

USO DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA PARA UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E ALERTA DE INUNDAÇÃO

Rainflow-runout modelling: contribution to the analysis of the initial abstraction coefficient of the number curve method

Alexandre Germano Marciano

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil

agermano@unifei.edu.br

André Luiz Vieira Barouch

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil

avbarouch@unifei.edu.br

Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha

Centro Universitário Internacional, UNINTER, Brasil

vera.r@uninter.com

Alessandro Luvizon Bérghamo

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil

jose.junior@icat.ufal.br

Alexandre Augusto Barbosa

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil

jose.junior@icat.ufal.br

Recebido: 23/05/2025

Aceito: 12/07/2025

Resumo

O desenvolvimento urbano próximo a rios no Brasil tem causado problemas como inundações, exigindo medidas estruturais e não estruturais para mitigação. Este estudo propõe integrar a simulação hidrodinâmica e sistemas de monitoramento para aprimorar a previsão e resposta a inundações, como a que ocorreu em 2000 em Itajubá – MG. A pesquisa utiliza o programa HEC-RAS e se baseia em dados de estações de monitoramento e entrevistas com moradores, no conceito de Ciência Cidadã, para suprir a escassez de informações detalhadas sobre o evento de 2000. A metodologia adotada inclui a construção de cotogramas, simulação hidrodinâmica bidimensional e análise de sensibilidade para validar a confiabilidade dos métodos. A proposta inspira-se em sistemas como o European Flood Awareness System (EFAS) e no sistema implementado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) na bacia do rio Sapucaí. Os resultados apontam que a integração entre modelos hidrodinâmicos e sistemas de monitoramento, aliados a ferramentas como a metodologia de Marciano (2019), melhora significativamente a capacidade de previsão e resposta a inundações. Embora existam limitações, a simulação bidimensional apresentou resultados consistentes. O estudo reforça a importância de combinar diferentes tecnologias para uma gestão eficaz de desastres naturais, especialmente em áreas urbanas vulneráveis como Itajubá – MG.

Palavras-chave: mapeamento das áreas inundáveis; simulação hidrodinâmica bidimensional; Rio Sapucaí; Itajubá – MG.

Abstract

Urban development near rivers in Brazil has led to problems such as flooding, requiring both structural and non-structural mitigation measures. This study proposes integrating hydrodynamic simulation with monitoring systems to enhance flood forecasting and response, as demonstrated by the 2000 flood event in Itajubá, Minas Gerais. The research utilises the HEC-RAS software and relies on data from monitoring stations and resident interviews, following the Citizen Science approach, to compensate for the lack of detailed information about the 2000 event. The adopted methodology includes the construction of stage hydrographs, two-dimensional hydrodynamic simulation, and sensitivity analysis to validate the reliability of the applied methods. The approach is inspired by systems such as the European Flood Awareness System (EFAS) and the system implemented by Federal University of Itajubá (UNIFEI) in the Sapucaí River basin. Results indicate that integrating hydrodynamic models with monitoring systems, supported by tools such as Marciano's (2019) methodology, significantly enhances flood prediction and response capabilities. Despite some limitations, the two-dimensional simulation produced consistent results. The study emphasises the importance of integrating various technologies for effective disaster management, particularly in vulnerable urban areas like Itajubá, MG.

Keywords: Flood-prone area mapping; two-dimensional hydrodynamic simulation; Sapucaí River; Itajubá – MG.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano brasileiro historicamente se concentrou nas margens dos rios, devido ao uso desses corpos hídricos como vias de transporte, fontes de irrigação, locais para descarte de resíduos, abastecimento e criação de animais (Souza *et al.*, 2023). No entanto, essa ocupação ocorreu, muitas vezes, sem infraestrutura adequada, resultando em problemas socioambientais, como as frequentes inundações (Rocha, 2021).

A ocorrência de inundações está diretamente relacionada às características das precipitações como volume, intensidade, distribuição e frequência e às condições físicas da bacia hidrográfica, incluindo cobertura vegetal, infiltração do solo, condutividade hidráulica e morfologia (Tominaga, 2011; Nunes *et al.*, 2023). A gravidade das inundações aumenta quando os limites naturais dos rios são desrespeitados pela ocupação humana (Rangel *et al.*, 2024).

Para mitigar os impactos das inundações, Todini (1999) propõe medidas estruturais e não estruturais. As estruturais incluem obras de engenharia, como diques e barragens, enquanto as não estruturais envolvem políticas públicas de prevenção, como educação ambiental, mapeamento de áreas de risco e monitoramento dos cursos d'água. Dentre essas, a modelagem matemática é uma ferramenta relevante, permitindo a criação de mapas que identificam áreas suscetíveis a alagamentos (Amaral *et al.*, 2024).

Na União Europeia, mapas de inundação são amplamente utilizados para delimitar áreas alagadas e estimar profundidades para diferentes períodos de retorno (Beden *et al.*, 2021). Esses mapas auxiliam tanto a comunidade quanto o poder público em ações

preventivas (Marcelino *et al.*, 2006), além de servirem como base para sistemas de monitoramento e alerta, especialmente em localidades sem estrutura para implantação de sistemas mais complexos (Kobiyama *et al.*, 2006).

No Brasil, desde 2001, a elaboração de Planos Diretores Urbanos é obrigatória para municípios com mais de 50 mil habitantes (Brasil, 2001). Apesar disso, muitos municípios não realizam ações de prevenção eficazes para evitar a ocupação de áreas de risco, em razão da falta de conhecimento técnico, capacitação profissional e vontade política (Moore *et al.*, 2005). Nesse cenário, mapas de inundação e sistemas de alerta se tornam ferramentas essenciais.

Os sistemas de monitoramento e alerta de inundações, considerados medidas não estruturais, utilizam dados pluviométricos, fluviométricos, modelos hidráulicos e hidrológicos, além de informações geográficas (SIG), para simular cenários de inundação e prever áreas afetadas (Marciano, 2019). Segundo a UN-ISDR (2004), esses sistemas devem integrar cientistas, autoridades e a sociedade civil para fortalecer as ações preventivas. Na Europa, destaca-se o European Flood Awareness System (EFAS), que usa sensores para coletar dados hidrológicos em tempo real e prever inundações, possibilitando ações preventivas mais eficazes (Thielen *et al.*, 2009).

Inspirado em experiências como o EFAS, foi criado, em 2002, na cidade de Itajubá – MG, o primeiro sistema de monitoramento e alerta de inundações da região, desenvolvido pelo Laboratório de Informações Hídricas (LIH) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). A iniciativa surgiu após a grande enchente de 2000, um dos eventos mais graves registrados na bacia do alto rio Sapucaí.

Esse sistema abrangia 18 estações hidrometeorológicas instaladas em diversos municípios da região, como Itajubá, Piranguinho, Pouso Alegre e Santa Rita do Sapucaí. As estações utilizavam sensores de pressão para medir o nível do rio, pluviômetros para registrar chuvas, placas solares para energia e transmissores GSM que enviavam os dados por SMS. O objetivo era fornecer dados em tempo real sobre o comportamento dos rios e informar a população sobre possíveis inundações. Apesar de sua eficácia, o sistema foi desativado em 2015 por motivos políticos (Marciano *et al.*, 2018).

Em 2023, um novo sistema foi desenvolvido pela empresa ASTHON Tecnologia, em parceria com a Prefeitura de Itajubá. O foco dessa nova implementação foi aprimorar a detecção de riscos hidrológicos, otimizar o tempo de resposta e aumentar a segurança da população. Ainda assim, muitos sistemas de monitoramento no Brasil permanecem

limitados à coleta de dados, sem aplicar tecnologias mais avançadas, como simulações hidrodinâmicas (Vanelli *et al.*, 2023).

A integração entre dados hidrometeorológicos e modelos hidrodinâmicos tem sido amplamente reconhecida em estudos internacionais como uma forma mais precisa de prever o comportamento dos rios e dos impactos de eventos extremos (Birocchi *et al.*, 2023; Scoti *et al.*, 2024). Isso possibilita respostas mais ágeis e planejadas.

Apesar dos avanços tecnológicos disponíveis, muitos municípios brasileiros ainda utilizam sistemas limitados, com baixa capacidade preditiva e ausência de integração com ferramentas de modelagem hidrodinâmica e análises espaciais detalhadas. Essa limitação compromete a efetividade das estratégias de mitigação e planejamento urbano, evidenciando a necessidade de soluções mais modernas e robustas.

Nesse contexto, este estudo apresenta uma proposta de modernização do sistema de alerta de inundações em Itajubá (MG), por meio da incorporação de duas ferramentas complementares: (i) simulações hidrodinâmicas, capazes de estimar a cota máxima do rio, o tempo de chegada da onda de cheia e sua duração; e (ii) geração de mapas de áreas inundáveis, que permitem identificar zonas de alagamento e volumes acumulados, oferecendo uma análise espacial detalhada dos impactos.

O objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial dessas tecnologias para aprimorar o sistema de alerta de Itajubá, utilizando como base os dados do evento extremo ocorrido no ano 2000 para realizar simulações hidrodinâmicas atuais no software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), aplicado ao rio Sapucaí e seus principais afluentes. A expectativa é que a experiência desenvolvida em Itajubá sirva como referência para outros municípios com características semelhantes, fomentando o uso de soluções baseadas em ciência, tecnologia e planejamento urbano integrado.

