

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

INFLUÊNCIA DA REPRESENTAÇÃO DA CALHA FLUVIAL NO MDT, SOBRE SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÃO RURAL

Antônio Edmilson de Alcântara Dantas¹ ; Felipe Daniel de Oliveira Santos² & Emanuel Gomes Soares³

Abstract: In Brazil, floods are among the most frequent natural disasters, worsened by gaps in risk modeling and management. This work applied the HEC-RAS hydrodynamic model to a rural stretch of the Cupissura River-PE, using DTM generated by drone and topobathymetric survey. Two scenarios were simulated in HEC-RAS: with and without the river channel. The flood extent with the channel followed the river path, concentrating flow and producing greater depths. Without the channel, the model underestimated the flood. The flooded area differed by 17%, highlighting the impact of proper riverbed representation in HEC-RAS. The model with the channel better matched field observations, reinforcing its importance for simulation accuracy. Using hydrographs in unsteady flow in HEC-RAS, applying the method in other basins, and improving the channel with techniques like stream burning are recommended.

Resumo: No Brasil, as inundações figuram entre os desastres naturais mais recorrentes, agravadas por lacunas na modelagem e gestão de riscos. Este trabalho aplicou o modelo hidrodinâmico HEC-RAS em um trecho rural do rio Cupissura-PE, utilizando MDT gerado por drone e levantamento topo-batimétrico. Foram simulados dois cenários no HEC-RAS: com e sem a calha fluvial no MDT. A mancha de inundação com calha seguiu o canal, concentrando o fluxo e gerando maiores profundidades. Sem a calha, o modelo subestimou a inundação. A diferença na área alagada foi de 17%, evidenciando o impacto da correta representação do leito fluvial no HEC-RAS. O modelo com calha mostrou maior aderência às evidências de campo, reforçando sua importância para a precisão das simulações. Recomenda-se o uso de hidrogramas em regime não permanente no HEC-RAS, além da aplicação da metodologia em outras bacias e do aprimoramento da calha com técnicas como stream burning.

Palavras-Chave – Floodplain Mapping, Hydrologic Modeling, HEC-RAS, Digital Elevation Model simples

INTRODUÇÃO

O meio físico natural influencia os padrões de uso e ocupação do solo pela sociedade, frequentemente orientando assentamentos humanos próximos a recursos hídricos. Porém, essa ocupação nem sempre considera os riscos naturais: muitas comunidades se estabelecem em áreas suscetíveis a desastres, como enchentes e deslizamentos, aumentando sua vulnerabilidade. Entre 1985 e 2021, por exemplo, a ocupação de áreas de risco no Brasil triplicou (Cheliz *et al*, 2023; Projeto MapBiomass, 2022). A falta de opções habitacionais seguras, a urbanização desordenada e o

1) Afiliação: Times New Roman, 8 pt com endereço completo, fone, fax e e-mail

2) Afiliação: Times New Roman, 8 pt com endereço completo, fone, fax e e-mail

planejamento inadequado do uso do solo são fatores que agravam esses riscos e têm resultado em expressivas perdas econômicas e sociais (Silva et al., 2017). Em países em desenvolvimento, como o Brasil, observa-se um aumento na frequência de inundações devido ao crescimento acelerado das cidades, à densificação populacional e ao uso inadequado do solo (Alves e Pereira, 2022).

Nas últimas décadas, a expansão urbana sobre áreas vulneráveis, sem infraestrutura de drenagem adequada, tornou os centros urbanos mais suscetíveis a eventos extremos de chuva. As mudanças climáticas agravam esse cenário, intensificando a ocorrência de precipitações intensas e irregulares (Alves e Pereira, 2022; Grim et al., 2015). As enchentes destacam-se hoje como um dos desastres naturais mais frequentes e devastadores globalmente, sendo responsáveis por grande parcela das perdas humanas e materiais associadas a eventos climáticos (OMM, 2021).

