrica a inundações das sub-bacias de quinta ordem. Mapa elaborado pelo autor

O detalhamento da suscetibilidade em bacias de quarta ordem demonstra que há uma correlação importante entre o grau de suscetibilidade nas bacias de ordem imediatamente superior, corroborando a premissa de que a delimitação hierárquica e a análise em nível de sub-bacias são fundamentais para a avaliação espacial da responsividade hidrológica e para a identificação de áreas de risco homogêneas (Souza, 2005). Um exemplo pode ser observado nas bacias a sul da BHJC que permanecem com valores cumulativos altos, enquanto sub-bacias de

quarta ordem de baixa suscetibilidade morfométrica se distribuem espacialmente associadas a sub-bacias de quinta ordem, que também possuem baixa suscetibilidade, ou áreas anteriormente não classificadas.

Nota-se que, no mapeamento das bacias de quinta ordem, 41,6% da área não foi classificada, enquanto nas bacias de quarta ordem esta porcentagem reduziu para 31,2%, refletindo a existência de sub-bacias de quarta ordem drenando diretamente para canais de sexta ordem (Figura 6). Um total de 13,9% da área que compreendia bacias do quartil superior de quinta ordem permaneceu com a mesma classificação na análise de bacias de quarta ordem, o que reflete em uma concentração de condições morfométricas propensas ao desenvolvimento de inundações nestas áreas, confirmando que a avaliação espacial detalhada desses parâmetros é crítica para a predição e identificação de locais específicos altamente suscetíveis a inundações (Tola; Shetty, 2022; Servidoni et al., 2023).

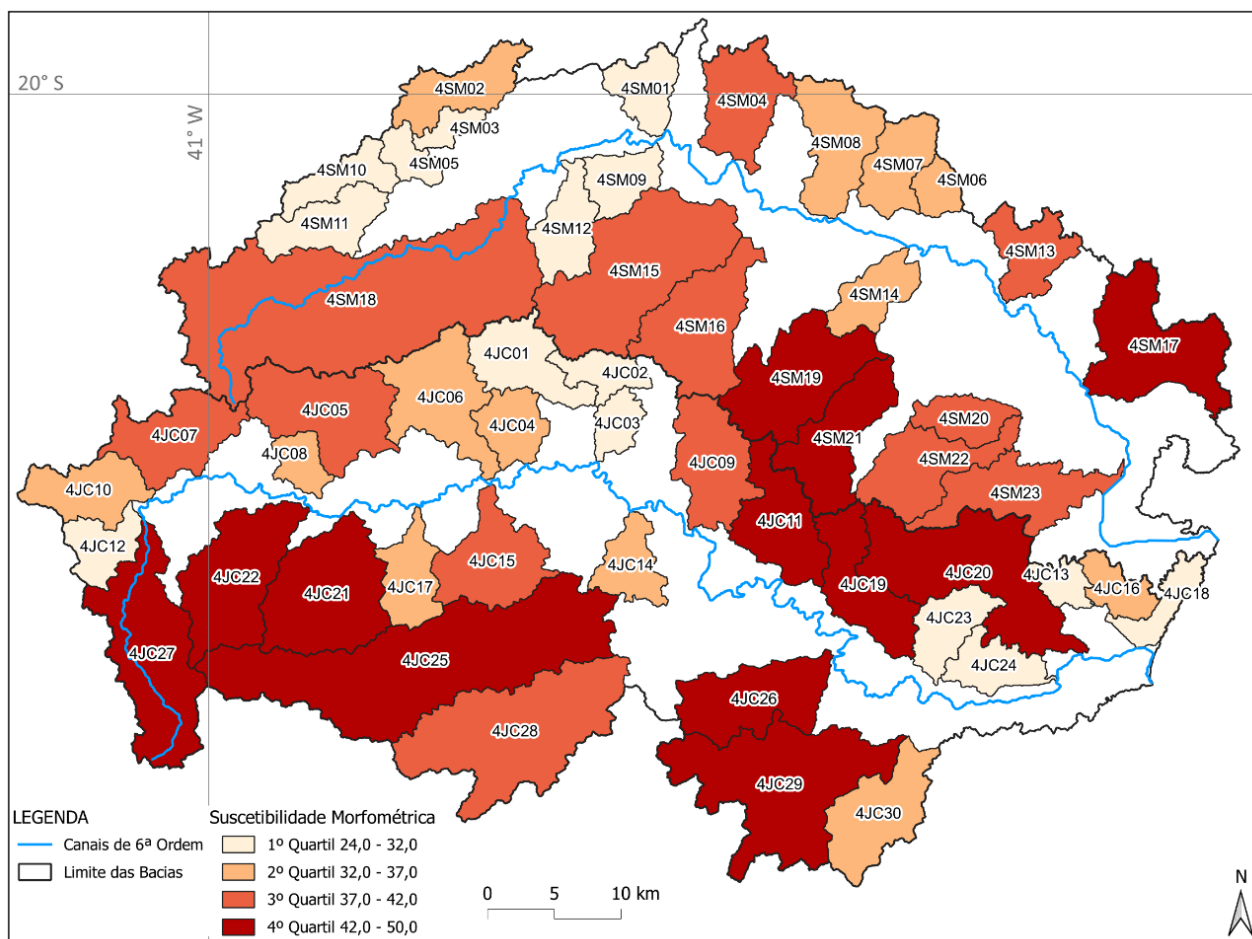


**Figura 6.** Representação da transição espacial (área) dos quartis de suscetibilidade morfométrica entre bacias de 5ª ordem para bacias de 4ª ordem. No diagrama a porcentagem representa a área total ocupada pelas bacias de cada quartil em relação à área de estudo.