2. ÁREA DE ESTUDO E OBTENÇÃO DOS DADOS

A área de estudo apresenta relevo predominantemente com formas de topo arredondado, vertentes de morfologia côncavo-convexa, vales encaixados e amplas planícies aluvionares, com padrão de drenagem dendrítico. As declividades variam de até 25% nas áreas próximas às nascentes, diminuindo gradualmente até as planícies (Reis, 2014). O clima local é influenciado pela elevada altitude, caracterizando-se como uma zona de transição entre os climas tropical e temperado, com temperaturas médias anuais entre 18°C e 19°C e precipitação média anual de cerca de 1.314 mm (Marciano *et al.*, 2018).

O rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, em Campos do Jordão (SP), a aproximadamente 1.680 metros de altitude, e percorre cerca de 405 km até desaguar no Rio Grande, a cerca de 760 metros de altitude. A área de estudo abrange o trecho do rio entre sua nascente e a confluência com o rio Piranguçu, localizada no município de Itajubá – MG. A Figura 1 apresenta uma sequência hierárquica de mapas hidrográficos: da Bacia do Prata (Figura 1A), passando pela Bacia do rio Paraná (1B), do Rio Grande (1C) e, por fim, pela bacia local do rio Sapucaí (1D), onde se situa a área de estudo.

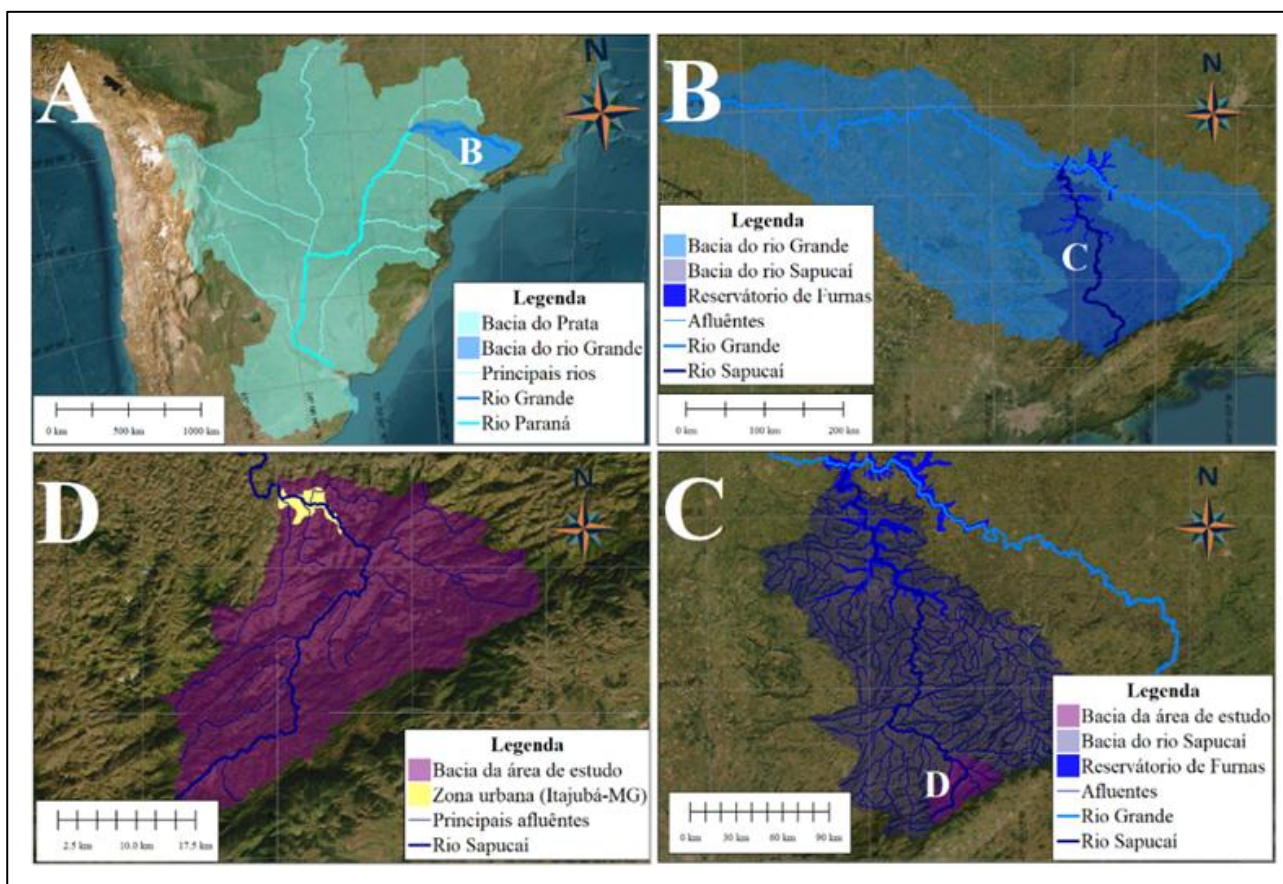


Figura 1 – Mosaico das bacias hidrográficas, A – bacia do Prata, B – bacia hidrográfica do rio Grande, C – bacia hidrográfica do rio Sapucaí e D – bacia hidrográfica da área de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Itajubá possui uma população estimada em aproximadamente 97.000 habitantes, dos quais cerca de 81% residem na zona urbana (IBGE, 2022). A área urbana do município é praticamente dividida ao meio pelo rio Sapucaí, que, em seu território, recebe as contribuições dos seguintes afluentes: rio Piranguçu, ribeirão José Pereira, ribeirão Anhumas e córrego da Água Preta (Figura 2).

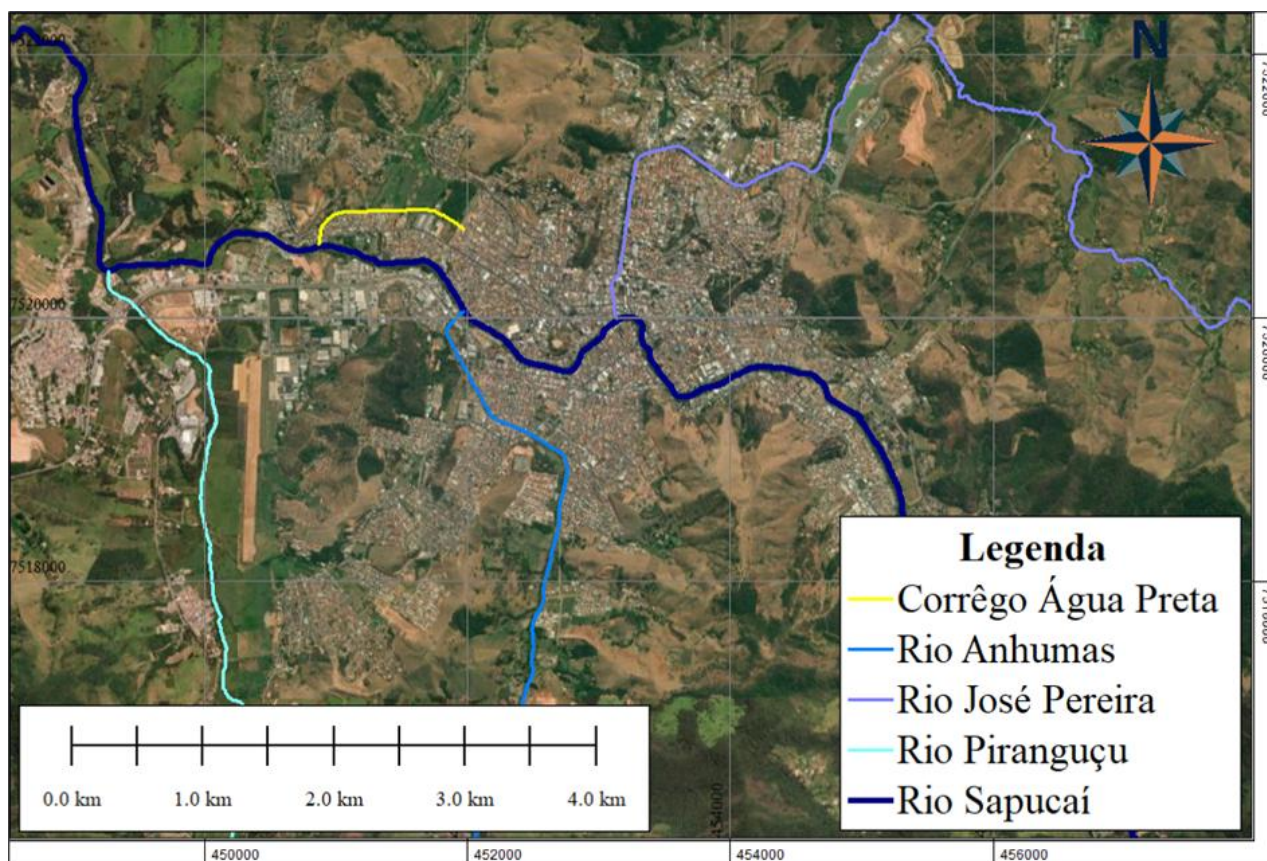


Figura 2 – Principais cursos d'água da cidade de Itajubá – MG.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Moraes (2003) e Pinheiro (2005) realizaram levantamentos históricos sobre eventos de inundação na cidade de Itajubá – MG, utilizando metodologias baseadas em entrevistas com moradores, análise de fotografias históricas e consulta a recortes de jornais. No período compreendido entre o primeiro registro, datado de 1821, e o ano de 2000, foram catalogados 74 eventos de inundação. Dando continuidade a esses estudos, o Laboratório de Informações Hídricas da UNIFEI passou a considerar apenas os eventos causados diretamente pelo transbordamento do rio Sapucaí, excluindo aqueles relacionados a seus afluentes, além de incluir registros posteriores ao ano de 2000.