No Brasil, as inundações figuram entre os desastres naturais mais recorrentes e danosos, afetando áreas urbanas e rurais (ONU, 2020). A região Nordeste concentra cerca de 40% dos desastres naturais registrados no país, principalmente eventos de secas e cheias (Moura et al., 2016; Calado et al., 2020), sendo que as inundações correspondem a aproximadamente 21% desses casos (CEPED/UFSC, 2012; BRASIL, 2016). Eventos recentes evidenciam essa vulnerabilidade: chuvas excepcionais em 2022 na região resultaram em enchentes e deslizamentos que causaram cerca de 130 mortes e deixaram mais de 130 mil pessoas desabrigadas ou afetadas (Marengo et al., 2023; CEMADEN, 2023).

Apesar da magnitude do problema, ainda existem lacunas significativas no monitoramento, na modelagem e na gestão de riscos de inundação no Brasil. Segundo o IBGE, 59,4% dos municípios brasileiros não dispõem de um plano de gerenciamento de riscos, e apenas 25% incluem medidas de prevenção de enchentes em seus planos diretores (IBGE, 2017). Além disso, a rede de monitoramento hidrológico é deficiente: das mais de 23 mil estações fluviométricas espalhadas pelo país, somente cerca de 15% reportam dados em tempo real, dificultando a emissão de alertas e a análise expedita de eventos críticos.

Para enfrentar esses desafios, tecnologias de geoprocessamento e sensoriamento remoto tornaram-se aliadas indispensáveis na gestão de recursos hídricos. Tais ferramentas permitem monitorar vastas áreas de bacias hidrográficas de forma contínua. Imagens de satélite fornecem uma visão ampla da superfície terrestre, possibilitando mapear o uso do solo e acompanhar a evolução de enchentes, enquanto levantamentos com aeronaves remotamente pilotadas (drones) permitem obter dados topográficos de altíssima resolução em áreas específicas (INPE, 2001; INPE, 2006). Com esses recursos, é possível gerar modelos digitais do terreno (MDT) detalhados, fundamentais para simulações de inundação.

Em paralelo, modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) são amplamente utilizados para simular o escoamento fluvial e a propagação de cheias (USACE, 2002; USACE, 2021). Essas ferramentas computacionais permitem prever quais áreas serão inundadas para determinados cenários de vazão, auxiliando na elaboração de mapas de mancha de inundação com alta acurácia. A integração de modelos hidrodinâmicos com dados geoespaciais de alta resolução proporciona análises robustas do risco de inundação, apoiando a definição de medidas de mitigação e sistemas de alerta (Tucci & Bertoni, 2003; Knebl et al., 2005). Com a maior disponibilidade de dados e a evolução dessas ferramentas, tornou-se viável avaliar cenários extremos de forma mais ágil, antecipando eventos críticos e subsidiando a gestão de áreas de risco (Mendes et al., 2002; Oliveira et al., 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho realiza a simulação hidrodinâmica de uma mancha de inundação em um trecho de rio rural no Nordeste brasileiro, integrando o modelo HEC-RAS a um MDT de alta resolução derivado de aerolevantamento. Essa abordagem demonstra o potencial da

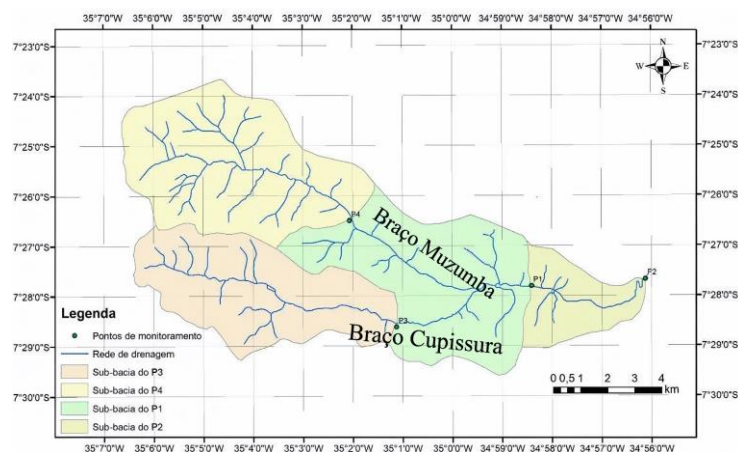
incorporação de dados de sensoriamento remoto de alta resolução em modelos hidrodinâmicos para a geração de informações confiáveis sobre áreas suscetíveis a enchentes.

METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em um trecho rural do rio Cupissura, localizado no município de Itambé, região da Zona da Mata no estado de Pernambuco. Essa área insere-se na sub-bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas e apresenta clima tropical úmido (classificação de Köppen), com precipitação média anual em torno de 1.511 mm e evaporação média anual de aproximadamente 1.300 mm. As chuvas concentram-se nos períodos sazonais mais úmidos, resultando em vazões elevadas no rio durante a estação chuvosa, quando ocorrem eventos de cheia de maior magnitude.

A região de estudo contou com um monitoramento fluviométrico contínuo, realizado pelo LARHENA/UFPB (Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental da UFPB) desde 2020 até o presente momento, com medições regulares de nível d'água e vazão. O trecho analisado corresponde ao ponto 4, seção fluviométrica mais a montante dentre quatro pontos de monitoramento instrumentados no rio, conforme ilustrado na Figura 1 abaixo.

Figura 1 - Mapa de localização das bacias dos pontos de monitoramento provenientes do relatório.



Fonte: Relatório de monitoramento Cupissura

Nesse local foi instalado um sensor de nível (transdutor de pressão) conectado a um *datalogger* para registro automático do nível d'água em intervalos de 15 minutos, calibrado periodicamente por meio de leituras manuais em régua de nível. Esse monitoramento de nível e vazão foi mantido ao longo do período de estudo até 2024, permitindo caracterizar a dinâmica hidrológica do rio em diferentes condições sazonais.

As medições de vazão foram realizadas em campanhas de campo utilizando molinetes hidrométricos. Em particular, empregou-se um micromolinete de hélice para determinar as velocidades pontuais do fluxo, registrando-se o número de rotações em intervalos de 30 segundos e convertendo-se em velocidade pela equação de calibração do aparelho. Adicionalmente, um molinete eletromagnético foi utilizado para complementar as medições em distintas profundidades. A partir dos perfis de velocidade obtidos e da área molhada de cada seção transversal (determinada por levantamentos batimétricos discretizados, medindo profundidades a cada 0,3–0,5 m com auxílio de trena e mira graduada), determinaram-se vazões parciais por faixas na seção, cuja soma forneceu a vazão total do rio em cada campanha. Os dados coletados durante o período de 2020–2024 resultaram em uma série histórica de vazões e níveis como pode ser visto na Figura 2 abaixo, destacando-se um

pico de aproximadamente $2,73 \text{ m}^3/\text{s}$ observado em 03/06/2022, durante um evento de cheia no período chuvoso.

Figura 2 - Série de vazões evidenciando um pico dentre os valores.

