



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Ministério da Ciência,
Tecnologia e Inovações



JAQUELINE CAROLINO SANTOS

**COMPARAÇÃO ENTRE A ÁREA INUNDÁVEL OBTIDA POR
IMAGENS ÓTICAS DE SATÉLITE E SIMULAÇÕES
REALIZADAS NO HEC-RAS E HAND MODEL:
estudo de caso de uma sub-bacia do Alto Paranapanema**

2023

JAQUELINE CAROLINO SANTOS

**COMPARAÇÃO ENTRE A ÁREA INUNDÁVEL OBTIDA POR IMAGENS ÓTICAS
DE SATÉLITE E SIMULAÇÕES REALIZADAS NO HEC-RAS E HAND MODEL:
estudo de caso de uma sub-bacia do Alto Paranapanema**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE(A) pelo Programa de Pós-Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais. Linha de pesquisa: Desastres associados a eventos extremos, inundações e movimentos de massa.

Orientador: Dr. Javier Tomasella
Coorientadora: Dra. Maria Clara Fava

São José dos Campos 2023

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2023]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Santos, Jaqueline Carolino

Comparação entre a área inundável obtida por imagens óticas de satélite e simulações realizadas no HEC-RAS e HAND model: estudo de caso de uma sub-bacia do Alto Paranapanema. / Jaqueline Carolino Santos. - São José dos Campos : [s.n.], 2023.

80 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2023.

Orientador: Javier Tomasella

Coorientadora: Maria Clara Fava

1. Sensoriamento remoto. 2. HEC-RAS. 3. HAND. 4. Landsat 5. 5. Inundação. I. Tomasella, Javier, orient. II. Fava, Maria Clara, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. V. Universidade Estadual Paulista (Unesp). VI. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VII. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A aplicação dos softwares HEC-RAS e HAND na sub-bacia hidrográfica do Alto Paranapanema traz consigo o potencial de impactos significativos, especialmente para os municípios que são suscetíveis a inundações e cuja principal atividade econômica é a agropecuária. Os resultados desse estudo podem proporcionar uma série de benefícios e oportunidades para a região, tanto em termos de gestão de recursos hídricos como na prevenção e mitigação de desastres naturais.

A identificação e delimitação de áreas suscetíveis a inundações permitem o desenvolvimento de estratégias de manejo e planejamento mais eficientes. Essas informações podem ser utilizadas para tomar decisões sobre o uso do solo, a implementação de medidas de controle de enchentes e a definição de políticas de prevenção e resposta a desastres.

Devido a escassez de informações necessárias para o mapeamento de áreas inundáveis, é fundamental buscar alternativas técnicas e economicamente viáveis, como a aplicação dos modelos propostos, para cumprir as exigências da legislação federal nº 12.608. Ao adotar abordagens técnicas e economicamente viáveis, baseadas em modelos hidrodinâmicos e geoespaciais, é possível tomar medidas que garantam a segurança e o bem-estar das comunidades em situação de vulnerabilidade. Essas ações contribuem para a construção de uma sociedade mais resiliente e preparada para lidar com os desafios impostos pelas inundações e outros eventos climáticos adversos.

Além disso, ao promover a gestão adequada dos recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais, o estudo proporciona uma base sólida para o desenvolvimento sustentável da região, preservando os meios de subsistência das comunidades e promovendo a resiliência econômica das atividades agropecuárias, que desempenham um papel fundamental na economia local.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Applying HEC-RAS and HAND software in the Upper Paranapanema watershed brings with it the potential for significant impacts, especially for municipalities prone to floods and whose main economic activity is agriculture and livestock farming. The results of this study can provide a range of benefits and opportunities for the region, both in terms of water resource management and the prevention and mitigation of natural disasters.

The identification and delineation of flood-prone areas allow for the development of more efficient management and planning strategies. This information can be used to make decisions regarding land use, the implementation of flood control measures, and the definition of disaster prevention and response policies.

Due to the scarcity of necessary information for mapping flood-prone areas, it is essential to seek technically and economically viable alternatives, such as applying the proposed models, to meet the requirements of Federal Law No. 12,608. Adopting technically and economically viable approaches based on hydrodynamic and geospatial models make it possible to take measures that ensure the safety and well-being of vulnerable communities. These actions contribute to the construction of a more resilient society prepared to deal with the challenges posed by floods and other adverse weather events.

Furthermore, by promoting proper water resource management and the prevention of natural disasters, the study provides a solid foundation for the sustainable development of the region, preserving the livelihoods of communities and promoting the economic resilience of agricultural and livestock farming activities, which play a crucial role in the local economy.

BANCA EXAMINADORA

Professor Doutor Javier Tomasella (Orientador)

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
São José dos Campos

Professora Doutora Luz Adriana Cuartas Pineda

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
São José dos Campos

Professora Doutora Marina Batalini de Macedo

Universidade Federal de Itajubá
Instituto de recursos naturais - IRN
Itajubá

São José dos Campos, 26 de maio de 2023.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos, ao meu parceiro, à minha mãe Elzi Carolino dos Santos (*in memorian*), ao meu avô José Francisco dos Santos (*in memorian*) e a todos que somaram na minha formação pessoal, profissional e acadêmica .

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha imensa gratidão a todas as pessoas e entidades que estiveram presentes em minha jornada até aqui.

A Deus, por me conceder a oportunidade de ingressar em uma renomada universidade pública, por me permitir conhecer pessoas excepcionais que contribuíram significativamente para a minha formação e por estar presente em cada passo do meu caminho.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Javier Tomasella e Professora Doutora Maria Clara Fava, pelo apoio incondicional, orientação, valiosos ensinamentos, incentivo constante e dedicação exemplar. Sou imensamente grata por todo o suporte que me proporcionaram ao longo dessa jornada.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos (ICT), Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI e a todos os seus colaboradores.

À minha família, meus pais, irmãos e demais familiares, pelo amor incondicional e apoio constante. Em especial, quero agradecer ao meu herói Irineu Francisco dos Santos, vulgo meu pai, por sempre me impulsionar mesmo nos momentos mais desafiadores da vida.

Aos meus amigos de todas as lugares que tive o prazer de passar, e ao meu parceiro, obrigada por compartilharem essa jornada comigo.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”

Marie Curie

RESUMO

SANTOS, J.C. **Comparação entre a área inundável obtida por imagens óticas de satélite e simulações realizadas no HEC-RAS e HAND model**: estudo de caso de uma sub-bacia do Alto Paranapanema. Projeto de pesquisa. São José dos Campos: Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), 2023.

O mapeamento das áreas suscetíveis à inundação é uma ferramenta primordial para o gerenciamento de risco da população vulnerável a este tipo de desastre e também para mitigar os prejuízos resultantes do evento. Embora a Política Nacional de Proteção Civil (Instituída pela Lei Federal nº 12.608) torne obrigatório o mapeamento de áreas sob risco de desastres, a ausência de informações hidrológicas tem sido um obstáculo para a aplicação prática da lei em muitos municípios do Brasil. Portanto, faz-se necessário a aplicação de ferramentas alternativas de menor complexidade, e que consequentemente requerem menos dados de entrada, para atingir os objetivos fixados na lei federal. Nesse sentido, o presente trabalho aplicou técnicas para o mapeamento de áreas inundadas de diferentes complexidades ao Município de Campina do Monte Alegre, SP, e as comparou com dados de satélite, com o objetivo de avaliar a precisão relativa entre cada método e validar o uso de modelos simplificados quando há escassez de dados hidrológicos. Desse modo, manchas de inundação foram simuladas pelo modelo Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) e Height Above the Nearest Drainage (HAND) e comparadas aos registro histórico captado pelo satélite Landsat 5. Por fim, foram aplicados métodos estatísticos para avaliar a sensibilidade e acurácia dos modelos executados. Na reconstituição do evento de cheia de 2004 que afetou o município, foram utilizadas as vazões máximas de 233, 600 e 833 m³.s⁻¹ para os respectivos rios Itapetininga e Paranapanema, e no ponto de inundação. Estas entradas resultaram em áreas de inundação de 27.11 km², 37.75 km² e 14.70 km² para os modelos HEC-RAS, HAND e para o Landsat. No geral, os parâmetros F estatístico (F), Acurácia geral (AG), Taxa de alarme falso (TAF) e índice Kappa (K) demonstraram que os modelos foram razoáveis, entretanto, demandam de ajustes. O presente estudo demonstrou que a simulação dos modelos foi uma abordagem satisfatória para mapear áreas suscetíveis a inundações. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de continuar buscando aprimoramentos e dados básicos mais precisos, principalmente topografia e batimetria, para melhorar a confiabilidade e a acurácia dos resultados gerados pelos modelos, como a extensão, a intensidade e a duração dos eventos de inundação.

Palavras-chaves: sensoriamento remoto; HEC-RAS, HAND, Landsat 5, inundação.

ABSTRACT

SANTOS, J.C. Comparison between the flood-prone area obtained from satellite optical images and simulations performed in HEC-RAS and HAND model: case study of the Upper Paranapanema sub-basin. Research project. São José dos Campos: São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; National Center for Monitoring and Natural Disaster Alerts (Cemaden), 2023.

Mapping flood-prone areas is a fundamental tool for risk management of populations vulnerable to this type of disaster and to mitigate the resulting damages. Although Federal Law No. 12,608 has been enacted, hydrological data, crucial for flood management, are scarce in Brazil. Therefore, the application of alternative tools of lesser complexity, which consequently require less input data, is necessary to generate flood-prone areas. This is the case for the municipalities of Buri, SP and Campina do Monte Alegre, SP, which experienced a major flood event in 2004. In this regard, this study applied techniques for mapping flooded areas of different complexities and compared them with satellite data to evaluate the relative accuracy between each method and validate the use of simplified models when hydrological data are scarce. Thus, flood extents were simulated using the Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) and Height Above the Nearest Drainage (HAND) models and compared to historical records captured by Landsat 5 satellite. Finally, statistical methods were applied to assess the sensitivity and accuracy of the executed models. In the reconstitution of the 2004 event, maximum flows of 233, 600, and 833 m³/s were used for the Itapetininga, Paranapanema, and Paranapanema rivers, respectively, at the flooding point, resulting in areas of 27.11 km², 37.75 km², and 14.70 km² for the HEC-RAS, HAND, and Landsat models, respectively. Overall, the statistical parameters F-statistic (F), Overall Accuracy (OA), False Alarm Rate (FAR), and Kappa index (K) demonstrated that the models were reasonable but required adjustments. The present study demonstrated that the simulation of the models was a satisfactory approach to map flood-prone areas. However, it is important to emphasize the need to continue seeking improvements and more accurate basic data, especially regarding topography and bathymetry, to enhance the reliability and accuracy of the results generated by the models, such as the extent, intensity, and duration of flood events.

Keywords: remote sensing; HEC-RAS, HAND, Landsat 5, flood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Perfil esquemático dos processos de enchente, inundação e alagamento.	19
Figura 2- Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 14: Bacia do Alto Paranapanema. 29	
Figura 3- Mapa de relevo da Bacia do AltoParanapanema (ALPA).....	31
Figura 4- Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (ALPA)	33
Figura 5– Localização das estações de monitoramento na área de estudo.....	36
Figura 6 - Mapa hipsométrico da sub-bacia de contribuição.....	46
Figura 7- Mapa de declividade da sub-bacia de contribuição.....	47
Figura 8 - Acervo histórico capturado por munícipe em um evento de inundação de 2004	48
Figura 9 - Relação entre os hidrogramas das condições de contorno da sub-bacia de contribuição	50
Figura 10- Composição RGB da imagem obtida por meio do Landsat 5.....	51
Figura 11- Vetorização da mancha de inundação obtida por meio do Landsat 5.	52
Figura 12- Simulação de evento de inundação por meio do modelo HEC-RAS.....	53
Figura 13- Simulação de evento de inundação por meio do modelo HAND.	56
Figura 14- Comparação de áreas de inundação gerada pelo HEC-RAS e a imagem do satélite Landsat 5.	58
Figura 15- Comparação de áreas de inundação gerada pelo HAND e a imagem do satélite Landsat 5.....	60
Figura 16- Comparação de áreas de inundação gerada pelos modelos HEC-RAS e HAND.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Postos fluviométricos disponibilizados pela CTG e Hidroweb.	37
Tabela 2- Relação de vazões máximas das condições de contorno nos rios Itapetinninga e Paranapanema.....	40
Tabela 3- Declividade e coeficiente de rugosidade de Manning aplicados nas condições de contorno (CC) no modelo HEC-RAS	41
Tabela 4 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning.	41
Tabela 5- Características fisiográficas da sub-bacia de contribuição para o ponto de inundação.	45
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar acurácia dos modelos HEC-RAS, HAND comparados a imagem do satélite Landsat 5, bem como entre os mesmos.	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Risco de inundação.....	18
2.2 Sistema de informações geográficas (SIG).....	21
2.3 Modelagem hidrodinâmica.....	22
2.3.1 Modelo HEC-RAS	23
2.4 Modelagem de menor complexidade: HAND	25
2.5 Desempenho dos modelos HEC-RAS e HAND.....	27
3 PROPOSTA DE PESQUISA.....	28
3.1 Objetivo geral	28
3.2 Objetivos específicos.....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 Contextualização da área de estudo	28
4.1.1 Geomorfologia	30
4.1.2 Pedologia	32
4.1.3 Clima e precipitação.....	33
4.1.4 Bioma e vegetação	34
4.1.5 Hidrografia	34
4.2 Delimitação da sub-bacia de contribuição	35
4.3 Levantamento de dados	36
4.3.1 Dados fisiográficos.....	36
4.3.2 Dados topográficos	36
4.3.3 Dados hidrológicos	37
4.3.4 Dados de satélites.....	38
4.4 Processamento de dados	39

4.4.1 Condições de contorno	39
4.4.2 Modelo hidrodinâmico: HEC-RAS.....	40
4.4.2.1 Coeficiente de rugosidade de Manning	41
4.4.3 Simulação HAND	42
4.4.4 Métricas comparativas entre a imagem de satélite e os modelos aplicados: HAND e HEC-RAS.....	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Caracterização das sub-bacias dos rios Itapetininga e Paranapanema	45
5.2 Dados do evento de fevereiro de 2004.....	47
5.3 Imagem óptica do satélite Landsat 5	51
5.4 Simulação modelo HEC-RAS.....	53
5.5 Simulação Hand model	55
5.6 Comparação entre a imagem de satélite e as imagens inundadas pelos modelos HEC-RAS e HAND.....	57
5.6.1 HEC-RAS X Landsat 5	57
5.6.2 HAND X Landsat 5	59
5.6.3 HAND X HEC-RAS	61
6 CONCLUSÕES	63
7 RECOMENDAÇÕES	64
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A – Acervo de imagens dos eventos de inundação.....	75

1 INTRODUÇÃO

O efeito combinado da degradação ambiental, aumento da temperatura, variabilidade dos ciclos naturais, crescimento populacional e ocupação irregular da superfície terrestre está relacionado à maior incidência, magnitude e gravidade de eventos climáticos extremos como consequência dos efeitos antrópicos (CRED; UNISDR, 2016; BEVACQUA et al., 2020; SWAIN et al., 2020; AMBRIZZI, et al., 2021).

Entre os principais tipos de eventos extremos associados a fenômenos atmosféricos estão as inundações, deslizamentos de terra, secas, tempestades intensas, furacões e tufões, sendo as inundações um dos riscos hidrológicos mais comuns dentre os desastres naturais oriundos de extremos de precipitação (CHANG et al., 2013; ZHANG et al., 2014).

O risco de inundação se dá em função do transbordamento das águas de um canal de drenagem e do escoamento superficial de água, combinados às condições ambientais (clima, topografia e cobertura vegetal) e socioeconômicas (ocupação irregular, densidade populacional, renda, acesso à educação e serviços de saúde) (FREIRE, N.; BONFIM, C.; NATENZON, C., 2014; TUCCI, 2015; BRAGA et al., 2020).

De modo geral, tais eventos são mais frequentes em áreas urbanas devido às atividades humanas, como desmatamento de mata ciliares e nascentes, ocupação das margens dos rios e impermeabilização do solo, consequentemente, aumentando a velocidade e magnitude do escoamento superficial. No entanto, inundações estão se tornando recorrentes em áreas rurais, como ocorrido em 190 municípios do estado da Bahia, em 2021 (KUNDZEWICZ et al., 2014; G1 BA, 2022).

Já no Sudoeste Paulista, nos meses de janeiro de 2004, 2010 e 2016, os municípios de Campina do Monte Alegre, SP, e Buri, SP (Apêndice A), tiveram extensas áreas agricultáveis tomadas pelas águas dos rios Itapetininga e Paranapanema, pertencentes à Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema. Tais eventos resultaram em prejuízos para grandes e pequenos produtores da região, conforme registrado no Sistema de Informação da Subvenção ao Seguro Rural - SISSER (2016).

Tendo em vista as perdas recorrentes a tais eventos, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) sugere a implementação de sistemas de alerta e previsão de enchentes como uma abordagem para gerenciar e mitigar os impactos das inundações. Essa medida é considerada não estrutural e pode ser complementada por outras estratégias, como o planejamento adequado do uso do solo e a implementação de políticas que desencorajam a

ocupação de áreas propensas a inundações (GERMANO et al., 2022).

A implementação de sistemas de previsão e alerta de enchentes oferece uma abordagem eficaz para reduzir o risco de perdas humanas e danos materiais. Esses sistemas fornecem às comunidades e serviços de emergência um tempo valioso para se prepararem para as inundações. Além disso, a combinação de previsões hidrológicas com mapas de inundação pode potencializar os benefícios dos alertas, melhorando a capacidade de resposta e a tomada de decisões (SILVA, 2019).

De acordo com Tucci (2007), existem dois tipos de mapas de inundação: os de planejamento e os de alerta. Os mapas de planejamento mostram as áreas afetadas por inundações com base em tempos de retorno específicos, enquanto os mapas de alerta fornecem informações sobre o nível da água em pontos de controle, como esquinas e ruas, relacionados às medições das estações fluviométricas durante eventos de inundação local. O mapa de inundação com propósito de alerta permite que os moradores em diferentes áreas da cidade acompanhem a evolução da enchente com base nas observações das medições, e quando combinado com um sistema de previsão de níveis, pode ser utilizado pelas autoridades competentes como uma ferramenta para o planejamento de ações que visam minimizar os danos causados pelo evento.

Todavia, sistemas operacionais de monitoramento e alerta ainda são escassos no país, haja visto a alta frequência de ocorrência de extremos de inundação e também quando se considera o potencial das bacias hidrográficas de grande e pequeno porte para geração de energia, irrigação, captação e abastecimento; atividades que também requerem monitoramento. Somado a isso, os dados disponíveis nem sempre apresentam séries de dados homogêneas e robustas. Por essa razão, são aplicados modelos hidrológicos que visam estimar a vazão máxima e a sequência temporal de vazões provindas de precipitações (BEVEN, 2012; BESKOW et al., 2015).

A combinação de modelos hidrológicos e ferramentas de geoprocessamento é utilizada para gerar manchas de inundação, permitindo a compreensão deste fenômeno, propiciando assim, ações para a reorganização e ocupação do espaço urbano e rural a longo prazo. E ainda, possibilita a elaboração de sistemas de previsão e alerta de inundação a partir da simulação de cenários, ou monitoramento em tempo real, oferecendo um tempo de resposta de curto prazo (CABRAL et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2018).

Tal mapeamento é capaz de determinar a extensão das manchas de inundação em função da velocidade e profundidade da água. No entanto, os modelos hidrodinâmicos, como é o caso

do modelo *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* (HEC-RAS) (PATEL et al., 2017), demandam dados hidrológicos e topográficos detalhados para sua utilização. Devido à baixa disponibilidade, quantidade e qualidade dos dados necessários, a aplicação e uso desse tipo de modelo se torna restrita.

Em vista disso, uma alternativa para o mapeamento de manchas de inundação é por meio de modelos baseados no relevo. Um exemplo é o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) que é um modelo de análise de menor complexidade inteiramente baseado em mapas digitais de elevação e que não requer dados hidrológicos detalhados (MONTE et al., 2019).