Entre os eventos mais significativos destaca-se a inundação ocorrida no ano de 2000, quando as precipitações nas áreas de nascente ultrapassaram 500 mm em um período de 72 horas (Marciano, 2019). O nível do rio Sapucaí atingiu mais de 8 metros, configurando um episódio ainda presente na memória coletiva da população local. As consequências foram severas, incluindo perdas materiais significativas, com destruição de residências e impacto direto sobre cerca de 80% da população urbana. A Figura 3 apresenta registros fotográficos das principais avenidas da cidade durante e após o evento de inundação.



Figura 3 – Imagens A e B mostram a inundação no centro comercial, enquanto as imagens C e D apresentam a área após o evento. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2024.

Após o evento de 2000, foi implementado um sistema de monitoramento e alerta de inundações composto por 18 estações. Essas estações foram equipadas com sondas de pressão, pluviômetros, placas fotovoltaicas e modems 3G, possibilitando o monitoramento contínuo e a transmissão dos dados coletados. A Tabela 1 apresenta as localizações e altitudes das estações utilizadas neste estudo. Para a construção dos cotogramas, foram analisados os dados das estações Borges,  gua Limpa, Santana, UNIFEI, Anhumas, Piranguçu e Base Santa Rosa.

Tabela 1: Localização das estações do sistema de monitoramento e alerta de inundação.

Estaa��o	Latitude	Longitude	Altitude
Borges	22� 34' 18.9513" S	45� 27' 35.0353" W	915,75
Santana	22� 30' 23,7356" S	45� 22' 55,5514" W	854,24
�gua Limpa	22� 28' 09,5358" S	45� 22' 04,5757" W	851,44
UNIFEI	22� 24' 49,8254" S	45� 27' 07,7692" W	841,93
Anhumas	22� 26' 05,8825" S	45� 27' 34,3235" W	840,15
Piranguçu	22� 31' 05,6390" S	45� 29' 51,9237" W	853,13
Base Santa Rosa	22� 26' 45,6960" S	45� 25' 27,4757" W	839,63
São Pedro	22� 30' 47,2292" S	45� 23' 24,9058" W	851,30
Cantagalo	22� 28' 36,9619" S	45� 23' 31,6563" W	845,02

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

3. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo está estruturada em quatro etapas principais: (1) Construção dos cotagramas; (2) Simulação hidrodinâmica bidimensional (2D); (3) mapeamento das áreas inundáveis; e (4) Análise de sensibilidade e avaliação da simulação.

3.1. Construção dos cotagramas

Devido à falta de informações do evento de inundação do ano de 2000, foi necessário utilizar os dados das estações de monitoramento e das entrevistas com os moradores que vivenciaram o desastre desse evento. As entrevistas possuem viés subjetivo, pois podem apresentar várias limitações que comprometem a robustez e a confiabilidade dos resultados. Mesmo assim, foram utilizadas para compor a construção dos cotagramas.

Os dados das estações Borges, Água Limpa, Santana, UNIFEI, Anhumas e Piranguçu foram disponibilizados pelo Laboratório de Informações Hídricas da UNIFEI, responsável pelo gerenciamento do sistema de monitoramento e alerta de inundações na bacia hidrográfica do alto rio Sapucaí de 2009 a 2015. Esses dados continham as altitudes dos níveis d'água dos rios. A partir desses dados, foram elaboradas planilhas, sendo selecionado, para o estudo, o evento de maior magnitude registrado nessas estações (LIH, 2025).

Em seguida foram feitas entrevistas com os moradores das localidades e com a equipe técnica do Laboratório de Informações Hídricas, que relataram os horários em que a inundação ocorreu e ainda identificaram os locais onde o nível da inundação atingiu a altitude máxima. Esses locais indicados pelos entrevistados foram georreferenciados utilizando um receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) modelo Leica CS09.

Com base nessas informações, foram geradas planilhas detalhadas contendo os horários de início da inundação, o nível máximo alcançado e o momento em que o curso d'água retornou à normalidade.

3.2. Simulação hidrodinâmica bidimensional (2D)

A simulação hidrodinâmica bidimensional (2D) exige um levantamento topográfico detalhado, o que implica custos elevados e demanda significativa de tempo para sua execução. Em razão disso, o presente estudo contou com a participação de alunos dos cursos de Engenharia Hídrica e Engenharia Ambiental da UNIFEI, sob a orientação de um técnico do Laboratório de Informações Hídricas. Ao longo de 8 anos de levantamento de

dados topográficos, foram coletadas mais de 20.000 coordenadas georreferenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Durante os levantamentos, foram determinadas as declividades dos trechos fluviais por meio de navegação com o receptor GNSS configurado no modo cinemático, programado para registrar um ponto a cada 10 metros, e no modo estático, utilizado para ajustes altimétricos de maior precisão. Além disso, foram feitas seções topobatimétricas nos trechos retilíneos dos rios, abrangendo desde o leito até as planícies fluviais nas margens, com o alinhamento das seções perpendicular ao fluxo do escoamento. Para a realização desse levantamento, foram utilizados equipamentos: o receptor GNSS modelo Leica CS09, a Estação Total modelo Leica TS02 e o medidor de vazão Qliner – OTT.

Os dados obtidos durante os levantamentos foram organizados em arquivos de texto no formato ENZ (East, North, Z-elevation) e importados para o programa de Global Mapper 26, um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Nesse ambiente foram convertidos em uma grade de elevação para a criação de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Após a geração do MDE, os dados foram exportados e salvos no formato Georeferenced Tagged Image File (GeoTIFF), a fim de serem exportados para o programa HEC-RAS para simulações hidrodinâmicas.

No editor de dados geométricos do programa HEC-RAS (USACE, 2022) foram feitos testes de refinamento da malha para avaliar a precisão e a estabilidade dos resultados, com intuito de equilibrar a qualidade dos dados obtidos com o custo computacional, garantindo, assim, resultados confiáveis e eficientes.

Os valores de rugosidade de Manning para calha principal e secundária foram determinados conforme a proposta de Chow (1959) onde n é determinado pela caracterização física do canal, conforme equação 4. Para estipular os valores n_0 ; n_1 ; n_2 ; n_3 ; n_4 e m_5 foi usada a tabela do estudo Chow (1959).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad 1$$

A calibração da simulação hidrodinâmica 2D foi elaborada para ajustar o hidrograma simulado ao hidrograma da estação observada (Base Santa Rosa). O processo consistiu em ajustar o coeficiente de Manning para todas as seções, variando de 0,030 a 0,070. Para selecionar o coeficiente de Manning, foi feita a comparação dos hidrogramas simulados e medidos pela estação Base Santa Rosa, utilizando análises estatísticas. Que determinou o Coeficiente de Variação (CV) entre os valores observados e os simulados, avaliando a

variabilidade e a precisão do modelo. As Equações 2, 3 e 4 mostram a comparação entre os hidrogramas e a determinação do CV. A Equação 8 calcula a proporção da variação dos valores observados em relação à variável simulada (Rangel, 2021; Marciano *et al.*, 2024b).

$$SQE = \sum (y - \hat{y})^2 \quad 2$$

$$STT = \sum (y - \bar{y})^2 \quad 3$$

$$CV = 1 - \frac{SQE}{STT} \quad 4$$

Onde: SQE é a soma quadrática do erro; STT é a soma total dos quadrados; y é o valor observado; $\bar{y}$ é a média dos valores observados; e $\hat{y}$ é o valor calculado/simulado.

Para a simulação hidrodinâmica 2D, foram inseridos os cotogramas elaborados na etapa anterior, bem como as declividades médias de cada curso d'água. A data da simulação foi definida com base nos relatos coletados durante as entrevistas, correspondendo ao período do evento de inundação, compreendido entre 31 de dezembro de 1999 e 6 de janeiro de 2000.

3.3. Mapeamento das áreas inundáveis

O mapeamento das áreas inundáveis foi realizado utilizando a metodologia desenvolvida por Marciano (2019), que delimita as áreas inundáveis por meio da subtração de imagens, gerando *rasters* representativos das áreas inundadas. Esse processo é composto por três etapas, que são executadas em um programa SIG, conforme descrito por Marciano *et al.* (2024a).

Após a elaboração dos mapas das áreas inundáveis, foi realizada uma análise comparativa entre o mapa de inundação gerado pelo programa HEC-RAS e aquele obtido por meio da metodologia proposta por Marciano (2019). Essa comparação utilizou como referência os registros das marcas preservadas da inundação ocorrida no ano 2000. Essas marcas preservadas foram previamente georreferenciadas, permitindo a comparação com os níveis simulados pelos dois métodos, contribuindo para a calibração e validação dos modelos utilizados.

Essa análise avalia a consistência e a precisão das metodologias aplicadas tanto no HEC-RAS quanto na abordagem de Marciano (2019), consolidando a confiabilidade de ambos os métodos no mapeamento de áreas inundáveis. A Tabela 2 mostra as altitudes das marcas preservadas em relação às ruas atingidas na inundação de 2000.

Tabela 2: Altitude e alturas das marcas preservadas da inundação do evento do ano 2000.