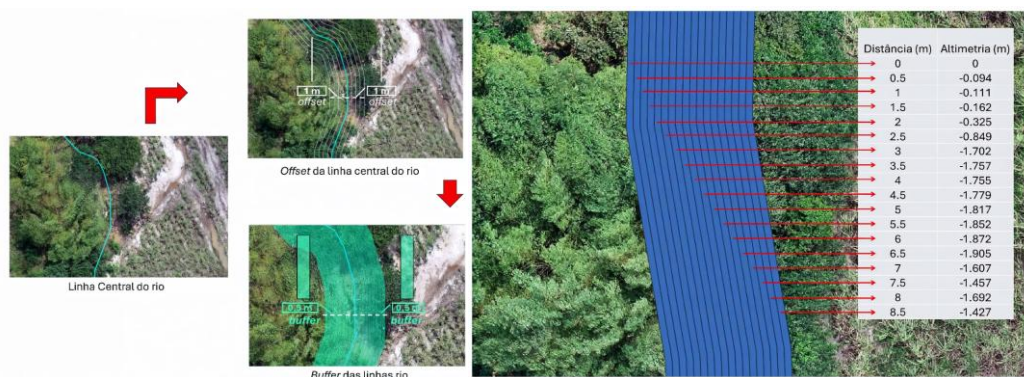


Fonte: Autor

Além das medições in situ, realizou-se um levantamento aerofotogramétrico de alta resolução do trecho de interesse para obter uma representação detalhada do terreno. Utilizou-se um drone DJI Phantom 4 Pro, equipado com câmera de 20 MP (DJI, 2024), para cobrir a área de estudo em voo planejado a aproximadamente 50 m de altitude e com 60% de sobreposição entre imagens adjacentes. Ao todo, foram obtidas 256 fotografias aéreas, com apoio de 6 pontos de controle em solo medidos via receptor GNSS com RTK (referencial SIRGAS2000 projetado) para assegurar elevada acurácia de posicionamento. O processamento das imagens foi efetuado no software Pix4D, resultando em um Ortomosaico georreferenciado de alta resolução cobrindo a área de estudo e em um Modelo Digital de Superfície (MDS) inicial. Em seguida, aplicou-se uma classificação semiautomática para remover do MDS os elementos não pertinentes ao terreno (como a densa vegetação ciliar e eventuais edificações), gerando-se assim um Modelo Digital do Terreno (MDT) representativo da superfície do solo.

Apesar do MDT resultante representar bem a topografia exposta da planície, a batimetria do leito do rio não pôde ser capturada pelo imageamento aéreo, devido à presença de água e cobertura vegetal sobre o curso d'água. Para incorporar a calha fluvial ao modelo digital, conduziu-se um levantamento topo-batimétrico no trecho estudado. Com o uso de nível topográfico e mira graduada, mediram-se cotas do terreno ao longo de uma seção transversal do rio, obtendo 18 pontos altimétricos espaçados de 0,5 m entre as margens, cobrindo tanto o perfil do leito submerso quanto as margens adjacentes. Em ambiente SIG, traçou-se então o eixo central do rio com base no Ortomosaico, e criaram-se polígonos representando a área da calha ao longo de aproximadamente 497 m de extensão do rio. A cada segmento poligonal foi atribuída uma cota de fundo correspondente à profundidade medida naquele trecho, com base no perfil topo-batimétrico levantado em campo. Além disso, para representar irregularidades naturais do leito ao longo do alcance do rio, adicionaram-se pequenas variações aleatórias ($\pm 0,15 \text{ m}$) nas cotas de fundo a cada $\sim 100 \text{ m}$ de comprimento. Por fim, por meio de um algoritmo de álgebra de mapas implementado em Python, os valores topo-batimétricos foram integrados ao MDT original, rebaixando-se as elevações dos pixels na região da calha de acordo com a profundidade especificada em cada bloco poligonal. Esse procedimento — exemplificado no esquema ilustrado na Figura 3, resultou em um MDT modificado contendo uma calha “virtual” inserida, coerente com a geometria do leito observada em campo.

Figura 3 - Esquema de criação de calha virtual



Fonte: Autor

Com o MDT modificado em mãos, elaborou-se um modelo hidrodinâmico no software HEC-RAS (versão 6.6) para simular a propagação de uma cheia no trecho estudado. No módulo RAS Mapper do HEC-RAS, importou-se o MDT como terreno base e definiram-se as feições geométricas do modelo: o eixo do rio (centerline), as linhas de margem da calha e os delineamentos de escoamento na planície adjacente, todos obtidos com o apoio do ortomosaico e do MDT. Em seguida, traçaram-se seções transversais (transectos) ortogonais ao curso (USACE, 2002) d'água ao longo de ~500 m do rio, gerando uma malha densa de perfis; após interpolações intermediárias, obteve-se um total de 95 transectos, cobrindo adequadamente a topografia do canal e da várzea potencialmente inundável (USACE, 2002; Mendes et al., 2022).

