UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

GUSTAVO ANTONIO SILVA NOGUEIRA



ALFENAS/MG 2024

GUSTAVO ANTONIO SILVA NOGUEIRA

SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTANA (MG)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharelado em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Gomes Rubira

ALFENAS/MG 2024

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas Biblioteca xxxxxx



Ficha gerada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor.

GUSTAVO ANTONIO SILVA NOGUEIRA

SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTANA

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharelado em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: xx de xxxx de 2xxx

Prof. Dr. Felipe Gomes RubiraAssinatura:Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Prof. Dr. Rodrigo José PisaniAssinatura:Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Me. Derielsen Brandão SantanaAssinatura:Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Dedico esse trabalho ao meu pai, minha mãe, minha irmã, meus sobrinhos e meus grandes amigos. Como também a todos aqueles que de maneira possam ter contribuído para a consolidação dessa etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de expressar minha gratidão ao meu pai Antonio Carlos Nogueira por sempre ter acreditado em mim e me inspirado a correr atrás dos meus sonhos. Agradeço à minha mãe Maria Aparecida da Silva pelo suporte e à minha querida irmã Renata Aparecida Silva Nogueira por sempre ter estado ao meu lado e acreditado em mim, aos meus amados sobrinhos Mirella e Caio, por sempre alegrar meus dias. Agradeço também às minhas avós Maria do Carmo e Maria Guilhermina, a todos os meus tios, tias e primos. A vocês minha eterna gratidão.

Aos meus grandes amigos Mariana, Gabriela e Matheus por toda a trajetória de amizade e companheirismo juntos na faculdade, obrigado por sempre estarem comigo. Agradeço aos meus amados amigos Nataly, Gabriel, Jessica e Ariel por todos os anos morando juntos e fazendo parte como uma verdadeira família. A minha amiga Raissa por todo auxílio nos momentos difíceis da graduação. Também agradeço ao meu amigo Rodrigo Yugi por todo suporte e apoio para ingressar na minha tão sonhada Universidade.

Ao meu querido professor e orientador Felipe Gomes Rubira por todo conhecimento, dedicação durante todo o processo de pesquisa, seus conhecimentos e conselhos foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho, obrigado por sempre acreditar no meu potencial.

Agradeço também aos professores e funcionários da Geografia e da Unifal, é uma realização de sonho ter vivido toda essa experiência que a Universidade Pública oferece.

Por fim, agradeço aos muitos amigos e colegas que fiz durante os anos acadêmicos, suas palavras de apoio, gestos de carinho e incentivo fizeram toda a diferença em minha trajetória. Esta conquista é o resultado do esforço e apoio que tive ao longo desses anos e a todos vocês, meu muito obrigado.

RESUMO

A suscetibilidade à inundação apresenta-se como um desafio crescente em muitas regiões, devido às mudanças no uso da terra e às alterações climáticas. Na Bacia Hidrográfica do Rio Santana, MG, essa problemática é evidente, afetando áreas urbanas e rurais com diferentes níveis de risco. Com base nessa problemática, esta pesquisa objetiva visa analisar a suscetibilidade à inundação na bacia do rio Santana, utilizando abordagens integradas de geoprocessamento e modelagem hidrológica. Os objetivos incluem identificar áreas críticas de inundação e compreender os processos morfológicos e geológicos que influenciam a dinâmica fluvial. A metodologia estruturou-se em três etapas: mapeamento das áreas suscetíveis a inundação pelo modelo Height above the Nearest Drainage (HAND); caracterização morfológica do sistema rio-planície de inundação com modelos tridimensionais; e aplicação de parâmetros complementares para validar os resultados e caracterizar setores adjacentes aos polígonos de alta e baixa suscetibilidade. A análise integrada de parâmetros morfométricos do relevo e características geológicas proporcionou uma compreensão abrangente dos processos evolutivos na região. Os resultados indicam alta suscetibilidade à inundação em áreas urbanas como Camacho e Candeias, e baixa vulnerabilidade em Baiões, Rodrigues e Curral. A correlação entre parâmetros morfométricos, características geológicas e antrópicas enriqueceu a compreensão da dinâmica fluvial local, destacando a importância da preservação de formações florestais e savânicas para mitigar os riscos de inundação. Estas descobertas estabelecem uma base sólida para investigações futuras sobre a evolução da paisagem e o impacto das atividades humanas na bacia. A integração dos resultados reforça a necessidade de um desenvolvimento territorial equilibrado e resiliente, que considere as particularidades hidrológicas e topográficas da região, visando proteger as comunidades locais e o meio ambiente de potenciais tragédias.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; Parâmetros morfométricos; Morfodinâmica fluvial.

ABSTRACT

Flood susceptibility presents a growing challenge in many regions due to changes in land use and climate alterations. In the Santana River Watershed, MG, this issue is evident, impacting urban and rural areas with varying levels of risk. Based on this problem, this research aims to analyze flood susceptibility in the Santana River basin, using integrated geoprocessing and hydrological modeling approaches. Objectives include identifying critical flood-prone areas and understanding morphological and geological processes influencing fluvial dynamics. The methodology was structured into three stages: mapping flood-prone areas using the Height above the Nearest Drainage (HAND) model; morphological characterization of the river-floodplain system using three-dimensional models; and application of complementary parameters to validate results and characterize sectors adjacent to high and low susceptibility polygons. Integrated analysis of morphometric terrain parameters and geological features provided a comprehensive understanding of evolutionary processes in the region. Results indicate high flood susceptibility in urban areas such as Camacho and Candeias, and low vulnerability in Baiões, Rodrigues, and Curral. Correlation between morphometric parameters, geological, and anthropogenic features enriched understanding of local fluvial dynamics, emphasizing the importance of preserving forest and savanna formations to mitigate flood risks. These findings establish a solid foundation for future investigations into landscape evolution and the impact of human activities on the watershed. Integration of results underscores the need for balanced and resilient territorial development, considering hydrological and topographic particularities of the region, aiming to protect local communities and the environment from potential tragedies.

Keywords: Hydrological modeling; Morphometric parameters; Fluvial morphodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Santana	26
Figura 2 - Geologia da bacia hidrográfica do Rio Santana	27
Figura 3 - Classificação climática na Bacia Hidrográfica do Rio Santana	28
Figura 4 - Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Santana	29
Figura 5 - Mapa dos biomas ao longo da BH do Rio Santana	30
Figura 6 - Fluxograma das etapas de execução da suscetibilidade	32
Figura 7 - Obtenção do modelo HAND	36
Figura 8 - Metodologia de integração das variáveis	37
Figura 9 - Exemplo relativo a trecho do rio São Francisco	38
Figura 10 - Exemplo relativo a trecho do rio São Francisco	39
Figura 11 - Mapa dos padrões de relevo	43
Figura 12 - Declividade do relevo	44
Figura 13 - HAND classificado de acordo com a sustentabilidade	45
Figura 14 - Mapa de suscetibilidade a inundacao	46
Figura 15 - Caracterização morfológica do sistema rio-planície de Camacho	47
Figura 16 - Caracterização morfológica do sistema rio-planície de Camacho	48
Figura 17 - Hierarquia Fluvial, densidade drenagem e hidrológica	49
Figura 18 - Lineamentos estruturais e densidade de lineamentos	52
Figura 19 - Diagrama de roseta	53
Figura 20 - Fator de assimetria de bacia de drenagem	54
Figura 21 - Fator de simetria topográfica transversal	54
Figura 22 - Índice de concentração de rugosidade, declividades	56
Figura 23 - Uso e cobertura da terra	58

LISTA DE TABELAS

de
33
34
36
40
da
41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HAND	Height above the Nearest Drainage				
SIG	Sistema de Informação Geográfica				
DFD	Direção do Fluxo de Drenagem				
LDD	Local Drain Direction				
FSTT	Fator de simetria topográfica transversa				
FABD	Fator de assimetria da bacia de drenagem				
MDE	Modelo Digital de Elevação				
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission				
USGS	United States Geological Survey				
CPRM	Serviço Geológico do Brasil				
IDE-SISEMA	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual Meio Ambiente				
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística				
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction				
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters				
UHE	Usina Hidrelétrica				
ALAGO	Associação dos Municípios do Lago de Furnas				
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais				
ANA	Agência Nacional de Águas				
LID	Low Impact Development				
EMDAT	Emergency Events Database				
RS	Rio Grande do Sul				
MAPBIOMAS	Projeto de Mapeamento Anual de Cobertura e Uso do Solo no Brasil				
PCI	Photo Coverage Index				
GSA	Geological Society of America				

1		12
2		14
		14
2		. 14 4 E
د 4	REFERENCIAL TEÓRICO	15 16
	4 1 BACIAS HIDROGRÁFICAS [.] DEFINICÕES E FUNCÕES	16
	4.1.1 Bacias hidrográficas dos rios Grande e Santana	16
	4.2 INUNDACÕES: EVENTOS NATURAIS AGRAVADOS POR ACÕES ANTRÓPICAS	17
	4.3 SUSCETIBILIDADE à INUNDACÃO: CONCEITOS E FATORES	20
	4.4 MODELAGEM AMBIENTAL	21
	4.4.1 Modelo HAND (Height above the Nearest Drainage)	22
5	METODOLOGIA	24
	5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	24
	5.2 MATERIAIS	28
	5.3. MÉTODOS	29
	5.3.1 Modelo Height above the Nearest Drainage (HAND)	29
	5.3.1.1 Classificação dos padrões de relevo	30
	5.3.1.2 Classificação da altitude pela declividade	31
	5.3.1.3 Classificação da altura do terreno acima da drenagem mais próxima	32
	5.3.1.4 Integração das variáveis	34
	5.3.2. Caracterização morfológica do sistema rio-planície inundação	35
	5.3.3 Parâmetros complementares	36
	5.3.3.1 Hierarquia Fluvial, densidade de drenagem e hidrográfica	36
	5.3.3.2 Lineamentos estruturais	38
	5.3.3.3 Fatores de assimetria de drenagem	38
	5.3.3.4 Concentração de rugosidade e perfis topográficos	39
	5.3.3.5 Uso e cobertura da terra	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
	6.1 SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO DA BACIA DO RIO SANTANA	40
	6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TERRENOS NOS AGLOMERADOS SUSCETÍVEIS	43
	6.3 ANÁLISE DE PARÂMETROS DA REDE DE DRENAGEM	46
	6.4 ANÁLISE DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS	47
	6.5 ANÁLISE DE PARÂMETROS MORFOLÓGICOS	51
	6.6 PARÂMETRO ANTRÓPICO	52
7		54
8	. KEFERENCIAS	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

O impacto das atividades antrópicas sobre o meio ambiente tem sido amplificado pela urbanização, que impermeabiliza solos e altera a infiltração e o escoamento das águas superficiais, aumentando a intensidade das inundações nas cidades (Costa, 2017). Esse cenário, combinado com as mudanças climáticas globais, tem provocado eventos climáticos extremos, como inundações, escorregamentos e erosões, recentemente observados no Estado do Rio Grande do Sul (Rizzatti e Batista, 2024; Bellettini e Hoelzel, 2024a; 2024b; Queiroz e Hoelzel, 2024a; 2024b).

Nesta perspectiva, foi indicado pelo *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR) que desastres naturais causaram prejuízos globais de US\$2,9 trilhões em 2020 (UNDRR, 2020). Assim, é cada vez mais necessário implementar técnicas de mapeamento e monitoramento da suscetibilidade a inundações, especialmente em centros urbanos onde esse fenômeno é ampliado.