Latitude	Longitude	Altitude (m)	Altura da inundação(m)	Bairro
22° 25' 28.3824" S	45° 28' 09.6963" W	842,64	0,75	Avenida
22° 25' 14.0511" S	45° 28' 17.2559" W	840,53	1,20	Boa Vista1
22° 25' 13.5767" S	45° 28' 02.7947" W	840,30	1,60	Boa Vista2
22° 25' 02.2883" S	45° 27' 14.3206" W	843,48	1,10	Pinheirinho
22° 26' 11.2694" S	45° 26' 22.0074" W	846,68	0,10	Cantina
22° 25' 25.0175" S	45° 27' 27.5070" W	843,05	1,00	Centro
22° 25' 57.3741" S	45° 27' 39.4447" W	842,02	1,60	Medicina
22° 25' 38.6472" S	45° 27' 00.9841" W	843,42	1,75	Porto Velho
22° 26' 45.2508" S	45° 25' 27.3467" W	843,79	2,43	Santa Rosa1
22° 27' 06.5730" S	45° 25' 17.8724" W	845,06	2,55	Santa Rosa2
22° 25' 17.5342" S	45° 28' 54.1766" W	839,65	1,20	Santos Drummond1
22° 25' 16.9620" S	45° 28' 52.7051" W	839,75	1,40	Santos Drummond2
22° 25' 14.4517" S	45° 28' 51.2651" W	839,84	1,90	Santos Drummond3
22° 25' 29.7240" S	45° 27' 03.9435" W	842,44	2,76	Varginha
22° 25' 13.2756" S	45° 27' 52.9465" W	839,19	3,10	Vila Rubens2
22° 25' 09.8744" S	45° 27' 54.3200" W	839,12	3,30	Vila Rubens3

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

3.4. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade do estudo foi realizada para avaliar a importância de integrar um modelo hidrodinâmico ao sistema de monitoramento e alerta de inundações. Para essa análise, foram examinados os picos do evento simulado, utilizando os dados de altitude dos níveis d'água do rio Sapucaí registrados pelas estações Borges, São Pedro, Cantagalo e Santa Rosa. Para essa análise, foram mensuradas as distâncias entre as estações de monitoramento, e, com base nos dados de altitude, foram calculados o horário de chegada do pico de inundação em cada estação, o intervalo de tempo entre os picos registrados e a velocidade da propagação da onda de inundação. Essa análise de sensibilidade visa demonstrar que o sistema de monitoramento possui a capacidade de prever esses parâmetros com antecedência, contribuindo para uma resposta mais eficiente frente a eventos de inundação.

4. Resultados e Discussões

4.1. Construção dos cotagramas

Durante o evento de inundação de 2000 no rio Sapucaí, o trecho estudado carecia de monitoramento fluviométrico, o que representou um desafio significativo para a realização de simulações hidrodinâmicas confiáveis. Para suprir essa lacuna, foram elaborados cotagramas com base em dados subjetivos, obtidos por meio de entrevistas com moradores

e da identificação de marcas deixadas pela água. No entanto, essa abordagem apresenta limitações, uma vez que as informações coletadas podem ter sido influenciadas por memórias individuais, emoções e percepções pessoais, o que compromete sua precisão (Sionek *et al.*, 2020).

Visando aumentar a confiabilidade dos dados, foi realizada uma triangulação de informações, que combinou os relatos das entrevistas com registros técnicos de profissionais que vivenciaram o evento e com os dados remanescentes das estações de monitoramento desativadas em 2015. Essa metodologia teve como objetivo minimizar as incertezas associadas à subjetividade das informações e aumentar a robustez das simulações hidrodinâmicas realizadas.

A utilização de entrevistas como fonte complementar de dados em simulações hidrológicas e hidrodinâmicas tem respaldo na literatura científica. Meller e Paiva (2007), McCann e Paxson (2016) e Biswal e Singh (2017) empregaram entrevistas em diferentes contextos como ferramenta auxiliar na construção e calibração de modelos, evidenciando a validade dessa abordagem, especialmente em cenários onde dados medidos são escassos ou inexistentes.

Com base nos dados do Laboratório de Informações Hídricas (LIH), nos relatos das entrevistas e no georreferenciamento das marcas de inundação, foram elaborados gráficos representando a evolução da cheia de 2000. Os cotagramas correspondentes às estações Borges, Água Limpa, Santana, UNIFEI, Anhumas e Piranguçu revelam a ocorrência de dois picos de cheia, sendo o segundo registrado durante o declínio da curva hidrológica. Esse padrão reforça a consistência dos dados coletados e a abrangência do evento, que afetou toda a bacia do rio Sapucaí. Esses resultados sustentam a viabilidade do uso de dados alternativos, como entrevistas, para reconstituir eventos extremos em ausência de monitoramento instrumental direto.

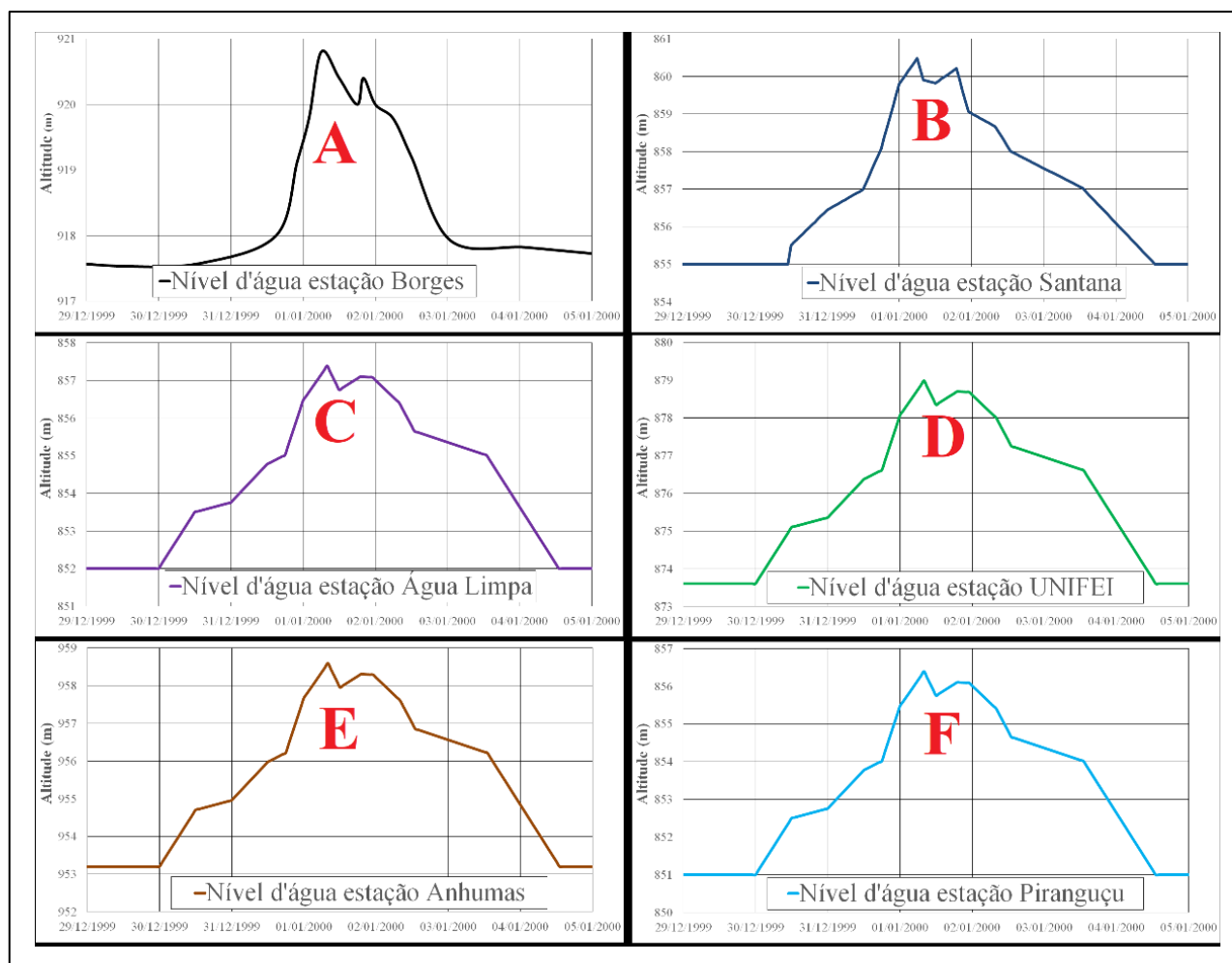


Figura 4 – Cotagramas da inundação do ano 2000, nas estações A – Borges, B – Santana, C – Água Limpa, D – UNIFEI, E – Anhumas e F – Piranguçu.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

4.2. Simulação hidrodinâmica 2D

Conforme os testes de refinamento da malha, foi criado um polígono, delimitando o fluxo da simulação e gerando a malha computacional com espaçamento de 20 x 20 (m) em toda a área. E para avaliar o desempenho do modelo foi calculado o CV, sendo que o coeficiente de Manning que apresentou o CV mais próximo de 1 foi de 0,045 para a calha principal com o CV de 0,93 e 0,15 para a calha secundária com o CV de 0,89.

Com os resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional (2D), foram gerados gráficos na seção da estação Base Santa Rosa. A Figura 5 mostra o cotagrama, detalhando o evento de inundação ocorrido em 2000 na cidade de Itajubá-MG. O transbordamento da calha começou na noite de 31 de dezembro de 1999, atingindo o pico às 9h30 da manhã de 1º de janeiro de 2000. Em seguida, observou-se uma pequena redução (0,20 m) levando a população presente a acreditar que a inundação estava diminuindo. No entanto, às 20

horas do mesmo dia, ocorreu uma variação positiva (0,15 m) intensificando a inundação, que perdurou até as 22 horas do dia 3 de janeiro de 2000.

É importante notar que esta descrição não descreve o evento de 2000 em sua totalidade, mas fornece um panorama das possíveis ocorrências durante o período em questão. Ressalta-se que a topografia e as características hidráulicas são semelhantes, mas não idênticas às do ano de 2000.