Na sequência, definiram-se os parâmetros hidráulicos e as condições de contorno para a simulação de cheia. Os coeficientes de rugosidade de Manning foram atribuídos conforme as características de uso do solo: adotou-se valor $n = 0,16$ para o leito natural do rio e $n = 0,40$ para as margens com vegetação densa, com base em valores da literatura para canais naturais e áreas alagadas com matas ciliares (Baptista, 2011; IPH, 2005). Como condição de montante, utilizou-se a vazão de pico observada ($2,73 \text{ m}^3/\text{s}$) no Ponto 4 e seu nível d'água associado medido em campo (cota 49,305 m) na data do evento de cheia. Na fronteira de jusante, adotou-se a declividade média do trecho (aproximadamente 0,48%, estimada a partir do MDT) como condição de saída, permitindo ao modelo calcular o escoamento crítico correspondente.

A simulação foi executada em regime permanente (fluxo estacionário), qual o HEC-RAS modela sob a equação de Manning (equação 1) (USACE, 2002; USACE, 2021), habilitando a opção de regime de escoamento misto, permitindo então, o software avalia localmente condições subcríticas ou supercríticas conforme a topografia e a vazão (USACE, 2002; Brunner, 2002). Ao final, o HEC-RAS gerou mapas de inundação delineando a mancha de alagamento prevista para o evento simulado, identificando as áreas atingidas pela cheia sobre o terreno modelado. Adicionalmente, repetiu-se o processo de simulação utilizando o MDT original (sem a calha inserida) para fins de comparação, a fim de avaliar o impacto da inclusão da batimetria do leito nos resultados de propagação da inundação.

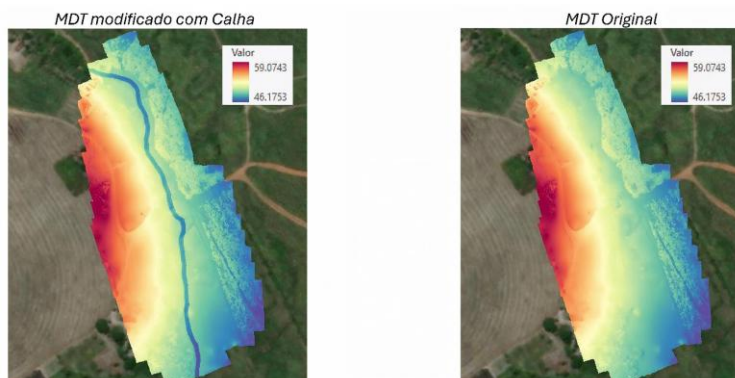
$$Q = \frac{Rh^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações hidrodinâmicas realizadas com o Modelo Digital de Terreno (MDT) modificado – contendo a calha do rio inserida virtualmente – em comparação com o MDT

original (sem a calha) revelam diferenças significativas no padrão e na extensão da inundação simulada em regime permanente (resolução de 6cm originária do Ortomosaico). A inserção da calha virtual no MDT gerou um modelo de terreno mais realista, sem alterar drasticamente as altimetrias globais (o histograma de elevações permaneceu praticamente inalterado), mas introduzindo a feição do leito fluvial de forma explícita. A Figura 4 abaixo ilustra essa diferença, comparando o MDT original com o MDT modificado com a calha.

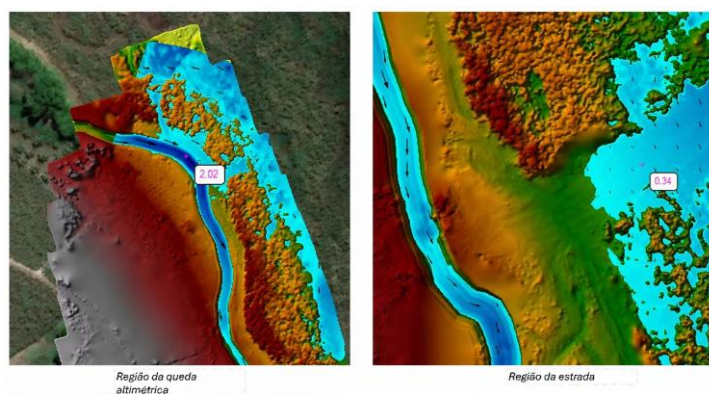
Figura 4 - Comparação entre MDT com calha e MDT original.