Diante deste contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são considerados fundamentais para o mapeamento e gestão desses locais (Toniolo et al., 2022). As técnicas de geoprocessamento têm sido efetivas na avaliação da suscetibilidade a enchentes ou inundações de uma bacia. Um modelo inovador aplicado em diversos trabalhos de mapeamento dessas áreas no Brasil é o *Height Above the Nearest Drainage – HAND* (altura acima da drenagem mais próxima) (Dantas; Canil, 2017).

O modelo HAND permite a identificação de áreas de suscetibilidade por meio do cruzamento de parâmetros físicos em ambiente SIG. A modelagem ambiental nos SIGs, por meio do geoprocessamento, amplia as relações e interações ambientais no espaço geográfico, além de facilitar a obtenção automática de variáveis morfométricas essenciais para o monitoramento ambiental (Costa, 2017). Isso torna o mapeamento de suscetibilidade a inundação mais eficiente em termos de custo e velocidade.

Neste ínterim, o entendimento e mapeamento dos processos hidrológicos são considerados estratégicos para a gestão de bacias hidrográficas. O mapeamento das áreas suscetíveis é reconhecido como essencial para prevenir e mitigar os impactos sociais, ambientais e econômicos das inundações, possibilitando a implementação de políticas públicas, ordenamento urbano e planos de gestão de risco mais eficazes (Cury et al., 2021).

A partir dessas premissas, esta pesquisa objetiva mapear e analisar a

suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Santana (MG), uma sub-bacia do rio Grande, localizada no estado de Minas Gerais. Dessa forma, a justificativa deste estudo reside na contribuição oferecida para a identificação de áreas propensas a serem impactadas em um contexto de eventos climáticos extremos regionais.

Na bacia hidrográfica do rio Grande e Santana, há divergência quanto à suscetibilidade às inundações. Segundo Guidolini et al. (2020), o rio Grande geralmente apresenta baixa suscetibilidade à inundação e à perda de solo em condições normais de precipitação. Entretanto, dados da Agência Nacional das Águas (ANA, 2017) indicam que aproximadamente 10% da Bacia do Rio Grande é vulnerável à inundação devido ao uso inadequado do solo. Por outro lado, a sub-bacia do Rio Santana foi identificada pela Associação dos Municípios do Lago de Furnas, em 2013, como uma área de alta fragilidade, suscetível às inundações. Neste cenário, a presente pesquisa utiliza o modelo HAND para verificar a precisão das perspectivas mencionadas, contribuindo assim para melhor entender e manejar essas questões na área em foco.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Santana.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Identificar as áreas da bacia com maior capacidade de infiltração da água e maior capacidade de escoamento superficial da bacia;

 b) Identificar sedes municipais, vilas e povoados rurais suscetíveis à inundação na bacia;

c) Caracterizar e analisar a morfologia do sistema rio-planície de inundação em áreas de alta suscetibilidade relacionadas às sedes municipais, aglomerados e povoados rurais;

d) Analisar parâmetros morfométricos e correlacioná-los com as características geológicas para compreender a dinâmica fluvial e a evolução da bacia;

e) Contribuir para a prevenção de possíveis desastres de inundação na região.

3. JUSTIFICATIVA

A pesquisa contribui para a compreensão do comportamento hídrico das áreas a montante do reservatório de Furnas, devido ao seu recorte espacial vinculado às principais cabeceiras de drenagem responsáveis pelo abastecimento do reservatório. Além disso, é uma contribuição determinante para os municípios de Camacho e Candeias, a vila urbana de Baiões, e os povoados rurais de Rodrigues e Curral, que são vulneráveis às inundações da bacia, pois essas localidades foram identificadas como setores com alta a baixa propensão à ocorrência do fenômeno.

Os polígonos da modelagem hidrológica das áreas suscetíveis a inundação, gerados pelo método de determinação da altura acima da drenagem mais próxima, e a caracterização morfológica do sistema de planície inundável através da elaboração de modelos tridimensionais perpendiculares e transversais ao rio, são úteis para melhorar o gerenciamento das áreas de risco e para estudos de planejamento territorial dos municípios envolvidos.

Metodologicamente, a pesquisa contribui indiretamente com estudos de risco de inundação, incentivando novas investigações na área e a possibilidade de reaplicação da metodologia em outras cidades para auxiliar na prevenção de desastres.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS: DEFINIÇÕES E FUNÇÕES

A bacia hidrográfica é uma unidade de planejamento e gestão ambiental que integra parâmetros ecológicos e hidrológicos, sendo essencial para o planejamento e gerenciamento de paisagens (Silva et al., 2021). Estas unidades espaciais desempenham um papel fundamental no ciclo hidrológico, especialmente na fase terrestre, que abrange a infiltração e o escoamento superficial da água.

Assim, as bacias hidrográficas são definidas como "um conjunto de terras drenadas por um conjunto de rios, cuja saída de toda a água ocorre por um único exutório" (Silva et al., 2021, p. 1631). Sob outra perspectiva, são consideradas unidades territoriais para o planejamento da gestão hídrica no Brasil pela Lei Federal nº 9.433/1997 (Brasil, 1997). Segundo Campos (2006) são sistemas físicos e dinâmicos, sendo consideradas unidades funcionais básicas para o planejamento e gestão ambiental, onde ocorre a integração das águas com o meio físico, biótico e social. Observa-se, nesse contexto, que atividades antrópicas como agricultura e urbanização são desenvolvidas no entorno das bacias hidrográficas, o que compromete a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos (Silva et al., 2021).

Segundo Teodoro et al. (2007), a caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos métodos mais utilizados para análises hidrológicas e/ou ambientais. De acordo com Tonello (2005), as características morfométricas de uma bacia hidrográfica podem ser divididas em: a) geométricas; b) do relevo; e c) da rede de drenagem. Essa técnica e essas características são fundamentais para subsidiar a gestão hídrica pela Agência Nacional das Águas (ANA), como destacado por Carvalho (2020). A implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, incluindo a fiscalização e a cobrança pelo uso da água no Brasil, é assumida pela ANA por meio da Lei nº 9.984/2000 (Brasil, 2000).

4.1.1 Bacias hidrográficas dos rios Grande e Santana

De acordo com Silva et al. (2021), o Brasil é dividido em 12 regiões hidrográficas para facilitar o gerenciamento de recursos hídricos e estratégias de uso da água, como a Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Paraná, Paraguai, Uruguai e Atlântico Sul. A Bacia Hidrográfica do Rio Grande, localizada na Região Sudeste do Brasil e parte da região hidrográfica Paraná, engloba a bacia do Rio Santana, objeto deste estudo, conforme a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento.

A Bacia do Rio Grande abrange aproximadamente 9 milhões de habitantes e 325 municípios, situando-se em dois estados importantes: Minas Gerais (ao norte, com 60,2% da área total de drenagem) e São Paulo (ao sul, com 39,8% da área) (ANA, 2017). O rio Santana, um dos afluentes pela margem direita, sentido nascente/foz, está integrado nesta bacia. Segundo Moreira, Silva e Silva (2014), apesar do importante papel no desenvolvimento agrícola e energético na região, a bacia do Rio Grande ainda carece de dados hidrológicos para fundamentar o processo de gestão e planejamento de recursos hídricos.

Quanto aos parâmetros de drenagem, Guidolini et al. (2020) destacaram que a bacia do Rio Grande apresenta baixa densidade de drenagem devido à elevada permeabilidade do solo ou às baixas taxas pluviométricas. Os autores observaram que essa baixa densidade, junto com os coeficientes de manutenção, indica capacidade reduzida de gerar novos canais de drenagem (Guidolini et al., 2020).

A análise de fragilidade (AF) realizada pela Associação dos Municípios do Lago de Furnas (ALAGO, 2013) determinou que a sub-bacia do rio Santana é considerada uma área de alta fragilidade. Essa classificação baseou-se em parâmetros como hierarquia fluvial, fisionomia vegetal, precipitação, relevo, temperatura e tipo de solo. Segundo Albuquerque, Campos e Moreau (2011), a bacia do rio Santana tem enfrentado diversos problemas ambientais devido à pressão das atividades humanas, destacando a necessidade de projetos de conservação ambiental para mitigar esses impactos.

4.2 INUNDAÇÕES: EVENTOS NATURAIS AGRAVADOS POR AÇÕES ANTRÓPICAS

As inundações são fenômenos hidrológicos naturais regulares que conectam o sistema rio-planície de inundação durante estações chuvosas, também compreendido como zona de transição aquática/terrestre (Junk et al., 1989; Rocha, 2011). Ocorrem quando se observa o transbordamento da água da calha normal de um corpo hídrico ou pela acumulação de água em áreas que normalmente não se encontram submersas (UNESCO, 2012). A ocorrência das inundações está relacionada às características físicas e climáticas da bacia hidrográfica, especialmente pela distribuição espacial e temporal da pluviosidade (Tominaga et al. 2009). Segundo Caldana et al. (2018), as inundações associadas à precipitação ocorrem predominantemente pela má eficiência da drenagem. Assim, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2014) conceitua a inundação como:

Elevação temporária do nível d'água relativo ao leito regular do canal em uma dada bacia de drenagem, comumente em razão do acréscimo de vazão d'agua ocasionado por eventos chuvosos de longa duração e elevados índices pluviométricos acumulados. Os excessos d'agua podem alcançar a planície aluvial atual (leito menor, várzea) e os terraços fluviais antigos (leito maior), topograficamente alçados em relação à cota da planície aluvial atual.

Tais fenômenos são também dependentes, influenciados e regulados por especificidades de fatores litoestruturais, tectônicos, geomorfológicos e biológicos, configurando-se como um complexo sistema de transformação a partir das trocas de entrada e saída de matéria e energia dos sistemas fluviais (Szabó, Dávid e Lóczy, 2010; Gontijo, 2007; Karkani et al., 2021; Simplício, 2020).

No entanto, ao longo do tempo, o processo de urbanização no sudeste brasileiro avançou, ocupou e impermeabilizou diversas margens fluviais, resultando em desastres anunciados, muitas vezes negligenciados pelo poder público (Stevaux et al., 2009; Tucci, 2002). Silva Filho e Costa (2023) destacam que as inundações são problemas antigos para diversas cidades ao redor do mundo e, embora naturais, são agravadas por atividades antrópicas. Neste cenário, o estudo do Cred (2023) afirma que eventos hidrológicos são uma das ameaças mais recorrentes no Brasil, especialmente durante chuvas severas.

Nesta perspectiva, é válido ressaltar que, embora as inundações sejam vistas como desastres devido aos impactos negativos nas comunidades, elas são processos naturais e temporários relacionados às características morfológicas dos sistemas hidrometeorológicos, como profundidade, largura, rugosidade, sinuosidade e declividade (Kelsch, 2001; Tucci, 2005; Oliveira, 2010; Nied et al., 2014; 2017; Liu et al., 2016).

Com relação às mudanças climáticas e aos eventos climáticos extremos, Marcelino (2007) destaca que a inundação é a principal consequência no Brasil, representando 59% dos registros em mais de 80% das cidades brasileiras. Neste contexto, de 1991 a 2012, o Brasil registrou 4.694 eventos de inundação (CEPED – UFSC, 2012). As mudanças climáticas atuais têm aumentado a frequência e intensidade desses fenômenos, impactando comunidades vulneráveis devido às transformações nos espaços naturais das cidades (Marengo et al., 2010).