A Figura 5 mostra que a altitude máxima atingida foi de 847,42 m, divergente do resultado encontrado por Moraes (2003) e Pinheiro (2005) que é de 846,89 m. Essa divergência de altitude máxima da inundação pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a qualidade dos dados de entrada e as incertezas do processo de simulação hidrodinâmica. Conforme destacado por Singh (2017), essas incertezas nos dados de entrada, bem como nos próprios modelos de simulação, podem resultar em discrepâncias nos resultados de estudos hidrológicos e hidrodinâmicos. Apesar dessas limitações, o resultado obtido foi considerado coerente, uma vez que se encontra dentro da faixa de variação.

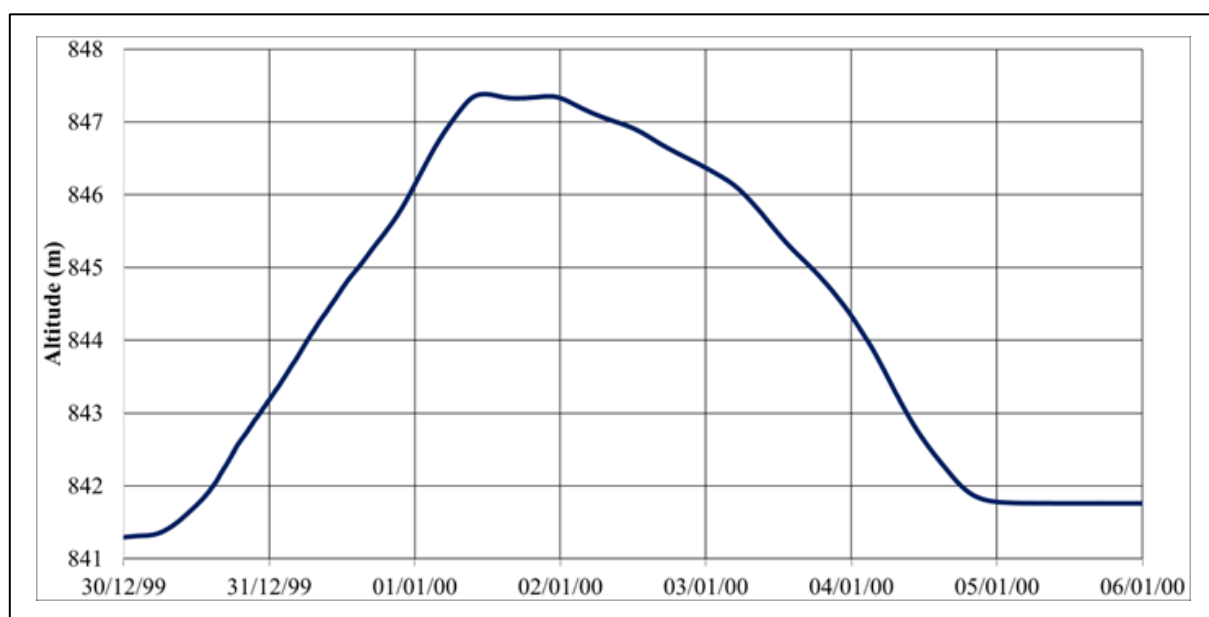


Figura 5 – Cotograma da estação Base Santa Rosa no evento de inundação do ano 2000.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

A Figura 6 apresenta o hidrograma, indicando que a vazão máxima alcançou 390 m³/s, valor que diverge significativamente dos 588 m³/s encontrados por Pinheiro (2005). Essa discrepância pode ser atribuída, conforme já mencionado, à qualidade dos dados de entrada e às incertezas inerentes ao processo de simulação hidrodinâmica. Um fator específico que contribui para essa divergência é o uso de diferentes valores de coeficiente de rugosidade. Pinheiro (2005) utilizou valores de 0,08 para a calha principal e 0,155 para

a calha secundária. Tais diferenças nos coeficientes de rugosidade podem influenciar significativamente os resultados das simulações hidrodinâmicas.

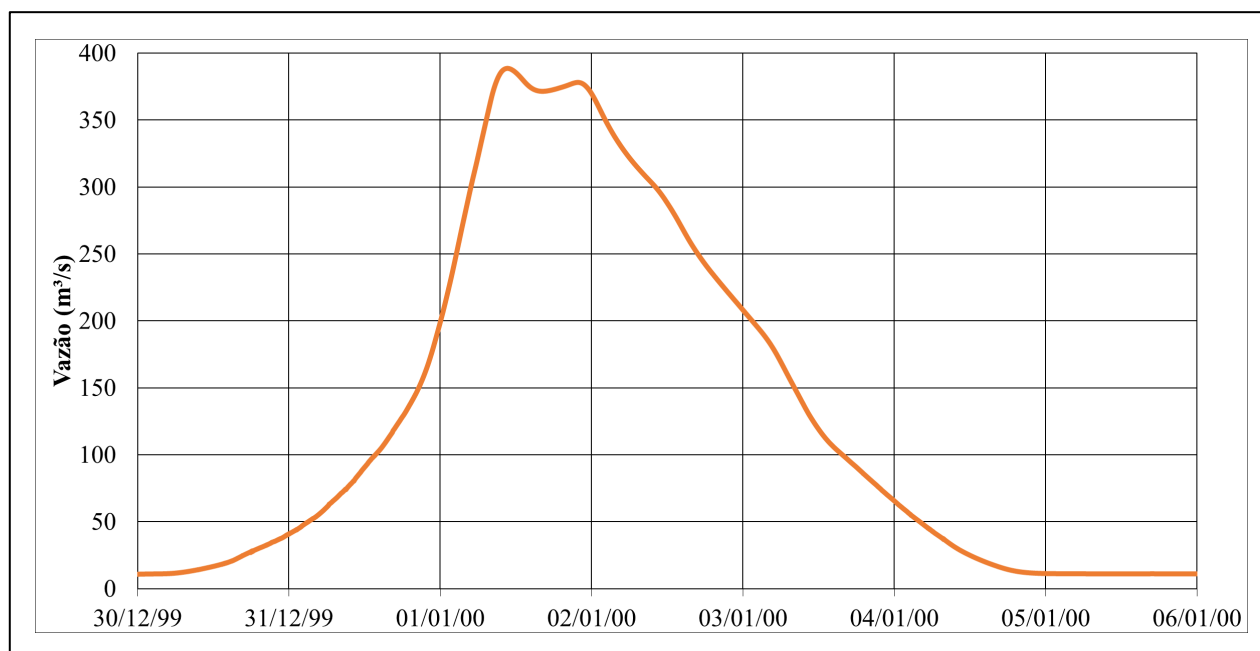


Figura 6 – Hidrograma na seção da estação Base Santa Rosa no evento de inundação do ano 2000.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

A simulação hidrodinâmica bidimensional (2D) produziu a curva-chave do evento (Figura 7), que foi segmentada em duas fases. A fase ascendente (cor vermelha) que abrange o período desde o início da simulação até o alcance da vazão de pico e da altura máxima d'água, demonstrando o aumento gradual da vazão e da altura. E a fase descendente (cor azul) que compreende o intervalo subsequente, estendendo-se do ponto da vazão de pico e da altitude máxima d'água até a conclusão da simulação, retratando o declínio do evento, com a diminuição progressiva da vazão e da altitude.

A Figura 7 mostra a curva-chave gerada pelo trabalho de Pinheiro (2005) em cor verde, que visivelmente difere das curvas simuladas (cor vermelha e azul). Comparando as altitudes para uma vazão de 100 m³/s, observa-se que a curva-chave de Pinheiro (2005) registra uma altitude de 843,48 m, enquanto a curva-chave gerada pela simulação aponta uma altitude de 844,90 m, evidenciando uma diferença de 1,56 m. Essa discrepância pode ser atribuída às variações nos coeficientes de rugosidade, na qualidade dos dados topobatimétricos, na resolução da malha computacional e nas condições de contorno utilizadas nos dois estudos. Os coeficientes de rugosidade são parâmetros críticos na

modelagem hidrodinâmica, influenciando a estimativa de vazões e altitudes em curvas-chave, conforme relatam Chow (1959) e Bladé *et al.* (2014).

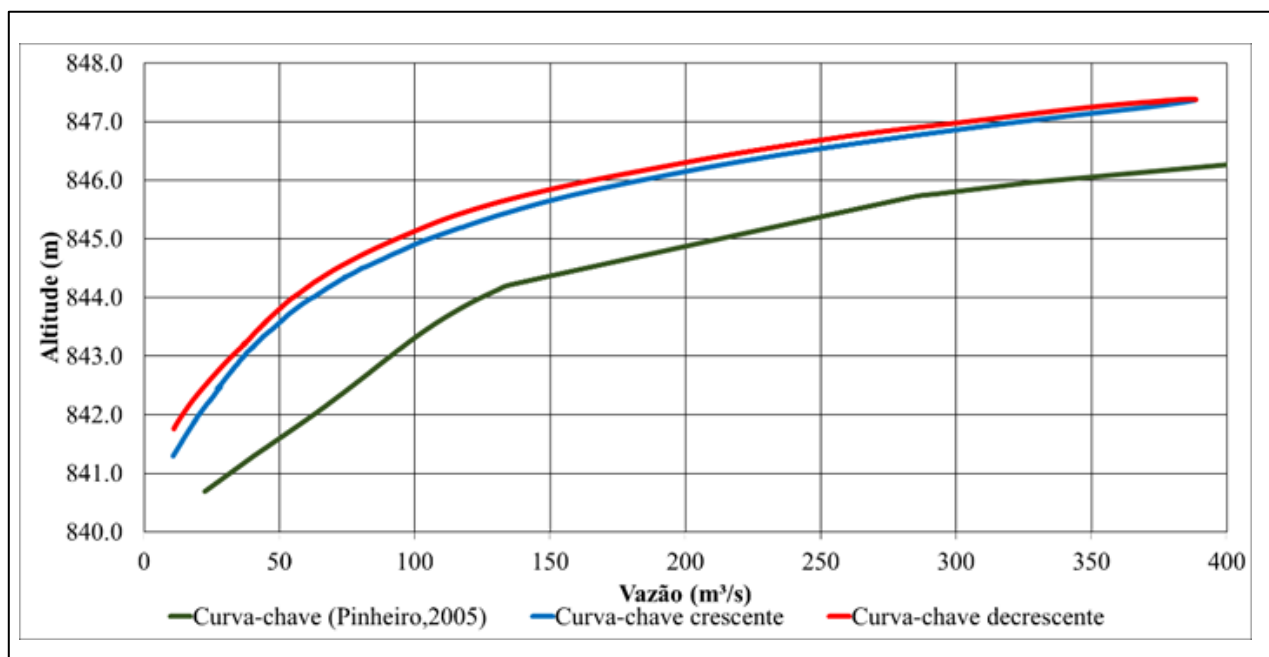


Figura 7 – Curva-chave da seção da estação Base Santa Rosa no evento de inundação do ano 2000.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