Fonte: Autor

Com o MDT modificado, a mancha de inundação resultante seguiu predominantemente o traçado da calha artificial ao longo do trecho estudado, concentrando escoamento e produzindo maiores profundidades dentro do leito do rio virtual. A Figura 5 apresenta a mancha de inundação sob regime permanente obtida com a calha inserida, evidenciando que a lâmina d'água acompanha o canal do rio modelado. Verifica-se a ocorrência de pontos de inundação mais profundos ao longo da calha – por exemplo, estimam-se profundidades da ordem de 2 metros em trechos montantes dentro do leito virtual – em contraste com as áreas adjacentes.

Figura 5 - Valores de lâmina de água da mancha



Fonte: Autor

Observa-se também que, na porção superior da bacia modelada, a inundação ultrapassa os limites da calha: devido a uma depressão topográfica local (uma “queda altimétrica” identificada no MDT e no Ortomosaico de alta resolução), a água extravasa para fora do canal e escoar para áreas vizinhas de menor cota. Esse extravasamento ocorre em direção a uma estrada rural localizada em nível mais baixo, provocando inundação sobre a via. Esse comportamento pôde ser confirmado por observações de campo: a Figura 6 mostra um registro fotográfico do evento de cheia na região da

estrada no dia 03/06/2022, no qual o nível d'água atingiu aproximadamente a altura do eixo do pneu de uma caminhonete. Visualmente, essa evidência corresponde aos resultados da simulação, que indicaram profundidades da água na estrada variando de algumas dezenas de centímetros até cerca de 1 metro nos pontos mais baixos (34 centímetros — ver figura 5). A concordância entre o modelo e o observado em campo reforça a confiabilidade da simulação com o MDT modificado.

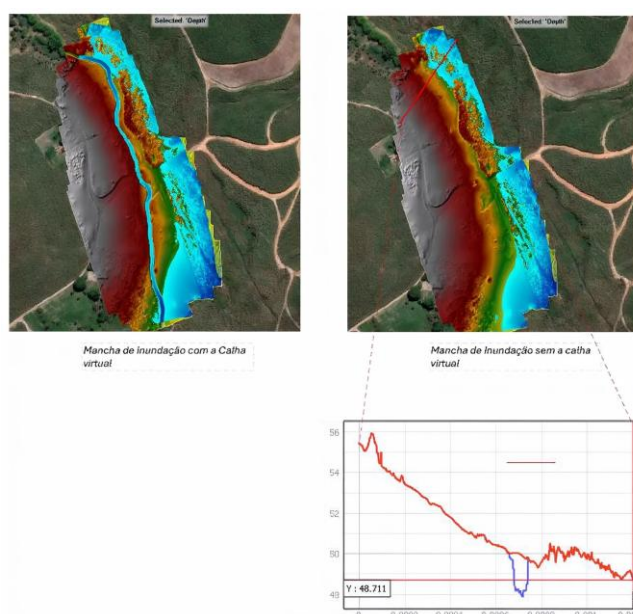
Figura 6 - Registro fotográfico feito no momento da cheia, na região da estrada.



Fonte: Autor

No cenário em que se utilizou o MDT original (isto é, sem a calha esculpida), a dinâmica de inundação apresenta diferenças notáveis. Sem a representação do leito do rio no modelo de terreno, o escoamento seguiu unicamente o gradiente natural do relevo: a água esparramou-se de forma menos confinada e desceu pelas cotas mais baixas do terreno em direção à mesma depressão topográfica mencionada. Assim, mesmo sem a calha modelada, o escoamento acabou encontrando a rota de menor elevação e alcançando a estrada, reproduzindo o padrão geral de alagamento naquele ponto crítico. Entretanto, a extensão areal da inundação foi menor no cenário sem calha. A Figura 7 ilustra uma comparação direta entre as manchas de inundação geradas com e sem a calha virtual, incluindo um perfil topográfico longitudinal.