Buscando compreender a sensibilidade de ambos os modelos acima citados, Afshari et al. (2018) compararam as manchas de inundação geradas por diferentes magnitudes de eventos extremos em termos de extensão e profundidade da mancha, sendo aplicados em dois rios em cidades distintas para representar escalas espaciais, relevo, uso e ocupação de terra e climas diferentes. Dessa maneira, os autores concluíram a necessidade de avaliar cautelosamente se as ferramentas de mapeamento de baixa complexidade podem ser mais favoráveis em cenários de respostas rápidas e emergenciais, uma vez que estes superestimaram áreas mais profundas dos canais.

Germano et al. (2022) avaliaram a exatidão das áreas inundadas pelo modelo HEC-RAS, comparando-as com imagens ópticas dos satélites Landsat-8, Sentinel-2, CBERS e imagens de satélite radar Radio Detection and Ranging e Sentinel-1 em um evento de inundação, em 2019, no município de Alegrete, RS. A modelagem foi feita em dois cenários: 1) usando dados topobatimétricos, 2) aplicando um MDE ALOS Palsar (resolução 12,5 m). A calibração das áreas de inundação simuladas foi realizada pela sobreposição e georreferenciamento de registros capturados pelos satélites. A média de erro nos cenários 2 e 1 é 7,3% e 5,4%, respectivamente. Apesar das limitações em dados e imagens, a combinação dessas técnicas se mostrou promissora para mapas de inundação, simplificando processos e reduzindo custos de campo.

Neste contexto, o presente estudo propõe a aplicação dos softwares HEC- RAS e HAND em uma sub-bacia hidrográfica do Alto Paranapanema, para identificar e delimitar áreas suscetíveis à inundação. Além disso, pretende-se comparar as manchas de inundação resultantes desses modelos com a mancha de inundação real obtida a partir de imagens de satélite. Essa comparação tem como objetivo validar o uso de modelos simplificados, como o HAND, quando há escassez de dados hidrológicos disponíveis. A comparação entre as manchas de inundação simuladas e a mancha de inundação real de imagem de satélite permitirá avaliar a precisão dos

modelos e sua capacidade de representar com acurácia os eventos de inundação na área de estudo.

Finalmente, a lei Federal nº 12.608 de 10/04/2012, que estabelece as normas e diretrizes direcionadas à redução dos riscos de desastres naturais em todo o território brasileiro determina que compete aos municípios identificar e mapear as áreas de risco de desastres (Artigo 8) e que é dever dos municípios inseridos no cadastro do governo federal “elaborar mapeamento contendo as áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos” (Artigo 22).

Levando em conta a escassez de informações básicas necessárias ao mapeamento de áreas inundáveis que dificulta o cumprimento da lei federal nº 12.608, fica claro que a busca de alternativas técnica e economicamente mais viáveis, como aqui proposto, contribui decisivamente com a redução de desastres em áreas vulneráveis do país.

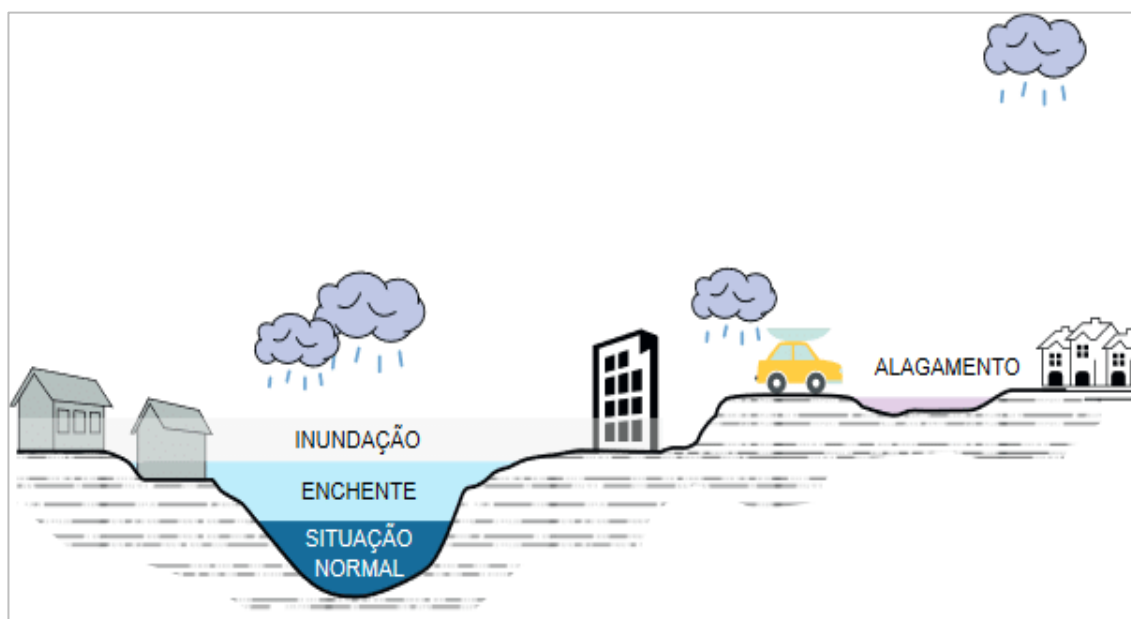
Ao adotar abordagens técnicas e economicamente viáveis, é possível tomar medidas proativas para evitar ou minimizar os impactos dos desastres naturais, garantindo assim a segurança e o bem-estar das comunidades em situação de vulnerabilidade, especialmente em áreas com dados escassos como os municípios com predomínio de população rural do país. Essa busca por soluções mais eficientes e acessíveis contribui de forma significativa para uma gestão de riscos mais eficaz e sustentável, alinhada com as diretrizes estabelecidas pela legislação vigente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Risco de inundação

O fenômeno de inundação se caracteriza pela elevação dos níveis regulares de um corpo d'água, transbordando suas margens e atingindo a planície de inundação (Figura 1). Isso está associado tanto a fatores naturais, como chuvas intensas, quanto a ações humanas, como a remoção da vegetação ciliar, ou seja, o desmatamento, a ocupação das margens dos rios e impermeabilização do solo (DANTAS, 2012; FRASER et al., 2020).

Figura 1- Perfil esquemático dos processos de enchente, inundação e alagamento.



Fonte: Ministério das Cidades (2007).

Enquanto as enchentes se dá pelo aumento do nível da água nos corpos d'água de forma gradual e extrapolando a calha normal do corpo hídrico. Essa elevação persiste por um intervalo de tempo antes de diminuir gradualmente, conforme a água é escoada. Geralmente estão relacionadas a períodos sazonais. Já os alagamentos, originam-se a partir do acúmulo de águas nas vias, áreas urbanas e rurais impermeabilizadas ou saturadas (BRASIL, 2007).

Tendo em vista a exposição da sociedade a esses riscos, se fez necessária a criação, adaptação e aplicação de políticas públicas, uma vez que estas serão capazes de buscar a redução do risco de desastres através de programas de prevenção, mitigação, preparação, monitoramento, alerta, resposta e recuperação aos desastres, presentes no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres Naturais (GUEDES, 2017; KREIBICH et al., 2017).

No entanto, observa-se que na maioria dos municípios atingidos por inundações não são aplicados investimentos em obras de infraestrutura para amenizar os seus efeitos, ou ainda em mapeamento, previsão e planejamento urbano e rural (PEREIRA, 2017). Segundo Oliveira et al. (2010), uma alternativa mais econômica para monitorar áreas suscetíveis às inundações, seria através do mapeamento das mesmas, utilizando diversas ferramentas como modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, e também, Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

O mapeamento de áreas inundáveis permite o zoneamento da planície de inundação, que são mapas gerados com base em cotas conhecidas de inundação na região ou com base em cheias de projeto, associadas a tempos de retorno. A partir dos mapas de limite da inundação, a área de restrição a ocupação pode ser determinada simplesmente pela consideração de uma cota segura, ou através da delimitação de uma zona de passagem da cheia (LARENTIS et al. 2020).

O mapeamento de áreas inundáveis, quando associado a informações de danos potenciais ou vulnerabilidade, conduz aos mapas de risco de inundação. O risco é calculado relacionando o dano potencial (referente à ocupação do território) com a probabilidade de ocorrência (referente ao evento de cheia). Tais mapas retratam os riscos da situação atual de ocupação da planície de inundação, destacando, em função dos maiores riscos, as áreas com alta frequência de inundação e com maiores danos potenciais (ocupação). Este diagnóstico é de grande interesse e serve como subsídio para análise de viabilidade na implementação de planos de alerta de cheia, de seguros contra inundação e de obras de proteção. Para o planejamento territorial, no entanto, importa a definição das atividades e usos do solo que serão permitidos em área de risco no futuro. Neste caso, o foco da análise passa a ser as áreas inundáveis que ainda não foram ocupadas ou não estão consolidadas, em que o poder público pode atuar de forma preventiva através do ordenamento do uso do solo (LARENTIS et al. 2020).

Além disso, mapeamento de áreas inundáveis associada com os danos constitui uma ferramenta fundamental no desenho de iniciativas não estruturais tais como a de “espaço para os rios” (*room for the rivers*). Esta abordagem significa uma mudança no uso da terra na planície inundável dos rios, abrindo novas áreas verdes destinadas à recreação. Uma vez que as mudanças climáticas aumentam a frequência de ocorrências nas chuvas intensas o que se traduzem em picos de cheias maiores, o aumento de espaço aos rios se apresenta como uma estratégia econômica e tecnologicamente viável no longo prazo. O aumento da segurança e qualidade de vida que estas iniciativas oferecem têm enfrentado resistências, principalmente dos gestores, porque implicam na maioria das vezes realocação de pessoas e empreendimentos. Entretanto, em muitas áreas com ocupação não consolidada é especialmente atrativa pelos menores custos comparados com as ações estruturais. Espera-se, portanto, que iniciativas como as propiciadas por este estudo contribuam com a adoção de iniciativas ambientalmente amigáveis e de maior segurança no longo prazo (TRAVASSOS, 2010; CASTRO & ALVIM, 2022).

2.2 Sistema de informações geográficas (SIG)

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são um conjunto de técnicas e ferramentas de Geoprocessamento, que engloba informações referentes à superfície do solo, como os fenômenos, aspectos físicos, uso e ocupação da terra, geologia, hipsometria, entre outros. E ainda, os SIG detêm a capacidade de capturar, analisar, gerar, manipular, armazenar e representar dados reais de maneira remota (BELO, 2012; WANG; XIE, 2018).

Segundo Liu et al. (2017), SIG se trata de uma ciência, está além do sistema de armazenamento de dados, pois carrega informações que permitem compreender fatos e fenômenos que ocorrem em um espaço geográfico. Para Norberto et al. (2020), pode-se conhecer muito dos fenômenos ambientais aplicando SIG no estudo destes, bem como estimar áreas de risco, áreas com potencial ambiental e agropecuário e vulnerabilidade ambiental, definindo assim zoneamentos correspondentes para melhor planejamento do uso dos recursos.

De acordo com Ribeiro e Cardoso (2014), às tecnologias SIG permitem-se ser integradas a simulações ambientais, como os modelos hidrológicos, por meio de avanços nas linguagens de programação, tornando as ferramentas habilitadas para criar cenários diferentes.

Dessa forma, em uma simulação hidrodinâmica, é preciso dispor de um grau de detalhamento preciso do terreno, visto que mesmo uma alteração mínima na elevação pode ter efeitos notáveis no escoamento superficial de um canal. Portanto, a integração de modelos hidrodinâmicos e hidrológicos pode ser efetuada dentro do ambiente de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo a manipulação dos dados espaciais.

De acordo com Maidment (1992), os SIG desempenham três funções cruciais no processo de modelagem:

- a) Realização do pré-processamento de dados, sendo responsáveis pela obtenção dos dados de entrada e pela sua conversão em formatos adequados para análises;
- b) Fornecimento de suporte direto à modelagem;
- c) Execução do pós-processamento, visualizando os resultados gerados em seu contexto espacial.

A combinação da análise temporal dos modelos matemáticos com as informações georreferenciadas providas pelos SIGs abre caminho para o desenvolvimento de instrumentos facilitadores para a tomada de decisões. A integração dos modelos hidrodinâmicos com os SIGs permite a incorporação de informações topográficas, como Modelos Digitais de Terreno (MDTs), dados sobre o solo e uso do solo, bem como a subdivisão da bacia hidrográfica.

Nesse sentido, Almeida (2015) afirma em seu trabalho que atualmente os SIG são uma tecnologia indispensável para a modelagem de inundações, visto que é possível integrar modelos matemáticos ao meio físico, ou seja, correlacionar modelos hidrológicos com o espaço físico de uma bacia hidrográfica, permitindo avaliar a resposta de uma bacia frente a precipitações em diferentes cenários, através de diferentes tempos de retorno e uso e ocupação do solo.

E ainda, no trabalho de Mendes et al (2022), a caracterização física das sub-bacias hidrográficas em estudo, como área, perímetro, comprimento do talvegue, altitudes (cotas) da nascente e foz, declividade e tempos de concentração, foram obtidas através do Modelo de Elevação Digital do Terreno (MDT) de Goiânia, aplicado como dado de entrada e processado em uma ferramenta SIG, o *software* ArcGIS. Tais dados foram aplicados posteriormente no software de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS. Desse modo, os dados do HEC-RAS foram validados com imagens da mídia local e levantamentos topográficos das zonas inundadas, ressaltando a eficácia da integração entre o SIG e a modelagem hidrodinâmica no estudo de áreas sujeitas a inundação.

2.3 Modelagem hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica busca representar o movimento das águas em canais a partir de modelos matemáticos para simular o comportamento da água em um determinado sistema hídrico, incluindo canais, rios, lagos e represas, bem como a interação desses elementos com a topografia do terreno (NETO et al., 2015).

De acordo com Tucci (1998), modelos hidrodinâmicos são compostos por um sistema de equações elaborados para representar o fluxo de água em rios e canais, os quais não podem ser solucionados através de métodos analíticos convencionais. Portanto, se torna essencial recorrer a métodos numéricos que permitem a discretização do rio em seções.

Tal como os princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos, propostos por Saint-Venant, onde são aplicadas as equações de energia, massa e quantidade de movimento para a compreensão dos fluxos em rios e canais. A partir das equações de Saint-Venant, de forma simplificada (Equação 1), os modelos hidrodinâmicos são capazes de reproduzir o movimento dos fluidos por meio de resolução computacional, a depender da representação do fluxo na planície de inundação. Estas podem ser agrupadas em 1D, 2D e 3D (TENG et al., 2017).

$$g\nabla H = -c_f V \quad (1)$$

Onde g é a aceleração gravitacional, H é a elevação da superfície da água (m), c_f é o coeficiente de atrito e V é a magnitude do vetor de velocidade, sendo a forma simplificada de Saint-Venant para análise bidimensional do escoamento, também conhecida como a equação da Onda difusa, pois é considerada mais estável e requer um tempo computacional menor (MAGRO, 2018).

A simulação 1D representa o escoamento da água em um único sentido, assumindo que o fluxo é uniforme e em uma única direção, a longitudinal. Já a simulação 2D é uma técnica mais avançada, que considera o comportamento hidrodinâmico da água em duas dimensões, ou seja, a profundidade e a velocidade, levando em conta a topografia e a rugosidade do terreno. Por fim, a simulação 3D é mais complexa e representa a água e o escoamento em três dimensões, levando em conta não apenas a topografia, mas também as características tridimensionais do canal ou do rio (DASALLAS et al., 2019; SILVA, et al., 2020).

Além disso, o regime de escoamento em uma modelagem hidrodinâmica pode ser classificado em permanente e não-permanente, também conhecido como transiente. No regime permanente, a variação da velocidade e do nível é nula, ou seja, não há mudança no estado do sistema ao longo do tempo. Essa condição é alcançada quando há um equilíbrio hidráulico em que o fluxo de água na seção analisada é igual tanto na entrada quanto na saída, enquanto a topografia permanece constante (COUTINHO, 2015; FERREIRA et al., 2021).

Já no regime não-permanente, a variação no tempo e no espaço da velocidade e do nível é significativa, podendo ocorrer variações diárias ou sazonais, em que o fluxo de água pode variar ao longo do tempo. Esse regime é comum em rios e canais encontrados na natureza, mas dependendo da necessidade de detalhamento do estudo, pode-se considerar regime permanente (COUTINHO, 2015; FERREIRA et al., 2021).

2.3.1 Modelo HEC-RAS

Dentre os modelos hidrodinâmicos, destaca-se o *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS)* desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*). O HEC-RAS é um *software* de modelagem hidrodinâmica que utiliza modelos matemáticos

baseados em equações de conservação de massa e energia para simular o comportamento hidráulico do escoamento de um canal livre, em regime permanente ou não permanente, considerando o efeito da gravidade, da viscosidade e da pressão da água. E ainda, o HEC-RAS é capaz de realizar simulações em uma ou duas dimensões, permitindo a representação do fluxo unidimensional em canais e rios, bem como a representação bidimensional em planícies de inundação (USACE, 2010).

O modelo bidimensional do HEC-RAS utiliza a equação de Saint-Venant (Equação 1) para simular o comportamento da água, considerando tanto a velocidade quanto a altura da água em duas dimensões. Ele permite a modelagem detalhada de áreas de inundação, incluindo a interação entre canais e planícies de inundação, e é adequado para simular fluxos de água complexos em áreas urbanas e rurais (BETSHOLTZ; NORDLÖF, 2017).

Tal modelo utiliza um sistema de grade retangular para representar a área de estudo e permite a entrada de dados de elevação, topografia, rugosidade do solo e características hidráulicas do canal. No entanto, é importante ressaltar que a modelagem hidrodinâmica em duas dimensões é mais complexa e computacionalmente intensiva do que a modelagem em uma dimensão. Além disso, a precisão dos resultados depende da qualidade e da precisão dos dados de entrada, como a topografia e a elevação da área de estudo (KOMI, et al., 2017).

O estudo de Oliveira et al. (2016) teve como objetivo demarcar as zonas sujeitas a inundação ao longo do Córrego Macambira, visando a implantação de um parque linear. Como muitos córregos urbanos, suas áreas de várzea estão ocupadas por habitações, comércios, pequenas plantações e indústrias. Para determinar os limites do parque, foi realizado um estudo hidrodinâmico que utilizou topografia de alta resolução e o software HEC-RAS para mapear as zonas inundáveis das margens do córrego. Em geral, os resultados mostraram que a maior parte das áreas sujeitas a inundação está dentro dos limites naturais do curso d'água. No entanto, em alguns pontos ocorrem transbordamentos que afetam ruas e áreas habitadas, com alcance de até 70 metros a partir da calha natural. O uso do software HEC-RAS permitiu entender o funcionamento hidrodinâmico do Córrego Macambira, focando no comportamento da calha de drenagem existente. Essa modelagem serviu de base para o projeto, auxiliando na definição de estratégias de intervenção mais apropriadas para cada situação.

Ongdas et al. (2020) empregou o software HEC-RAS (2D) para simular cenários de inundação em diferentes condições no rio Yesil (ou Ishim). Foram gerados mapas de inundação para eventos de tempo de retorno de 10, 20 e 100 anos, que destacaram as regiões vulneráveis às inundações nos três cenários avaliados. Portanto, o estudo recomendou que a construção de

quaisquer estruturas fossem proibidas nessas áreas, demonstrando que modelo HEC-RAS se apresentou como uma ferramenta relevante para embasar decisões estratégicas em relação à gestão territorial e de inundações.