Esses eventos têm causado inúmeros prejuízos à população que reside próxima aos leitos dos rios (Marth; Moura; Koester, 2016). Em estimativa realizada por Collins (2004), mais de 29 milhões de brasileiros são encontrados em áreas suscetíveis às inundações. Segundo Tucci e Bertoni (2003), existem duas formas de ocorrência de inundação em áreas urbanas, sendo caracterizadas como ribeirinhas e aquelas decorrentes da urbanização:

- (1) Inundações ribeirinhas: são processos naturais e ocorrem em geral em bacias de grande e médio porte, onde a declividade é baixa e a seção de escoamento é pequena. Uma precipitação intensa que chega simultaneamente ao rio é superior à sua capacidade de drenagem que resulta em inundação nas áreas ribeirinhas. Os problemas gerados por esse tipo de inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual as mesmas ocorrem.
- (2) Inundações devido a urbanização: são processos influenciados por diversas atividades humanas realizadas nas áreas urbanas. Ocorrem em bacias pequenas com exceção para as grandes cidades. Esse tipo de inundação acontece à medida que a população impermeabiliza o solo, o que acelera o escoamento, ou seja, aumenta a quantidade de água que passa nos condutos e canais ao mesmo tempo e chega ao sistema de drenagem. Essa quantidade de água no sistema de drenagem elevada produz inundações mais frequentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento natural.

Wolfgang (2002) atribui dois tipos principais de inundações: as graduais, que ocorrem de maneira lenta e ciclicamente sazonal devido à elevação gradual das águas; e as bruscas, que são repentinas e com pouco tempo de alerta, resultado de fatores como intensa precipitação, relevo acidentado, pequenas bacias de drenagem e impermeabilização do solo, especialmente em áreas urbanas densamente construídas.

Isso implica que tais eventos, embora naturais, podem ser agravados por pressões antrópicas e impactos ambientais, elevando os riscos e danos devido à urbanização, ocupação das planícies de inundação, impermeabilização do solo e canalização dos corpos d'água (Tucci; Bertoni, 2003). Nestes cenários antropizados, a capacidade de infiltração é reduzida em relação ao escoamento, resultando em

transbordos para as margens urbanas e causando diversas perdas, tanto materiais quanto imateriais (Müller; Reiter; Weiland, 2011).

Com base nesta problemática, verifica-se que os rios e a gestão da água são fortemente influenciados pela interação entre os sistemas físicos e sociais (Tucci; Bertoni, 2003). Neste sentido, estudos que abordam o mapeamento das áreas suscetíveis a inundação são essenciais para compreender e prever esses desastres (Falconer et al., 2009; Devia; Ganasri; Dwarakish, 2015; Zaharia et al., 2017; Zhao et al., 2018; Swain; Singha; Nayak, 2020).

4.3 SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO: CONCEITOS E FATORES

O conceito de suscetibilidade na área das geociências descreve a propensão dos terrenos à ocorrência de um fenômeno ou processo do meio físico (Flentje et al., 2008). Sob a ótica dos desastres hidrológicos, a suscetibilidade é definida por Miguez et al. (2017) como a propensão do meio físico a sofrer processos de inundação. Para Moura et al. (2019), a suscetibilidade à inundação de uma região resulta de fatores naturais que a predispõem a esse fenômeno, sendo os aspectos socioambientais e climáticos os principais agentes causadores desses eventos.

O estudo de Moura et al. (2019) sobre a suscetibilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Piratini, no Rio Grande do Sul, destacou a importância da cobertura vegetal. Os autores evidenciaram que a infiltração de água no solo melhora onde a vegetação está bem estabelecida, reduzindo o risco de inundação. Também identificaram alta suscetibilidade à inundação em áreas próximas à zona urbana, sugerindo a necessidade de um plano de mitigação para esses eventos.

A pesquisa de Marchi et al. (2010) sobre eventos de enxurradas em bacias hidrográficas caracterizou esses eventos em termos climáticos e morfológicos. Os autores concluíram que as condições de relevo influenciam a concentração de fluxo ao longo das drenagens, resultando em descargas elevadas que favorecem a inundação em bacias com alta declividade. Para Marchi et al. (2010), a relação entre a declividade da bacia e seu tamanho, além do comprimento do canal principal em relação ao tamanho da bacia, são fatores morfológicos específicos que afetam a suscetibilidade da região à inundação.

Segundo Souza et al. (2014) o formato da bacia e seu tempo de concentração são fatores que podem ser utilizados para a análise da suscetibilidade à inundação de

bacias hidrográficas. Conforme destacado pelos autores, quanto maior o tempo de concentração, menor é a vazão do curso d'água em enchentes ou inundações. Essas observações são corroboradas por Villela e Matos (1975), que recomendam o uso do índice de fator de forma proposto por (Horton, 1945) para avaliar a suscetibilidade das bacias. Esse índice relaciona a forma da bacia a um círculo, indicando a probabilidade de ocorrência de inundações. Quanto menor o fator de forma, menor é a probabilidade de eventos extremos, devido ao formato alongado da bacia, que favorece o escoamento em detrimento das inundações. Entre os parâmetros morfométricos comuns para avaliar a suscetibilidade das bacias hidrográficas à inundação estão a distância da rede de drenagem mais próxima, elevação, inclinação e altura do terreno em relação à drenagem mais próxima (Bathrellos et al., 2016; Kaur et al., 2017).

Além dos fatores naturais, o uso e ocupação da terra por atividades agrícolas, pecuárias e urbanas levam à remoção da vegetação nativa e à impermeabilização do solo, modificando a vazão fluvial e aumentando a suscetibilidade desses locais a eventos extremos de enchentes e inundações (Nogueira, 2017).

4.4 MODELAGEM AMBIENTAL

Nos últimos anos, pesquisas têm orientado o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os SIGs são sistemas integrados que incluem hardware, software, organização, dados e informações geográficas. A aplicação dos SIGs no mapeamento de eventos naturais tem demonstrado alta eficiência devido à produção de informações específicas por meio de mapas temáticos, que auxiliam na interpretação de cenários hidrológicos e contribuem para a tomada de decisões (Fitz, 2008).

O uso do SIG destaca-se pela coleta, armazenamento e análise de um grande volume de dados e variáveis sem erros conceituais graves (Costa, 2017). Segundo o autor, essas tecnologias, junto com o sensoriamento remoto, contribuem efetivamente para a integração e análise complexa, sendo um importante subsídio para planos de mitigação e monitoramento ambiental (Costa, 2017).

Farias e Mendonça (2019) destacaram que o uso de SIGs e ferramentas de geoprocessamento é considerado fundamental nos modelos hidrológicos, pois permite a combinação de informações topográficas e de drenagem para bacias hidrográficas em ambiente remoto. Essa capacidade possibilita a visualização de cenários em diferentes períodos e a predição de cenários futuros, como demonstrado

por Leal, Barbosa e Aquino (2020) ao mapear a vulnerabilidade à inundação na bacia hidrográfica do rio Uma, em Pernambuco.

Sob essa perspectiva, argumenta-se por Pinheiro (2024) que a aplicação de técnicas associadas ao sensoriamento remoto em ambiente SIG permite identificar, mensurar, quantificar e modelar áreas suscetíveis à inundação. No estudo, áreas urbanas densamente povoadas foram identificadas como suscetíveis a inundação pelo modelo HAND, demonstrando a eficácia das técnicas para modelagem e classificação da magnitude das inundações com base em diferentes cotas altimétricas (Pinheiro, 2024).

Na mesma linha de raciocínio, Seabra (2012) destaca o potencial das ferramentas em pesquisas geoecológicas, especialmente no uso de imagens orbitais para mapear variáveis importantes e entender melhor a paisagem e suas interações. Mengue et al. (2016) corroboram essas premissas ao enfatizar a essencialidade dessas tecnologias na orientação de políticas públicas, como o zoneamento de áreas de risco e a elaboração de planos de mitigação para locais com alta suscetibilidade à inundação.

4.4.1 Modelo HAND (Height above the Nearest Drainage)

O modelo "*Height above the Nearest Drainage*" (HAND), ou "altura acima da drenagem mais próxima", desenvolvido por Rennó et al. (2008) com o apoio do Centro de Ciências do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para identificar áreas suscetíveis à inundação. Neste modelo hidrológico, áreas com maior suscetibilidade são indicadas pelos pixels de valores menores em relação à altura da drenagem próxima ao talvegue da rede (Rennó et al., 2008; Milanesi; Quadros; Lahm, 2017).

A topografia é normalizada em relação à rede de drenagem por meio de dois procedimentos em um Modelo Digital de Elevação (MDE) (Nobre *et al.*, 2011). Primeiro, uma sequência de cálculos cria um MDE coerente, que define e delineia os fluxos e canais de drenagem. Esse processo é essencial, pois as elevações dos canais são usadas para calcular as alturas normalizadas do terreno. Em seguida, é criado um mapa de drenagem com base nas direções de drenagem locais, que serve como guia para o operador HAND. Nesse contexto, observa-se que as regiões com baixa altura relativa tendem a sofrer mais com inundações (Nobre et al., 2011).

O modelo HAND surge como uma alternativa competente para identificação de áreas de risco a desastres (Flora, 2019). Foi adotado para orientar o desenvolvimento de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações, elaboradas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em conformidade com as diretrizes específicas da Lei 12.608/2012 (BRASIL, 2012), que rege a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC).

Após avaliações de validação, constatou-se que desníveis relativos de até 5 metros no modelo HAND indicam maior probabilidade de inundação; entre 5 e 15 metros, são locais de risco médio, e acima de 15 metros, locais com baixo risco de inundação (Santos, 2015). Além da acessibilidade em relação aos custos, Hu e Demir (2021) indicam que o HAND é extremamente útil devido à sua baixa dependência de dados anteriores, utilizando apenas informações relacionadas ao MDE.

McGrath *et al.* (2018) e Speckhann *et al.* (2018) observaram que o modelo HAND foi rapidamente adotado na modelagem de inundações devido à sua capacidade de refletir o potencial de drenagem, aos baixos requisitos de entrada e à facilidade de implementação desse sistema em plataformas SIG. Os autores mencionam que a metodologia também pode ser aplicada para replicar eventos históricos de inundação.

Com base nessas premissas, Milanesi, Quadros e Lahm (2017) conduziram um estudo para mapear o terreno sujeito à inundação e identificar o perfil social vulnerável no município de Porto Alegre (RS), utilizando o algoritmo HAND. Os autores concluíram que há possibilidade de estabelecer uma relação espacial entre o HAND, como representação cartográfica de áreas inundáveis, e dados socioeconômicos. Com base nos resultados positivos, os autores recomendaram o uso dessa metodologia em futuras análises de vulnerabilidade social a desastres em escala cadastral.

Sobre a confiabilidade e assertividade dos dados obtidos pelo HAND, estudos como os de Nobre et al. (2016) e Li, Mount e Demir (2020) utilizaram o modelo HAND para prever mapas de inundação, alcançando uma acurácia de 86 a 98% em comparação com mapas de referência. Enquanto Hu e Demir (2021) aplicaram o HAND para mapear inundações em tempo real, demonstrando sua aplicabilidade em situações que exigem precisão e execução rápida, como no mapeamento de enchentes interativo e no suporte a decisões de mitigação.

5. METODOLOGIA

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A sub-bacia hidrográfica do rio Santana abrange uma área territorial de aproximadamente 1085,64 km². Ela faz parte da bacia do rio Grande (MG) e está localizada na mesorregião Oeste do Estado de Minas Gerais. O rio principal nasce no município de Itapecerica MG e percorre cerca de 47,98 km até desaguar no reservatório da UHE de Furnas (Figura 1).





Fonte: Autor (2023)

A geologia regional da bacia está associada à borda sul do Cráton do São Francisco e é composta principalmente por rochas metamórficas, como ortopiroxenitos e gnaisses, formadas durante o Éon Arqueano (Figura 2). Além disso, são encontradas rochas metassedimentares do Éon Proterozoico, como Metadiamictito, Ardósias e metapelitos, resultantes da metamorfização de sedimentos depositados durante transgressões e regressões marinhas ocorridas há aproximadamente 500 milhões de anos, no período Neoproterozoico (Fonseca, 2013). Nos arredores do reservatório de Furnas, ocorrem depósitos clásticos quaternários em amplas planícies fluviais do rio Santana. (Silva et al., 2020).