4.3. Mapeamento das áreas alagáveis

A Figura 8 mostra o mapa de inundação resultante da simulação do evento ocorrido em 2000 na cidade de Itajubá – MG, evidenciando a extensão das áreas alagadas em uma escala de tons de azul. As tonalidades mais escuras indicam as maiores profundidades de inundação, alcançando valores próximos a 5,0 metros. Essa informação é crucial para a avaliação dos riscos associados às inundações e para a identificação de áreas de maior perigo para a população e as propriedades, conforme destacado em normativas internacionais e nacionais (European Union, 2007; Brasil, 2012).

Com base na análise da Figura 8, estima-se que aproximadamente 70% da área urbana tenha sido impactada pelo evento. Esse tipo de análise é fundamental para subsidiar o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão de riscos de desastres, incluindo a implementação de medidas estruturais e não estruturais (Blöschl *et al.*, 2013; Singh, 2017).

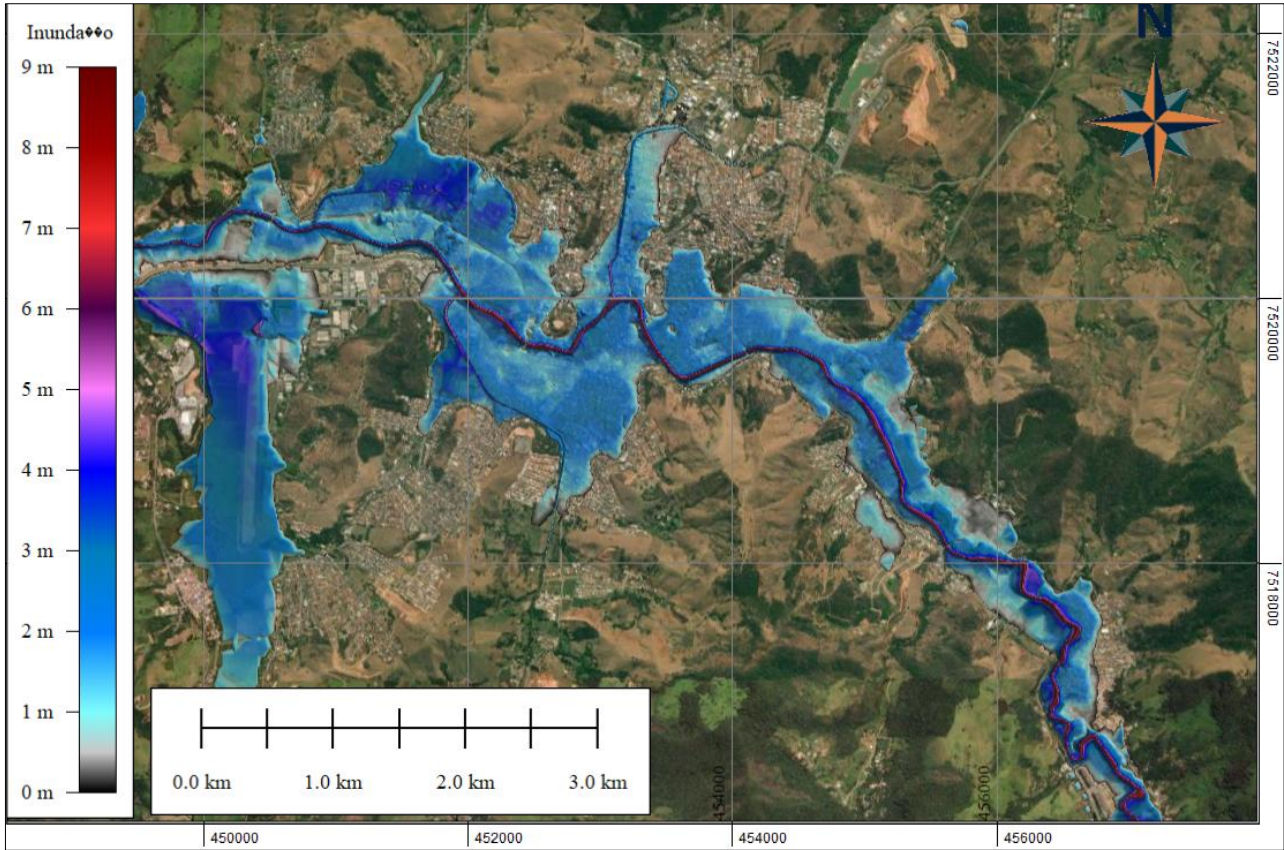


Figura 8 – Mancha de inundação do evento de inundação do ano 2000.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

A comparação entre o mapa de inundação gerado pelo programa HEC-RAS e o obtido por meio da metodologia proposta por Marciano (2019) é apresentada na Tabela 3, que fornece uma avaliação detalhada das áreas inundadas e dos volumes simulados por ambas as abordagens. Os resultados indicam que as áreas inundadas simuladas pelas duas metodologias são bastante semelhantes, com uma diferença de apenas 0,4%. No entanto, observa-se uma discrepância mais acentuada em relação ao volume de água preenchido pelas inundações, com uma diferença de 7%. Apesar dessas diferenças, os resultados mostram uma consistência geral entre as duas abordagens, reforçando a aplicabilidade e a confiabilidade das ferramentas empregadas para a modelagem de eventos de inundação.

Tabela 3: Comparação da área e do volume entre a mancha gerada pelo programa HEC RAS e pela metodologia proposta por Marciano (2019).

	Área inundada (m²)	Volume ocupado (m³)
Simulação HEC-RAS	10.674.358	19.469.025
Metodologia Marciano (2019)	10.636.217	20.867.843

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

A análise de consistência e precisão das metodologias aplicadas, tanto pelo programa HEC-RAS quanto pela abordagem proposta por Marciano (2019), é apresentada na Tabela 4. A Tabela 4 compara as alturas atingidas pelo levantamento das marcas de inundação preservadas, pelas simulações realizadas no programa HEC-RAS e pela metodologia de Marciano (2019), utilizando as mesmas coordenadas geográficas.

Comparando os resultados das duas metodologias com as alturas das marcas preservadas, observa-se que a abordagem proposta por Marciano apresenta maior proximidade com os valores reais levantados. A simulação realizada pelo programa HEC-RAS apresenta uma diferença média de 30%, resultando em um erro médio de 0,50 m. Em contrapartida, a metodologia de Marciano apresenta uma diferença média de 15%, correspondente a um erro médio de 0,22 m. Esses resultados indicam que a metodologia de Marciano (2019) oferece uma melhor representação das alturas da inundação em comparação com a simulação HEC-RAS.

Tabela 4: Comparação das alturas levantadas das marcas preservada da inundação de 2000, com as geradas pelo programa HEC RAS e com proposta por Marciano (2019).

Bairros	Alturas (m)		
	Marcas preservada da inundação de 2000	Simulação HEC RAS	Metodologia Marciano (2019)
Avenida	0,75	0,00	0,38
Boa Vista1	1,20	1,36	1,38
Boa Vista2	1,60	1,60	1,96
Pinheirinho	1,10	0,22	1,27
Cantina	0,10	0,10	0,10
Centro	1,00	0,36	1,04
Medicina	1,60	0,68	1,77
Porto Velho	1,75	0,81	1,88
Santa Rosa1	2,43	2,07	2,91
Santa Rosa2	2,55	2,18	2,71
Santos Drummond1	1,20	1,78	1,49
Santos Drummond2	1,40	1,70	1,41
Santos Drummond3	1,90	1,62	1,37
Varginha	2,76	1,80	2,87
Vila Rubens1	3,10	2,71	3,57
Vila Rubens2	3,30	2,78	3,58

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

4.4. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade avalia a importância de integrar um modelo hidrodinâmico ao sistema de monitoramento e alerta de inundações. Essa análise demonstra que o sistema de monitoramento e alerta de inundação possui a capacidade de prever o horário de chegada do pico de inundação, o período da inundação e a velocidade da propagação da onda de inundação, contribuindo para uma resposta mais eficiente frente a eventos de inundação.

O evento analisado revelou que a inundação na cidade de Itajubá – MG, teve início quando a altitude do nível d'água do rio Sapucaí atingiu 844,50 m, momento em que algumas áreas marginais começaram a ser inundadas. De acordo com a simulação, o início da inundação ocorreu às 10h30 do dia 31 de dezembro de 1999, alcançando seu pico às 11h30 do dia 1º de janeiro de 2000. O período de inundação estendeu-se até às 22h30 do dia 3 de janeiro de 2000, totalizando 4 dias e 12 horas até que o nível do rio retornasse às condições normais. Essas informações da simulados apresentam forte convergência com os relatos da população, que vivenciou o evento de inundação, corroborando a precisão do modelo. Essa correspondência entre os resultados da simulação e as observações empíricas reforça a confiabilidade da modelagem hidrodinâmica para a reconstrução de eventos extremos e a avaliação de seus impactos.