Urbani et al. (2023) delimitou áreas sujeitas a inundação na bacia hidrográfica do Córrego Ipiranga, São Paulo - SP, que enfrenta problemas frequentes de inundações. O estudo também buscou avaliar a quantidade de propriedades afetadas. A abordagem envolveu modelagem hidrológica para diferentes cenários de chuva com diferentes tempos de retorno de 10, 25 e 100 anos, impactando aproximadamente 3.019, 3.423 e 3.854 edificações, respectivamente. Diante do número significativo de propriedades afetadas e dado o progresso das mudanças climáticas e do potencial aumento de ocorrência de eventos extremos, o estudo se mostrou satisfatório, e ainda pode servir como embasamento na formulação de políticas públicas que reforcem a resiliência de áreas vulneráveis a inundações, visando a mitigação dos prejuízos ocasionados por tais eventos.

2.4 Modelagem de menor complexidade: HAND

A modelagem hidrodinâmica para simulação de manchas de inundação pode ser bastante complexa, exigindo um grande volume de dados, como dados pluviométricos e fluviométricos, topografia, coeficiente de rugosidade, entre outros. Porém, em regiões com escassez de dados, a modelagem de menor complexidade pode ser uma alternativa para a simulação de manchas de inundação, como é o caso do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND - Altura Acima da Drenagem mais Próxima, tradução para o português) (HU; DEMIR, 2021).

O HAND é um *software* concebido e desenvolvido no Brasil, por um grupo de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), financiado pelo projeto GeoClima. Sendo considerado um modelo normalizado de terreno, pois utiliza uma superfície altimétrica referenciada ao canal de drenagem mais próximo. (NOBRE et al., 2015).

A formulação matemática pelo HAND é relativamente simples, e consiste em determinar a diferença da cota de cada ponto do terreno em relação à drenagem mais próxima, utilizando dados de MDT. Com base nessa informação, é possível delimitar áreas sujeitas a inundação, bem como estimar a extensão e profundidade da água em caso de eventos de inundações. Neste modelo são utilizadas informações topográficas dos MDTs para a extração

do desnível ou distância vertical. (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011; MENGUE, et al. 2016).

Dessa forma, o HAND tem desempenhado um papel fundamental na categorização de terrenos com base em características do solo, geomorfologia, geologia, declividade e regime hidrológico, considerando a profundidade do lençol freático. Além disso, o HAND é empregado para modelar áreas inundadas e ocorrências de deslizamentos de terra, antecipar cenários de expansão urbana e conduzir análises dinâmicas de fatores químicos e biológicos e suas interações com a topografia, entre outras aplicações variadas (RENNÓ et al., 2008; CUARTAS, et al., 2012).

Em seu estudo, Nobre et al. (2015) aplicaram uma metodologia denominada como *HAND contour*, fundamentada no conceito de contornos, em que tal método utilizou a topografia normalizada pela drenagem e trajetos de fluxo para identificar as variações verticais relativas (quedas) em direção ao rio mais próximo, sendo um indicador distribuído eficaz do potencial de inundação, diretamente correlacionado à elevação do rio. O mapeamento de riscos de inundação previu a extensão da inundação no canal principal e nos canais influenciados pelo evento. No entanto, para canais localizados fora da área de inundação, o método superestimou a extensão real da inundação. Segundo os autores, tal superestimação pode se dar devido as características locais do escoamento.

Komolafe et al. (2020) integraram Sistemas de Informação Geográfica (GIS), análise multicritério e o modelo normalizado de terreno Height Above Nearest Drainage (HAND) para identificar zonas de risco de inundação potencial e vulnerabilidade na Bacia do Rio Ogun, Nigéria. Tal abordagem gerou zonas de risco de inundação com base em critérios específicos. Ao sobrepor o mapa de risco de inundação com dados demográficos da população, foi possível identificar áreas onde pessoas e bens estão mais vulneráveis. Este estudo ofereceu uma base preliminar para estratégias de alerta precoce e formulação de políticas visando à redução do risco de desastres por inundação.

Queiroga et al. (2023) avaliaram os mapeamentos gerados pelo HAND por meio de diferentes MDTs com resoluções espaciais de 90 m x 90 m, 30 m x 30 m e 5 m x 5 m. A validação foi realizada comparando os resultados com informações do Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa (PMSB-JP) e pontos de inundação coletados em campo. As simulações geradas pelo HAND abrangeram cerca de 80% dos pontos de inundação do PMSB-JP e pontos verificados em campo. Demonstrando a precária adaptação da comunidade, o que ressaltou a importância de aumentar a resiliência no contexto da Redução de Riscos de

Desastres (RRD).

2.5 Desempenho dos modelos HEC-RAS e HAND

O estudo de Afshari et al. (2018) apresenta uma comparação entre os modelos HAND e HEC-RAS para gerar as manchas de inundação. Os resultados mostraram que o modelo HEC-RAS produziu os melhores resultados, seguido pelo HAND. Os autores concluem que, embora as ferramentas de baixa complexidade possam ser úteis para análises rápidas de inundação, elas não substituem a necessidade de um modelo hidrodinâmico mais detalhado para uma avaliação precisa da inundação.

Devido às limitações de cada modelo, foram realizados alguns estudos com o objetivo de compará-los a partir das manchas de inundação geradas por ambos. Assim como Afshari et al. (2018), Monte et al. (2019) também comparou a capacidade dos modelos a fim de validar o uso do modelo simples (HAND) como alternativa aos modelos mais robustos (HEC-RAS). Concluindo que embora o modelo atenda de forma razoável o seu propósito, deve-se ter cautela devido a super dimensionalidade de suas simulações, beirando a resultados grosseiros.

Szymanski (2020), aplicou ambos modelos em bacias montanhosas no Sul do Brasil, uma vez que os modelos hidrodinâmicos ainda são pouco utilizados nessas regiões devido às dificuldades de simular o comportamento hidráulico e a topografia complexa desses locais. Após as simulações, foram utilizadas as seguintes métricas de comparação: F estatístico, Acurácia geral, Taxa de alarme falso e índice Kappa. Assim, os resultados obtidos pelo modelo HAND foram superestimados em comparação ao HEC-RAS, porém razoável para seu propósito de auxiliar na gestão e planejamento territorial.

Além de verificar a precisão de modelos tradicionais calibrados com medições de vazão de rios, é possível comparar diretamente as simulações do modelo com observações obtidas por satélite. A utilização de dados de altimetria por satélite para medir a elevação da superfície da água, assim como o uso de imageadores de radar de abertura sintética (SAR) e microondas para mapear áreas inundadas, são recursos valiosos para aprimorar a calibração e validação de modelos hidrológicos. Em estudos realizados na bacia amazônica, por exemplo, foi observada uma boa correlação entre a variação espaço-temporal da área inundada simulada e as observações de satélite, especialmente quando considerado o efeito de remanso (PARON, 2014; BRAKENRIDGE, 2018).

3 PROPOSTA DE PESQUISA

3.1 Objetivo geral

Avaliar a precisão relativa do mapeamento das áreas inundadas geradas pelos modelos HAND e HEC-RAS, por meio da comparação com imagens de satélite, durante um evento de inundação na Bacia do Alto Paranapanema, visando demonstrar a viabilidade de metodologias simplificadas de mapeamento de inundações em regiões com escassez de dados.

3.2 Objetivos específicos

- Delimitar a sub-bacia de contribuição para a área de inundação, bem como definir suas condições de contorno.
- Obter manchas de inundação através dos modelos HEC-RAS e HAND, bem como da imagem de satélite Landsat 5.
- Avaliar a precisão das estimativas de manchas de inundação obtidas pelos modelos HEC-RAS e HAND, comparando-as com a imagem real do evento capturada pelo satélite Landsat 5.
- Avaliar a precisão das estimativas de manchas de inundação obtidas pelo modelo HAND, comparando-as com a simulação de inundação obtida pelo modelo HEC-RAS.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Contextualização da área de estudo

A área de estudo contempla um ponto de inundação recorrente na confluência entre os rios Itapetininga e Paranapanema presentes na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 14: Alto Paranapanema (ALPA) (Figura 2), localizada no estado de São Paulo. A Bacia do Alto Paranapanema possui uma área de drenagem de 22.689 km², sendo a maior do estado, e população aproximada de 871.264 habitantes.

Figura 2- Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 14: Bacia do Alto Paranapanema.



Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (2021).

Composta pelos municípios Angatuba, Arando, Barão de Antonina, Bernardino de Campos, Bom Sucesso de Itararé, Buri, Campina do Monte Alegre, Capão Bonito, Cerqueira Cesar, Coronel Macedo, Fartura, Guapiara, Guareí, Ipaussu, Itaberá, Itaí, Itapetininga, Itapeva, Itaporanga, Itararé, Itatinga, Manduri, Nova Campina, Paranapanema, Pilar do Sul, Piraju, Ribeirão Branco, Ribeirão Grande, Riversul, São Miguel Arcanjo, Sarutaiá, Taguaí, Taquaritiba, Taquarivaí, Tejupá, Timburi. (SIGRH, 2021).

De acordo com o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Comitê da bacia hidrográfica do Alto Paranapanema (2021), a agricultura é apontada como uma das principais

atividades econômicas na região da UGRHI 14. Destacam-se as culturas de soja, milho, feijão, batata e cana-de-açúcar. Além disso, a pecuária, por meio da suinocultura e avicultura, e a indústria desempenham papéis significativos na economia, com o município de Itapetininga se destacando como um importante polo econômico.

Com relação aos recursos hídricos, os principais usos da água são para irrigação agrícola, abastecimento público, geração de energia elétrica, industrial e lazer. E ainda, na UGRHI-14, existem quatro usinas geradoras de energia elétrica de destaque: UHE Paranapanema, UHE Chavantes, UHE Piraju e UHE Jurumirim. A Usina Hidrelétrica Paranapanema tem uma capacidade instalada de 31,1 MW e suas construções civis começaram em 1925 (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

4.1.1 Geomorfologia

A Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema abrange duas unidades morfoestruturais distintas: o Cinturão Orogênico do Atlântico e a Bacia Sedimentar do Paraná. A primeira corresponde ao Planalto Atlântico, especificamente o Planalto de Guapiara, enquanto a segunda abrange a Depressão Periférica Paulista (Depressão do Paranapanema) e o Planalto Ocidental Paulista (Planalto Centro Ocidental e Planalto Residual de Botucatu) (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

O Planalto de Guapiara é caracterizado por morros baixos com topos convexos e altitudes entre 700 e 800 m. Possui declividades de 20 a 30% e é composto por filitos, granitos e calcários. Há a presença de alinhamentos de cristas associados a corpos quartzíticos. Nas áreas de contato entre as rochas metamorfizadas e as unidades da Bacia Sedimentar, ocorrem escarpas estruturais e erosivas (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

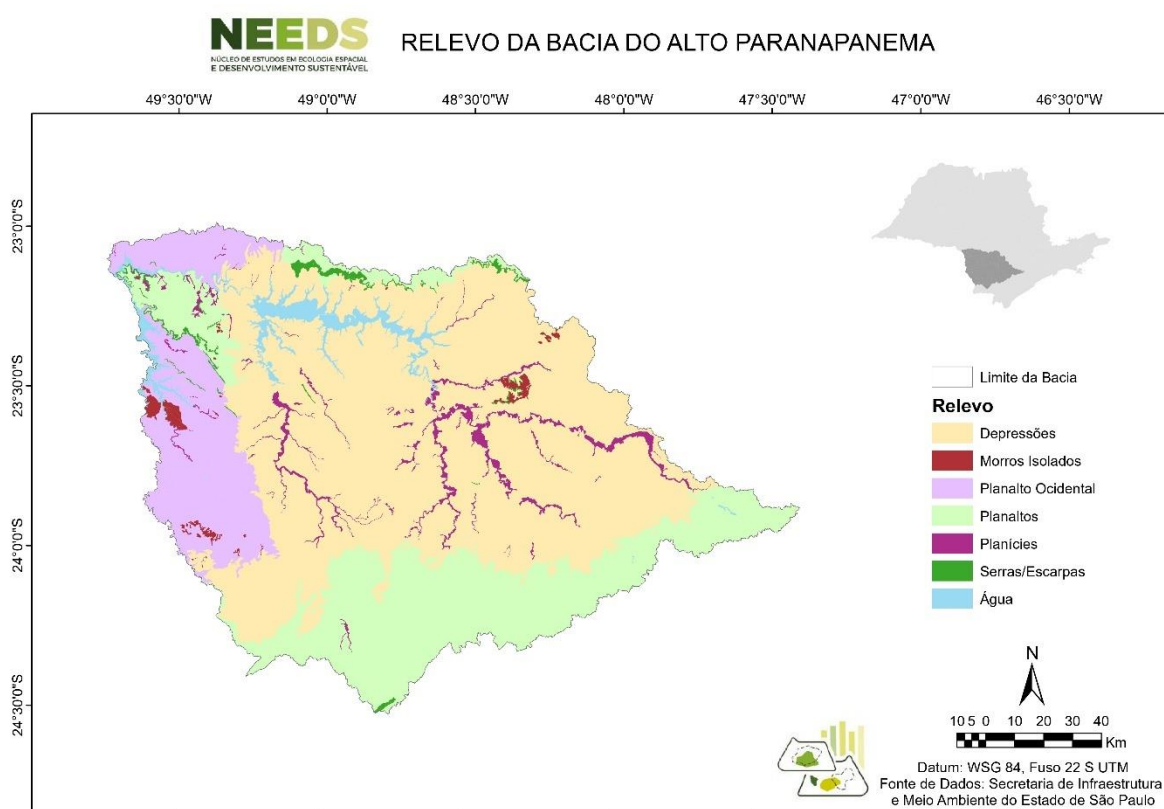
A Depressão Periférica Paulista, representada pela Depressão Paranapanema, está situada entre os terrenos pré-cambrianos a leste/sudeste e a grande escarpa arenito-basáltica ao norte. É composta por sedimentos paleo-mesozóicos. Os cursos d'água nessa região são todos afluentes do Rio Paranapanema e apresentam um padrão de drenagem paralelo (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Na Bacia Sedimentar, encontramos a unidade morfoescultural denominada Planícies Fluviais Diversas. Essas planícies são áreas planas e baixas ao longo das margens dos rios, sujeitas a inundações periódicas. Também são observados terraços fluviais quando estão

ligeiramente acima da planície e livres das inundações. As planícies fluviais são compostas por sedimentos fluviais arenosos e argilosos inconsolidados e apresentam alto potencial de fragilidade devido às inundações frequentes, lençol freático pouco profundo e sedimentos sujeitos a acomodação constante (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021)..

Em resumo, a Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema é caracterizada por uma diversidade de formas de relevo (Figura 3), incluindo morros baixos, escarpas, vales entalhados, planícies fluviais e terraços fluviais. Essas características influenciam o comportamento dos rios e a vulnerabilidade da região a eventos erosivos e inundações (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Figura 3- Mapa de relevo da Bacia do AltoParanapanema (ALPA)



Fonte: Núcleo de Estudos em Ecologia Espacial e Desenvolvimento Sustentável (2023).

4.1.2 Pedologia

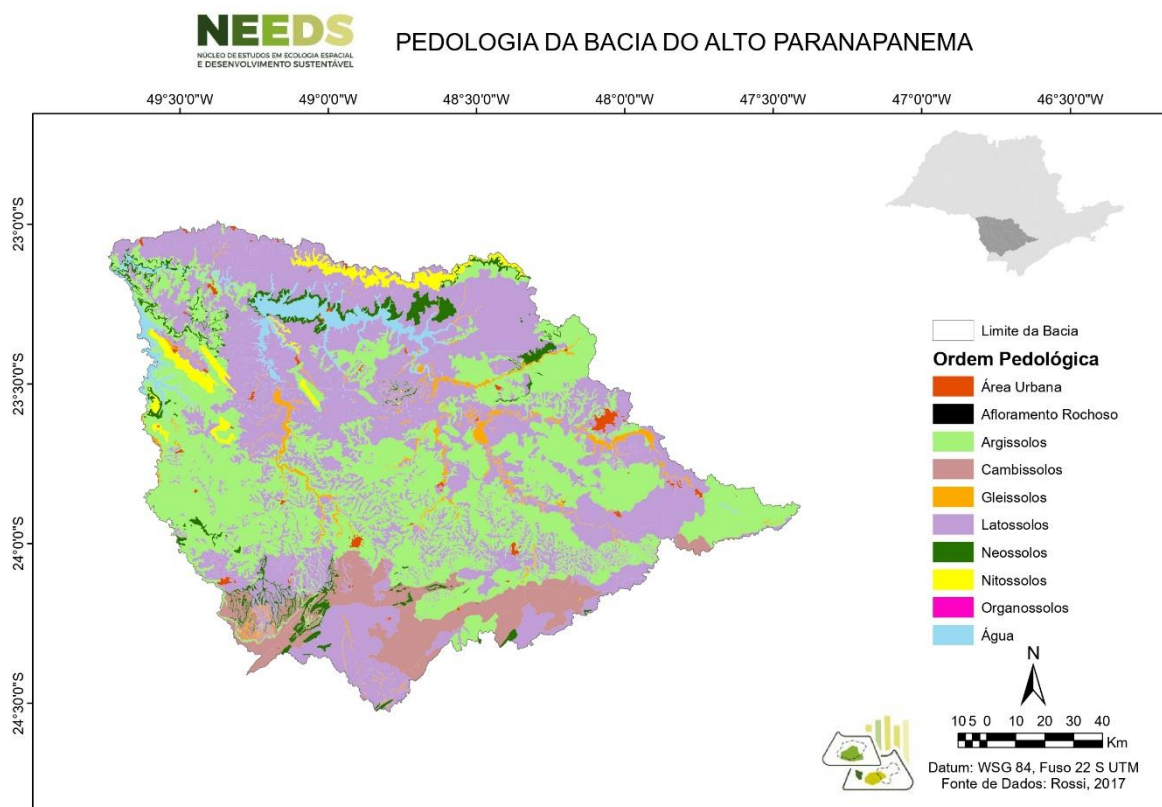
Na ALPA, foram identificados quatro tipos principais de solos: solos com B textural, solos com B latossólico, solos hidromórficos e solos pouco desenvolvidos (Figura 4). Os solos com B textural são bem drenados, sem salinização, e possuem horizontes A, B e C, sendo a transição entre eles clara ou abrupta. O horizonte B apresenta espessuras variáveis e textura argilosa, com estrutura em blocos subangulares a angulares. A porosidade desses solos varia de acordo com a textura, sendo mais baixa nos solos argilosos (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Os solos com B latossólico são caracterizados por apresentarem um perfil A, B e C, com transições difusas ou graduais entre os horizontes. O horizonte B é o mais importante, com espessuras variáveis e textura argilosa. Esses solos possuem alta porosidade e estrutura granular, podendo apresentar também estrutura prismática (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Os solos hidromórficos são encontrados em áreas de várzea, com relevo plano e encharcamento. Esses solos possuem horizontes A, C, G (ou A, G), podendo apresentar também horizonte Bg ou BG. A presença de matéria orgânica na camada superficial e a redução nas camadas inferiores são características desses solos (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Os solos pouco desenvolvidos são azonais, com perfil incipiente. Geralmente possuem sequência de horizontes AC ou AD e apresentam um horizonte B pouco desenvolvido, com baixa espessura e teor de argila abaixo de 15%. Esses diferentes tipos de solos são distribuídos em segmentos dos rios Capivari e Guareí, bem como nas regiões altas do Apiaí-Guaçu (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Figura 4- Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (ALPA)



Fonte: Núcleo de Estudos em Ecologia Espacial e Desenvolvimento Sustentável (2023).

4.1.3 Clima e precipitação

Segundo Köppen, a ALPA é classificada como Cfa, ou seja, clima subtropical úmido. Os limites dos tipos climáticos não são claramente definidos nem fixos, pois eles mudam de ano para ano.