Dentre as sub-bacias de quarta ordem com maior grau de suscetibilidade a inundações encontram-se as que possuem valores cumulativos acima de 42. No quartil superior, encontram-se 12 sub-bacias nas quais apenas 3 (4SM17; 4SM19; 4SM21) estão localizadas na BHSM (Figura 7). As sub-bacias com maior suscetibilidade morfométrica seguem o mesmo padrão com altos valores de *A*, *P*, *H*, *Nc*, *Lt* e *Ir*, enquanto os demais parâmetros possuem maior variação, a exemplo dos parâmetros *Kf*, *Dh* e *Dd*.

As 13 sub-bacias do terceiro quartil possuem valores cumulativos entre 38 e 42, dentre as quais 8 encontram-se localizadas na BHSM e 5 na BHJC. Nota-se que neste quartil são encontradas bacias menores como a 4SM20 e 4SM13, com valores cumulativos de 38 e 40, respectivamente, que possuem alta suscetibilidade a inundações devido à declividade acentuada e a parâmetros como *Tc*, *Dd*, *Dh* e *Rr*. Essa constatação é corroborada pela literatura, que demonstra que a combinação de fortes inclinações (elevado *Rr*), alta densidade da rede de drenagem e curtos tempos de concentração dos fluxos (*Tc*) são as causas primárias na aceleração do escoamento superficial e geração de picos de vazão (Ali et al., 2023; Tola; Shetty, 2022). Dentre as sub-bacias do terceiro quartil, 5 estão localizadas na BHSM enquanto 8 estão localizadas na BHJC. As sub-bacias do quartil inferior reúnem valores cumulativos entre 24 e 32 e se concentram ao longo da margem esquerda da BHJC, enquanto na BHSM as sub-bacias desse quartil estão localizadas em áreas mais elevadas da bacia.





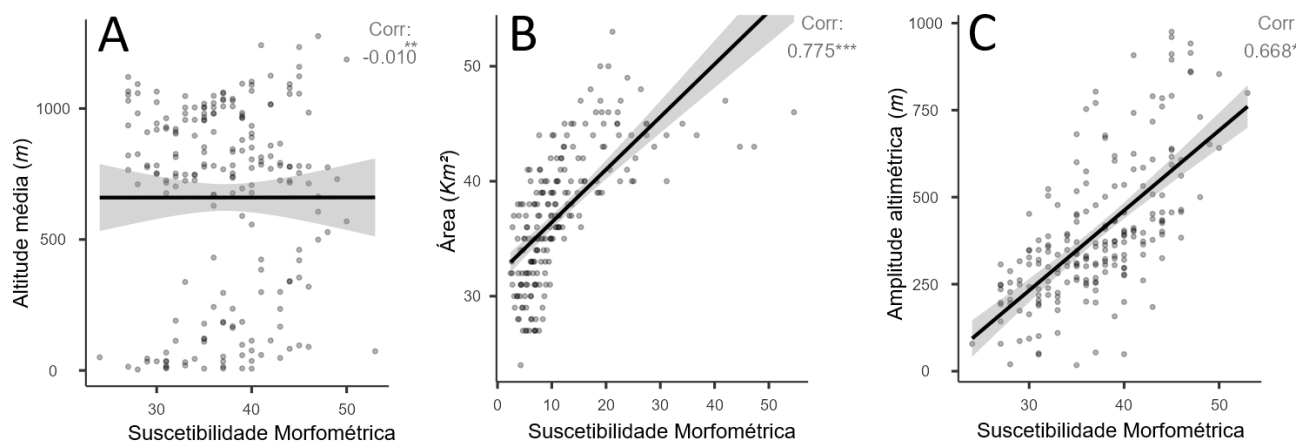
**Figura 7.** Mapa de suscetibilidade morfométrica a inundações das sub-bacias de quarta ordem. Mapa elaborado pelo autor.

#### 4.3. Suscetibilidade a inundações em bacias de terceira ordem

As sub-bacias de terceira ordem possuem dimensões que variam de 2,4km<sup>2</sup> a 54,6km<sup>2</sup> e se distribuem de forma irregular pela área de estudo. Neste nível de detalhamento da suscetibilidade morfométrica, é possível identificar o nível de contribuição que cada sub-bacia possui no desenvolvimento de inundações, formando um mosaico mais detalhado do potencial de suscetibilidade à inundação a que a população residente nestas áreas está submetida.

Há uma concentração maior de sub-bacias mais suscetíveis a inundações próximas ao divisor de drenagem entre as BHSM e BHJC, o que não está necessariamente associado à altitude média das mesmas (Figura 8A), enquanto as menos suscetíveis não apresentam um padrão espacial bem definido. Contudo, é notório que as bacias no quartil superior possuem parâmetros associados à sua dimensão, gerando maior influência na classificação de suscetibilidade, com destaque para as sub-bacias da margem direita da BHSM. A literatura hidrogeomorfológica confirma que o tamanho absoluto da bacia é um condicionante primordial, uma vez que dita a quantidade do excesso de chuva captado e o tempo de resposta, influenciando o desenvolvimento de cheias (Souza, 2005).