Figura 2 - Geologia da bacia hidrográfica do Rio Santana

Fonte: Autor (2023).

Com base na classificação climática de Köppen (1936) e nos dados fornecidos por Alvares et al. (2013), o clima na bacia é classificado nas categorias Cwa (verão quente e úmido) e Cwb (verão ameno e úmido) (Figura 3). Na primeira categoria, os verões são mais amenos e a estação chuvosa ocorre no verão, com temperaturas médias mensais abaixo de 18°C no mês mais frio e abaixo de 22°C no mês mais quente (Alvares et al., 2013). Na segunda categoria, os verões são quentes, a estação chuvosa ocorre no verão, e as temperaturas médias mensais são inferiores a 18°C no mês mais guente (Alvares et al., 2013). Na segunda categoria, os verões são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 22°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio e abaixo de 18°C no mês mais são inferiores a 18°C no mês mais frio, mas superiores a 22°C no mês mais quente (Alvares et al., 2013).





Fonte: Autor (2023).

A formação dos relevos na área é propiciada pela configuração geológica, caracterizada pela presença de morros e planícies de inundação, com uma diferença de amplitude altimétrica de 512m (Figura 1). Nos morros mais altos a montante, encontram-se declividades mais acentuadas (Figura 1). Nos morros de menor altitude e nas planícies de inundação a jusante, observam-se declividades mais suaves (Figura 1). Essa configuração geomorfológica indica a existência de zonas com maior

tendência à exportação de sedimentos a montante e à acomodação dos mesmos a jusante.

Predominam na área o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Latossolo Vermelho (Figura 4), solos geralmente bem desenvolvidos devido à intensa intemperização que favorece a presença de minerais de óxidos de ferro e alumínio. Também são encontrados Argissolos Vermelhos, com baixa ou alta atividade de argila e saturação por bases baixas, além de Argissolo Vermelho-Amarelo, bem desenvolvidos devido à alta atividade de argila, o que facilita a interação com nutrientes e água. Algumas áreas ainda apresentam Cambissolo, Gleissolo e Nitossolo (UFV et al., 2010).



Figura 4 - Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Santana

Fonte: Autor (2023).

Em termos de vegetação, observa-se que a região se encontra em uma área de transição entre os biomas da Mata Atlântica e Cerrado (Figura 5). A Mata Atlântica prevalece em zonas com clima subtropical úmido com inverno seco e verão temperado (Cwa), enquanto o Cerrado domina as áreas com clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente (Cwb) (Figuras 3 e 5).



Figura 5 - Distribuição dos biomas ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Santana

Fonte: Autor (2023).

5.2. MATERIAIS

Utilizamos os seguintes materiais na pesquisa:

- Softwares ArcGIS 10.8.1, Global Mapper 20, PCI Geomática 2016, RockWorks 16, Hand Model v1.0 e Corel Draw 2019;
- Modelo digital de elevação de 30m (1 arc second) da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), extraído da plataforma digital United States Geological Survey (http://earthexplorer.usgs.gov/) (USGS, 2023);
- Modelo digital de elevação de 30 m reamostrado para 12,5 m, do radar ALOS PALSAR-FBS, extraído da plataforma online Alaska Satellite Facility (<u>https://asf.alaska.edu/</u>);
- Shapefile de Geologia com escala de 1:1.000.000, disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (Silva et al., 2020) (https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21828);
- Shapefile da drenagem com escala 1:100.000 e 1:50.000 disponibilizados pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2014), eferentes à base hidrográfica Ottocodificada da bacia do rio Grande, adquiridos junto ao Catálogo de Metadados da ANA (https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home);

- Shapefile das classes de solos na escala de 1:650.000 (UFV et al., 2010), disponibilizado na plataforma do Departamento de Solos Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa (<u>https://dps.ufv.br/softwares/</u>);
- Shapefile das classes de bioma do estado de Minas Gerais na escala de 1:250.000, disponíveis na plataforma da Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE SISEMA, 2023) (<u>https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</u>);
- Shapefile de localidades relativas a sedes municipais, vilas e aglomerados rurais do estado de Minas Gerais, disponíveis na plataforma da Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE SISEMA, 2023) (<u>https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</u>).
- Shapefile da compartimentação do relevo disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) na escala de 1:250.000 (<u>https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-</u> ambientais/geomorfologia).

5.3. MÉTODOS

A metodologia adotada para este trabalho está estruturada em três etapas. Na primeira etapa, mapeou-se áreas suscetíveis a inundação por meio do modelo Height above the Nearest Drainage (HAND). Na segunda etapa, caracterizou-se morfologicamente o sistema rio-planície de inundação nas áreas de interesse, utilizando modelos tridimensionais perpendiculares e transversais ao rio. A terceira etapa envolveu a aplicação de parâmetros complementares para validar os resultados da modelagem e caracterizar os setores adjacentes aos polígonos de alta e baixa suscetibilidade de inundação.

5.3.1 Modelo Height above the Nearest Drainage (HAND)

O modelo HAND utiliza a combinação de três variáveis: relevo, altitude e distância vertical à drenagem mais próxima, fornecidas pelo modelo normalizado de terreno HAND (Rennó et al., 2008) (Figura 6). Após as três etapas iniciais para obtenção dessas variáveis, uma quarta etapa é realizada para integrá-las em ambiente SIG. Nesta etapa, são atribuídos pesos conforme um critério de classificação que indica a predisposição ou potencialidade para inundações. O resultado final associa-se ao zoneamento da suscetibilidade de inundações, baseado

no acúmulo de diferentes classes de suscetibilidades inerentes às variáveis obtidas. Figura 6 - Fluxograma das etapas de execução, classificação e zoneamento da suscetibilidade a inundações.



Fonte: Conceição e Simões (2021)

5.3.1.1 Classificação dos padrões de relevo

Para o mapeamento das formas de relevo, a base de dados geoespaciais de compartimentação do relevo foi adquirida do IBGE (2023), a partir do táxon de maior detalhe relativo às unidades geomorfológicas. Posteriormente, toda a base de dados em *shapefile* foi inserida no ArcGIS, onde foi atribudo peso 3 para áreas com alta predisposição, peso 2 para média e peso 1 para áreas com baixa suscetibilidade.

Foram identificadas 4 unidades de relevo na bacia: planícies fluviais, terraços fluviais, patamares e planaltos. Devido à sua proximidade aos canais de drenagem, as planícies e terraços fluviais receberam peso 3 devido à alta suscetibilidade a inundações. Estes compartimentos funcionam como áreas naturais de escoamento das águas do canal principal durante intensas chuvas (Tabela 1).

Com relação aos relevos em patamares, foi atribuído peso 2, uma vez que são compartimentos que apresentam variações na permeabilidade do solo e na

vegetação, influenciando a capacidade de absorção e escoamento das águas. Esta unidade reflete uma suscetibilidade moderada a inundações, caracterizada por características intermediárias que incluem tanto zonas de maior elevação quanto áreas situadas em níveis altimétricos inferiores.

Padrões de Relevo	Código	Suscetibilidade	Peso
Planícies fluviais	R1A	Alta	3
Terraços fluviais	R1b2	Alta	3
Patamares	R2b5	Média	2
Planaltos	R2b3	Baixa	1

Tabela 1: Classificação de suscetibilidade a inundação dos padrões de relevo

Fonte: autor (2024)

Os planaltos receberam peso 1 devido à sua caracterização por maior declividade natural e solos mais permeáveis, favorecendo o escoamento rápido das águas para áreas inferiores e reduzindo significativamente o risco de inundação.

5.3.1.2 Classificação da altitude pela declividade

A altitude é uma variável determinante na identificação da suscetibilidade à inundação. Neste trabalho, foi classificada com base na declividade encontrada para evitar possíveis distorções no mapeamento das áreas mais propensas a inundação, especialmente na região nos planaltos. A altitude normalizada pela declividade revela de maneira mais eficaz as áreas em níveis altimétricos superiores, especialmente aquelas com amplas planícies associadas, onde o comportamento do volume d'água não seria adequadamente caracterizado por uma simples classificação altimétrica.

Além disso, a declividade do terreno é uma variável importante para a suscetibilidade a inundações devido à sua influência direta na velocidade de escoamento das águas pluviais. Terrenos com baixa declividade tendem a acumular água, aumentando o risco de inundação, enquanto áreas com alta declividade possibilitam um escoamento mais rápido, reduzindo esse risco. A topografia também influencia a direção e a concentração do fluxo de água, afetando a drenagem natural do solo (Santos et al., 2018).

Os dados de declividade foram calculados utilizando a ferramenta "slope" do ArcGIS e classificados conforme os critérios estabelecidos pela Embrapa (2013).

Atribuiu-se peso 3 às declividades planas e suave onduladas devido à alta propensão a inundações, peso 2 às áreas com declividades onduladas e fortemente onduladas, e peso 1 às montanhosas e escarpadas (Tabela 2).

Classes de Declividade	%	Suscetibilidade	Peso
Plana	0 – 3	Alta	3
Suave ondulada	3 – 8	Alta	3
Ondulada	8 – 20	Média	2
Fortemente ondulada	20 – 45	Média	2
Montanhosa	45 – 75	Baixa	1
Escarpada	100	Baixa	1
Fonte: autor (2024)			

Tabela 2: Classificação da altitude pela razão da declividade próxima

5.3.1.3 Classificação da altura do terreno acima da drenagem mais próxima (HAND)

A classificação da altura do terreno acima da drenagem mais próxima foi realizada com o software Hand Model v1.0. Inicialmente, a área da bacia hidrográfica foi extrapolada e o Modelo Digital de Elevação (DEMc) corrigido. Em seguida, o fluxo de drenagem (DFD) foi calculado para cada ponto da grade, considerando suas células vizinhas e a direção do escoamento superficial pela regra de maior declividade. A conexão hidrológica entre os pontos da grade levou em conta a direção do escoamento superficial pela regra de maior declividade. O resultado foi uma grade de pontos com a direção do fluxo de drenagem (DFD), conhecida como *Local Drain Direction* (LDD), e o fluxo acumulado (FA), em inglês *Flow Accumulation* (ACC) (Figura 7A).

A rede de drenagem foi extraída utilizando a grade de direção do fluxo, com base em uma área de contribuição mínima derivada da quantidade de pixels acumulados que cada canal percorre (Figura 7B). Para tanto, definiu-se um limiar de 5000 pixels (*headwater*), relativo ao número de células que a água atravessa até chegar à célula de análise. As células da grade de contribuição com valores iguais ou superiores a esse limiar foram sinalizadas como células de drenagem e extraídas. Por outro lado, limiares inferiores a 5000 pixels, relativas as drenagens de menores extensão, foram desconsideradas na análise e, portanto, não foram extraídas para aplicação do modelo. Limiares inferiores a 5000 pixels, relativos a drenagens de menores cextensão, foram desconsiderados para evitar a inclusão de pequenos canais

não perenes, formados apenas durante precipitações. De acordo com Momo e Nobre (2015), quanto maior o limiar, menos pontos na grade são encontrados e menor é a densidade de drenagem.

Para gerar a topologia HAND, todos os pontos da grade foram calculados e classificados com base nas distâncias verticais relativas ao longo das trajetórias superficiais de fluxo para o curso d'água mais próximo, usando os limiares predefinidos (Figuras 7C e 7D). Em seguida, foi gerada a distância à drenagem mais próxima (HAND) (Figura 7E).