No que diz respeito à distribuição das precipitações ao longo do tempo e do espaço, a média anual de chuva na UGRHI 14 totaliza aproximadamente 1.200 mm. A área mais propensa a chuvas na UGRHI é encontrada na região da Serra de Paranapiacaba, registrando uma média anual de 1.800 mm (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Destaca-se que o período mais chuvoso compreende os meses de setembro a março, com o mês de janeiro se destacando como o mais pluvioso, seguido por fevereiro e março. Contrastando, o período entre abril e agosto normalmente apresenta precipitações inferiores a 40 mm, sendo agosto o mês de menor pluviosidade (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA

DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

4.1.4 Bioma e vegetação

A Bacia do Alto Paranapanema abrange diferentes biomas, sendo eles principalmente a Mata Atlântica e o Cerrado. Esses biomas são reconhecidos pela sua riqueza em biodiversidade e pela importância na manutenção dos serviços ecossistêmicos. Portanto, possui uma vegetação remanescente, composta por Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Semidecidual, que abrigam uma variedade de formações vegetais. A região apresenta aproximadamente 4.677 km² de vegetação natural remanescente, ocupando cerca de 20% da área total da ALPA (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

As principais categorias de vegetação remanescente na região são a Floresta Estacional Semidecidual, a Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Ombrófila Mista. A Floresta Estacional Semidecidual é caracterizada pela presença de árvores que perdem parcialmente suas folhas durante uma parte do ano. Já a Floresta Ombrófila Densa é uma formação florestal densa e exuberante, caracterizada por árvores perenes e grande biodiversidade. A Floresta Ombrófila Mista é uma transição entre a Floresta Atlântica e a Floresta de Araucária (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

4.1.5 Hidrografia

Com relação aos recursos hídricos, os principais usos da água são para abastecimento público, industrial, geração de energia elétrica, lazer e irrigação agrícola. E ainda, na UGRHI-14, existem quatro usinas geradoras de energia elétrica de destaque: UHE Paranapanema, UHE Chavantes, UHE Piraju e UHE Jurumirim. A Usina Hidrelétrica Paranapanema tem uma capacidade instalada de 31,1 MW (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2021).

Esse grande potencial hídrico se dá devido a sua rica malha de drenagem, que ocorre nos sistemas aquíferos Guarani, Serra Geral e Botucatu. Também é composta pelos principais rios, Paranapanema, Itararé, Capivari, Taquari, Paranapitanga e Itapeva. Estes desempenham um papel importante na disponibilidade de água subterrânea e são fundamentais no abastecimento de água potável, na irrigação agrícola e no suporte aos ecossistemas locais

(SIGRH, 2021).

4.2 Delimitação da sub-bacia de contribuição

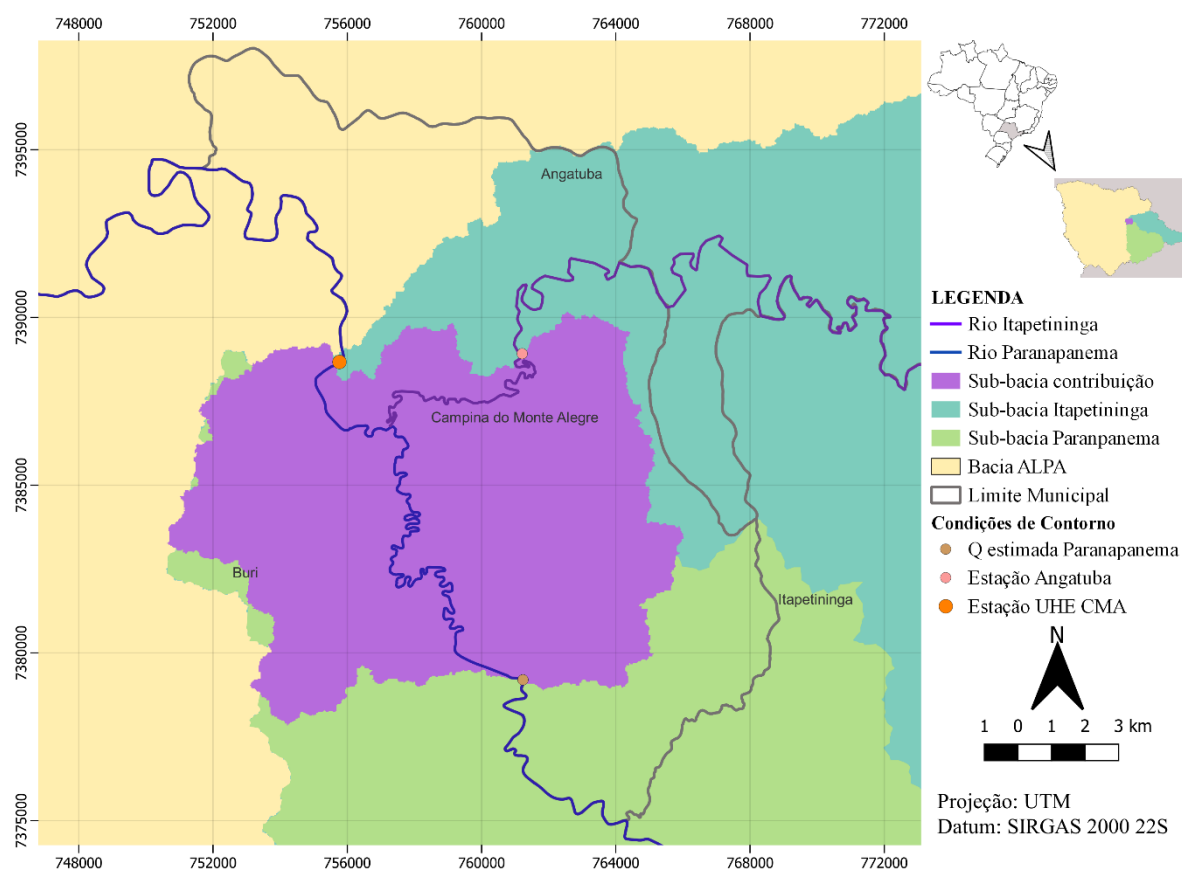
Foram delimitadas duas sub-bacias, a saber: Sub-bacia do rio Itapetininga, com área de 2.607,65 km² e Sub-bacia do rio Paranapanema, cuja área é de 3.200,80 km², sendo a área total de cerca de 5.808,45 km² referentes à Bacia de Contribuição para o ponto de inundação, que está localizado nas coordenadas 23°36'54.44"S e 48°29'19.34"O, na divisa entre os municípios de Buri e Campina do Monte Alegre. As nascentes das sub-bacias Itapetininga e Paranapanema estão localizadas, respectivamente, nas coordenadas 23°51'5.10"S e 47°23'56.93"O; 24°16'57.69"S e 48°16'41.98"O. Devido a extensa dimensão de ambas bacias de contribuição, a área de estudo foi limitada a partir de condições de contorno, como as estações de monitoramento fluviométricas.

Vale ressaltar que para o presente trabalho considerou-se como rio Itapetininga o rio principal da sub-bacia Itapetininga, pois este nasce na junção do rio Pinhal (ou Grande) com o rio Turvo na divisa de Pilar do Sul com Alambari. Essa consideração foi feita com a finalidade de facilitar a identidade visual da mesma.

Devido à vasta extensão da bacia hidrográfica, foi crucial adotar uma abordagem de delimitação em uma área reduzida para a determinação da vazão e modelagem hidrodinâmica, de modo a minimizar os erros de modelagem e garantir resultados mais precisos e confiáveis. Portanto, foram determinadas microbacias para realizar uma análise mais detalhada em escalas menores (Figura 5), levando em consideração as estações de monitoramento como condição de contorno (CC).

Uma bacia hidrográfica de grande extensão requer uma quantidade significativa de dados hidrológicos ou recursos para coletar tais dados, além de realizar medições em toda a sua extensão. Isso envolve a instalação de estações de monitoramento, coleta de amostras de água, medição de vazão dos rios e outras atividades de campo que demandam tempo, equipamentos e pessoal especializado. Ao considerar a redução da área de estudo por meio das microbacias hidrográficas, além de minimizar os erros de modelagem, também se obtém uma significativa redução de custos associados à realização de análises em campo.

Figura 5– Localização das estações de monitoramento na área de estudo



Fonte: elaborado pela autora.

4.3 Levantamento de Dados

4.3.1 Dados fisiográficos

As dimensões da bacia de contribuição para o ponto de inundação foram obtidas através de análises do Sistema de Informação Geográfica. Assim, suas características fisiográficas foram obtidas por meio do software QGIS 3.24 (software livre), a partir de Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDE). Em posse da delimitação, serão extraídas algumas características como área, perímetro, diferença de cota, declividade do relevo, comprimento dos rios principais, entre outras.

4.3.2 Dados topográficos

No início do presente estudo, a região de estudos não possui dados de levantamentos

topobatimétricos para realizar as simulações hidrodinâmicas. Para suprir essas informações, serão utilizadas imagens do modelo digital de elevação (MDE) derivado do SRTM (Missão Topográfica Radar Shuttle), com resolução de 30 m. Os mesmos podem ser obtidos gratuitamente na plataforma *Earth Explorer*. No entanto, tal resolução pode não ser suficiente para capturar detalhes finos do relevo e das áreas alagadas, o que pode afetar a precisão das simulações hidrodinâmicas.

4.3.3 Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos, chuva e vazão, foram disponibilizados pela CTG CORP Brasil (Tabela 1) empresa responsável pelas operações da Usina Hidrelétrica (UHE) Jurumirim, que está instalada no rio Paranapanema com a capacidade de gerar 100,9 MW. Foram fornecidos dados de uma série histórica, entre 2000 a 2020, de 14 estações fluviométricas e pluviométricas que captam dados horários. No entanto, desse levantamento foi utilizado apenas os dados da estação no exutório da sub-bacia de contribuição, após a confluência entre os rios Paranapanema e Itapetininga, pois os demais estavam localizados fora da nossa área de estudos.

Outra fonte de dados utilizada foi a plataforma *hidroweb* da Agência Nacional de Água, em que foram levantadas séries históricas compatíveis com o período das séries históricas fornecidas pela CTG, para fins de condição de contorno, uma vez que as mesmas estão a montante do ponto de inundação em estudo.

Tabela 1- Postos fluviométricos disponibilizados pela CTG e Hidroweb.

Fonte	Código da Estação	Nome da Estação	Estação	Rio	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Data da Instalação
CTG	64080000	UHE JURUMIRIM	Fluviométrica	Rio Paranapanema	-23°35'34"	-48°29'29"	571,00	01/06/1965
		CAMPINA DO MONTE ALEGRE (UHE CMA)						
Hidroweb	64075000	ANGATUBA	Fluviométrica	Rio Itapetininga	-23°56'39"	-48°38'97"	572,00	05/01/1935

Fonte: elaborado pela autora.

4.3.4 Dados de satélites

Para fins de comparação, foi levantado um registro histórico do evento de inundação de 2004 capturado pelo satélite Landsat 5 por meio de plataformas gratuitas, como a *Earth Explorer*. Foi selecionada a imagem cujo ID: LT05_L1TP_220076_20040204_20200904_02_T1, para a data de 04/02/2004, pois era a única disponível com baixo índice de cobertura de nuvens. O satélite Landsat 5 foi lançado em 1984 e operou até 2013, tornando-se um dos satélites mais bem-sucedidos em termos de longevidade e coleta de dados. Ele é equipado com um sensor de imagens de alta resolução chamado Thematic Mapper (TM), que possui sete bandas espectrais com resolução espacial de 30 metros (BHATTACHARYA et al., 2019).

Para análises de manchas de inundação, o Landsat 5 foi particularmente útil devido à sua capacidade de detectar a diferença de reflectância entre áreas inundadas e não inundadas. Isso é possível devido à resposta espectral única da água na faixa do infravermelho próximo. No entanto, devido à sua idade e limitações tecnológicas, as imagens do Landsat 5 podem apresentar distorções e defeitos, o que pode afetar a precisão das análises de manchas de inundação. Por essa razão, foi aplicado o filtro de tolerância de até 25% de presença de nuvens nas imagens, para que fossem reduzidas ainda mais distorções. No entanto, o registro obtido nestas condições, foi de dois dias após o pico máximo de inundação, podendo afetar na comparação proposta (NEVES, 2019).

A imagem foi processada no *software* QGIS 3.24 para criar uma composição de cores reais (RGB) e uma composição de índices (523) onde as áreas com concentração de água são realçadas em cor púrpura. Para obter informações mais refinadas, o raster foi reclassificado para identificar apenas as áreas inundadas e, em seguida, convertido em formato vetorial. Excluiu-se áreas de acúmulo de água que não foram causadas por transbordamento do rio, como açudes e lagos (GERMANO et al., 2022).

A banda 5, do infravermelho próximo, foi utilizada para identificar a água, pois essa região do espectro é altamente absorvida pela água. A banda 2, que corresponde à cor verde, e a banda 3, que corresponde à cor vermelha, são combinadas para realçar ainda mais os pixels de água na imagem, criando um contraste visual significativo, no caso deste estudo, a cor púrpura, o que facilitou a diferenciação entre as sombras causadas por presença de nuvens (GERMANO et al., 2022).

4.4 Processamento de dados

4.4.1 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas como entrada no modelo hidrodinâmico foram obtidas a partir dos dados observados nas estações de monitoramento Angatuba e UHE Jurumirim Campina do Monte Alegre, localizadas nos rios Itapetininga e Paranapanema (após confluência com o rio Itapetininga), respectivamente. Essas estações forneceram informações cruciais sobre as vazões dos rios, permitindo uma representação mais precisa do comportamento hidrodinâmico na área de estudo.

No entanto, para o rio Paranapanema, até o momento desse estudo, não haviam disponíveis dados observados próximo a montante de sua confluência com o rio Itapetininga. Nesse caso, as vazões de entrada foram estimadas com base no conceito simplificado de conservação de massa (Equação 2), ou seja, considerou-se o princípio fundamental da física, em que a massa não pode ser criada nem destruída (GOMES, 2021).

$$CCRPE = CCRI + CCRP \quad (2)$$

Onde:

CCRPE: Condição de contorno – vazão do Rio Paranapanema Exutório;

CCRI: Condição de contorno – vazão do Rio Itapetininga;

CCRP: Condição de contorno – vazão Rio Paranapanema;

Embora tal estimativa foi realizada considerando as vazões reais disponíveis nas estações de monitoramento, é vital ressaltar que os valores são aproximados, uma vez que os mesmos variam devido a múltiplos fatores, como as características do rio, a topografia, uso e ocupação da terra, condições climáticas, entre outros.

Dessa forma, foram obtidas as vazões que caracterizaram as condições de contorno citadas acima, conforme demonstra a Tabela 2. Para tanto, foram aplicados os valores de vazão máxima diária, uma vez que os dados da hidroweb são diários, e não horários como os dados da CTG.

Tabela 2- Relação de vazões máximas das condições de contorno nos rios Itapetinga e Paranapanema.

Data	Q máxima (m ³ /s)		
	CCRI	CCRP	CCRPE
30/01/2004	232	475	707
31/01/2004	236	585	821
01/02/2004	233	600	833
02/02/2004	223	593	816
03/02/2004	203	548	751
04/02/2004	194	477	671
05/02/2004	177	425	602
06/02/2004	160	372	532
07/02/2004	143	311	454
08/02/2004	128	267	395

Fonte: elaborado pela autora.

Com as condições de contorno definidas, o modelo hidrodinâmico HEC-RAS foi capaz de simular o comportamento hidrodinâmico na área de estudo. Utilizando os dados observados nas estações de monitoramento e as estimativas de vazões, o modelo pôde calcular os fluxos de água, as variações de nível e outros parâmetros hidrológicos relevantes para a área de interesse.

4.4.2 Modelo hidrodinâmico: HEC-RAS

Na primeira etapa da modelagem, foi adicionado ao RAS Mapper o MDE (SRTM) para determinar a malha computacional 2D, uma vez que a área de estudos não possui estudos de topobatimetria, sendo esta uma alternativa para representar a propagação de vazão. Para tanto, aplicou-se a delimitação baseada no conjunto de sub-bacias selecionadas para o balanço hídrico. Ainda, foram adicionadas as condições de contorno alicerçadas nas estações fluviométricas de monitoramento.

Para a etapa seguinte, inseriu-se os dados hidrológicos. Por se tratar de um evento específico, determinou-se o regime como não permanente e uniforme, ou seja, a vazão não é constante e não há variação no na seção transversal. Isso se deu pois não obtivemos dados topobatimétrico, em contrapartida pudemos aplicar dados de vazão de estações de monitoramento, com intervalos de uma hora. Após essa definição, adicionou-se também as condições de contorno, declividade dos trechos em estudo e coeficiente de rugosidade de Manning, conforme a Tabela 3.

Tabela 3- Declividade e coeficiente de rugosidade de Manning aplicados nas condições de contorno (CC) no modelo HEC-RAS.

	Declividade (m.m ⁻¹)	Coeficiente de Manning
CC: Rio Paranapanema (Exutório)	0,015	0,035
CC: Rio Itapetininga	0,020	0,035
CC: Rio Paranapanema	0,018	0,035

Fonte: elaborado pela autora.

4.4.2.1 Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning é essencial para determinar o comportamento da vazão sobre uma superfície, variando de acordo com a composição do fundo e das margens dos rios. Nesse sentido, o mesmo foi obtido através da observação local das características das paredes dos leitos dos rios, e em seguida relacionadas aos parâmetros da Tabela 4:

Tabela 4 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning.

Natureza das Paredes	N
Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfeitas e águas limpas. Tubos de cimento e de fundição em perfeitas condições.	0,011
Canais de cimento liso, de dimensões limitadas, de madeira aplainada e lixada; trechos retilíneos compridos e curvas de grande raio e água limpa. Tubos de fundição usados.	0,012
Canais com reboco de cimento não completamente liso; de madeira como no 2º, porém com traçado tortuoso e curvas de pequeno raio e juntas imperfeitas	0,014
Canais com reboco de cimento rugoso, depósitos no fundo, musgo nas paredes e traçado tortuoso.	0,018
Canais de chapas rebitadas e juntas irregulares; de terra, bem construídos com pequenos depósitos no fundo e vegetação rasteira nos taludes.	0,02
Canais de terra, com vegetação rasteira no fundo e nos taludes.	0,022
Canais de terra, com vegetação normal, fundo com cascalhos ou irregular por causa de erosões; revestidos com pedregulhos e vegetação.	0,025
Álveos naturais, cobertos de cascalhos e vegetação.	0,03
Álveos naturais, andamento tortuosos	0,035

Fonte: Bandini (1961).

A escolha do coeficiente 0,035 para álveos naturais com andamento tortuoso se deu com base nas características hidráulicas desses cursos d'água. Os rios com leitos naturais e trajetórias sinuosas apresentam uma maior resistência ao fluxo de água devido às curvas, obstáculos naturais e variações na largura do canal. Essas características resultam em uma maior rugosidade hidráulica ao longo do percurso, o que reduz a velocidade média da água.

O coeficiente de 0,035 é um valor empiricamente estabelecido que reflete essa rugosidade adicional dos rios com leitos naturais tortuosos. Dessa forma, levou-se em consideração as características fisiográficas desses rios e sua influência na dinâmica do escoamento.

4.4.3 Simulação HAND

Para simular manchas de inundação, foi aplicado como dado de entrada o MDT, sendo um raster da missão SRTM, com recorte da sub-bacia de contribuição.

A simulação se deu em algumas etapas, iniciando pelo condicionamento do MDT através do algoritmo Fill, que foi realizado com o intuito de ajustar o MDT para análise da drenagem, ou seja, removendo pixels contendo altimetrias anômalas e preenchendo vazios por meio da interpolação entre células vizinhas ao pixel em branco. A partir dessa etapa, foram gerados os MDT Corrigido (DEMC) e a direção de fluxo de drenagem (LDD).

Após a obtenção desses dados, foi realizada a classificação dos pixels inundáveis, bem como o fluxo acumulado (ACC), que serviram para identificar os canais de drenagem (DREN) presentes na área de estudo. Por fim, a superfície normalizada (HAND) foi gerada por meio da diferença entre as células da rede de drenagem e células da diferença de altura das encostas mais próximas.

Segundo Speckhann et al. (2018), ao utilizar o HAND é preciso compreender que o descritor mapeia o evento de forma estática, buscando determinar a extensão máxima relacionada a um fenômeno específico no passado ou a uma probabilidade de ocorrência baseada em análises de frequência de séries temporais de cotas (ou vazões).