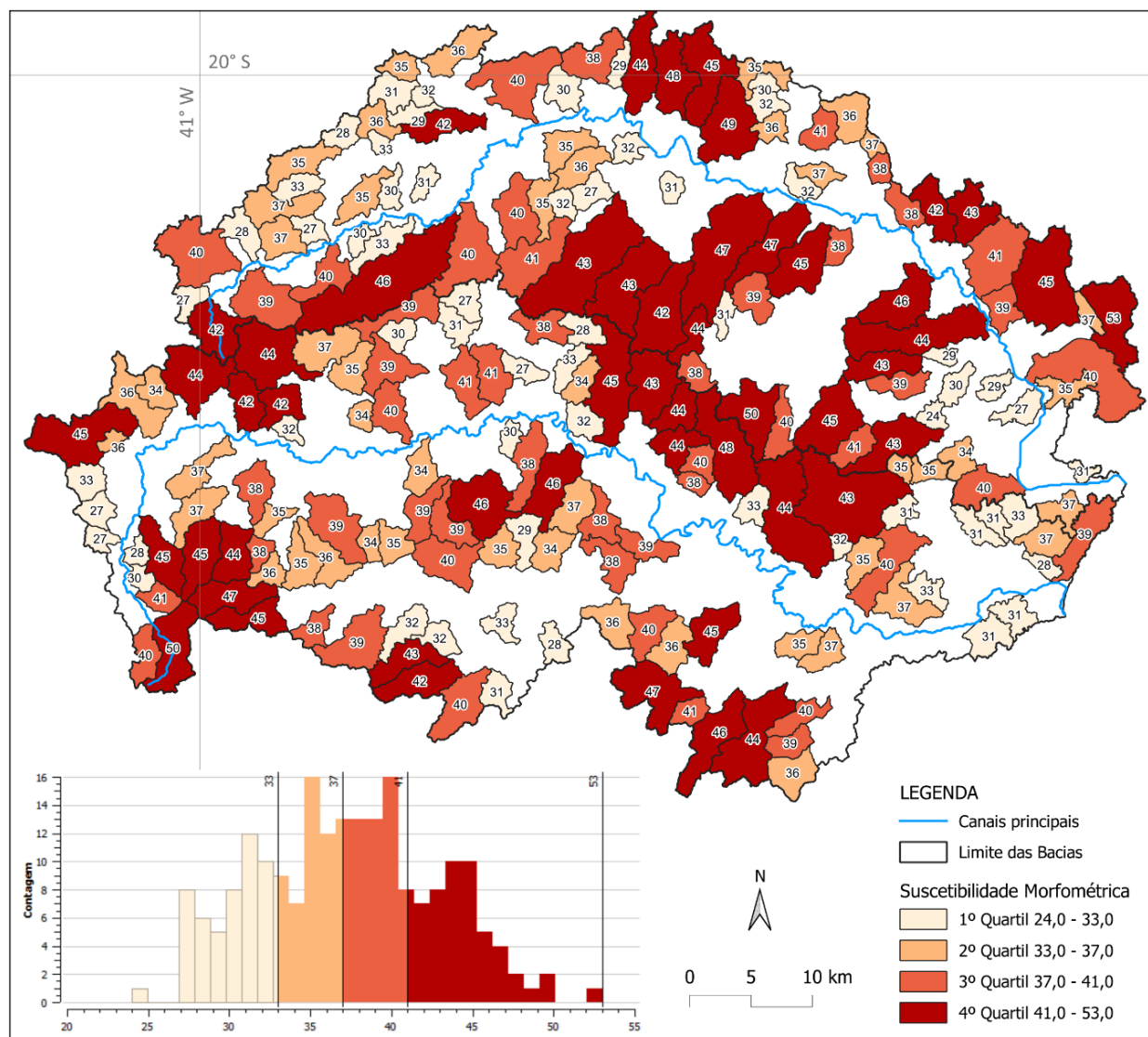
Além dos parâmetros associados à área (Figura 8B), também há uma correlação positiva entre o grau de suscetibilidade e a amplitude altimétrica das sub-bacias de terceira ordem (Figura 8C), indicando uma influência importante na velocidade de escoamento. De fato, entende-se que uma maior amplitude altimétrica atua aumentando o gradiente de energia das águas, o que induz fluxos mais rápidos, encurta sensivelmente o tempo de concentração pluvial e intensifica os picos de escoamento superficial (Dutal, 2023; Tola; Shetty, 2022).



**Figura 8.** Correlação (Spearman) entre a suscetibilidade morfométrica e os parâmetros de (A) altitude média ( $Rho = -0.010$ ), área ( $Rho = 0.775$ ) e (C) amplitude altimétrica ( $Rho = 0.668$ ) das sub-bacias de 3ª ordem.

Os valores cumulativos de suscetibilidade morfométrica variam de 24 a 53, com maior frequência próximo à mediana, indicando uma distribuição mais próxima de uma normal, enquanto valores extremos apresentam menor frequência e maior variação (Figura 9). Dentre as sub-bacias pertencentes ao quartil inferior, 29 estão localizadas na BHSM, enquanto 30 estão localizadas na BHJC. Dentre as 48 pertencentes ao segundo quartil, há uma maior concentração na BHJC com 29 sub-bacias. O terceiro quartil também concentra a maior parte das sub-bacias na BHJC, com 29 dentre as 50. As sub-bacias do quartil superior, com maior suscetibilidade, possuem maior variação, com valores entre 41 e 53, e estão concentradas na BHSM.