Figura 7: Obtenção do modelo HAND. (A) Cálculo da direção do fluxo e extração da rede de drenagem; (B) Área de contribuição mínima derivada da quantidade de pixels acumulada pela qual cada canal percorre; (C e D) Classificação com base nas distâncias verticais relativas para o curso d'água mais próximo; (E) Classificação da altura do terreno com relação à distância da drenagem mais próxima pelo modelo HAND na bacia do rio Santana com limites extrapolados.



Fonte: RENNÓ et al. (2008).

Por fim, o raster gerado foi reclassificado no ArcGIS em cinco intervalos de suscetibilidade a inundações: 0 a 1 m, 1 a 2 m, 2 a 3 m, 3 a 4 m e superiores a 4 m. Na modelagem HAND, os pesos atribuídos variaram de 1 a 3. As áreas mais baixas em relação à drenagem receberam peso 3, por serem mais suscetíveis a inundações, enquanto as áreas mais altas receberam peso 1 (Tabela 3).

Intervalos de Suscetibilidade	Suscetibilidade	Peso
0 a 1 metro	Alta	3
1 a 2 metros	Alta	3
2 a 3 metros	Média	2
3 a 4 metros	Média	2
> 4 metros	Baixa	1
Γ_{outor} (0004)		

Tabela 3: Classificação dos intervalos de suscetibilidade a inundação

Fonte: autor (2024)

5.3.1.4 Integração das variáveis

Na última etapa, as três variáveis reclassificadas foram cruzadas utilizando a função de sobreposição ponderada "*Weighted Overlay*" do ArcGIS 10.8.1. Foram definidas classes e valores de influência, representando a importância de cada classe dentro da camada. Em seguida, foram atribuídos pesos refletindo a importância de cada variável na análise, totalizando 100% (Figura 8).



Figura 8: Metodologia de integração das variáveis usando Weigted Overlay.

Fonte: Autor (2024).

Foi atribuído um peso menor à categoria padrão de relevo (20%) devido à menor escala de detalhe dessa base de dados em relação às demais. Por outro lado, a classificação HAND, resultante de um processamento mais preciso, recebeu o maior valor de influência entre as variáveis (45%). A combinação das camadas, somando as pontuações de cada célula raster, resultou em um mapa que representa a combinação ponderada das variáveis de suscetibilidade à inundação.

5.3.2. Caracterização morfológica do sistema rio-planície inundação

A partir das áreas afetadas pelos cenários de inundação, a morfologia do sistema planície de inundação foi caracterizada por modelos tridimensionais perpendiculares e transversais ao rio. Esse procedimento foi fundamental para entender como os processos fluviais atuam nas áreas mapeadas. Para isso, utilizaram-se imagens de radar da missão SRTM. Com o software Global Mapper Pro 23, a ferramenta "path profile" foi empregada para criar uma rota nas adjacências do sistema planície de inundação a partir de uma determinada largura (Figura 9A). Em seguida, preencheram-se os valores referentes à amostragem de um número fixo de localizações regularmente espaçadas, ou seja, a quantidade de perfis transversais ao vale na rota criada anteriormente (Figuras 9B e 9C).

Figura 9: Exemplo relativo a trecho do rio São Francisco. (A) Criação da rota com 5000 metros de largura; (B) criação de 1500 perfis ao longo da amostragem perpendicular; (B e C) amostragem de um número fixo de localizações regularmente espaçadas (1500 perfis na rota)



Fonte: Rubira (2022)

Com o auxílio do visualizador 3D, a morfologia do canal foi analisada a partir de uma perspectiva tridimensional e perpendicular ao rio, conforme proposto por Rubira (2022) e Melo e Rubira (2023) (Figura 10).

Figura 10: Exemplo relativo a trecho do rio São Francisco. Na imagem é possível observar: a transição de canal difuso/ilha fluvial para um trecho com canal concentrado e único; a morfologia das margens do canal; a planície de inundação e os trechos não alagados compostos por morros residuais elevados



Fonte: Rubira (2022)

5.3.3 Parâmetros complementares

A terceira etapa envolveu a aplicação de parâmetros complementares para validar os resultados da modelagem e caracterizar os setores adjacentes aos polígonos de alta e baixa suscetibilidade de inundação. Para isso, foram considerados parâmetros hidrológicos, estruturais, morfológicos e antrópicos.

5.3.3.1 Hierarquia Fluvial, densidade de drenagem e hidrográfica

A proposta de Strahler (1952) foi utilizada para classificar a hierarquia fluvial e analisar a capacidade das nascentes. A hierarquia fluvial foi calculada no software ArcGIS 10.8.1, a partir da extração da rede de drenagem derivada do MDE (USGS, 2023). Para isso, foram empregadas a ferramenta "*Hydrology*" e as funções "*Fill*" para preencher valores espúrios no MDE, "*Flow Direction*" para determinar a direção do fluxo hídrico, "*Flow Accumulation*" para modelar a acumulação do fluxo e "*Stream Order*" para categorizar a hierarquia fluvial.

Para avaliar as relações entre a rede de drenagem e o grau de dissecação do relevo, foram desenvolvidos os índices de densidade de drenagem (Dd) e densidade hidrográfica (Dh) conforme as metodologias de Horton (1945) e Christofoletti (1969), respectivamente (Tabela 4). Esses índices revelam como a geologia local influencia a concentração dos rios, a formação de gradientes fluviais, abastecimento subterrâneo e na distribuição da precipitação e velocidade do escoamento superficial na bacia, e a distribuição da precipitação e velocidade do escoamento superficial na bacia, abrangendo vales, interflúvios internos e o canal principal.

Parâmetro	Equação	Descrição / Objetivos / Valores	Variáveis
<i>Dh – densidade hidrográfica</i> (Christofoletti, 1969)	$Dh = \frac{n}{A}$	Fornece informações sobre a dissecação do relevo e a influência da geologia local na concentração dos rios: (i) baixa (< 3), (ii) média (3 - 7), (iii) alta	Dh = densidade hidrográfica canais/km ² =
		(7 - 15) e (iv) muito alta (> 15)	densidade de drenagem em km/km²
<i>Dd – densidade de drenagem</i> (Horton, 1945)	$Dd = \frac{\sum Lti}{A}$	Caracteriza a distribuição de água pelos vales, interflúvios internos e canal principal: (i) muito baixa (< 0,5); (ii) baixa (0,5 - 1,5); (iii) média (1,5 - 2,5); (iv) alta (2,5 - 3,5); (v) muito alta (> 3,5)	n = é o númerototal de canaisA = área dabacia em km2Lti =comprimentototal doscanais em km

Tabela 4: Parâmetros hidrológicos complementares

A densidade de drenagem e a densidade hidrográfica foram calculadas utilizando o *software* ArcGIS 10.8 e os dados cartográficos fornecidos pela ANA (2014). A ferramenta "*density line*" foi utilizada para gerar a densidade de drenagem, enquanto a densidade hidrográfica foi calculada através da ferramenta "*kernel density*".

5.3.3.2 Lineamentos estruturais

No ArcGIS 10.8.1, aplicamos diferentes azimutes de iluminação (360°, 315°, 90° e 45°) no MDE para criar quatro "*hillshades*". Posteriormente, as imagens foram importadas para o *software* PCI Geomática 2016, onde os lineamentos foram extraídos usando a ferramenta "*LineExtraction*" do menu "*Tools* > *Algorithm Librarian*". Os lineamentos passaram por revisão e validação no ArcGIS 10.8 para remover duplicações, não-lineamentos e erros. Em seguida, calculou-se a densidade de lineamentos estruturais da bacia utilizando a ferramenta "*kernel density*", e os resultados foram classificados em 5 classes com base no método de quantil. Por fim, as coordenadas geográficas das extremidades dos lineamentos foram utilizadas para desenvolver o diagrama de roseta no *software* RockWorks16, com as ferramentas "*Rose Diagram*", "*From Endpoints*" e "*Process*", para determinar as orientações e frequências preferenciais dos lineamentos estruturais da bacia do rio Santana.

5.3.3.3 Fatores de assimetria de drenagem

O fator de simetria topográfica transversa (FSTT) e o Fator de assimetria da bacia de drenagem (FABD) são utilizados para avaliar os efeitos do basculamento na migração do canal principal da bacia (Hare; Gardner, 1985; Cox, 1994).

Parâmetro	Equação	Variáveis	Descrição / Objetivo / Valores	Referências
Fator de assimetria de bacia de drenagem	$Af = 100 \frac{Ar}{At}$	<i>Ar</i> = área direita da bacia em km² <i>At</i> = área total da bacia em km²	Indica assimetria associada a movimentos tectônicos: valores próximos a 50 revelam pouco ou nenhum basculamento; > 50 indica inclinação tectônica para a direita; e < 50 indica inclinação tectônica para a esquerda	Hare e Gardner (1985)
Fator de simetria topográfica transversa	$T = \frac{Da}{Dd}$	<i>Da</i> = distância do eixo médio da bacia ao canal principal em km. <i>Dd</i> = distância do eixo médio ao divisor de águas mais próximo do canal principal em km	Avalia a migração lateral do canal principal em relação ao eixo médio da bacia e estabelece associações com contatos litológicos, falhas e/ou blocos basculados. Valores próximos a 0 indicam simetria nos trechos em relação ao eixo médio, enquanto próximos de 1,0 indicam maior assimetria dos trechos	Cox (1994)

Tabela 5: Fator de simetria topográfica transversa (FSTT) e o Fator de assimetria c	la bacia
de drenagem (FABD)	

Aplicamos o FABD e FSTT no ArcGis 10.8.1 a partir de sete vetores: (i) limite da área da bacia hidrográfica; (ii) limite da área direita da bacia; (iii) rio principal; (iv) linhas transversais entre interflúvios adjacentes; (v) eixo médio das linhas transversais entre os interflúvios; (vi) linhas entre o eixo médio da bacia e o canal principal (Da); e (vii) linhas entre o eixo médio da bacia e divisor de águas mais próximo do canal principal (Dd). Calculamos as distâncias para cada trecho segmentado usando a função "Calculate Geometry" no ArcGIS 10.8.1. Por fim, exportamos os valores de distância e de área das tabelas de atributos para uma planilha no Excel, onde realizamos os cálculos das equações (Tabela 5).

5.3.3.4 Concentração de rugosidade e perfis topográficos

Para avaliar a distribuição e os padrões de rugosidade da bacia, utilizamos o índice de concentração de rugosidade local (Icr), que quantificou, classificou e espacializou esses padrões. A validação do índice seguiu a metodologia proposta por Sampaio e Augustin (2014). O Icr varia de valores próximos a zero, indicando áreas predominantemente planas com elevada dimensão interfluvial e baixo entalhe vertical, a valores próximos ao infinito, caracterizando áreas com relevo altamente acidentado, baixa dimensão interfluvial e alto entalhe vertical. Os perfis topográficos transversais aos vales fluviais foram elaborados no *software* Global Mapper 23 para apoiar a análise da variação das rugosidades topográficas obtidas pelo Icr.

5.3.3.5 Uso e cobertura da terra

O mapa de uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Santana, MG, foi elaborado com os dados da coleção 8 do MapBiomas do ano de 2022. O processo incluiu a extração e análise de imagens do satélite Landsat 8, com resolução de 30 metros, classificadas para identificar variados tipos de cobertura e uso do solo, como áreas urbanas, agrícolas, florestais e lagos, utilizando técnicas de processamento digital de imagens e classificação supervisionada.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO DA BACIA DO RIO SANTANA

A classificação dos padrões de relevo destaca as características topográficas da bacia hidrográfica, com ênfase nas áreas de planície ao longo do canal principal, identificadas como mais suscetíveis à inundação devido ao relevo plano (Figura 11). Isso ocorre pela capacidade reduzida de escoamento superficial, facilitando o acúmulo de água durante chuvas intensas e aumentando o risco de inundações.