Além disso, o descritor também pôde fornecer informações sobre a profundidade da máxima extensão da inundação. Por essa razão, neste estudo, estabeleceu-se uma profundidade de corte de 15 metros, seguindo relatos observacionais da comunidade ao entorno da área de estudo.

4.4.4 Métricas comparativas entre a imagem de satélite e os modelos aplicados:

HAND e HEC-RAS

Para comparar as saídas dos modelos com uma imagem de satélite Landsat 5, manchas de inundação foram geradas nos softwares HEC-RAS e HAND, sendo consideradas como área de controle (Landsat 05) e áreas simuladas (modelos aplicados). Para comparação entre os modelos, a área de controle passou a ser o resultado da mancha gerada pelo HEC-RAS, enquanto a área simulada manteve-se a mancha gerada pelo HAND.

A partir das manchas obtidas, estas foram sobrepostas utilizando o *software* QGIS 3.24, onde considerou-se áreas de acerto aquelas com 100% de sobreposição (Acs); Áreas omissas (Ao): áreas que não foram inundadas na simulação; Áreas de comissão (Acom): áreas que não foram inundadas pela área de controle, mas foram inundadas na simulação.

Foram empregados quatro parâmetros estatísticos para efetuar comparações entre as áreas de inundação simuladas pelos modelos e as imagens de satélite, bem como entre si. Esses parâmetros são: o teste estatístico F, a Acurácia Geral (AG), a Taxa de Alarme Falso (TAF) e o índice Kappa (K). Devido às suas amplas aplicações na avaliação comparativa de áreas inundadas em contextos de estudos científicos, bem como à capacidade de fornecer informações abrangentes acerca do desempenho dos modelos, esses parâmetros foram selecionados.

O parâmetro fitness (F) (Equação 3) foi calculado como a média harmônica dos índices de similaridade dos dois modelos. A média harmônica foi utilizada por ser mais sensível a valores pequenos do que a média aritmética, o que é importante para evitar que a precisão de um dos modelos seja mascarada por valores altos do outro modelo. O valor de Fitness (F) varia entre 0 e 1, com valores próximos de 1 indicando alta similaridade entre as manchas de inundação geradas pelos modelos. O método Fitness (F) é uma ferramenta útil para avaliar a precisão de modelos de inundação e selecionar o modelo mais adequado para aplicações específicas (MOMO et al., 2016).

$$F(\%) = \frac{A_{CS}}{A_C + A_S + A_{CS}} 100 \quad (3)$$

O método estatístico de Acurácia Geral (AG) (Equação 4) foi aplicado para comparar a precisão de dois modelos diferentes na geração de manchas de inundação. Esse método avaliou

a capacidade dos modelos em identificar corretamente áreas inundadas e distinguir entre áreas inundadas e não inundadas. O valor da precisão geral (AG) varia entre 0 e 100%, com valores próximos de 100% indicando alta precisão na identificação de áreas de inundação e um baixo número de áreas classificadas erroneamente. O método de precisão geral é uma ferramenta útil para avaliar a capacidade de modelos de inundação em identificar corretamente áreas inundadas e pode ser usado para selecionar o modelo mais adequado para aplicações específicas (MOMO et al., 2016).

$$AG(\%) = \frac{A_{CS}}{A_C} 100 \quad (4)$$

O cálculo da taxa de alarme falso (TAF) (Equação 5) foi realizado a partir da comparação entre as áreas simuladas pelos modelos e uma imagem real de satélite, uma vez que o método revela a capacidade dos modelos em identificar áreas que na verdade não estão inundadas. A escala de valores da taxa de alarme falso varia de 0 a 100%, sendo que valores próximos de 0 indicam que poucas áreas foram erroneamente classificadas como inundadas pelo modelo, e valores próximos de 100% indicam que muitas áreas foram erroneamente classificadas como inundadas (MELO, 2021).

$$TAF(\%) = \frac{A_S - A_{CS}}{A_S} 100 \quad (5)$$

Para verificar o grau de concordância entre as áreas de controle e as áreas simuladas, também será aplicado o índice Kappa (Equação 6). O valor do índice Kappa (k) varia entre 0 e 1, com valores próximos a 1 indicando alta concordância entre as áreas simuladas pelos modelos e as áreas observadas. Valores próximos a 0 indicam baixa concordância e que os modelos não são capazes de simular com precisão as áreas de inundação observadas (SILVA, 2019).

$$K = \frac{P_0 - P_C}{1 - P_C} \quad (6)$$

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^m N x_{i+} * n x_{+j}}{N_t^2} \quad (7)$$

Onde:

A_{cs} : Áreas de acerto;

A_c : Área de controle;

A_s : Área simulada.

P_o : Exatidão geral;

P_c : Proporção de unidades que concordam por casualidade;

m : Número de classes presentes na matriz de erro;

n_{xj} : Número de observações na linha i e coluna j ;

n_{xi+} e n_{x+j} : Totais marginais da linha i e coluna j ;

N_t : Número total de unidades amostrais contempladas pela matriz.

Ao considerar esses quatro parâmetros, foi possível obter uma avaliação mais completa e precisa da concordância entre as áreas de inundação simuladas pelos modelos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das sub-bacias dos rios Itapetininga e Paranapanema

As características das sub-bacias de estudo estão apresentadas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5- Características fisiográficas da sub-bacia de contribuição para o ponto de inundação.

Características	Sub-bacia de Contribuição
Área (km²)	128.85
Comprimento do rio principal (km)	12.04
Diferença de cota (m)	81

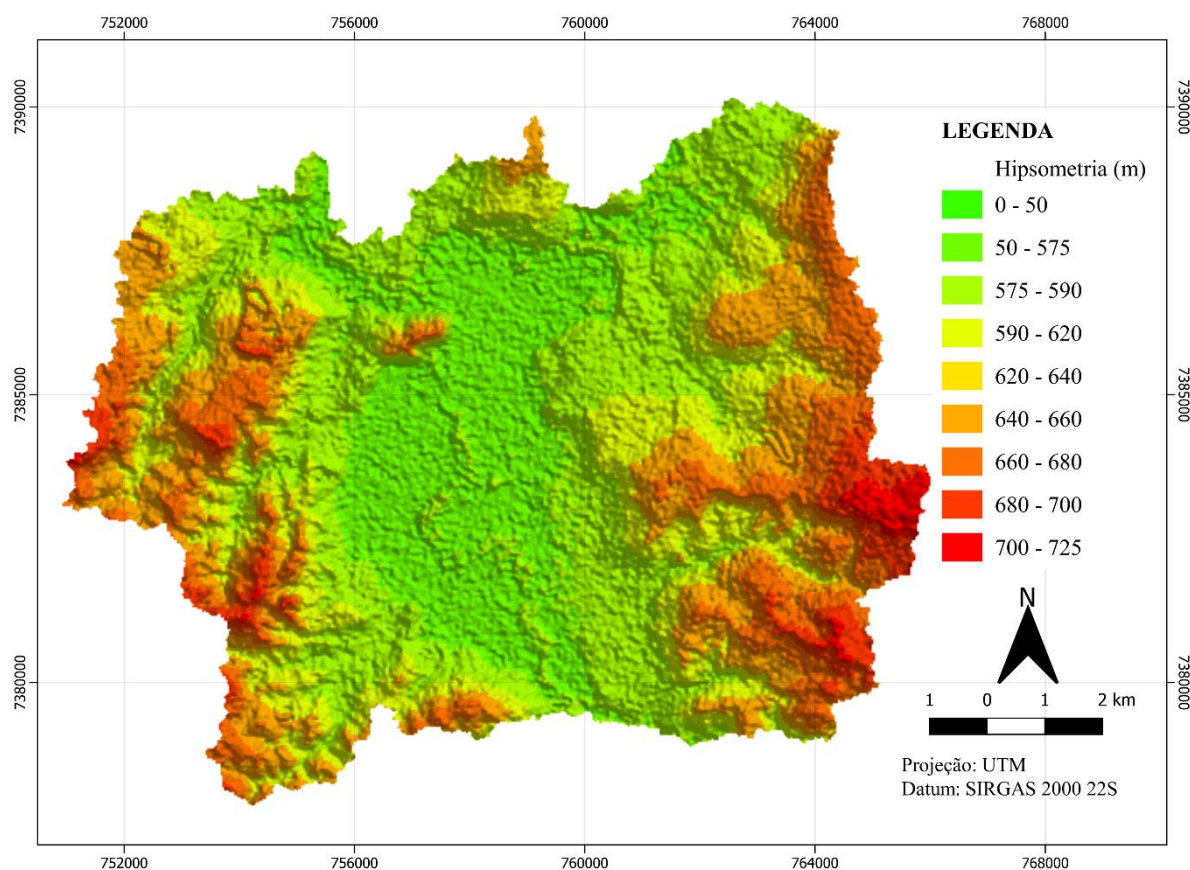
Fonte: elaborado pela autora.

A declividade da sub-bacia de contribuição foi classificada segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (1979) por meio da obtenção de seus valores sobre o MDT. Em geral, a sub-bacia evidenciou três classes: o Plano (0 - 3%), o Suave Ondulado (3 - 8%) e o Forte Ondulado (20 - 45 %).

No entanto, a área de estudo pode ser considerada plana, uma vez que esta possui majoritariamente declividade entre 0 e 3%. Em terrenos planos, a velocidade de escoamento da água é menor, o que pode levar ao acúmulo de água em determinadas áreas e prolongar a duração da inundação, agravando os impactos socioeconômicos e ambientais.

Enquanto que os relevos suave ondulados e o forte ondulado ocorrem em porções terrestres mais distantes das redes de drenagem (Figura 6). O aumento da declividade favorece o acúmulo da água em regiões planas, bem como a chegada da água a esses pontos com maior velocidade, podendo agravar um evento de inundação.

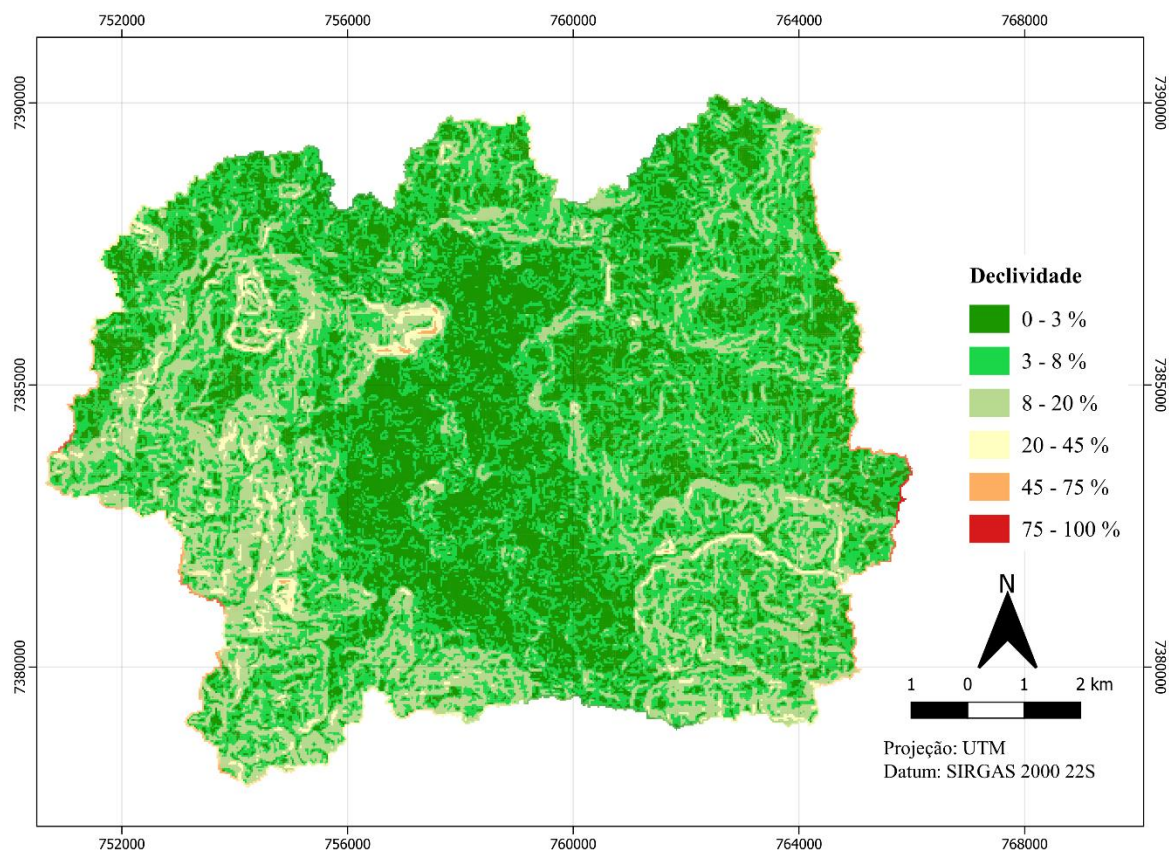
Figura 6 - Mapa hipsométrico da sub-bacia de contribuição.



Fonte: elaborado pela autora.

Observou-se a partir do mapa (Figura 7), que a montante de confluência, entre os rios Itapetininga e Paranapenema, ocorre uma formação característica, equivalente a uma bacia de contenção, ou seja, uma porção plana do relevo, cercada por morros e morretes, que detém parte do volume da inundação durante um evento.

Figura 7- Mapa de declividade da sub-bacia de contribuição.



Fonte: elaborado pela autora.

5.2 Dados do evento de fevereiro de 2004

Foram levantados registros históricos do evento de inundação que ocorreu no fim de janeiro e início de fevereiro de 2004. As imagens a seguir (Figura 8), foram obtidas por meio de capturas de tela feitas a partir de um vídeo publicado no YouTube, por um munícipe que registrou cerca de 40 minutos de um evento no município de Campina do Monte Alegre, e ao percorrer o município se deparou com alguns pontos de inundação.

Figura 8 - Acervo histórico capturado por munícipe em um evento de inundação de 2004



Fonte: <https://youtu.be/QCQcU3HBxpA?si=LIY18jdeBezQLurl>.

O testemunho e relatos de pessoas que experienciaram inundações podem trazer informações valiosas sobre o impacto e a extensão desses eventos, bem como os fatores que contribuíram para a ocorrência e os danos causados. E ainda, pode criar uma consciência direta do risco que os munícipes enfrentam em suas áreas de residência ou trabalho. Ao documentar e compartilhar suas experiências, esses registros pessoais ajudam a sensibilizar a comunidade local e as autoridades responsáveis sobre a realidade das inundações e seus efeitos prejudiciais.

Magalhães & Maia (2010) propuseram uma abordagem prática para avaliar os níveis de água durante enchentes em áreas estuarinas, utilizando o modelo HEC-RAS visando identificar áreas inundadas para enchentes de retorno de 10, 50 e 100 anos. A metodologia foi aplicada nos estuários dos rios Neiva, Âncora e Coura, resultando em boa correspondência entre os mapas de inundação e os relatos locais. Conclui-se que a metodologia e ferramentas adotadas foram adequadas para atingir os objetivos do estudo.

Marotti et al. (2014) realizaram análise histórica no município de São Carlos. Foram

coletadas informações sobre as inundações de 2007 a 2013 na cidade e aplicados questionários abertos para identificar os danos materiais e imateriais resultantes. A Pesquisa revelou que as enchentes são persistentes, sendo as mais severas as mais prejudiciais. Os autores concluíram que a inobservação do conjunto de fatores presentes nas inundações leva à persistência de soluções isoladas e não abrangentes.

Em 2019, o Departamento de Gestão Territorial (DEGET) e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) realizaram a Setorização de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa, Enchentes e Inundações, no município de Conceição das Alagoas, MG. O trabalho foi dividido em três etapas, inicialmente foram levantadas informações prévias sobre as características geológicas do município. Na segunda etapa foram realizadas visitas a campo em regiões com registros de desastres naturais de acordo com a defesa civil. Por fim, na última etapa foram feitas análises visuais de características, indícios e marcas causadas por desastres naturais, segundo o relato dos munícipes. O estudo não identificou setores de alto ou muito alto risco no município. No entanto, ressaltou-se a relevância de se trabalhar em comunhão com a sociedade, uma vez que ingerências podem colocar em risco a população. E ainda, originar áreas de risco de grau elevado.

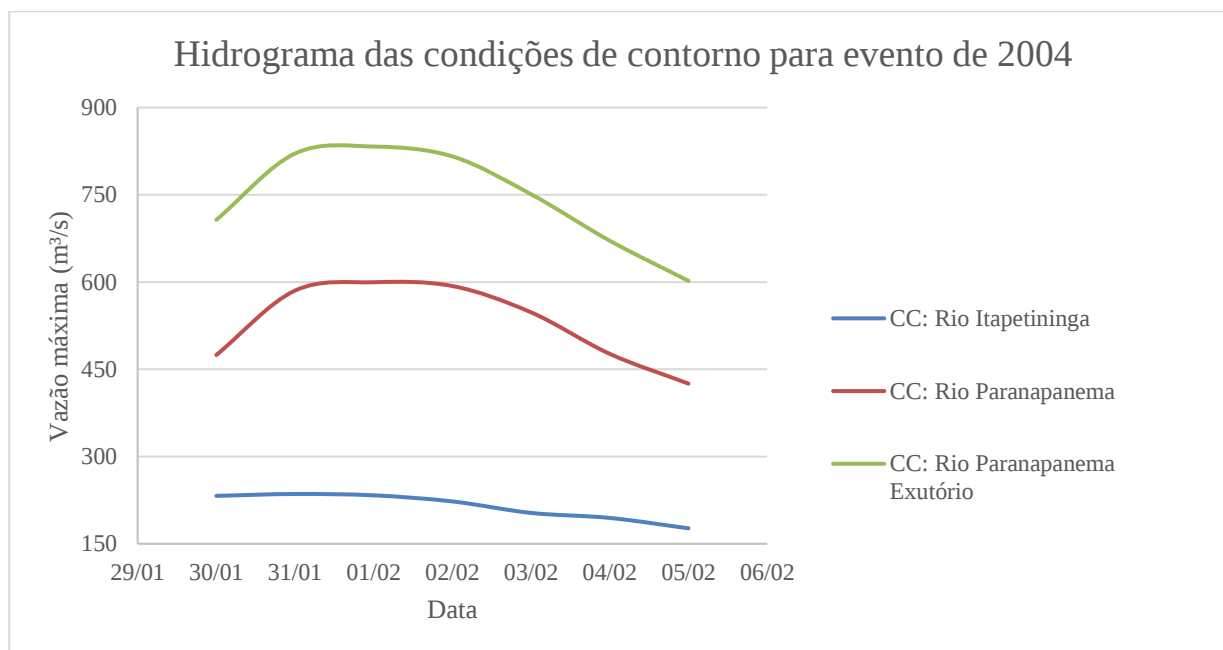
Tais relatos podem fornecer detalhes únicos sobre os impactos sociais, econômicos e emocionais das inundações, destacando a necessidade de medidas de prevenção, mitigação e resposta adequadas. Eles também podem evidenciar os desafios enfrentados pelos moradores afetados e a necessidade de ações para reduzir a vulnerabilidade das áreas propensas a inundações.

Ao incorporar os registros dos munícipes no processo de planejamento e gestão de riscos, é possível aumentar a conscientização sobre a importância da prevenção e da adoção de medidas de proteção individual e comunitária, bem como, influenciar a tomada de decisões das autoridades, incentivando investimentos em infraestrutura de proteção contra inundações, desenvolvimento de planos de evacuação e educação pública sobre a segurança durante eventos extremos. Além de criar uma rede de compartilhamento de informações e experiências entre os membros da comunidade. Isso fortalece a coesão social e a solidariedade, estimulando a colaboração mútua na adoção de medidas preventivas e na preparação para situações de risco.