Faz-se importante destacar que bacias maiores também tendem a receber um maior volume de precipitação, ao mesmo tempo em que, por outro lado, possuem maior capacidade de atenuação devido a altos valores de  $T_c$  (Bajabaa; Masoud; Al-Amri, 2014). No entanto, a amplitude altimétrica associada a estas áreas e o maior valor de declividade dos canais podem levar à menor infiltração e maior fluxo superficial associado, elevando o potencial de inundações repentinas em sub-bacias mais íngremes.



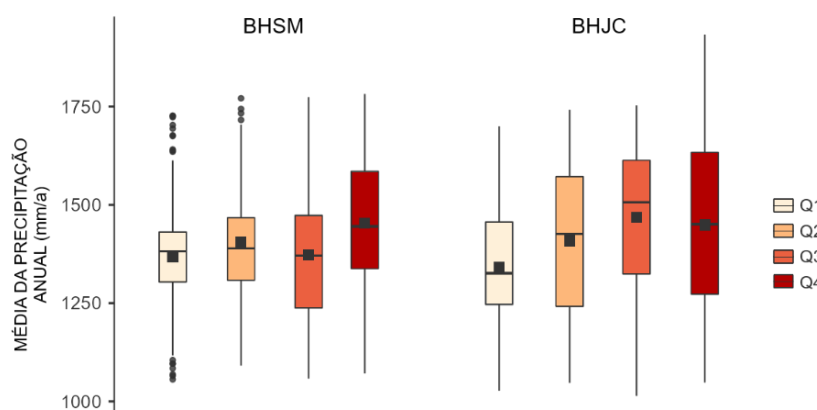
**Figura 9.** Mapa de suscetibilidade morfológica a inundações das sub-bacias de 3ª ordem e gráfico de distribuição da contagem dos valores no histograma. Mapa elaborado pelo autor.

#### 4.4. Zoneamento de suscetibilidade a inundações

A precipitação média acumulada anual na área de estudo varia entre 973 e 1933 mm·ano<sup>-1</sup>. No entanto, a BHJC possui uma maior amplitude, enquanto a BHSM concentra seus valores próximos à mediana (1392 mm·ano<sup>-1</sup>). Mesmo com pequenas variações nos valores máximos e mínimos, ambas possuem similaridades dado o contexto geomorfológico e climático propenso ao desenvolvimento de chuvas orográficas, uma vez que a presença de maciços montanhosos e escarpas próximos à costa atua como uma barreira orográfica à circulação das frentes úmidas, elevando os volumes pluviométricos nas partes mais altas (Souza, 2005; Nascimento, 2017; Servidoni et al., 2023). Contudo, a literatura consolida que a incidência pluviométrica, embora atue como mecanismo deflagrador, não é o determinante isolado da criticidade do sistema hidrogeomorfológico (Mendiondo; Tucci, 1997). Em se tratando de bacias pequenas e montanhosas, a alta rugosidade topográfica e as elevadas declividades reduzem drasticamente o tempo de concentração, acelerando a conversão do *input* climático em escoamento superficial e estabelecendo a dominância do relevo sobre a dinâmica hidrológica (Hallema et al., 2016; Freitas, 2018).

Essa premissa é empiricamente demonstrada pela distribuição da precipitação frente à suscetibilidade destas sub-bacias. A Figura 10 apresenta uma leve tendência de aumento das medianas de precipitação em direção aos quartis superiores de sub-bacias de terceira ordem, contudo, é acompanhada por uma expressiva sobreposição das amplitudes e dos intervalos interquartis entre todas as classes (Q1 a Q4). Na BHJC, por exemplo, o quartil de maior