Uma outra informação primordial para o sistema de monitoramento e alerta de inundação é saber quando a inundação vai chegar na cidade. Nessa análise foram utilizadas as estações Borges, São Pedro, Cantagalo e Base Santa Rosa. A Tabela 5 mostra os registros do evento simulação pelo programa HEC-RAS. Na Tabela 5 são informados os dados de distância entre as estações, os horários entre os picos de vazão e as velocidades médias calculadas para o deslocamento da onda de cheia entre as estações. É evidente que a velocidade média da onda de cheia varia ao longo do percurso, sendo maior no trecho entre as estações Borges e São Pedro (12,5 km/h) e menor no trecho final., entre Cantagalo e Santa Rosa (3 km/h). Esse comportamento está de acordo com a dinâmica hidrológica observada em bacias hidrográficas, onde a redução da velocidade na parte final do trajeto estar associada a fatores como aumento da largura do canal, diminuição da declividade e presença de planícies de inundação, conforme discutido por Leandro (2020) e Anand *et al.* (2024).

Tabela 5: Comparações entre o evento registrado pelo LIH com o evento simulado pelo HEC RAS.

Estações	Distância (km)	Evento Simulado HEC RAS	
		Horário entre os picos	Velocidade média (km/h)
Estação Borges	0.00	01/01/00 5:00	-
Estação São Pedro	12.50	01/01/00 6:30	8,3
Estação Cantagalo	18.50	01/01/00 7:30	4,0
Estação Santa Rosa	24.50	01/01/00 9:30	3,0

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Com base nos resultados da simulação, a cidade de Itajubá – MG teria aproximadamente 4 horas para emitir alertas à população. Embora esse período seja relativamente curto para uma preparação completa, permitiria a adoção de medidas emergenciais que poderiam minimizar significativamente os impactos da inundação. Estudos como os de Blöschl *et al.* (2013) e Santos, & Manzione (2023) destacam que sistemas de alerta, mesmo com janelas temporais limitadas, desempenham um papel crucial na redução de perdas humanas e materiais durante eventos extremos.

Segundo o estudo de Reis (2014), caso ocorresse um evento de inundação entre a estação São Pedro e a estação Base Santa Rosa, o tempo estimado para a previsão de cheia seria de 3 a 4 horas. Nesse estudo o tempo em que o evento de inundação chegaria na estação Base Santa Rosa seria de 3 horas. Portanto, esses estudos mostram uma coerência, nos resultados entre a previsão e o tempo simulado.

É importante destacar que diversas variáveis não foram consideradas na simulação e que podem exercer influência significativa sobre os resultados obtidos, o que limita a precisão. Embora as ferramentas de simulação hidrodinâmica, associadas a sistemas de monitoramento e alerta de inundações, representem avanços relevantes, elas não garantem a reprodução reais do evento de inundação.

A análise de sensibilidade reforça que a integração de modelos hidrodinâmicos com sistemas de monitoramento e alerta tem o potencial de ampliar a capacidade de resposta frente a eventos extremos. Tal integração é fundamental para reduzir as vulnerabilidades das populações expostas, fortalecer a resiliência urbana e mitigar os impactos das inundações, contribuindo para a proteção das comunidades situadas em áreas de risco.

O estudo analisa a integração de sistemas de monitoramento e simulação hidrodinâmica bidimensional (2D) para prever inundações no município de Itajubá (MG), utilizando o software HEC-RAS. A pesquisa compara os resultados simulados com dados históricos da inundação ocorrida no ano 2000, validando-os por meio de marcas preservadas e entrevistas com moradores locais. Os resultados mostram que o modelo

proposto por Marciano (2019) apresentou maior precisão (diferença mínima de 0,4% na área inundada) em relação ao HEC-RAS, embora ambos os métodos tenham demonstrado consistência nas alturas simuladas. Esses achados são semelhantes aos de Anand *et al.* (2024), que aplicaram modelos hidrodinâmicos bidimensionais na bacia do rio Yamuna, na Índia, destacando a importância dessas ferramentas para gerar mapas detalhados de áreas inundáveis e planejar intervenções urbanas. Apesar da precisão alcançada, o estudo aponta limitações relacionadas à escassez de dados fluviométricos detalhados, como foi observado nos trabalhos de Krajewski *et al.* (2017), que enfatizaram a necessidade de sensores remotos para melhorar a acurácia das previsões. Além disso, a produção de mapas de áreas inundáveis, conforme destacado por Amaral *et al.* (2024), alinha-se com a metodologia deste estudo, reforçando a importância dessas ferramentas para a gestão e prevenção de inundações.

O estudo contribui significativamente para a mitigação de eventos de inundação, tanto em nível nacional quanto internacional. No Brasil, aprimora os sistemas de alerta ao integrar modelos hidrodinâmicos com o monitoramento de inundações, melhorando a previsão e a resposta a eventos extremos (Rosseto, 2025). Também oferece um modelo replicável para municípios com problemas de inundação, promovendo medidas não estruturais, como o mapeamento de áreas inundáveis e a previsão de eventos extremos. A metodologia de Marciano (2019) foi aplicada com sucesso no município de Santa Rita do Sapucaí (Marciano *et al.*, 2024), demonstrando alta precisão quando comparada com marcas históricas das inundações.

O estudo prevê o horário de chegada do pico de inundação, reforçando o potencial do programa HEC-RAS para sistemas de alerta em tempo real, como já foi feito nos EUA (Krajewski *et al.*, 2017; Haces-Garcia *et al.*, 2023). Também demonstrou eficácia na simulação de escoamentos em bacias urbanizadas, considerando mudanças no uso do solo e na impermeabilização, como evidenciado na pesquisa de Zhang & Song (2023). Além de aprimorar a previsão de cheias, o estudo contribui para o aumento da precisão e do tempo de antecedência das previsões (Jam-Jalloh *et al.*, 2024).

A metodologia adotada se diferencia de abordagens mais recentes que utilizam inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina para prever inundações, como discutido por Bladé *et al.* (2014). Técnicas de IA oferecem maior escalabilidade e previsões em tempo real, como demonstrado por Amaral *et al.* (2024) e Haces-Garcia *et al.* (2023), mas são menos precisas nos detalhes locais quando comparadas à metodologia de Marciano (2019). Enquanto o HEC-RAS realiza modelagens hidrodinâmicas detalhadas (altura e

velocidade da onda de cheia), sua dependência de dados topográficos extensos limita sua aplicação em áreas com recursos escassos. Em contrapartida, a IA integra dados heterogêneos com maior flexibilidade (Scoti *et al.*, 2024). A integração entre o HEC-RAS, a metodologia de Marciano (2019) e ferramentas de IA poderia combinar precisão local com escalabilidade, promovendo avanços na gestão de inundações em escala global. O estudo da inundação de Itajubá, embora menos inovador que abordagens baseadas em IA, é valioso por sua adaptabilidade a contextos com dados limitados e pelo seu potencial de replicação em níveis nacional e internacional.

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises observadas e nos dados obtidos por meio da simulação hidrodinâmica bidimensional (2D), foi avaliada a potencial contribuição da integração entre sistemas de monitoramento e alerta de inundações e com os estudos hidrodinâmicos. O que podem aumentar significativamente a eficiência na previsão e resposta a eventos de inundação. A área de estudo corresponde ao município de Itajubá – MG, localizado no estado de Minas Gerais, que enfrenta problemas recorrentes de inundações desde sua fundação. Assim, as principais conclusões deste estudo são:

1. Para a construção dos cotagramas foi necessário integrar métodos qualitativos e quantitativos na reconstrução de eventos de inundações, especialmente em cenários onde há ausência de dados fluviométricos. A triangulação dos dados das entrevistas, das marcas indicadas pelos entrevistados e das informações técnicas contribuíram para a redução das incertezas e para a validação dos resultados. Os gráficos gerados a partir dessas informações demonstraram coerência quando comparados entre si, apresentando similaridades em relação aos picos. O resultado da elaboração dos cotagramas proporciona uma compreensão detalhada do evento de inundação do ano de 2000, oferecendo uma base de referência valiosa para o aprimoramento de sistema de monitoramento e alerta de inundações,
2. Embora a simulação hidrodinâmica 2D tenha apresentado limitações, especialmente relacionadas à disponibilidade e qualidade dos dados de entrada, bem como à simplificação de parâmetros como o coeficiente de Manning, os resultados demonstraram coerência com os eventos observados. Apesar da ausência de elementos hidráulicos, como pontes, e da simplificação na representação da heterogeneidade das calhas, a simulação forneceu informações valiosas para a

compreensão da dinâmica da inundação e a estimativa de sua extensão temporal e espacial. Dessa forma, o estudo contribui para a gestão de riscos e o planejamento urbano em áreas suscetíveis a inundações.