Para simular a expansão da mancha de inundação que originou os registros acima, foram tratados os dados das estações de monitoramento fluviométrico presentes nas condições de contorno do Rio Paranapanema (Exutório) e Rio Itapetininga. Assim, os dados hidrológicos da condição de contorno do Rio Paranapanema, foram obtidos por meio das condições de contorno

da sub-bacia de contribuição (Tabela 2). Dessa forma, foi possível obter os hidrogramas resultantes das condições de contorno, conforme gráficos a seguir:

Figura 9 - Relação entre os hidrogramas das condições de contorno da sub-bacia de contribuição



Fonte: elaborado pela autora.

Observando a relação entre os hidrogramas de vazão da bacia de contribuição para a área de inundação, notou-se que os mesmos apresentam picos de vazão máxima em diferentes momentos e volumes. Essas diferenças podem ter impactos significativos na formação e extensão de uma mancha de inundação.

No caso dos hidrogramas mencionados, observa-se que o Rio Itapetininga atingiu seu pico de vazão de 220 m³/s às 07h do dia 01/02/2004. Por outro lado, o Rio Paranapanema registrou um pico de vazão de 629 m³/s às 17h do mesmo dia. Indicando que um maior volume de água atingiu a área de inundação em um momento posterior. Isso pode acarretar em um efeito de remanso e em um aumento mais rápido do nível de água, levando a uma inundação de maior magnitude e potencialmente causando impactos mais significativos.

É importante destacar que o hidrograma do Rio Paranapanema no ponto de inundação apresentou um pico de vazão ainda mais elevado, atingindo 833 m³/s às 09h do dia 01/02/2004, levando cerca de quatro dias para retomar as vazões comumente mensuradas pela estação fluviométrica. Dentre os fatores que podem ocasionar a lenta dissipação da mancha de

inundação, estão o efeito de remanso, volume e intensidade da precipitação, relevo da área afetada, capacidade de absorção de água no solo, entre outros.

5.3 Imagem óptica do satélite Landsat 5

Após a obtenção da imagem LT05_L1TP_220076_20040204_20200904_02_T1, que representa o evento de inundação no dia 04/02/2004, foi feito o tratamento da imagem raster do satélite Landsat 5 para visualizar a mancha de inundação real, uma vez que devido às suas características e capacidades, inclusive as bandas espectrais, incluindo o espectro visível e infravermelho próximo, que são relevantes para identificar a presença de água.

A técnica de combinação de cores RGB, que envolve as bandas 5, 2 e 3 do Landsat 5 (correspondentes ao infravermelho próximo, verde e vermelho, respectivamente) (Figura 10), é amplamente utilizada para realçar a representação da água em imagens de satélite.

Figura 10- Composição RGB da imagem obtida por meio do Landsat 5.



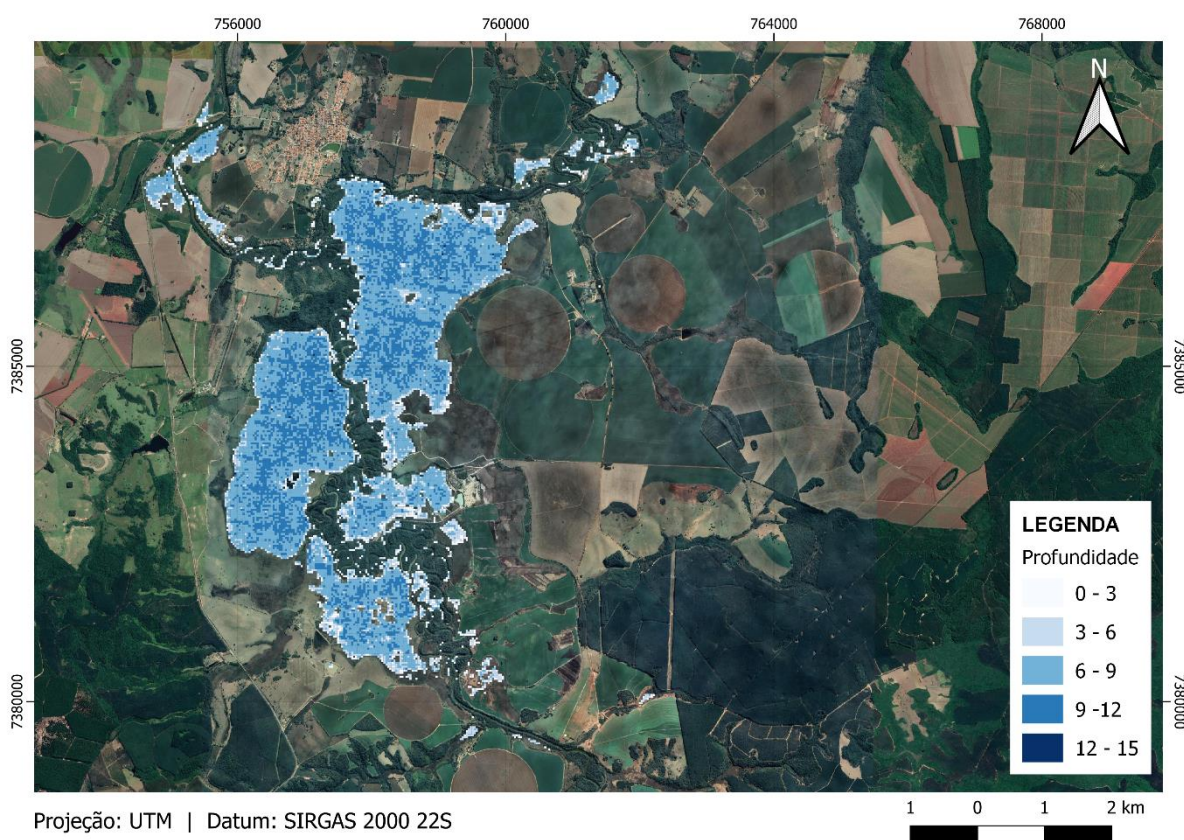
Fonte: elaborado pela autora.

Essa combinação específica de bandas possibilitou uma distinção clara entre as massas

de água e outros elementos do cenário, incluindo as sombras das nuvens, que poderiam causar confusão em outras composições (GERMANO, 2022).

Após o tratamento da imagem raster, destacando os pixels que representam a água por meio da composição de cores RGB, foi possível vetorizar o resultado (Figura 11), para realizar análises adicionais, como medir a área total da inundação e compará-la com as áreas simuladas pelos modelos HEC-RAS e HAND.

Figura 11- Vetorização da mancha de inundação obtida por meio do Landsat 5.



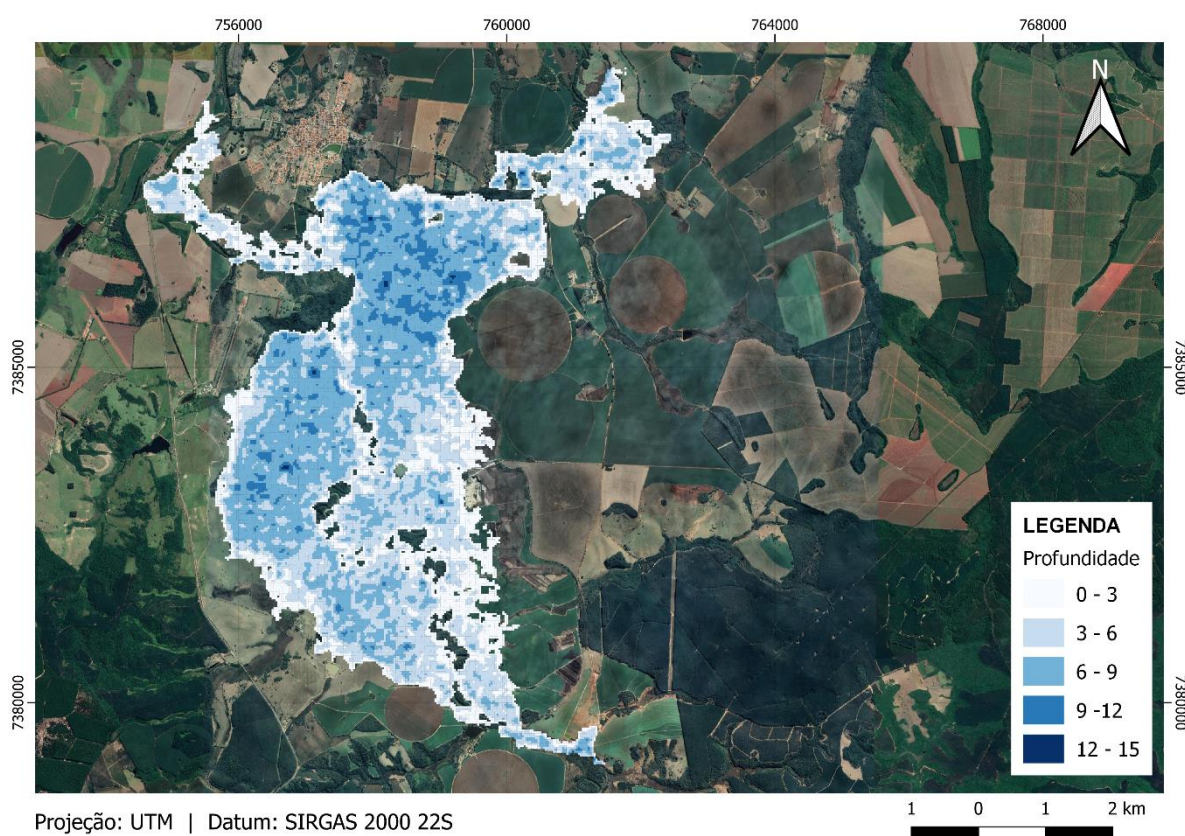
Fonte: elaborado pela autora.

A persistência da representação de água na mancha de inundação mesmo após 3 dias sugere que o evento de inundação foi significativo em termos de magnitude e extensão. Além disso, a profundidade máxima registrada durante o evento atingiu 14,2 metros, indicando uma inundação de grande escala e impacto.

5.4 Simulação modelo HEC-RAS

A mancha de inundação gerada por esse modelo corresponde a área de 27.111 km² (Figura 12), cuja extensão supera a retratada pela imagem de satélite capturada em 04/02, como previsto por se tratar de uma representação posterior ao pico da inundação.

Figura 12- Simulação de evento de inundação por meio do modelo HEC-RAS.



Fonte: elaborado pela autora.

Ao reproduzir a enchente que ocorreu em 1º de fevereiro de 2004, observa-se que a maior expansão da mancha ocorreu ao longo do Rio Paranapanema. No entanto, o hidrograma da sub-bacia de contribuição (Figura 12) mostra que os rios registraram picos de fluxo máximo em tempos diferentes, o rio Itapetininga às 07:00h o rio Paranapanema às 17:00 em 1º de fevereiro, com vazões máximas de 220m³.s⁻¹ e 629m³.s⁻¹, respectivamente. Embora a onda de cheia do rio Itapetininga tenha a sua chegada antecipada no ponto de confluência, sua vazão inferior ao rio Paranapanema, praticamente um terço, pode ter causado um efeito de remanso em seu encontro com o rio Paranapanema, levado a uma maior expansão da mancha de

inundação a montante da confluência.

Segundo Pontes et al (2017), o efeito de remanso ocorre quando o fluxo de um rio é atrasado ou bloqueado pela chegada de água de outro rio ou pela ocorrência de obstáculos naturais ou artificiais. Esse efeito pode ser responsável pelo aumento do nível de água na seção a montante da confluência, o que pode ter contribuído para a maior expansão da planície de inundação ao longo do Rio Paranapanema.

Somado a esse fator, a ausência de dados topobatimétricos na área de estudo, são fatores de incertezas, levando a simulação a resultados imprecisos, uma vez que as análises topobatimétricas permitem obter informações detalhadas sobre a forma do fundo do rio, como a presença de bancos de areia, pedras, rochas e obstáculos, que podem influenciar o comportamento hidráulico da bacia hidrográfica e afetar a velocidade e direção do fluxo de água. Além disso, a análise da batimetria do leito do rio é essencial para o cálculo preciso do volume de água armazenado na bacia, o que é fundamental para a previsão da magnitude e extensão das inundações (SILVA & MATIAS, 2022).

Quanto as declividades inseridas ao modelo nas condições de contorno nos rios Itapetininga e Paranapanema, essas foram de $0,020 \text{ m.m}^{-1}$ e $0,018 \text{ m.m}^{-1}$ respectivamente, para o exutório foi de $0,015 \text{ m.m}^{-1}$. Porém, são dados obtidos através do MDE (SRTM), pois ainda não há estudos topográficos na área de estudo para validar tais valores, de modo que possa ter acarretado em mais imprecisão na simulação. Logo, a realização de estudos topográficos é fundamental para a obtenção de dados precisos sobre a declividade do terreno, pois a utilização de valores imprecisos pode influenciar diretamente na simulação da mancha de inundação. Isso ocorre porque o HEC-RAS utiliza a declividade para calcular a velocidade de escoamento da água, que é um fator determinante na expansão da mancha de inundação. A utilização de valores imprecisos de declividade pode levar a uma subestimação ou superestimação da velocidade da água, o que pode afetar diretamente a simulação da mancha de inundação (MOREIRA et al., 2019).

Outro fator que pode influenciar na super ou subestimação da mancha de inundação é o coeficiente de rugosidade, que para o presente estudo foi adicionado às condições de contorno e exutório no valor de 0,035, pois foi considerado que o canal é natural, com trechos de vegetação e presença de atividade agropecuária na planície de inundação.

No entanto, o mesmo pode ser calibrado, para tal, é necessário comparar os resultados da simulação com dados de campo ou observações reais georreferenciadas, a fim de verificar se o modelo reflete adequadamente as características hidrológicas da área de estudo. Ajustes

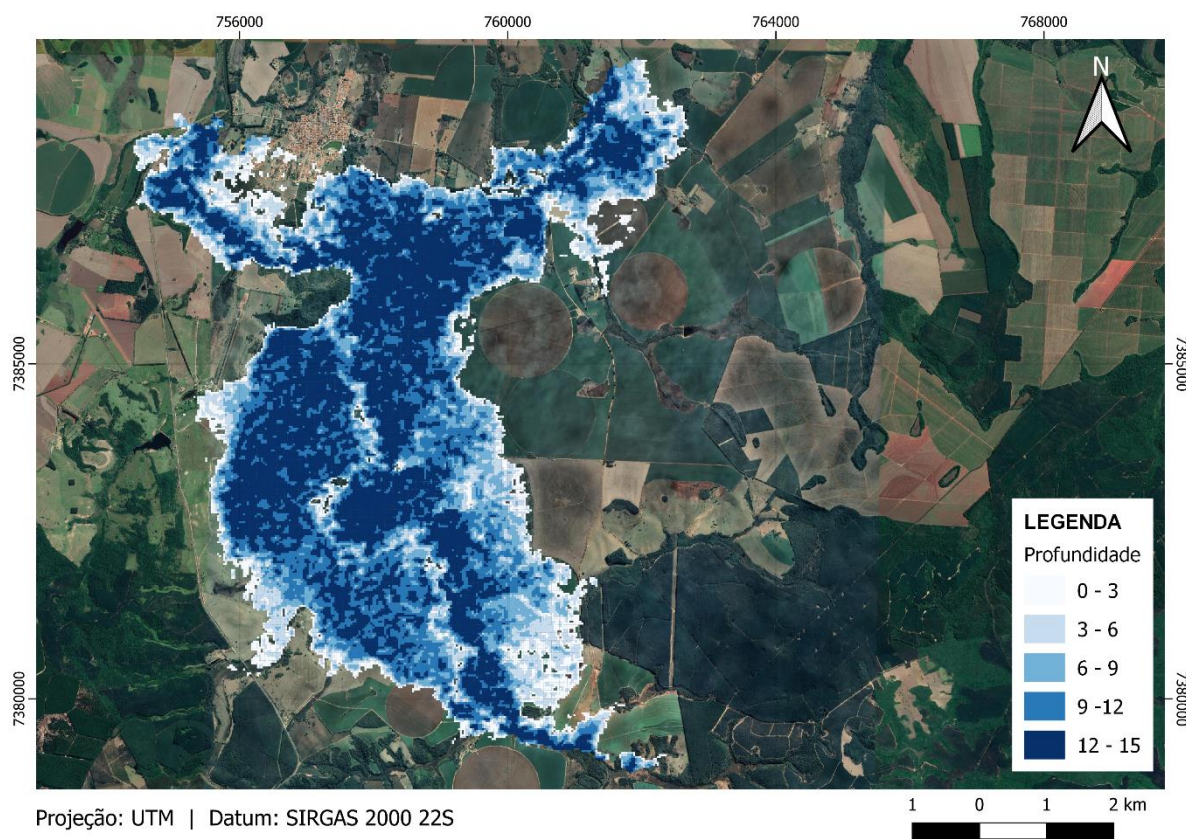
sucessivos do coeficiente de Manning devem ser realizados até que os resultados da simulação sejam compatíveis com as observações de campo. Além disso, é importante destacar que diferentes condições de vegetação, cobertura do solo e características do canal podem afetar o coeficiente de rugosidade.

5.5 Simulação Hand model

O modelo HAND utiliza estágios de altura para controlar a inundação, de forma que a água flua do canal mais próximo para áreas vizinhas mais altas. Isso significa que os canais que controlam as inundações respeitam as condições de equilíbrio hidrostático lateral. Portanto, é considerado uma metodologia robusta e fácil de entender, pois permite uma relação simples entre as alturas do algoritmo e a vulnerabilidade às inundações. Na prática, a previsão do modelo é alcançada definindo um limiar de altura HAND, o que permite a geração da superfície máxima de inundação em relação a um limite escolhido. Para o presente estudo, estabeleceu-se o limite de 15 metros. Tal limite foi estabelecido de acordo com o valor obtido no modelo HEC-RAS para que os parâmetros de comparação fossem os mesmos.

Diante do evento de enchente de 2004, foi possível observar que a simulação gerou mancha de inundação mais extensa com área total de 37.753 km², ou seja, ultrapassou consideravelmente as áreas alagadas pela imagem do Landsat 5 e pelo modelo HEC-RAS, conforme figura a seguir:

Figura 13- Simulação de evento de inundação por meio do modelo HAND.



Fonte: elaborado pela autora.

Tal resultado pode estar atrelado a uma das principais limitações do modelo HAND, que se dá devido a sua simplificação da dinâmica hidrológica, que não considera processos mais complexos, como por exemplo o efeito de remanso na confluência dos rios, a velocidade da água, a capacidade de infiltração do solo, entre outros .

Compreende-se que há uma superestimação dos valores da extensão da mancha, principalmente em regiões planas, o que levou à demarcação de alagamentos na área urbana do município e em pequenos afluentes. O mesmo não pode ser dito com relação a profundidade, pois não foram feitas análises em campo para demarcar e mensurar pontos reais de inundação. Embora haja a imagem real do evento, a mesma é uma representação posterior ao evento e não fornece dados de profundidade, apenas extensão espacial.

Apesar de não ser completamente fiel ao evento, a simulação HAND pode ser considerada satisfatória, pois é um modelo simplificado e ainda apresenta zonas de risco.

5.6 Comparação entre a imagem de satélite e as imagens inundadas pelos modelos HEC-RAS e HAND

A expansão da mancha de inundação obtida por meio de imagem do satélite Landsat 5 foi comparada com as manchas simuladas nos modelos HAND e HEC-RAS. E ainda, o desempenho entre os modelos, uma vez que o primeiro é de menor complexidade com relação ao segundo. Dessa forma, tais comparações permitiu avaliar a capacidade de cada modelo na representação de áreas de inundação de forma precisa. Para tanto, foram aplicados os parâmetros estatísticos como Fitness, Acurácia Geral, Taxa de Alarme Falso e Índice Kappa, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar acurácia dos modelos HEC-RAS, HAND comparados a imagem do satélite Landsat 5, bem como entre os mesmos.