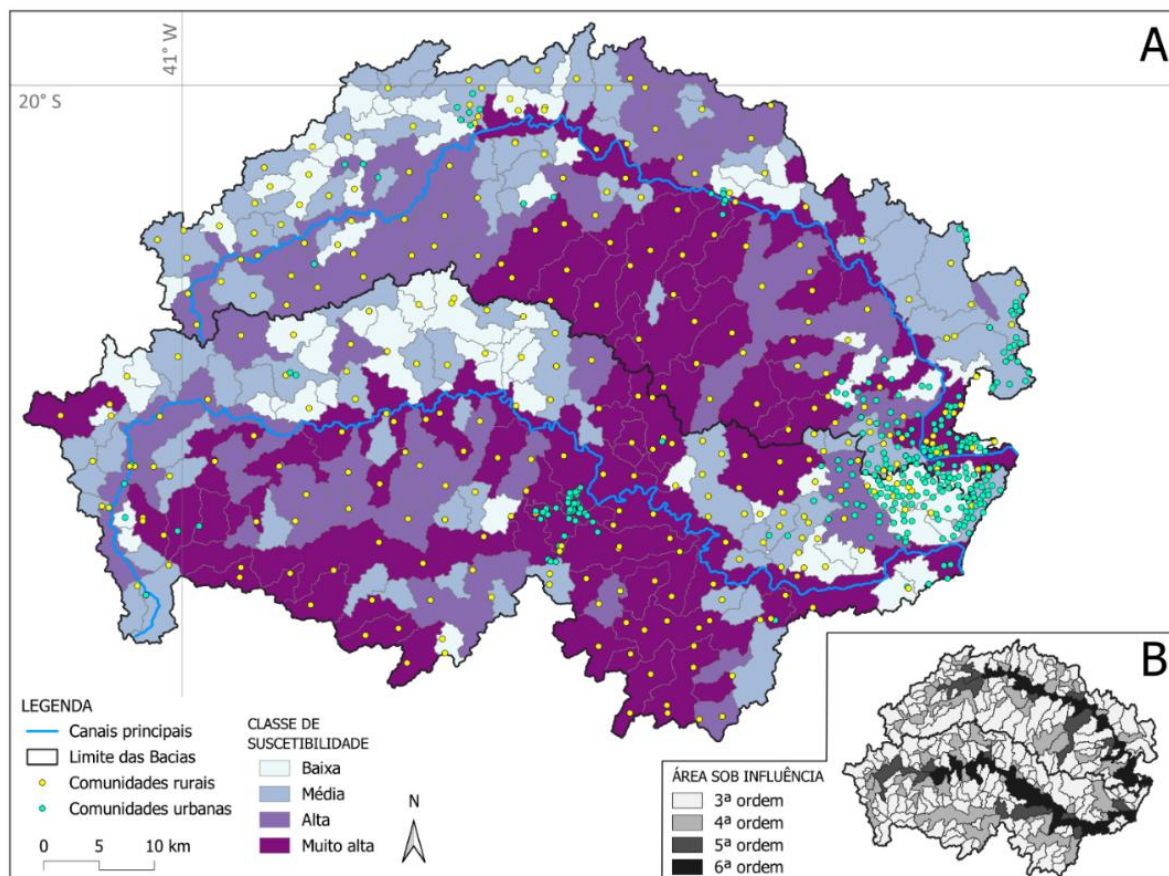
perigo (Q4) apresenta uma mediana equiparável à do Q3, mas exibe a maior dispersão amostral, com volumes variando desde valores próximos a 1000 mm·ano<sup>-1</sup> até o teto máximo absoluto. Este comportamento estatístico evidencia que unidades espaciais submetidas a cargas pluviométricas equivalentes podem ser enquadradas em graus diametralmente opostos de suscetibilidade (do Q1 ao Q4). A ausência de um isolamento dos maiores volumes de chuva restritos ao nível de maior perigo demonstra que o grau de suscetibilidade à inundação não é regido apenas pelo excedente hídrico. Tais evidências reafirmam que a integração da distribuição espacial das chuvas atua para espacializar o gatilho climático (Tola; Shetty, 2022), revelando-se essencial justamente porque o arranjo morfológico e topográfico atua de forma decisiva na amplificação ou mitigação desse deflúvio local (Lavarini; Magalhães Júnior, 2013).



**Figura 10.** Distribuição da precipitação média anual com base em CHELSA v.1.2 em função dos quartis de suscetibilidade morfométrica a inundações para as bacias de 3ª ordem. Elaborado pelo autor

Combinando os valores médios de precipitação de cada sub-bacia até a sexta ordem com a suscetibilidade morfométrica encontrada, foi possível gerar um mapa síntese com as classes de suscetibilidade a inundações na área de estudo (Figura 11A). De forma que toda a área fosse abrangida, foram sobrepostos os resultados obtidos por cada ordem hierárquica, sendo que as sub-bacias de terceira ordem se sobrepõem às demais classes, seguidas por sub-bacias de quarta, quinta e sexta ordens (Figura 11B). Nesta sobreposição não houve reclassificação dos valores de suscetibilidade morfométrica, de forma que cada classe permaneceu classificada conforme sua ordem.

Ao comparar os parâmetros adimensionais como *Isp*, *Kf*, *Kc*, *Dd*, *Dh*, *Rr*, *Ir* e *Tc* das bacias de sexta ordem com os valores encontrados para os mesmos em bacias de quinta ordem, observou-se que as BHSM e BHJC possuem, ambas, valores que indicam muito alto potencial morfométrico de gerar inundações. A análise integrada destes parâmetros mostra-se fundamental para identificar o comportamento hidrológico de uma bacia, especificamente o agrupamento de valores elevados de *Dd* e *Dh*, aliado a fatores de forma específicos como *Kc* e *Kf*, que indicam uma alta propensão à rápida concentração do escoamento superficial e apontam para um comportamento hidrológico propenso à geração de inundações severas (Servidoni et al., 2023).



**Figura 11.** Mapa síntese com (A) Distribuição das classes de suscetibilidade a inundações considerando os valores de suscetibilidade morfométrica e a média de precipitação para cada sub-bacia; (B) Sobreposição de sub-bacias de 3ª a 6ª ordens. Mapa elaborado pelo autor.

Como resultado da avaliação, foram encontradas, em ambas as bacias, áreas com muito alta suscetibilidade, sobretudo no médio curso da BHSM e ao longo da margem direita da BHJC, representando, respectivamente, 32,6% e 43,7% da área das bacias. Nestas áreas de maior suscetibilidade encontram-se 213 comunidades urbanas e rurais (IJSN, 1994) pertencentes aos municípios de Santa Leopoldina, Santa Maria de Jetibá, Domingos Martins, Marechal Floriano, Vila Velha, Cariacica, Guarapari e Vitória. As áreas de alta suscetibilidade compreendem 28,9% da BHSM e 20,0% da BHJC e englobam 99 comunidades.

As áreas de média suscetibilidade encontram-se fragmentadas em ambas as bacias e abrangem 166 comunidades urbanas e rurais. A área de abrangência desta classe corresponde a 27,2% da BHSM e 21,6% da BHJC. Já as bacias de baixa suscetibilidade possuem a menor porcentagem de área com 11,3% e 14,7% respectivamente, e abrangem 80 comunidades urbanas e 50 rurais.