3. O resultado apresentado do mapeamento das áreas inundáveis evidencia a importância da utilização de metodologias variadas na simulação de eventos de inundação. A análise comparativa entre o mapa de inundação gerado pelo programa HEC-RAS e a metodologia proposta por Marciano (2019) mostra que ambas as abordagens são eficazes para simular a extensão das áreas alagadas, com uma diferença mínima de 0,4%. No entanto, a abordagem proposta por Marciano (2019) demonstrou maior precisão e consistência em relação às marcas de inundação preservadas, evidenciando sua superioridade na representação das alturas de inundação. Assim, o presente estudo contribui para o aprimoramento do mapeamento de áreas de inundação, fornecendo subsídios para a elaboração de planos de gestão e mitigação de desastres, além de destacar a necessidade de pesquisas adicionais que combinem diferentes abordagens metodológicas para alcançar maior precisão e detalhamento nos estudos de inundações.
4. A integração de simulações hidrodinâmicas a sistemas de monitoramento e alerta de inundações é uma estratégia essencial para a gestão eficiente de desastres hídricos. A possibilidade de prever o comportamento de eventos extremos, como o horário de chegada do pico de inundação, a duração do evento e a velocidade de propagação da onda de cheia, fornece uma base sólida para a tomada de decisões rápidas e eficazes. Essas informações permitem antecipar ações emergenciais, como a evacuação de áreas de risco e a implementação de medidas estruturais e não estruturais.
5. O programa HEC-RAS se mostrou uma ferramenta eficaz para estudos hidrodinâmicos, oferecendo suporte à geração de manchas de inundação e ao planejamento de medidas de mitigação. No entanto, sua plena potencialidade depende de dados de alta qualidade e do conhecimento técnico do operador, reforçando a necessidade de investimentos em levantamentos topobatimétricos detalhados e estudos mais aprofundados para aprimorar a representatividade dos modelos. Além disso o programa HEC-RAS pode ser utilizado para realizar simulações em tempo real com o objetivo de prever o comportamento de eventos futuros, como as inundações. No entanto, sua aplicação nesse contexto depende de uma infraestrutura adequada, dados de entrada atualizados em tempo real e estar integrado com um sistema de monitoramento hidrológico. Nos Estados Unidos, o programa HEC-RAS já é usado em sistemas de monitoramento em tempo real, para emitir alertas antecipados de inundação, estimar o tempo de chegada da onda de cheia em áreas vulneráveis e planejar evacuações e medidas de mitigação

REFERÊNCIAS

AMARAL, F.; PIROLI, E. L.; SANTOS, V. C. Mapeamento da suscetibilidade a inundação usando os modelos Floresta Aleatória e Máquina Vetor de Suporte com diferentes tipos de kernel. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 44, p. 213348, 2024.

ANAND, J.; GOSAIN, A. K.; KHOSA, R. Hydrological and hydrodynamic modelling for flood management: A case study of the Yamuna River Basin in Delhi. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 56, p. 101960, 2024.

BEDEN, N.; KESKIN, A. U. Flood map production and evaluation of flood risks in situations of insufficient flow data. *Natural hazards*, v. 105, n. 3, p. 2381-2408, 2021.

BIROCCHI, P.; SILVA, D. A.; SASAKI, D. K.; DOTTORI, M. Estimating River discharge from rainfall satellite data through simple statistical models. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 1, p. 241-261, 2023.

BISWAL, B.; SINGH, R. Travel time dynamics of overland flow: An investigation using storage-cascaded linear reservoirs. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 504–515, 2017.

BLADÉ, E.; CEA, L.; CORESTEIN, G.; ESCOLANO, E.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, M. E.; DOLZ, J.; COLL, A. Iber: herramienta de simulación numérica de flujo en ríos. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 30, n. 1, p. 1–10, 2014.

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. **Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places, and Scales**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal. Estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências, Art. 37, Diário Oficial da União, 2001.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação do Fundo Nacional para Calamidades Públicas - FUNCAP e dá outras providências. 2012.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1959. 680p.

EUROPEAN UNION. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. **Official Journal of the European Union**, p. 288/27, 2007.

HACES-GARCIA, F.; MASLENNIKOVA, N.; GLENNIE, C. L.; RIFAI, H. S.; HOSKERE, V.; EKHTARI, N. **Deep Learning Hydrodynamic Forecasting for Flooded Region Assessment in Near-Real-Time**, v. 1, 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama da cidade de Itajubá – MG**. 2022.

JAM-JALLOH, S. U.; LIU, J.; WANG, Y.; LIU, Y. Coupling WRF with HEC-HMS and WRF-Hydro for flood forecasting in typical mountainous catchments of northern China. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 24, n. 9, p. 3155-3172. 2024.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p.

KRAJEWSKI, W. F.; CEYNAR, D.; DEMIR, I.; GOSKA, R.; KRUGER, A.; LANGE, C.; YOUNG, N. C. Real-time flood forecasting and information system for the state of Iowa. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 3, p. 539-554, 2017.

LEANDRO, G. R. D. S. **Interações hidromorfodinâmicas na bacia hidrográfica do rio Sepotuba–Alto Paraguai, Mato Grosso–Brasil**. 2020. 287 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2020.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina. *Caminhos da Geografia (UFU)*, Uberlândia, v. 7, n. 17. p. 72-84, 2006.

MARCIANO, A. G. **Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hídrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

MARCIANO, A. G.; ASSIREU, A. T.; AZEVEDO, S. C. D.; SILVA, B. C. D.; ABREU, A. T. D.; NALINI, H. A. Dramatic changes in the confluence morphology driven by an extreme hydrologic pulse: impacts to River Doce restoration. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 29, n. 9, p. 1-22, 2024.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; MONI, A. P. S. Estudo de cenários na simulação de eventos de cheias no rio Piranguçu e sua influência no Distrito Industrial de Itajubá-MG. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 1. p. 1-15, 2018.

MARCIANO, A.; ODA, P. S. S.; BARBOSA, A. A.; MONI, A. P. S.; CANDIDO, H. O. S. A. Mapeamento de áreas de inundação do rio Sapucaí no município de Santa Rita do Sapucaí -MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 4, p. 2930–2949, 2024.

MCCANN, M.; PAXSON, G. Flood Modeling and Mitigation Using HEC-RAS and GIS. **Journal of Water Management Modeling**, v. 24, p. 417, 2016.

MELLET, L.; PAIVA, F. A. Emprego de hietogramas de projeto na avaliação de redes de drenagem urbana: obtenção por meio de entrevistas. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 16, n. 2, p. 199-209, 2007.

MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. Forecasting for flood warning. **Computes Rendus Geoscience - External Geophysics, Climate and Environment**, v. 337, p. 203-217, 2005.

MORAES, J. M. **Rio Sapucaí**: Vereda da visão de uma Alvorada. ACR & Associados, 2003. 128p.

NUNES, J. O. R.; PERUSI, M. C.; FUSHIMI, M.; DOS SANTOS MORENO, M.; DA SILVA THOMAZINI, L. Estabilização de erosão hídrica em Antropossolos com técnicas de bioengenharia na Área de Proteção Ambiental de Uso Sustentável do Timburi, município de Presidente Prudente, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. esp., p. 1-24, 2023.

PINHEIRO, M. V. Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá MG. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

RANGEL, B. D. Á. **Comportamento morfológico no delta do rio Magdalena (Colômbia) devido as variações da vazão em escala intra e interanual**. 2021. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

RANGEL, L. C.; JUNIOR, J. L.; DA SILVA NETO, A. J. Instrumentos de planejamento e gestão urbana para mitigação de inundações: Estudo de caso dos municípios fluminenses ao longo do rio Muriaé. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 11, n. 2, p. 181-203, 2024.

REIS, J. B. C. **Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos**. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

ROCHA, É. T. S. Mobilidade espacial e desastres ambientais em contexto urbano. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 15, p. 01-21, 2021.

ROSSETO, G. Cidade submersas e população vulnerável: o que revelam as grandes inundações no Brasil nos últimos anos. **Revista (o) eco**, Coluna de 26 de março de 2025.

SANTOS, P. H. M.; MANZIONE, R. L. Previsão em bacias não monitoradas: reflexos da iniciativa da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS) na comunidade hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 28, p. 1, p. 142, 2023.

SCCOTI, A. A. V.; PEREIRA, S.; BATEIRA, C. V. M.; ROBAINA, L. E. D. S.; TRENTIN, R. Modeling flood susceptibility in hydrological data-scarce study areas. **Mercator**, Fortaleza, v. 23, p. 23024, 2024.

SINGH, V. P. **Handbook of Applied Hydrology**. McGraw-Hill Education, 2017. 1140p.

SIONEK, L.; ASSIS, D. T. M.; FREITAS, J. L. “Se eu soubesse não teria vindo”: Implicações e desafios da entrevista qualitativa. **Psicologia em estudo**, v. 25, p. e44987, 2020.

SOUZA, V. M.; SILVA, L. O.; MELLO, A. H.; SOUZA, N. F. C. Impactos socioambientais no processo de urbanização em São Domingos do Araguaia-PA. **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia**, v. 15, n. 80, 2023.

THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M. H. & DE ROO, A. The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 125-140, 2009.

TODINI, E. An operational decision support system for food risk mapping, forecasting and management. **Urban Water**, v. 1, p. 131-143, 2009.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico 2011. 196p.

UN-ISDR - UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **Living with Risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Genebra, Suíça: Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction, 2004. 457p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI. **Laboratório de Informações Hídricas**. Instituto de Recursos Naturais, 2025. Disponível em: <https://mpeh.unifei.edu.br/apresentacao/infraestrutura/>. Acessos em: 20 fev. 2025.

USAGE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **“HEC-RAS Hydraulic Reference Manual.”** Instrucion HEC-RAS software 2022. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/display/RAS1DTechRef/HEC-RAS+Hydraulic+Reference+Manual>. Acesso em: 20 fev. 2025.

YALCIN, G.; AKYREK, Z. Analysis Flood Vulnerable Areas with Multicriteria Evaluation. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS, 20., 2004. Istambul. **Proceedings...** Istambul: 2004. p. 359-364.

ZHANG, Y.; HE, Y.; SONG, J. Effects of climate change and land use on runoff in the Huangfuchuan Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 626, p. 130195, 2023.

Recebido: 23/05/2025

Aceito: 12/07/2025