Embora os relevos em patamares sejam menos propensos a acumular água comparados às planícies, também podem ser afetados por inundações durante eventos de precipitação intensa e prolongada, especialmente em áreas baixas próximas à confluência de tributários volumosos com o canal fluvial e o reservatório da UHE de Furnas. Além disso, alguns cursos d'água nos planaltos, caracterizados frequentemente por regiões montanhosas e colinas íngremes, são suscetíveis a inundações rápidas devido ao escoamento acelerado (Figura 11).





A classificação da altitude pela declividade revelou a variação de elevação na Bacia Hidrográfica do Rio Santana (Figura 12). Nas áreas planas (0-3%), a proximidade dos canais fluviais contribui para alta suscetibilidade à inundação devido à baixa capacidade de escoamento superficial durante chuvas intensas, aumentando o risco de danos em áreas residenciais e agrícolas. Nas áreas suaves onduladas (3-8%), há uma suscetibilidade considerável à inundação, sendo menor que nas áreas planas devido à ligeira inclinação que permite um escoamento um pouco mais rápido da água da chuva, porém insuficiente para evitar o acúmulo.



Figura 12: Declividade do relevo da bacia hidrográfica do rio Santana

As áreas planas estão associadas a três setores principais: (i) adjacências do reservatório da UHE de Furnas; (ii) planícies fluviais ao longo do canal principal e tributários mais volumosos; (iii) vales fluviais nas áreas de transição entre planaltos e patamares rebaixados, principalmente ao sul da bacia (Figura 12). O reservatório funciona como regulador do fluxo hídrico, recebendo a maior parte do escoamento superficial e reduzindo a probabilidade inicial de inundação nas áreas próximas. No entanto, é fundamental gerenciar adequadamente o nível da água para evitar transbordamentos durante eventos extremos. Tanto as planícies de inundação ao

longo do canal principal e seus tributários quanto os vales fluviais nas áreas de transição entre planaltos e patamares rebaixados são frequentemente afetados por eventos de precipitação intensa, devido à proximidade com rios e à baixa inclinação do terreno, o que os torna altamente suscetíveis. Durante épocas de chuvas excepcionais, o volume de escoamento superficial aumenta significativamente, exacerbando ainda mais a vulnerabilidade dessas áreas.

O mapa HAND foi usado para definir os limiares de altura dos terrenos e identificar as áreas mais propensas a inundação com base em cotas prédeterminadas, especialmente onde a altura em relação ao canal fluvial é baixa e crítica. Áreas entre 0 a 2 metros são altamente suscetíveis, podendo inundar com eventos de precipitação moderada, afetando pessoas e estabelecimentos próximos aos canais fluviais. Entre 2 a 4 metros, a suscetibilidade é média e sujeita a eventos intensos em curto prazo. Acima de 4 metros, a suscetibilidade é baixa, sendo raramente inundadas, exceto por eventos extremos com transbordamentos excepcionais (Figura 13).



Figura 13: HAND classificado de acordo com a suscetibilidade a inundações

Os resultados da álgebra de mapas, que englobam variáveis de suscetibilidade do relevo, da razão da altitude pela declividade e da altura do terreno acima da drenagem mais próxima (HAND), foram utilizados para destacar a propensão à inundação na bacia hidrográfica do rio Santana. A classificação final revela três classes de suscetibilidade (Figura 14).



Figura 14: Mapa de suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Santana

Fonte: Autor (2024).

6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TERRENOS NOS AGLOMERADOS SUSCETÍVEIS

O mapeamento da suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Santana revelou localidades potencialmente vulneráveis, classificadas em setores de alta a baixa propensão ao fenômeno. Nesse contexto, incluem-se as sedes municipais de Camacho e Candeias, a vila urbana de Baiões e os aglomerados rurais de Rodrigues e Curral.

A análise detalhada mostrou que Camacho e Candeias possuem alta suscetibilidade à inundação em terrenos urbanos adjacentes à rede de drenagem. As demais localidades possuem suas malhas viárias e residências fora das cotas de 0 a 4 metros determinadas pelo HAND, situando-se apenas em cotas acima de 4 metros e apresentando, portanto, baixa suscetibilidade às inundações.

Com base nesses resultados, a análise se concentrou em caracterizar a morfologia do sistema rio-planície de inundação apenas dos munícipios com alta suscetibilidade à inundação. Na região planáltica de Camacho, grande parte da sede municipal está localizada sobre terrenos com alta e média suscetibilidade à inundação (Figuras 15A e 15B). O relevo é caracterizado por morros elevados, com alturas de até 60 metros em relação à drenagem mais próxima (Figura 15C). Os perfis perpendiculares e transversais ao vale fluvial, criados a partir de uma rota com 1000 metros de largura e 200 perfis ao longo da amostragem perpendicular, evidenciam a influência da topografia na acumulação dos fluxos hídricos em 2.35 km de distância (Figura 15D).

Figura 15: Caracterização morfológica do sistema rio-planície de inundação adjacente à sede municipal de Camacho. (A) Área urbana de Camacho no trecho amostrado; (B) Limite da área urbana sobreposto à altura do terreno acima da drenagem mais próxima (HAND); (C) Blocodiagrama do setor amostrado; (D) Modelo tridimensional obtido a partir da criação de perfis topográficos perpendiculares e transversais ao vale fluvial.



No município de Candeias, a situação se repete e parte da sede municipal também está localizada sobre terrenos com alta e média suscetibilidade à inundação (Figuras 16A e 16B). O relevo é caracterizado por morros elevados, com alturas de mais de 100 metros em relação à drenagem mais próxima, em área que marca a transição entre as regiões mais elevadas dos planaltos para os patamares situados em níveis altimétricos inferiores (Figura 16C). Os perfis perpendiculares e transversais ao vale fluvial, criados a partir de uma rota com 20000 metros de largura e 300 perfis ao longo da amostragem perpendicular, evidenciam a influência da topografia na acumulação dos fluxos hídricos em 2.35 km de distância (Figura 16D).

Figura 16: Caracterização morfológica do sistema rio-planície de inundação adjacente à sede municipal de Camacho. (A) Área urbana de Candeias no trecho amostrado; (B) Limite da área urbana sobreposto à altura do terreno acima da drenagem mais próxima (HAND); (C) Blocodiagrama do setor amostrado; (D) Modelo tridimensional obtido a partir da criação de perfis topográficos perpendiculares e transversais ao vale fluvial.



Esses cenários, caracterizados por regiões montanhosas e colinas íngremes são suscetíveis a inundações rápidas devido ao escoamento acelerado. Embora os relevos em patamares sejam menos propensos a acumular água comparados às planícies, também podem ser afetados por inundações durante eventos de precipitação intensa e prolongada, especialmente em áreas baixas próximas à confluência de tributários.

6.3 ANÁLISE DE PARÂMETROS DA REDE DE DRENAGEM

A hierarquia fluvial confirma o padrão dendrítico da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Santana, composta por 3.118 canais de até 5ª ordem, sendo, 1.861 são de 1ª ordem, 774 de 2ª ordem, 317 de 3ª ordem, 125 de 4ª ordem e 41 de 5ª ordem (Figura 17A).

A análise da densidade hidrográfica na bacia revelou um valor de 1,00 canais/km², indicando baixa propensão à formação de novos cursos d'água. A distribuição espacial dessas concentrações mostrou uma estreita relação com variações geomorfológicas e litológicas (Figuras 2 e 17B). As áreas com valores mais elevados associaram-se a maiores declividades em setores com rochas de maior dureza e menor fraturamento, como o ortopiroxênio-hornblenda gnaisse (A34cn). Também foi observado um aumento na densidade hidrográfica nos afloramentos de metadiamictitos e ardósias (Np3sb1).

Também foi observado um aumento na densidade hidrográfica em contatos litológicos entre o ortopiroxênio-hornblenda gnaisse (A34cn), biotitas gnaisses (A31ip e A23fd), e metapelitos do Grupo Bambuí (Np3sla) (Figuras 2 e 17B). Esses contatos representam transições entre diferentes tipos de rochas com propriedades hidrogeológicas distintas, frequentemente associadas a falhas e fraturas, que criam zonas preferenciais de escoamento da água e influenciam a densidade de drenagem.

Em contraste, as áreas com metapelitos do Grupo Bambuí revelaram as menores concentrações de densidade hidrográfica na região, destacando a influência da litologia sobre o padrão hídrico superficial (Figuras 2 e 17B). A foliação dos metapelitos, resultante da orientação preferencial de minerais planares durante o metamorfismo, aliada a processos deformacionais, pode ter impactado a produção de fraturas na rocha, facilitando a infiltração da água e o abastecimento dos canais subterrâneos.



Figura 17: A) hierarquia fluvial; B) densidade de drenagem; C) densidade hidrográfica

A densidade de drenagem calculada para toda a bacia revelou uma média de 0,49 km/km². Os valores mais densos concentraram-se ao longo do rio Santana e em setores associados a tributários volumosos e de maiores ordens. Esses resultados apontam áreas com alta transferência de sedimentos, potencial erosivo e eficiência no escoamento pluvial durante picos de cheias (Figura 17C).

6.4 ANÁLISE DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS

A densidade de lineamentos estruturais (Figuras 18A e 18B) revela uma concentração mais pronunciada nos setores norte e leste da bacia, associada aos afloramentos de Gnaisses mesoarqueanos (A34ip e A34cn) e às zonas contíguas ao alto e médio curso do rio Santana. Variações de menor magnitude são também identificadas nos setores oeste e sul da bacia, correlacionadas aos afloramentos de

Gnaisses (A23fd), Quartzitos (Aqt), Metadiamictitos e ardósias (NP3sb1). Por outro lado, as áreas com menor densidade de lineamentos, especialmente a oeste e ao sul da bacia, estão associadas a substratos compostos predominantemente por Metapelitos do Grupo Bambuí (Np3sla) e sedimentos clásticos (Qa), que constituem o leito e as planícies aluviais quaternárias do rio Santana (Qa). A distribuição espacial identificada sugere uma influência significativa dessas feições estruturais na configuração morfológica da bacia, contribuindo para a heterogeneidade observada nos padrões de drenagem e na morfologia fluvial local (Figuras 18A e 18B).



Figura 18: (A) Lineamentos estruturais. (B) densidade de lineamentos estruturais.

O diagrama de roseta revela a orientação preferencial destes lineamentos na área, que é de 135° NW / 315° SE e 270° W / 315° E (Figura 19). A associação dessas orientações com os lineamentos sugere que a distribuição preferencial de sedimentos ao longo do canal principal é, em parte, governada por essas feições estruturais. Isso desempenha um papel determinante na configuração atual da paisagem, influenciando a erosão diferencial e a distribuição de sedimentos no curso do rio.



Figura 19: Diagrama de roseta evidenciando a direção preferencial e frequência dos

A análise dos índices FABD e FSTT revela uma complexa dinâmica de deslocamento lateral do canal principal ao longo da bacia, indicando assimetria devido ao basculamento tectônico. O índice FABD destaca um possível basculamento tectônico na margem direita ao norte da bacia, com um valor significativo de 30,59% (Figura 20). Esses dados explicam a disparidade na extensão dos tributários ao norte e ao sul do canal, resultando em reajustes erosivos na área que ampliaram as planícies fluviais ao sul da bacia, aumentando sua suscetibilidade à inundação (Figuras 13 e 14).



Os resultados do índice FSTT segmentaram as áreas mais impactadas e confirmaram a tendência média de deslocamento do canal principal para o norte da bacia, conforme identificado pelo FABD (Figura 21).



Figura 21: Fator de simetria topográfica transversa.