## 5. Conclusões

Os resultados reforçam a relevância de parâmetros morfométricos, como a área e a amplitude altimétrica, bem como de atributos correlatos, perímetro e declividade do canal principal, na definição de áreas mais suscetíveis a inundações. Em um cenário montanhoso, o contexto geomorfológico prova ser o fator dominante na dinâmica hidrológica frente aos montantes absolutos de precipitação. É necessário destacar que, embora as formas predominantemente alongadas destas sub-bacias tendam a favorecer a translação e o amortecimento do fluxo, as dimensões reduzidas e as altíssimas declividades e rugosidades do terreno suplantam essa atenuação morfológica, acelerando drasticamente o escoamento superficial.

Além das características morfométricas das BHSM e BHJC, a consideração dos efeitos topográficos em nível de sub-bacia, classificadas a partir de sua ordem hierárquica, possibilitou um detalhamento que até então não foi realizado para a área de estudo, conferindo uma análise local mais precisa de áreas mais suscetíveis a inundações.



Em ambas as bacias foi identificada uma porcentagem significativa de áreas com muito alta suscetibilidade, o que converge com o histórico local destes eventos. Na BHSM as áreas mais suscetíveis encontram-se concentradas no médio e baixo curso, enquanto na BHJC estas áreas, que compreendem a maior parte da bacia, estão mais bem distribuídas. No entanto, a predominância de áreas mais suscetíveis na margem direita dos canais principais de ambas as bacias são fortes indicativos de que o eixo de drenagem, convexo para Norte, possa ter gerado uma assimetria na configuração morfométrica das sub-bacias, gerando maior potencial de inundações na margem direita.

A suscetibilidade morfométrica identificada aponta áreas mais propensas a inundações naturais. Contudo, é imperativo que os gestores de risco considerem que as alterações nos sistemas fluviais, como impermeabilização do solo e canalizações em áreas urbanizadas, podem gerar distorções hidrológicas que amplificam significativamente os picos de vazão e a severidade dos eventos. Neste sentido, a principal contribuição deste estudo reside na robustez metodológica da análise multiescalar, até a terceira ordem, para a regionalização de áreas de risco, superando a limitação de homogeneização inerente a estudos de macroescala e provendo um mapeamento mais preciso em um cenário de escassez de dados hidrológicos em canais de menor ordem hierárquica. Os resultados alcançados balizam o planejamento territorial e o desenvolvimento de políticas de mitigação a inundações para a área de estudo, oferecendo uma base analítica crítica para a compreensão da vulnerabilidade hidrogeomorfológica na zona de contato entre a faixa montanhosa e a planície litorânea.

**Contribuições dos Autores:** Concepção, M.V.O.S e A.P.M.J.; metodologia, M.V.O.S e A.P.M.J.; validação, M.V.O.S e A.P.M.J.; análise formal, M.V.O.S; pesquisa, M.V.O.S; recursos, M.V.O.S; preparação de dados, M.V.O.S; escrita do artigo, M.V.O.S e A.P.M.J.; revisão, M.V.O.S e A.P.M.J. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela bolsa de nível doutorado cedida no ano de 2022/2023 ao primeiro autor. Número de bolsa 5.18/2022.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFMG e ao CNPq pela bolsa PQ 317019/2025-2 do professor Antônio Pereira Magalhães Júnior.

**Conflito de interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse.

**Declaração de uso de Inteligência Artificial:** Durante a elaboração deste manuscrito, os autores utilizaram a ferramenta Gemini 1.5 Pro com o objetivo de melhorar a gramática e fluência do texto e auxiliar na tradução para o inglês. Após o uso da ferramenta, os autores revisaram e editaram criticamente todo o conteúdo, assumindo total e integral responsabilidade pelo manuscrito publicado, inclusive por eventuais imprecisões ou incorreções.

## Referências

1. ABDEL-FATTAH, M.; SABER, M. KANTOUSH, S. A.; KHALIL, M. F.; SUMI, T.; SEFELNASR, A. M. A hydrological and geomorphometric approach to understanding the generation of wadi flash floods. **Water**, v. 9, n. 7, p. 553, 2017. DOI: 10.3390/w9070553
2. ABUZIED, S.; YUAN, M.; IBRAHIM, S.; KAISER, M.; SALEEN, T. Geospatial risk assessment of flash floods in Nuweiba area, Egypt. **Journal of Arid Environments**, v. 133, p. 54-72, 2016. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.06.004
3. ADNAN, M. S. G.; ABDULLAH, A. Y. M.; DEWAN, A.; HALL, J. W. The effects of changing land use and flood hazard on poverty in coastal Bangladesh. **Land Use Policy**, n. 99. 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104868
4. ALAM, A.; AHMED, B.; SAMMONDS, P. Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. **Quaternary International**, v. 575, p. 295-307, 2021. DOI: 10.1016/j.quaint.2020.04.047
5. ALI, M. A. S.; SARWAR, A.; ALI, M.; GULZAR, S.; MAJID, A.; KHAN, M. I.; NAZIR, J.; AHMAD, A. Application of Morphometric Ranking Approach using Geospatial Techniques for Flash Flood Susceptibility Modelling in District Shangla, Pakistan. **Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. Life and Environmental Sciences**, 60, n. 2, 243-255, 2023. DOI: 10.53560/PPASB(60-2)830
6. ALMEIDA, F. F. M. o Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.7, p. 249-264, 1977. DOI: 10.25249/0375-7536.1977349364
7. ANTONGIOVANNI L. L.; COELHO A. L. N. **Panorama sobre a desertificação no estado do Espírito Santo**. Consultoria e relatório apresentados para o IEMA do Governo do Estado do Espírito Santo. MMA, Brasília. 87p. 2005.
8. BAJABAA, S.; MASOUD, M.; AL-AMRI, N. Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, p. 2469-2481, 2014. DOI: 10.1007/s12517-013-0941-2