Parâmetros	HEC-RAS X LANDSAT	HAND X Landsat	HAND X HEC-RAS
A simulada (km²)	27.11	37.75	37.75
A controle (km²)	14.70	14.70	27.11
Acs (km²)	14.58	14.63	26.95
Ao (km²)	0.12	0.07	0.16
Acom (km²)	12.53	23.13	10.80
F (%)	53.54	53.54	71.09
AG (%)	99.19	99.52	99.41
TAF (%)	46.23	61.26	28.61
Kappa (K)	0.57	0.55	0.60

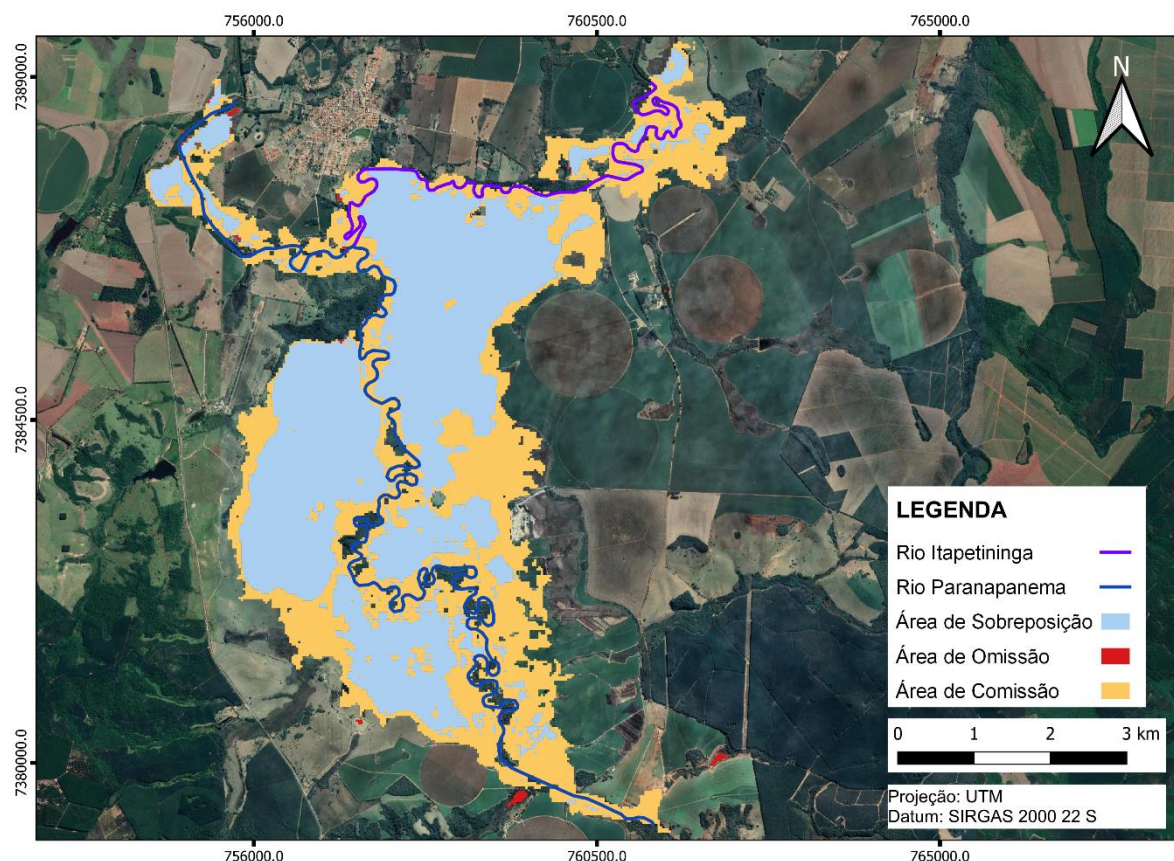
Fonte: elaborado pela autora.

5.6.1 HEC-RAS X Landsat 5

A Figura 14 apresenta a sobreposição entre a imagem obtida por meio do satélite Landsat 5 e a área de inundação gerada pelo HEC-RAS. A avaliação levou em consideração três tipos de áreas: Áreas de sobreposição (Acs), consideradas áreas de 100% de acerto, pois representa o que inundou em comum entre as duas áreas; Áreas de omissão (Ao), que estavam

inundadas pelo LANDSAT 5, mas não foram inundadas pelo modelo HEC-RAS; e, por fim, Áreas de comissão (Acom), que foram inundadas pelo HEC-RAS, mas estavam inundadas pelo LANDSAT 5.

Figura 14- Comparação de áreas de inundação gerada pelo HEC-RAS e a imagem do satélite Landsat 5.



Fonte: elaborado pela autora.

Foi possível observar que as áreas de acerto predominam em relação às áreas de omissão e comissão, especialmente nas regiões de menor declividade, onde a planície de inundação é considerada plana. E também, a montante da confluência, devido ao possível efeito de remanso na chegada de ondas de cheia. Os trechos ao leito do rio que não possuem representação da mancha de inundação, são as áreas de vegetação e de declividade levemente maiores comparadas aos demais pontos inundados.

Destaca-se também as Áreas de Comissão, ou seja, áreas superestimadas pelo modelo HEC-RAS, representando praticamente o dobro do que foi representado pelo satélite. Em contrapartida, as Áreas de Omissão foram significativamente baixas, o que indica que o modelo

não subestimou áreas inundadas, como demonstra a Tabela 6.

Analisando os parâmetros estatísticos, o índice Fitness de 54% indica que há uma razoável concordância entre a mancha de inundação simulada e a mancha de inundação real. No entanto, ainda existem algumas diferenças significativas entre elas, indicando que o modelo de simulação pode ser melhorado ou que alguns dados podem ser adicionados para melhorar a precisão da simulação. Portanto, a análise estatística sugere que ainda há espaço para aprimoramento do modelo utilizado na simulação da inundação.

Já a Acurácia Geral de 99,19% indica que houve uma boa correspondência entre as duas manchas, simulada e real. Isso significa que o modelo utilizado para gerar a mancha simulada tem uma alta capacidade de prever a extensão da inundação na área em estudo. É importante lembrar, no entanto, que a Acurácia Geral é uma medida global e não informa como o modelo se comporta em cada tipo de erro individual, como as áreas de comissão e omissão. Portanto, é necessário avaliar outros indicadores, como Taxa de Alarme Falso e o índice Kappa, para obter uma visão mais completa da qualidade do modelo.

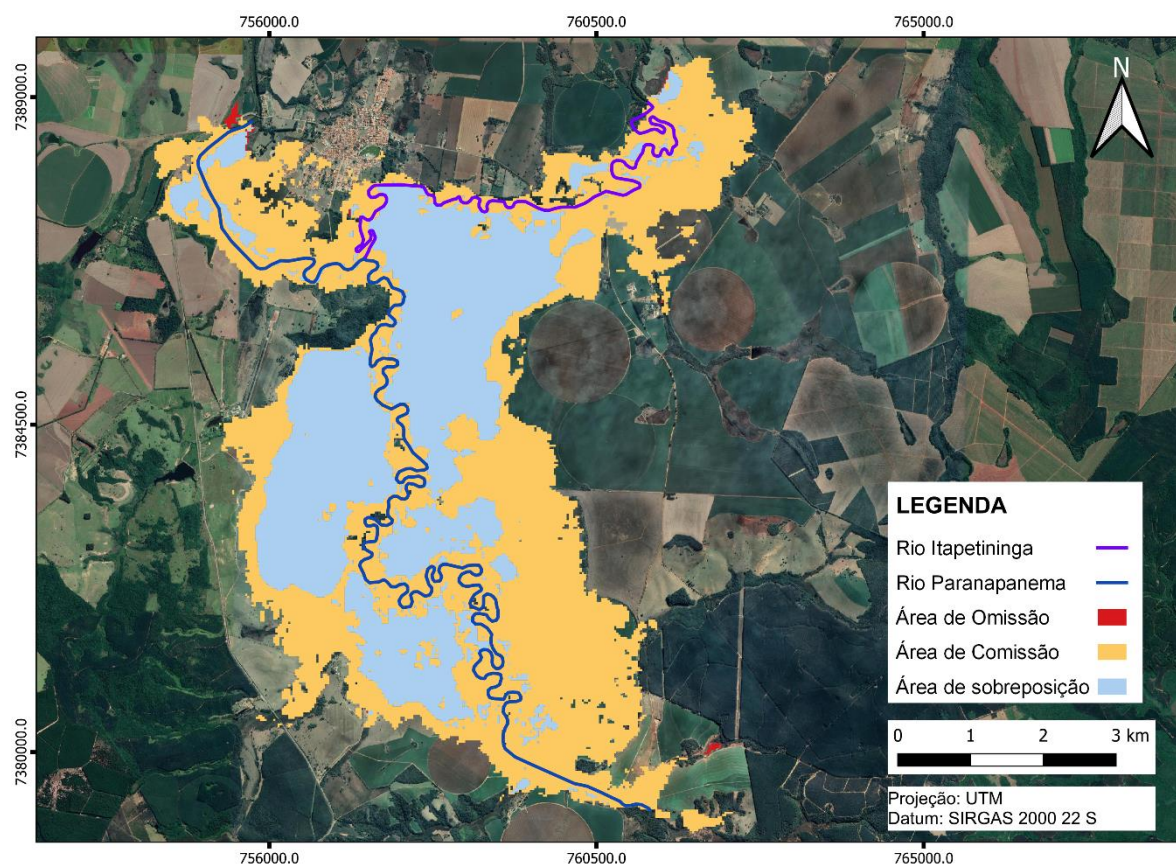
Uma taxa de alarme falso de 46,23% indica que aproximadamente metade da área indicada como inundada pelo modelo simulado não foi inundada na realidade. Isso pode ser um indicativo de limitações ou imprecisões do modelo utilizado na simulação. Já o índice kappa de 0,57 indica que há uma concordância moderada entre a mancha de inundação simulada e a mancha de inundação real.

Embora a comparação tenha sido feita entre o pico da inundação e um registro ótico em datas diferentes, entende-se que o relevo contribuiu para a contenção do volume de inundação, sendo possível observar a lenta regressão da onda de cheia registrada por satélite. Desse modo, considerando que a mancha de inundação não reduziu consideravelmente sua expansão, o modelo hidrodinâmico apresentou superestimação em seus resultados comparados com o evento real.

5.6.2 HAND X Landsat 5

Partindo para a comparação entre a mancha real do satélite LANDSAT 5 e a mancha simulada pelo modelo HAND, demonstrou-se um processo importante para avaliar a qualidade da estimativa gerada pelo modelo em relação ao evento de inundação ocorrido. Com base nos parâmetros estatísticos utilizados, pode-se observar que o modelo apresentou resultados satisfatórios em alguns métodos, mas deixou a desejar em outros.

Figura 15- Comparação de áreas de inundação gerada pelo HAND e a imagem do satélite Landsat 5.



Fonte: elaborado pela autora.

Assim como na simulação do HEC-RAS, a simulação no modelo HAND também apresentou certa predominância nas áreas de acerto em relação às áreas de omissão. No entanto, as áreas de comissão, ou seja, as áreas superestimadas pelo modelo, sobressaem mais de 60% da imagem do satélite (Figura 15). Além da análise espacial da mancha, é importante considerar os parâmetros estatísticos para avaliar a qualidade da estimativa gerada pelo modelo HAND (Tabela 6).

O parâmetro Fitness resultou em 53.54%, o que significa que mais da metade da área inundada simulada pelo modelo coincidiu com a área inundada identificada pela imagem de satélite. Já a Acurácia Geral alcançou um valor elevado de 99.52%, tal resultado indica que o modelo foi capaz de identificar com precisão a maior parte das áreas inundadas e não inundadas.

No entanto, a Taxa de Alarme Falso atingiu um valor preocupante de 61.26% indicando que o modelo pode ter superestimado a área de inundação em muitas regiões. Por fim, o índice Kappa (k) apresentou um valor moderado de 0.55. Esse valor pode ser explicado pelas

discrepâncias entre as manchas de inundação identificadas pelo modelo e pela imagem de satélite, que afetaram a concordância entre as duas.

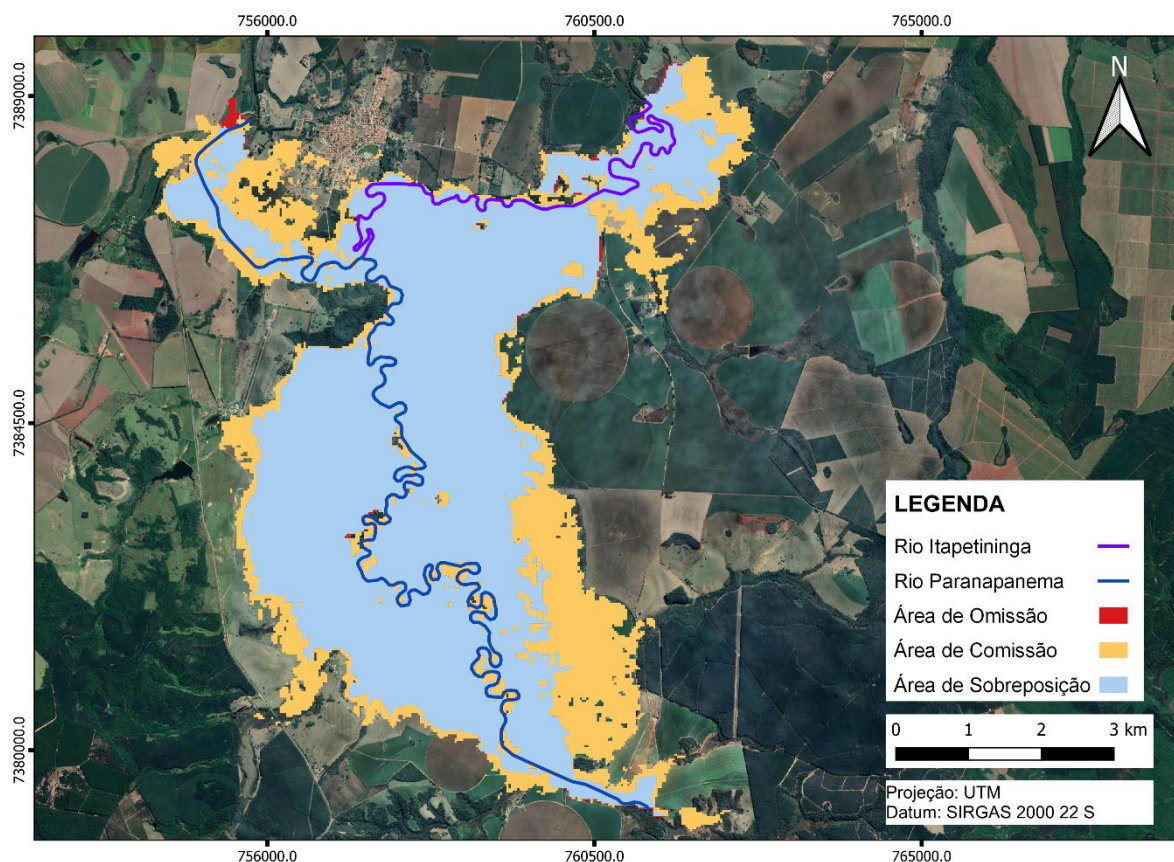
Assim como apresentado no presente trabalho, observou-se em outros estudos, como Nobre et al. (2015), Mengue et al (2016), Momo et al. (2016) Alves et al. (2020), que o modelo HAND apresentou manchas superestimadas, tanto em áreas continentais, quanto regionais, principalmente em cabeceiras e afluentes menores. Isso se dá, pois a extensão da área inundada é diretamente influenciada pela maneira como as redes de drenagem são criadas no modelo, uma vez que a superfície normalizada é gerada automaticamente pelo modelo.

5.6.3 HAND X HEC-RAS

A comparação entre diferentes modelos de simulação de inundação é crucial para avaliar a capacidade de cada um em reproduzir as áreas inundadas em uma região. No caso em questão, foram comparados os modelos HEC-RAS e HAND (Figura 16- Comparação de áreas de inundação gerada pelos modelos HEC-RAS e HAND.Figura 16) individualmente com a imagem real do satélite LANDSAT 5, por meio de análises espaciais e parâmetros estatísticos.

Contudo, para uma análise mais abrangente e precisa, é necessário comparar os resultados obtidos pelos dois modelos entre si, a fim de identificar suas vantagens e limitações em relação ao outro. Isso permitirá uma avaliação mais completa da capacidade dos modelos em simular áreas inundadas e fornecer informações valiosas para futuras tomadas de decisão em situações de enchentes e inundações.

Figura 16- Comparação de áreas de inundação gerada pelos modelos HEC-RAS e HAND.



Fonte: elaborado pela autora.

Analisando a expansão das manchas apresentadas na comparação dos modelos HAND x HEC-RAS (Tabela 6), podemos observar que a área simulada pelo modelo HAND foi de 37,75 km², enquanto a área controle foi de 27,11 km². A área de acerto, que representa a área em que os modelos simulados concordam com a mancha real, foi de 26,95 km², o que indica uma boa precisão dos modelos em relação à realidade.

A área de omissão, que representa a área inundada na realidade, mas que não foi simulada pelos modelos, foi de apenas 0,16 km², indicando que os modelos foram capazes de detectar a maioria das áreas inundadas. Por outro lado, a área de comissão, que representa as áreas simuladas pelos modelos, mas que não estão inundadas na realidade, foi de 10,80 km², o que representa cerca de 28,61% da área total simulada. Isso indica que os modelos superestimaram a área inundada em algumas regiões.

O parâmetro fitness apresentou um valor de 71,09%, indicando uma boa precisão. A acurácia geral apresentou um valor de 99,41%, o que é considerado excelente. Já a taxa de alarme falso foi de 28,61%, indicando que os modelos apresentaram algumas áreas simuladas

incorretamente. Por fim, o índice kappa (k), que mede a concordância entre os modelos simulados e a realidade, apresentou um valor de 0,60, indicando uma concordância moderada entre os modelos e a mancha real.

Portanto, a comparação entre os modelos HAND x HEC-RAS mostrou que ambos apresentaram boa precisão e acurácia em relação à realidade, porém com uma taxa de alarme falso relativamente alta. E ainda, ambos modelos apresentaram superestimação em suas simulações comparadas ao Landsat. No entanto, o modelo HAND, em comparação ao modelo HEC-RAS, não considera as variações hidrodinâmicas nos cursos d'água, apresentando apenas uma inundação estática. Em seus estudos, Momo et. al (2016) e Teng et al (2017) explicam que o HAND não é capaz de identificar inundações bruscas, pois não computa a dinâmica e a velocidade do fluxo. Sendo assim, em locais com limitações de dados hidrológicos, o modelo HAND pode ser uma alternativa para identificar as áreas suscetíveis a inundação.

6 CONCLUSÕES

As análises realizadas entre a imagem do satélite LANDSAT 5 e os modelos HEC-RAS e HAND permitiram avaliar a capacidade desses modelos em simular manchas de inundação em regiões com poucos ou nenhum dado disponível. Verificou-se que ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios em relação à imagem real, sendo que o modelo HAND apresentou uma área simulada de 37.75 km², maior do que o modelo HEC-RAS com 27.11 km². Notoriamente superestimada, porém, o HAND apresentou uma menor área de omissão (0.7 km²), com relação ao HEC-RAS (0.12 km²).

Com relação aos parâmetros estatísticos, o HEC-RAS apresentou maior concordância com a imagem do Landsat 5 em comparação ao HAND. Principalmente a Taxa de Alarme Falso, com aproximadamente 20% de diferença entre os modelos. No entanto, na comparação entre as simulações dos modelos entre si, o valor é de 28.61%. Demonstrando que a mancha gerada pelo HAND se aproxima mais da simulação do modelo HEC-RAS do que da imagem do satélite Landsat 5.

Com base nesses resultados, pode-se concluir que ambos os modelos, HEC-RAS e HAND, apresentam vantagens e desvantagens na simulação de áreas inundadas. Enquanto o modelo HAND possui uma maior extensão da área simulada, o modelo HEC-RAS demonstra uma maior precisão na identificação das áreas efetivamente inundadas. A concordância entre os modelos é moderada, com uma margem de erro representada pela área de comissão. É

importante considerar esses aspectos ao utilizar esses modelos para o mapeamento de áreas inundadas, buscando ajustes e calibrações adequadas para melhorar a acurácia e a confiabilidade dos resultados.