6.5 ANÁLISE DE PARÂMETROS MORFOLÓGICOS

O índice de concentração de rugosidade (Icr) foi aplicado para identificar os setores da bacia com maior rugosidade do terreno. Áreas com concentrações elevadas correlacionaram-se positivamente com a presença de lineamentos estruturais, maiores declividades e altitudes, especialmente nos ambientes de variações de Gnaisses (A34cn, A34ip e A23fd), indicando intensa dissecação fluvial na região (Figuras 2 e 22). Nos setores onde ocorrem Quartzitos (Aqt), Metadiamictitos e ardósias (Np3sb1), também se observou aumento na rugosidade. Em contraste, nos setores a jusante, próximos ao reservatório de Furnas, encontraram-se valores médios a muito baixos de rugosidade, especialmente onde há baixas densidades de lineamentos estruturais associadas aos Metapelitos do Grupo Bambuí (NP3sla).

Figura 22: índice de concentração de rugosidade, declividade com classes montanhosas e escarpadas agrupadas e cortes esquemáticos transversais entre os interflúvios em relação ao canal principal (A, B, C, D, E).



O perfil topográfico transversal entre os interflúvios no alto curso do rio (transecto A) revela altitudes elevadas, encostas íngremes e um curso d'água encaixado no leito rochoso composto por ortopiroxênio-hornblenda gnaisse (A34cn), intensificando os processos de intemperismo e erosão. Nos transectos B, C e D, há uma estreita correlação com os valores do FSTT, indicando influência do basculamento tectônico na bacia. Nessas áreas, ocorre um deslocamento significativo para a margem direita, onde o leito rochoso é dominado por biotita gnaisse (A34ip) e sedimentos clásticos quaternários (Qa), com menor resistência à migração lateral em zonas altamente suscetíveis à inundação. No transecto E, no baixo curso, observa-se uma simetria restaurada do canal principal em relação aos interflúvios adjacentes, influenciada pelo reservatório de Furnas. Estudos indicam que reservatórios podem modular o fluxo fluvial e influenciar a morfologia do canal (Petts, 1979; Graf, 2006; Gregory, 2006).

6.6 PARÂMETRO ANTRÓPICO

A suscetibilidade aos processos hidrológicos, como a inundação, é intensificada pelo tipo de uso e cobertura da terra, interferindo na permeabilidade dos solos e aumentando o escoamento superficial. Na bacia do rio Santa, áreas planas próximas aos rios, comumente usadas para agricultura e pastagem, são altamente suscetíveis à inundação devido à baixa capacidade de infiltração pela supressão da mata ciliar (Figura 23). Nas áreas urbanizadas, a impermeabilização do solo amplia o escoamento superficial e reduz a permeabilidade, exacerbando o problema. A falta de infraestrutura de drenagem adequada pode agravar esses eventos, resultando em inundações rápidas durante picos de chuvas severas.

Portanto, a preservação das formações florestais e savânicas da bacia desempenha um papel decisivo na redução dos riscos de inundação, mantendo a capacidade de infiltração do solo, regulando o ciclo hidrológico, e prevenindo erosões e inundações. Nas áreas destinadas à silvicultura e pastagem, a adoção de práticas de manejo sustentável é fundamental para mitigar os impactos negativos no escoamento superficial e diminuir o risco de erosão e inundações (Figura 23).



Figura 23 - Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Santana

Fonte: Autor (2024).

7. CONCLUSÕES

A importância de abordagens integradas na avaliação da suscetibilidade à inundação foi evidenciada por esta pesquisa, que empregou diferentes enfoques, fontes de dados e ferramentas de geoprocessamento para proporcionar uma compreensão detalhada e precisa.

A modelagem HAND revelou-se uma ferramenta eficaz para a identificação de áreas suscetíveis à inundação, permitindo zoneamentos precisos. Os polígonos da modelagem hidrológica e a caracterização morfológica do sistema rio-planície por meio de modelos tridimensionais fornecem subsídios para futuras ações relacionadas ao gerenciamento de áreas de risco, ao planejamento territorial e a adoção de estratégias específicas de mitigação.

A análise detalhada revelou alta suscetibilidade à inundação em terrenos urbanos próximos à rede de drenagem das sedes municipais de Camacho e Candeias, enquanto Baiões, Rodrigues e Curral, localizados em áreas com cotas acima de 4 metros determinadas pelo HAND, apresentaram baixa suscetibilidade às inundações.

A correlação dos parâmetros morfométricos do relevo com as características geológicas enriqueceu a compreensão dos processos evolutivos na região do rio Santana, proporcionando uma visão abrangente da dinâmica fluvial local em um contexto evolutivo. Essas descobertas não apenas aprimoram o entendimento da morfodinâmica fluvial, mas também estabelecem uma base sólida para investigações futuras sobre a evolução da paisagem e o impacto das atividades humanas na bacia.

A integração de parâmetros antropogênicos, como o uso da terra, proporcionou insights importantes sobre os efeitos da intensificação da suscetibilidade à inundação, especialmente em áreas planas utilizadas para agricultura e pastagem. Assim, destaca-se a necessidade de preservação das formações florestais e savânicas da bacia, que desempenham um papel decisivo na redução dos riscos de inundação ao regular o ciclo hidrológico e prevenir erosões e inundações.

Conclui-se que a gestão da suscetibilidade à inundação e a implementação de práticas sustentáveis são fundamentais para proteger as comunidades locais e o meio ambiente de potenciais tragédias. A integração dos resultados reforça a importância de um desenvolvimento territorial equilibrado e resiliente, que leve em consideração as particularidades hidrológicas e topográficas da bacia hidrográfica.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Relatório Final - Produto Parcial PP07: plano integrado de recursos hídricos da Bacia do Rio Grande**. Brasília: Agência Nacional de Águas/Ministério do Meio Ambiente. p. 310, 2017.

ALBUQUERQUE, M.G.; CAMPOS, M.N.; MOREAU, M.S. Caracterização ambiental e socioeconômica da bacia hidrográfica do Rio Santana. **Revista Brasileira de Geografia Física,** v.4, 2011.

ALVARES, C. C.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift,** v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ASSOCIAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DO LAGO DE FURNAS (ALAGO). **PDRH FURNAS - Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Entorno do Lago de Furnas**: relatório parcial 1: resumo executivo. Alfenas: ALAGO, 2013. Disponível em:

<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/planos-diretores/bacia-hidrografica-do-rio grande/ upgrhgd3en torno-do-reservatorio-de-furnas/8265-pdrhfurnasresumo executivo2013>. Acesso em: 15 mai 2024.

BATHRELLOS, G. D.; KARYMBALIS, E.; SKILODIMOU, H.D.; GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; BALTAS, E. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 4, p. 319, 2016.

BELLETTINI, A.; HOELZEL, M. **Avaliação Técnica Pós Desastre:** Cruzeiro do Sul, RS. Serviço Geológico do Brasil: Porto Alegre, 2024a.

BELLETTINI, A.; HOELZEL, M. **Avaliação Técnica Pós Desastre:** Encantado, RS. Serviço Geológico do Brasil: Porto Alegre, 2024b.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres.

BRASIL. **Lei nº 9.433/1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (...). Brasília, 8 de janeiro de 1997. Disponível em: <u>https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm</u>. Acesso em: 29 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.984/2000.** Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Brasília, 17 de julho de 2000. Disponível em: <u>https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984.htm</u>. Acesso em: 29 jun. 2024.

CALDANA, N.F.S. Ocorrência de alagamentos, enxurradas e inundações e a variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Iguaçu. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 23, p. 343-355, 2018.

CAMPOS, H. L. **Gestão de bacia hidrográfica: pressupostos básicos**. In:SÁ, A. J.; CORRÊA, A. C. B. Regionalização e analise regional: perspectivas e abordagens contemporâneas. Recife: Editora Universitária, p. 91-111, 2006

CARVALHO, A.T.F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia,** v. 1, n.42, p. 140-161, 2020.

CEPED-RS/UFRGS. **Mapeamento de Vulnerabilidade à Áreas Susceptíveis à Inundações e Deslizamento em Municípios do Rio Grande do Sul**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres. 2017.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

COLLINS, T. **Disaster risk for floods**: 1980 - 2000. 2004. United Nations University, Tokyo

COSTA, F.H.L. Estudo da suscetibilidade a inundações na bacia hidrográfica do Rio Alcântara (RJ): Subsídios ao desenvolvimento de metodologias para avaliação de enchentes urbanas. 203f. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

COX, R. T. Analysis of drainage and basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. GSA Bulletin, v. 106, n. 5, p. 571-581, 1994.

CPRM; CODEMIG. **Mapa Geológico do Estado da Minas Gerais**. 2020. Escala 1:1.000.000 Disponível em: < <u>https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html</u>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Relatório Técnico de Pesquisa: Área de Interesse para Estudos de Base Geológica e Recursos Minerais. Porto Alegre: CPRM, 2024. Disponível em: <u>https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/24839/1/Relatorio Marques de Souza</u> <u>RS 2024.pdf</u>. Acesso em: 1 jul. 2024.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Relatório Técnico de Pesquisa: Área de Interesse para Estudos de Base Geológica e Recursos Minerais. Porto Alegre: CPRM, 2024. Disponível em: <u>https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/24847/1/relatorio_doutor_ricardo_rs_20</u> 24.pdf. Acesso em: 1 jul. 2024.

CRED. **Emergency Events Database (EMDAT).** 2023. Disponível: <u>https://public.emdat.be/</u>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CURY, M. D.; LADWING, N. I.; MENEGASSO, J. D.; SUTIL, T.; CONTO, D. de. Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação como informação para o planejamento e a gestão territorial em Bacia Hidrográfica. **Caminhos da Geografia**. v. 22, n. 83, p. 160-175, 2021.

DANTAS, C.G.; CANIL, K. Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a inundação na bacia do Aricanduva – SP utilizando o algoritmo descritor de terreno HAND. **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada,** 2017.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B.P; GAYATHRI, K.D. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

FALCONER, R.H., COBBY, D., SMYTH, P., ASTLE, G., DENT, J.; GOLDING, B. Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. **Journal of Flood Risk Management**, v.2, n.3, p. 198-208, 2009

FARIAS, A.; MENDONÇA, F.A. Modelagem e mapeamento de áreas de perigo de inundação urbana na cidade de Francisco Beltrão (Brasil). **Physis Terrae-Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente,** v.1, n.1, p. 73-91, 2019.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem Complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLENTJE, P. N.; MINER, A.; WHITT, G.; FELL, R. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. 2008.

FLORA, B.D. Simulação de inundações através do modelo HAND. Estudo de caso: Zona urbana de Alegrete-RS. 98p. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.

GONTIJO, N. T. Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica. 2007. 156p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Blelo Horizonte, 2007.

GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. **Geomorphology**, 37th Binghamton Geomorphology Symposium. v. 79, n. 3, p. 336–360, 30 set. 2006

GREGORY, K. J. The human role in changing river channels. **Geomorphology**, 37th Binghamton Geomorphology Symposium. v. 79, n. 3, p. 172–191, 30 set. 2006.

GUIDOLINI, J.F.; OMETTO, J.P.; NERY, T.D.; ARCOVERDE, G.; GIAROLLA, A. Hydro-geomorphological characterization of the Rio Grande Basin, Brazil, using geospatial approach. **Sustainable Water Resources Management,** v.6, p. 93-103, 2020.

HARE, Paul W.; GARDNER, Thomas W. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. **Tectonic geomorphology**, v. 4, p. 75-104, 1985.

HORTON, R. E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, n.3, p. 275-370, 1945.

HU, A.; DEMIR, I. Real-time flood mapping on Client-Side Web Systems using HAND Model. **Hydrology**, v. 8, n.2, 2021.

IBGE. **Shapefile da compartimentação do relevo**. Disponível em: <u>https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia</u>. Acesso em: 2023.