9. BHAT, M. S.; AHMAD, A. A. S.; FAROOQ, H. AHMAD, B. Flood hazard assessment of upper Jhelum basin using morphometric parameters. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, p. 1-17, 2019. DOI: 10.1007/s12665-019-8046-1
10. BHATT, S.; AHMED, S. A. Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. **Geocarto international**, v. 29, n. 8, p. 878-894, 2014. DOI: 10.1080/10106049.2013.868042
11. BORGA, M.; GAUME, E.; CREUTIN, J. D.; MARCHI, L. Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. **Hydrological Processes**, v.22, n.18, p. 3883-3885. 2008. DOI: 10.1002/hyp.7111
12. CALEGARI, S. S.; PEIFER, D.; NEVES, M. A.; CAXITO, F. Post-Miocene topographic rejuvenation in an elevated passive continental margin not characterized by a sharp escarpment (northern end of the Mantiqueira Range, Brazil). **GEOMORPHOLOGY**, v. 393, 2021. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107946
13. CARVALHO, L. M. V. de; JONES, C. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: CAVALCANTI, I. F. de A; FERREIRA, N. J; SILVA, M. G. A. J. da; DIAS, M. A. F. da. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. (p. 95-109).
14. CHEREM, L. F. S. **Análise morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. 111 p.
15. CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
16. CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. Editora Blucher, 1999.
17. COSTA, J. E. Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. **Journal of hydrology**, v. 93, n. 3-4, p. 313-338, 1987. DOI: 10.1016/0022-1694(87)90102-8
18. D'ALCÂNTARA, E, A. **Ensaio Sobre os Alagamentos do Município de Vila Velha**. 2012. Disponível em: <http://www.morrodomoreno.com.br/materias/ensaio-sobre-os-alagamentosdo-municipio-de-vila-velha-.html> Acesso em: mai, 2024.
19. DEINA, M. A.; COELHO, A. L. N. A Influência da Zona Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nos Eventos de Inundação no Baixo Jucu em Vila Velha (ES). **Geografia (Londrina)**, v. 24, n. 2, p. 05-23, 2015. DOI: 10.5433/2447-1747.2015v24n2p05
20. DUTAL, H. Using morphometric analysis for assessment of flash flood susceptibility in the Mediterranean region of Turkey. **Environmental monitoring and assessment**, v. 195(5), n. 582, 2023. DOI: 10.1007/s10661-023-11201-0
21. FENTA, A. A.; YASUDA, H.; SHIMIZU, K.; HAREGEWEYN, N.; WOLDEAREGAY, K. Quantitative analysis and implications of drainage morphometry of the Agula watershed in the semi-arid northern Ethiopia. **Applied Water Science**, v. 7, p. 3825-3840, 2017. DOI: 10.1007/s13201-017-0534-4
22. FREITAS, A. R. de. **Identificação de áreas potencializadoras de inundações e enxurradas: uma proposta metodológica aplicada na Bacia Arroio dos Pereiras, Irati-PR**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018. 150 p.
23. GUTH, P. L.; GEOFFROY, T. M. LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. **Transactions in GIS**, v. 25, n. 5, p. 2245-2261, 2021. DOI: 10.1111/tgis.12825
24. HALLEMA, D. W.; MOUSSA, R.; SUN, G. McNULTY, S. G. Surface storm flow prediction on hillslopes based on topography and hydrologic connectivity. **Ecological Processes**, v. 5, n. 1, p. 13, 2016. DOI: 10.1186/s13717-016-0057-1
25. HORTON, R. E. Drainage-basin characteristics. **Transactions, American Geophysical Union**, V. 13, n. 1, p. 350-361, 1932. DOI: 10.1029/TR013i001p00350
26. HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
27. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; **Geografia do Brasil: Região Sudeste**. V.3. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.
28. IJSN – Instituto Jones dos Santos Neves. Nota Técnica e Arquivos Vetoriais – **Projeto Mapeamento de Comunidades Urbanas e Rurais do Espírito Santo** – Divisão Territorial. 1994. Disponível em: <https://geobases.es.gov.br/links-para-mapas> Acesso em: outubro de 2024.
29. INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Gráficos da Série Histórica**. Disponível em: < <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica> >. Acesso em: nov. 2023.
30. INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Eventos Extremos de Março de 2024 No Brasil**. Notícias Técnicas. Brasília/DF. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas#> Acesso em: mai. 2024.
31. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)**. 2021. Disponível em: - <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> Acesso em: maio de 2023.
32. KARGER, D. N.; CONRAD, O.; BÖHNER, J.; KAWOHL, T.; KREFT, H.; SORIA-AUZA, R.W.; ZIMMERMANN, N. E.; LINDER, H. P.; KESSLER, M. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. **Scientific Data**, v.4, n.1, p.1-20. 2017. DOI: 10.1038/sdata.2017.122
33. KIRPICH, Z. P. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Civil engineering**, v. 10, n. 6, p. 362, 1940.