Tais modelos demonstraram que podem ser importantes ferramentas para auxiliar na simulação de manchas de inundação em regiões vulneráveis, pois permitem uma análise mais precisa das áreas que podem ser afetadas pelas cheias. Embora seja necessário avaliar os resultados com cautela e considerando as limitações do modelo em relação às variáveis de entrada, a utilização desses modelos pode subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à gestão de riscos de enchentes, pois oferecem informações valiosas sobre as áreas mais vulneráveis e a intensidade das cheias.

Diante desses resultados, é importante ressaltar que o modelo HAND mostrou-se como uma alternativa promissora para regiões com poucos dados hidrológicos disponíveis, pois apresentou precisão razoável, menor dependência de dados hidrológicos, menor custo técnico para aplicação e agilidade na geração da mancha de inundação, oferecendo uma solução acessível e razoável na implementação de medidas preventivas e mitigadoras

7 RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros é recomendado realizar um levantamento topobatimétrico mais detalhado dos canais, a fim de aprimorar os resultados das simulações dos modelos hidrodinâmicos e dos descritores de terreno.

Nas simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, é importante incluir as piscinas naturais para uma avaliação mais precisa da propagação da inundação, levando em conta as características locais e a dinâmica das áreas alagadas. Para tal fim é necessário levantamentos topográficos nas áreas mais propensas a inundação visando quantificar os efeitos dessas áreas na atenuação dos picos de cheia do município. Essa informação é fundamental para que a expansão de áreas urbanas comuns nos municípios do país não leve ao agravamento dos problemas ocasionados pelas cheias.

Realizar ajuste no coeficiente de rugosidade de Manning por meio da captação de dados em campo, a fim de fazer o cruzamento de pontos reais e pontos simulados.

Por falta de dados, neste estudo foi aplicado Balanço Hídrico para obtenção de vazão, mas a partir do levantamento de dados, a calibração do modelo hidrológico é essencial para garantir que ele reproduz com precisão os padrões de escoamento e a propagação da

inundação para diferentes períodos de retorno. Isso envolve ajustar os parâmetros do modelo com base em dados observados, como medições de vazão e níveis de água em diferentes pontos da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

- AFSHARI, S.; TAVAKOLY, A. A.; RAJIB, M. A.; ZHENG, X.; FOLLUM, M. L.; OMRANIAN, E. O.; FEKETE, B. M. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 539-556, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036>.
- ALMEIDA, E.R. **Modelagem hidrológica de inundações urbanas baseadas em dados geoespaciais de alta resolução**. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.
- ALVES, Maria Eduarda Pereira; FAN, Fernando Mainardi; SIQUEIRA, Vinícius Alencar; SANTOS, Leonardo Laipelt. Comparação de métodos de modelagem de áreas inundadas utilizando técnicas de escala local, regional e global para uma cheia no rio Uruguai. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL & 10ª REUNIÃO DE ESTUDOS AMBIENTAIS. 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: GFM, 2020. 609 p.
- AMBRIZZI, T.; REHBEIN, A.; DUTRA, L.L.M.; CRESPO, N.M. **Mudanças climáticas e a sociedade**. São Paulo: IAG, 2021. 44 p. ISBN 978-65-88233-02-3. Disponível em: <https://www.climaesociedade.iag.usp.br/livreto.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2022.
- BANDINI, A. **Hidráulica**. São Carlos: USP, 1961. v. 1, 481 p.
- BHATTACHARYA, B.; MAZZOLENI, M.; UGAY, R. Flood inundation mapping of the sparsely gauged large-scale Brahmaputra basin using remote sensing products. **Remote Sensing**, v. 11, n. 5, p. 501, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11050501>.
- BELO, J. P. R. **Os SIG aplicados à análise do risco de inundação progressiva do rio Tejo, entre Belver e Vila Nova da Barquinha, região do Médio Tejo**. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica) Departamento de Ciências Florestais e Arquitetura Paisagista da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 2012.
- BETSHOLTZ, A.; NORDLÖF, B. **Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS: a case study on Høje river**. Dissertation (Master Thesis of Water Resources Engineering), Lund University, Lund, 2017.
- BEVACQUA, E.; VOUSDOKAS, M.I.; ZAPPA, G.; HODGES, K.; SHEPHERD, T.G.; MARAUN, D.; MENTASCHI, L.; FEYEN, L. More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. **Communications Earth & Environment**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2020.
- BESKOW, S.; CALDEIRA, T.L.; MELLO, C. R.; FARIA, L.C.; GEDUES, H. S. Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 4, p. 123-133, 2015.
- BEVEN, K. **Rainfall-Runoff Modelling: the primer**. 2. ed. Chichester: John Wiley and Sons,

2012. 457 p. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119951001>

BRAGA, S.E., WANDERLEY, R.A., HOLANDA, T.F., CALDAS, A.M. Aplicação da Análise Hierárquica para mapeamento de risco de inundação: o caso no município de Limoeiro (Pernambuco - Brasil). **Meio Ambiente Brasil**, v. 2, n. 1, p. 57-66, 2020.

BRAKENRIDGE, G.R. Flood risk mapping from orbital remote sensing. In: Schumann, G. J-P.; BATES, P. D.; APEL, H.; ARONICA, G. T. **Global flood hazard: applications in modeling, mapping, and forecasting**. Washington: American Geophysical Union, 2018. cap. 3, p. 43 – 54.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Dispõe sobre a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC e o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 abr. 2012. Seção 1, p. 1. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 02 mai. 2023.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Política Nacional de Defesa Civil**. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/pndc.pdf>. Acesso em: 07 jun. de 2023.

CABRAL, S.L. CAMPOS, J.N.B., SILVEIRA, C.S. TEIXEIRA, F.A.A. Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio Granjeiro-CE. **Geociências**. v. 35, n. 1, p. 90–101, 2016.

CASTRO, A. C. V.; ALVIM, A. T. B. Urbanização e gestão de riscos hidrológicos em São Paulo. **Cadernos Metrópole**, v. 24, n. 54, p. 669–696, 2022. doi: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2022-5410>

CHANG, Y., LEE, M-A., LEE, K-T., SHAO, K-T. Adaptation of fisheries and mariculture management to extreme oceanic environmental changes and climate variability in Taiwan. **Marine Policy**, v. 38, p. 476–482, mar. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2012.08.002>. Acesso em: 02 mar. 2022.

Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema – CBH ALPA. **Breve caracterização da área do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema**. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-ALPA/21357/rs_2021_ab_2020.pdf. Acesso em: 05 ago. 2022.

COUTINHO, M. M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 2015. 245 f. Dissertação (Mestrado em m Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. **Setorização de áreas em alto e**

muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Conceição das Alagoas – Minas Gerais, 2019. Disponível em:
https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/20915/1/produtos_conceicaodasalagoas_mg_risco.zip.
 Acesso em: 12 mai. 2023.

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED; The United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNISDR. **The human cost of weather-related disasters 1995–2015**, 2016. Disponível em:
https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf. Acesso em: 21 mar. 2021.

CUARTAS, L. A. et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 462, p. 15 – 27, 2012.

DANTAS, C. E. O. **Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução**. 2012. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

DASALLAS, L.; KIM, Y.; AN, H. Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan flood event in Korea. **Water**, 2019, v. 11, p. 2048. doi:
<https://doi.org/10.3390/w11102048>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**, Rio de Janeiro, 83 p., 1979.

FERREIRA, A. H. R.; FERREIRA, D.M.; FERNANDES, C. V. S. Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água como ferramenta para avaliação de enquadramento de corpos d'água. **Gestão de Água da América Latina**, v. 18, n. 20, 2021. doi:
<https://doi.org/10.21168/rega.v18e20>

FRASER, A.; PELLING, M.; SCOLOBIG, A.; MAVROGENIS, S. Relating root causes to local risk conditions: A comparative study of the institutional pathways to small-scale disasters in three urban flood contexts. **Global Environmental Change**, v. 63, p. 102, 2020.

FREIRE, N.; BONFIM, C.; NATENZON, C. Vulnerabilidade socioambiental, inundações e repercussões na Saúde em regiões periféricas: o caso de Alagoas, Brasil. **Ciência Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 9, set. 2014.

GERMANO, A.O.; MATTIUZI, C.D.P.; SILVA, E.D.; BINOTTO, R.B.; MENDONÇA, R. **Mapeamento de manchas de inundação: Alegrete, RS**. Porto Alegre: CPRM, 2022. Disponível em:
https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/23398/2/mapeamento_manchas_inundacao_alegrete.pdf. Acesso em: 02 mai. 2023.

GOMES, I. V. C. A. Princípio de permanência da substância e reações químicas. **Perspectivas**, v. 2, n. 2, p. 52-73, 2021. doi: <https://doi.org/10.20873/rpv6n1-84>.

GUEDES, A. M. **Projeções de mudanças climáticas e o risco de desastres naturais**. Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, Conservação da Biodiversidade, 2017. Disponível em: <https://docplayer.com.br/150382366-Projecoes-de-mudancas-climaticas-e-o-risco-de-desastres-naturais.html>. Acesso em: 21 mar. 2022.

HU, A.; DEMIR, I. Real-time flood mapping on Client-Side web systems suing HAND model. **Hydrology**, v. 8, p. 65, 2021. DOI: 10.3390/hydrology8020065.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

KOMI, K.; NEAL, J.; TRIGG, M. A.; DIEKKRÜGER, B. Modelling of flood hazard extent in data sparse areas: a case study of the Oti River basin, West Africa. **Hydrology**, v. 10, p. 122-132, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.03.001>

KOMOLAFE, A. A.; AWE, B. S.; OLORUNFEMI, I. E.; OGUNTUNDE, P. G. Modelling flood-prone area and vulnerability using integration of multi-criteria analysis and HAND model in the Ogun River Basin, Nigeria, **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 10, p. 1766-1783, 2020. DOI: 10.1080/02626667.2020.1764960

KUNDZEWICZ, Z. W.; KANAE, S.; SENEVIRATNE, S. I.; HANDMER, J.; NICHOLLS, N.; PEDUZZI, P.; MECHLER, R.; BOUWER, L. M.; ARNELL, N.; MACH, K.; MUIR-WOOD, R.; BRAKENRIDGE, G.R.; KRON, W.; BENITO, G.; HONDA, Y.; TAKAHASHI, K.; SHERSTYUKOV, B. Flood risk and climate change: global and regional perspectives, **Hydrological Science**, v. 59, p. 1–28, 2014. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>

KREIBICH, Heidi et al. Adaptation to flood risk: results of international paired flood event studies. **Earth's Future**, v. 5, n. 10, p. 953-965, 2017.

LARENTIS, D. G.; NOGARE, M.; TUCCI, C. E. M.; POHLMANN, P. Procedimentos e critérios para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas. **Gestão de Água da América Latina**, v. 17, e. 13, 2020. doi: <https://doi.org/10.21168/reg.v17e13>.

LIU, X.; WANG, X.; WRIGHT, G.; CHENG, J. C. P.; LI, X.; LIU, R. A State-of-the-art review on the integration of building information modeling (BIM) and geographic information system (GIS). **Geo-Information**, v. 6, n. 2, p. 53, 2017. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi6020053>

MAIDMENT, David R. et al. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1992.

MAGALHÃES, H.; MAIA, R. Metodologia prática para delimitação de leitos de cheia em

zonas estuarinas: exemplo de aplicação ao Rio Neiva. In: JORNADAS DE HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE, 5., 2010, Porto. **Anais [...]** Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~shrha/publicacoes/pdf/JHRHA_5as/10_HMagalh%C3%A3es_Problema%C3%A1ticaAn%C3%A1liseDaEros%C3%A3o.pdf. Acesso em: 05 de mai. 2023.

MAGRO, G. R. **Modelagem numérica e computacional da hidrodinâmica de reservatórios utilizando as equações bidimensionais de Saint-Venant**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MAROTTI, A.C.B.; SANTOS, K.E.L.; MACERA, L.G.; NEVES, L. L.; GONÇALVES, J.C. Levantamento histórico e relatos de inundações do Córrego do Gregório na região central do município de São Carlos - SP. **Eixo**, v. 3, n. 1, 2014. doi: <https://doi.org/10.19123/eixo.v3i1.141>.

MELO, V.B. **Aplicação de informações espaciais de alta resolução para estudo de ocorrências de inundações urbanas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

MENDES, T. A.; SOUSA, M. B.; PEREIRA, S. A. S.; SANTOS, K. A.; FORMIGA, K. T. M.. Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 141–157, 2022. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200276>

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

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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 200 – 208, 2016. doi: 10.21168/rbrh.v21n1.p200-208.

MONTE, B.E.O.; ZANANDREA, F.; ABATTI, B.H.; TAVARES, M.H.; SILVEIRA, A.L.L. Capacidade do Modelo HAND na representação de uma mancha de inundação comparado ao Modelo Hidrodinâmico HEC-RAS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5731>. Acesso em: 17 ju. 2021.

MOREIRA, F. S. A.; MORAIS, G. F.; VITORINO, M. I.; SILVA, J.C.C. Efeitos da precipitação e topografia para o risco de inundações na cidade de Belém-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 07, p. 2716-2728, 2019. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.7.p2716-2728>.

NETO, S. L. R.; RICARDO, G. S.; MENDES, C.F.; CUNHA, M.B. Modelagem hidráulica dos eventos de inundações em Lages (SC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 6., 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015. Disponível em:

<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2015/VIII-040.pdf> . Acesso em: 22 ago. 2021.

NEVES, L. V.; DEUS, L. A. B.; JÚNIOR, A. C. S. O.; FERNANDES, M. C. Mudanças de uso e cobertura da terra e áreas suscetíveis à inundação: estudo de caso do município de Duque de Caxias, RJ. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 1-17, 2019. doi: 10.11606/rdg.v37i0.149051

NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C.D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, S.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>.

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. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320 - 333, 2015. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.10581>.

NORBERTO, A. S.; NASCIMENTO, A. V.; MEDEIROS, R.M.; ALVES, A. T. A.; BARROS, V. H. O. O uso de ferramentas SIG para obtenção de parâmetros topográficos e de vegetação em municípios do sertão pernambucano. **Semiárido De Visu**, Petrolina, v. 8, n. 1, p. 55-66, 2020.

NÚCLEO DE ESTUDOS EM ECOLOGIA ESPACIAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – NEEDS. **Mapeamentos**. Disponível em: <https://www.needs.ufscar.br/mapeamentos>. Acesso em: mai. 2023.

OLIVEIRA, F. A.; Arantes, C.Q.; Oliveira, J.A.; PEREIRA, T.S.R, FORMIGA, K.T.M. Determinação do limite da faixa de inundação com uso do hec-ras para o parque linear do Córrego Macambira em Goiânia, Goiás. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, p. 56-66, 1 fev. 2016. Universidade Federal de Goiás. doi: <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v11i1.32101>.

OLIVEIRA, G.G.; SALDANHA, D.L.; GUASSELLI, L. A. Espacialização e análise das inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS. **Geociências**, v. 29, p. 413-427, 2010.

OLIVEIRA, G.G.; FLORES, T.; BRESOLIN JUNIOR, N.A.; HAETINGER, C.; ECKHARDT, R.R.; QUEVEDO, R.P. Análise da suscetibilidade a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS, Brasil. **Geociências**, v. 37, n. 2, p. 437 - 453, 2018.

ONGDAS, N.; AKIYANOVA, F.; KARAKULOV, Y.; MURATBAYEVA, A.; ZINABDIN, N. Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2672, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/w12102672>

PARON, P. **Hydro-meteorological hazards, risks, and disasters**. Amsterdam: Elsevier, 2014.

PATEL, D. P.; RAMIREZ, J. A.; SRIVASTAVA, P. K.; BRAY, M.; HAN, D. Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. **Natural Hazards**, v. 89, p. 93-130, 2017.

PEREIRA, C.R.C.P. **Índice de risco de inundações como ferramenta de planejamento urbano**. 2017. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PONTES, P. R.M.; DORNELLES, F.; SORRIBAS, M.V.; GOLDENFUM, J.A. Determinação de mancha de inundação em local sem monitoramento de níveis e com efeito de remanso: caso de Eldorado do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22. 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/xxiisbrh>. Acesso em: 04 abr. 2023.

QUEIROGA, A. A.; OLIVEIRA, R. G. L.; FILGUEIRA, H. J. A.; CUNICO, C. Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND) . **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 43, p. 191008, 2023. doi: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191008>

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, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RIBEIRO, A.; CARDOSO, A. Integração de modelos de simulação em SIG: aplicação ao caso da drenagem das águas pluviais urbanas. In: JORNADAS LUSÓFONAS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 2014, Coimbra. **Anais [...]**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014. Disponível em: <https://ucdigitalis.uc.pt/pombalina/item/70739>. Acesso em: 07 ago. 2022.

SILVA, E. D. **Previsão hidroeconômica de curto prazo com modelo de redes neurais artificiais**: aplicação à bacia do rio Caí. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado o em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SILVA, A. T. et al. The effects of hydrodynamics on the three-dimensional downstream migratory movement of Atlantic salmon. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135773, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135773>.

SILVA, F.C.P.; MATIAS, A.B. Análise, simulação e delimitação das manchas de inundação do rio Poti na cidade de Teresina-PI. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 3, n. 4,

p. 92-105, jul./dez. 2022. doi: 10.29327/261865.3.4-7

SISTEMA DE SUBVENÇÃO ECONÔMICA AO PRÊMIO DO SEGURO RURAL - SISSER. **Apólices de seguro rural entre os anos de 2006 a 2016**, 2016. Disponível em: <https://dados.gov.br/dataset/sisser3>. Acesso em: 05 de ago. de 2021.

SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO - SIGRH. **Características gerais**. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhalpa/apresentacao>. Acesso em: 10 de ago. de 2021.

SOBE para 27 o nº de mortos por causa das chuvas na BA. **G1 BA**, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2022/01/16/sobe-para-27-o-no-de-mortos-por-causa-das-chuvas-na-ba.ghtml>. Acesso em: 22 jan. de 2022.

SPECKHANN, G.A.; CHAFFE, P. L. B.; GOERL, R. F.; ABREU, J. J. A.; 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. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>

SWAIN, D. L.; WING, O. E. J.; BATES, P. D.; DONE, J. M.; JOHNSON, K. A.; CAMERON, D. R. Increased flood exposure due to climate change and population growth in the United States. **Earth's Future**, v. 8, p. 2020EF001778, 2020. doi: <https://doi.org/10.1029/2020EF001778>.

SZYMANSKI, F.D. **Análise de inundações em bacias montanhosas no Sul do Brasil por meio de monitoramento e modelagem**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2020.

TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**. v. 90, p. 201-216, 2017. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.01.006

TRAVASSOS, L. **Revelando os rios: novos paradigmas para intervenção em fundos de vale urbanos na cidade de São Paulo**. 2010. 243 f. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 943 p

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BASTOS, M.T. **Drenagem urbana**. ABRH. 2015.

URBANI, G. L.; GRACIOSA, M. C. P.; VALVERDE, M. C. Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem

hidrológico-hidráulica. **Gestão de Água da América Latina**, v. 20, p. 13, 2023. doi: <https://doi.org/10.21168/reg.v20e13>

US Army Corps of Engineers - USACE. **User's manual: hydrologic engineering center's – river analysis system**, 2010. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>. Acesso em: 24 abr. 2021.

WANG, X.; XIE, H. A Review on applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) in water resources and flood risk management. **Water**. v. 10, n. 5, p. 608, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/w10050608>.

YOU TUBE. **Enchente Campina do Monte Alegre 2004**. Disponível em: <https://youtu.be/QCQcU3HBxpA?si=LIYI8jdeBezQLurI>. Acesso em: 19 set. 2022.

ZHANG, Y. et al. Response of groundwater to climate change under extreme climate conditions in North China plain. **Journal of Earth Science**, v. 25, n. 3, p. 612–618, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12583-014-0443-5>.

APÊNDICE A – Acervo de imagens dos eventos de inundação

2004









2016







+