IDE SISEMA.Shapefile das classes de bioma do estado de Minas Gerais na
escala de 1:250.000.Disponível em:
em:
https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis.Acesso em: 2023.

IDE SISEMA. Shapefile de localidades relativas a sedes municipais, vilas e aglomerados rurais do estado de Minas Gerais. Disponível em: <u>https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</u>. Acesso em: 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000 (livro eletrônico): nota técnica explicativa / coordenação Omar Yazbek Bitar. -- São Paulo: IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF. CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2014.

JUNK, W.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E. **The flood pulse concept in river-floodplain systems**. Pages 110-127 in D.P. Dodge, ed. Proceedings of the International Large River Symposium (LARS). Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106, 1989.

KARKANI, A.; EVELPIDOU, N.; TZOUXANIOTI, M.; PETROPOULOS, A.; SANTAGELO, N.; SPYROU, E.; LAKIDI, L.; MAROUKIAN, H. Flash flood susceptibility evaluation in human-affected areas using geomorphological methods - The case of 9th August 2020, Euboea, Greece. **GeoHazards**, v.2, n.4, p.366-382, 2021.

KAUR, H., GUPTA, S., PARKASH, S., THAPA, R., & MANDAL, R. Geospatial modelling of flood susceptibility pattern in a subtropical area of West Bengal, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 9, p. 339, 2017.

KELSCH, M. Hydrometeorological Characteristics of Flash Floods. **Coping With Flash Floods**, p. 181–193, 2018.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Ed.). **Handbuch der klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, p. 1-44, 1936.

LEAL, F.C.B.S.; BARBOSA, I.M.B.R.; AQUINO, J.T. Mapeamento de áreas vulneráveis a inundação com uso do SIG e da análise multicritério: o caso da bacia hidrográfica do rio uma em Pernambuco. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental,** v.9, n.esp, p. 20-40, 2020.

LI, Z.; MOUNT, J.; DEMIR, I. Model Parameter Evaluation and Improvement for Real-Time flood inundation mapping using HAND model: Iowa case study. **Earth AirXiv**, 2020.

LIU, A. Q.; MOONEY, C.; SZETO, K.; THÉRIAULT, J.M.; KOCHTUBAJDA, B.; STEWARTS, R.E.; BOODOO, S.; GOODSON, R.; LI, Y.; POMEROY, J. The June 2013 Alberta Catastrophic Flooding Event: Part 1—Climatological aspects and hydrometeorological features. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 4899-4916, 2016.

MARCHI, L.; BORGA, M.; PRECISO, E.; GAUME, E. Characterization of selected extreme flash floods in Europe and inplications for flood risk management. **Journal of Hydrology**, p. 118-133, 2010.

MARCELINO, E. V.; **Desastres Naturais e Geotecnologias:** Conceitos Básicos. INPE, Santa Maria, 2007.

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. **Mudanças** climáticas e eventos extremos no Brasil. São Paulo: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2010.

MARTH, J.D.; MOURA, N.S.V.; KOESTER, E. Estudo da suscetibilidade à inundação com base em análise geomorfológica, bacia hidrográfica do arroio Santa Isabel, região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista do Instituto Geológico,** v. 37, n.1, p. 13-28, 2016.

McGRATH, H.; BOURGON, J.F.; PROULX-BOURQUE, J.S.; NASTEV, M.; EL EZZ, A.A. A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. **Nat. Hazards,** v. 93, p. 905-920, 2018.

MELO, C. T.; RUBIRA, F. G. Avaliação de metodologia para simulações de inundação e caracterização morfológica de sistema rio-planície de inundação. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 14., 2023, Corumbá. Anais [...]. Corumbá: UFMS, 2023.

MENGUE, V.P.; SCOTTÁ, F.C.; SILVA, T.S.; FARINA, F. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n.1, p. 41-53, 2016.

MIGUEZ, M.; VERÓL, A.; DI GREGORIO, L. T. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. Elsevier Brasil, 2017.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L. De; LAHM, R. A. Utilização do modelo hand no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre / RS . **Revista Brasileira de Cartografia** (2017), nº69/4, Ed. Desastres Naturais e Impactos Ambientais.Pontifícia Univ. [s. l.], 2017.

MOMO, M.R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, D.L.; CUARTAS, L.A.; NOBRE, A.D. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **RBRH**, v.21, n.1, p. 200-208, 2016.

MOREIRA, M.C.; SILVA, D.D.; SILVA, M.P. Atlas hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Grande. **Revista de Engenharia e tecnologia,** v. 6, n.2, p. 47-58, 2014.

MOURA, M.M.; ARAUJO, M.M.F.; CASTRO, T.A.D.; LEANDRO, D. Suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Piratini-RS. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade,** v.6, n.2, p. 17-25, 2019.

MÜLLER, A.; REITER, J.; WEILAND, U. Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach – a case study for Santiago de Chile. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v.11, p. 2107–2123, 2011.

NIED, M.; PARDOWITZ, T.; NISSEN, K.; ULBRICH, U.; HUNDECHA, Y.; MERZ, B. On the relationship between hydro-meteorological patterns and flood types. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 3249-3262, 2014.

NIED, M.; SCHROTER, K.; LUDTKE, S.; NGUYEN, V.D.; MERZ, B. What are the hydro-meteorological controls on flood characteristics? **Journal of Hydrology**, p. 310-326, 15, 2017.

NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C.D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology,** v. 404, n.1, p. 13-29, 2011.

NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; MOMO, M.R.; SEVERO, D.L.; PINHEIRO, A.; NOBRE, C.A. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrolodical Processs**, v.30, n.2, p. 320–333, 2016.

NOGUEIRA, T.P.N. **Mapeamento da suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do Ribeirão da Fábrica, município de Patos de Minas – MG.** 141p. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2017.

OLIVEIRA, G.G. **Modelos para precisão, especialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do Rio Caí, RS**. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Roi Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

PETTS, G. E. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment,** v.3, n.3, p. 329-362, 1979

PINHEIRO, J.G.M. Aplicação do modelo HAND para modelagem de suscetibilidade à inundação nos bairros de ilhéus, sul da Bahia (Brasil). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto,** v. 5, n.1, p. 2-12, 2024.

QUEIROZ, L.J.S.; HOELZEL, M. **Avaliação Técnica Pós-Desastre:** Doutor Ricardo, RS. Serviço Geológico do Brasil: Porto Alegre, 2024a.

QUEIROZ, L.J.S.; HOELZEL, M. Avaliação Técnica Pós Desastre: Marques de

Souza, RS. Serviço Geológico do Brasil: Porto Alegre, 2024b.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, 2008.

RESENDE, L.A. **Estudo temporal e quantitativo de outorgas de domínio da união da Bacia Hidrográfica do Rio Grande na vertente mineira.** 67p. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas. 2023.

ROCHA, P.C. Sistemas rio-planície de inundação: geomorfologia e conectividade hidrodinâmica. **Caderno Prudentino de Geografia**, n. 3, p. 50-67, 2011.

RUBIRA, F. G. Global Mapper aplicado às análises hidrogeomorfológicas. **Curso Introdutório ao software Global Mapper**. Data de realização: 16/11/2022. Slides tutoriais. Universidade Federal de Alfenas, curso de Geografia.

SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, n. 1, 2014.

SANTOS, K. A. Dos. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas de inundação.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goias - Goiânia. [s. l.], 2015.

SEABRA, V.S. Análise da paisagem em apoio aos estudos de favorabilidade à recuperação florestal na bacia hidrográfica do Rio São José. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA FILHO, A.L.; COSTA, V.C. Análise comparativa da modelagem para mapeamento de suscetibilidade à inundação, nas sub-bacias rio da prata do Mendanha e campinho, município do Rio de Janeiro. **Revista Tamoios,** v. 19, n.2, p. 4-23, 2023.

SILVA, F.L.; FUSHITA, A.T.; CUNHA-SANTINO, M.B.; BIANCHINI JUNIOR, I.; VENEZIANI JUNIOR, J.C.T. Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n.3, p. 1626-1653, 2021.

SILVA, M. A.; PINTO, C. P.; PINHEIRO, M. A. P.; MARINHO, M. S.; LOMBELLO, J. C.; PINHO, J. M. M. P.; GOULART, L. E. A.; MAGALHÃES, J. R. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. CPRM, 2020. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <u>https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21828?show=full</u>. Acesso em: 22 fev. 2023.

SIMPLÍCIO, M.N. Evolução da ocupação e da suscetibilidade às inundações na planície do Rio Atibaia em Campinas e Jaguariuna. 96f. 2020. Universidade

Estadual de Campinas, Campinas. 2020.

SOUZA, L.M.; FERNANDES, F.H.S.; NERY, C.V.M.; RIBEIRO, O.A. Caracterização Fluvio-Morfológica e Dinâmica da paisagem da sub-Bacia do Rio Ribeirão Santana – Rio Pardo de Minas/MG. **Revista Monografias Ambientais,** v.14, n.3, p. 3346-3356, mai-ago. 2014.

SPECKHANN, G.A.; CHAFFE, P.L.B.; GOERL, R.F.; ABREU, J.J.; FLORES, J.A.A. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. **Hydrological Sciences Journal**, v.63, n.1, p. 87-100, 2018.

STEVAUX, J.C.; MARTINZ, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. **Geomorphology**, v. 113, p. 230-238, 2009.

STRAHLER, H. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. GSA Bulletin, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952. Disponível em: <u>https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-</u> <u>abstract/63/11/1117/4477/HYPSOMETRIC-AREA-ALTITUDE-ANALYSIS-OF-</u> <u>EROSIONAL</u>. Acesso em: 2 jul. 2024.

SWAIN, K.C.; SINGHA, C.; NAYAK, L. Flood Susceptibility Mapping through the GIS-AHP Technique Using the Cloud. **International Journal of Geo-Information**, v.9, n.12, p.2-23, 2020.

SZABÓ, J.; DÁVID, L.; LÓCZY, D. **Anthropogenic Geomorphology**. Springer Dordrecht, p. Springer, 10 abr. 2010.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D.J.L.; FULLER, B.B.. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, v.20, p.137-157, 2007.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; DO AMARAL, R. **Desastres naturais:** conhecer para prevenir. Instituto geológico, 2009.

TONELLO, K.C. Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das **Pombas, Guanhães, MG. 2005.** 69p. 2005. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TUCCI, C.E.M. Curso de gestão das inundações urbanas. 2005.

TUCCI, C.E.M; BERTONI, J. C. Inundações urbanas na América do Sul. Ed. dos Autores, 2003.

TUCCI, C. E. M. Flood Control and Urban Drainage Management in Brazil. **Waterlines**, v. 20, no. 4, p. 6–8, 2002.

UFV; CETEC-MG; UFLA; FEAM. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais: legenda expandida**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. Escala 1:650.000. UNESCO. **Glossário hidrológico internacional**. 1° ed. Suiça: WMO, 2012. Disponível em: <u>https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862</u>. Acesso em: 29 jun. 2024.

UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Como Construir Cidades Mais Resilientes Um Guia para Gestores Públicos Locais**. Genebra: UNISDR, p. 120, 2012.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR), CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED). **The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019)**. Brussels, Belgium, 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Modelo digital de elevação de 30m (1 arc second) da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Disponível em: <u>http://earthexplorer.usgs.gov/</u>. Acesso em: 2023.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WOLFGANG, K. Flood risk= hazard x exposure x vulnerability. **Flood Defense**, **Science Press**, New York, p. 82-97, 2002.

ZANANDREA, F.; SILVEIRA, A.L.L. Effects of LID Implementation on Hydrological Processes in an Urban Catchment under Consolidation in Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, p. 1-17, 2018

ZHAO, G.; PANG, B. Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. **Science of The Total Environment**, v. 615, p. 1133-1142, 2018.