34. LAVARINI, C.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Análise morfométrica de bacias de cabeceira como ferramenta de investigação geomorfológica em média e larga-escala espacial. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 14, n. 1, p. 35-46, jan./mar. 2013
35. MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; LOPESF. W. de A. **Recursos hídricos: as águas na interface sociedade-natureza**. Oficina de Textos, 2022.
36. MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas I: conceitos. **Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. vol. 2, n. 1, p. 59-79, 1997. DOI: 10.21168/rbrh.v2n1.p59-79
37. MILLER, V. C. A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin: Characteristics in the Clinch Mountain Area Virginia and Tennessee. **Technical Report** (2). Columbia Univ New York, 1953.
38. MORISAWA, M. E. Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, v. 73, n. 9, p. 1025-1046, 1962. DOI: 10.1130/0016-7606(1962)73[1025:QGOSWI]2.0.CO;2
39. NASCIMENTO, F. H. do. **Análise do Efeito Orográfico na Distribuição de Chuvas**: estudo de caso nos municípios de Fundão e Santa Teresa (ES) no ano hidrológico (AH) 2015-2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2017. 154 p.
40. NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. **Clima da região Sudeste do Brasil**. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S.; Orgs. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, p. 243-58, 2009.
41. OZDEMIR, H.; BIRD, D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environmental geology**, v. 56, p. 1405-1415, 2009. DOI: 10.1007/s00254-008-1235-y
42. PATTON, P. C.; BAKER, V. R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water resources research**, v. 12, n. 5, p. 941-952, 1976. DOI: 10.1029/WR012i005p00941
43. PINTO, V. G.; LIMA, R. N. S.; SANTOS, R. C. P.; RIBEIRO, C. B. M. Influência do número de classes de vulnerabilidade na determinação da suscetibilidade morfométrica à inundação. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 11, n. 3, p. 637-649, 2016. DOI: 10.4136/ambi-agua.1842
44. QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System (versão 3.22)**. 2022. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>.
45. RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. **Journal of statistical modeling and analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.
46. RENTSCHLER, J.; MARCONCINI, M.; SU, R.; STRANO, E.; BERNARD, L.; HALLEGATTE, S.; RIOM, C.; AVNER, P. Rapid Urban Growth in Flood Zones: Global Evidence since 1985. **Policy Research Working Paper**; 10014. World Bank, Washington, DC. World Bank. 2022. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37348>. Acesso em: Jun. 2024.
47. ROMSHOO, S. A.; BHAT, S. A.; RASHID, I. Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin. **Journal of Earth System Science**, v. 121, p. 659-686, 2012. DOI: 10.1007/s12040-012-0192-8
48. SCHUMM, Stanley A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological society of America bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956. DOI: 10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2
49. SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. TopoToolbox 2-MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, v. 2, n. 1, p.1-7. 2014. DOI: 10.5194/esurf-2-1-2014
50. SERVIDONI, L. E.; SANTANA, D. B.; LENSE, G. H. E.; PARREIRAS, T. C.; AYER, J. E. B.; RUBIRA, F. G.; MINCATO, R. L. Detection of vulnerable areas to the occurrence of floods in tropical regions, from morphometric attributes. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 4, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i4.2287
51. SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, 52(3-4), 591-611. 1965. DOI: 10.2307/2333709
52. SILVA, A. C. **Histórico de desastres do estado do Espírito Santo 2000-2009**. Defesa Civil do Estado do Espírito Santo. Grafitusa Gráfica e Editora, 2010. Disponível em: <https://defesacivil.es.gov.br/publicacoes-2> Acesso em: maio de 2024.
53. SILVA, R. M. J.; LIMA, C. I. M.; VERONESE, V. F.; JUNIOR, R. N. R.; ROCHA, M. R.; JUNIOR, S. O. Geologia. **Projeto Radam Brasil**. Folhas se 24 Rio Doce, v.34. Rio de Janeiro, 1987.
54. SILVA, K. R. da.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; GARCIA, G. de O. Interpolação espacial da precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v. 18, p. 417-427, 2011. DOI: 10.4322/loram.2011.061
55. SIRANGELO, F. R. **Relação entre a ocorrência de inundações e enxurradas e os índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. 149 p.

56. SHEN, X.; ANAGNOSTOU, E. N.; MEI, Y.; HONG, Y. A global distributed basin morphometric dataset. **Scientific Data**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2017. DOI: 10.1038/sdata.2016.124
57. SMALL, Christopher; NICHOLLS, Robert J. A global analysis of human settlement in coastal zones. **Journal of coastal research**, p. 584-599, 2003.
58. SOUZA, Celia R. de G. Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 1, 2005. DOI: 10.20502/rbg.v6i1.38
59. STRAHLER, Arthur N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological society of America bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952. DOI: 10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2
60. TEHRANY, M. S.; JONES, S.; SHABANI, F. Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. **Catena**, v. 175, p. 174-192, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2018.12.011
61. THE JAMOVI PROJECT. Jamovi. (Version 2.3) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>. 2022.
62. TOLA, S. Y.; SHETTY, A. Flood susceptibility modeling based on morphometric parameters in Upper Awash River basin, Ethiopia using geospatial techniques. **Sustainable Water Resources Management**, 8(2), 49, 2022. DOI: 10.1007/s40899-022-00642-z
63. VASCONCELLOS, F. C. **Variabilidade Atmosférica Associada a Casos Extremos de Precipitação na Região Sudeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Programa de pós-graduação em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. 110 p.
64. UNDRR – UN Office for Disaster Risk Reduction; CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **Human cost of natural disasters: An overview of the last 20 years 2019-2020**. 2020. Disponível em: <https://reliefweb.int/report/world/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>. Acesso em agosto de 2021.
65. WMO – World Meteorological Organization: Flash Flood Guidance System (FFGS) with global coverage Brochure. 2016.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.