Figura 7 - Comparação das manchas de inundação



Fonte: Autor

Quantitativamente, a área total alagada simulada com o MDT original atingiu aproximadamente 16.178 m², ao passo que com o MDT modificado (com calha) a área inundada foi de cerca de 18.939 m². Essa diferença corresponde a um acréscimo de aproximadamente 2.760 m², ou 17,1% a mais de área alagada quando a calha do rio é incorporada no modelo. Em outras palavras, a ausência do canal fluvial no MDT levou a uma subestimativa significativa da mancha de inundação – o modelo original não representou cerca de 17% da área potencialmente alagável, em comparação com o cenário considerado mais próximo da realidade (com o leito do rio inserido).

Do ponto de vista qualitativo, diferenças visuais e hidráulicas emergem entre os dois cenários. Com a calha virtual, a mancha de inundação mostra um traçado linear bem definido ao longo do vale do rio, com a água confinada no canal até transbordar no ponto de baixa topografia; as profundidades na calha são maiores e o escoamento ocorre de forma mais canalizada, como seria esperado em condições reais. Sem a calha, por outro lado, a inundação aparece mais difusa no modelo, sem um canal definido para concentrar o fluxo – a água espalha-se pelo terreno raso, resultando em lâminas menos profundas ao longo do curso d'água. Apesar disso, vale ressaltar que ambas as simulações indicaram a estrada como área vulnerável à inundação devido à forte influência da depressão topográfica local: em ambos os casos a água atingiu esse ponto baixo, e as profundidades simuladas na estrada foram similares, mostrando que o relevo existente conduz o fluxo para a estrada independentemente do cenário. Ainda assim, o percurso da água até chegar a esse ponto e a extensão da área alagada diferiram substancialmente conforme a presença ou não do leito no MDT.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram, portanto, a importância da incorporação da calha do rio na qualidade do modelo hidrodinâmico e na representação fiel dos processos hidráulicos. A inclusão da calha virtual proporcionou um comportamento de escoamento condizente com o esperado fisicamente – o fluxo manteve-se concentrado no canal e transbordou nos locais de menor elevação –, ao passo que sua omissão resultou em perda de precisão na distribuição da água. Em suma, a modelagem com base em dados de imageamento aéreo de alta resolução, aliada à inserção de feições hidráulicas-chave como o leito fluvial, propiciou simulações de cheia mais realistas. A mancha de inundação obtida com o MDT modificado mostrou-se mais abrangente e alinhada às evidências observadas em campo, ao contrário do MDT original que subestimou a área alagada. Esses achados reforçam que a representação adequada da geomorfologia do rio no MDT é fundamental para reproduzir corretamente a propagação da inundação em trechos rurais, melhorando a confiabilidade de estudos e aplicações em planejamento de riscos de enchentes, destacando-se ainda as seguintes conclusões.

- Quantificou-se uma diferença de aproximadamente 17% na área alagada simulada ao comparar o cenário com a calha fluvial inserida no modelo digital do terreno (MDT) e o cenário sem essa inclusão. Esse resultado evidencia o impacto significativo que a representação da calha do rio exerce na delimitação das manchas de inundação, indicando que a ausência do canal no MDT pode levar a uma considerável subestimação da extensão das áreas inundadas.
- O modelo hidrodinâmico que incorporou a calha fluvial mostrou-se mais coerente com evidências de campo de eventos de cheia observados. As manchas de inundação simuladas com a calha representada corresponderam mais de perto às áreas efetivamente alagadas registradas em enchentes reais, demonstrando que a inclusão do canal no MDT aprimora a capacidade da modelagem em reproduzir o comportamento real das cheias no trecho de rio estudado.

- Os resultados obtidos validam a relevância metodológica de representar explicitamente o leito fluvial para aumentar a confiabilidade das simulações hidrodinâmicas. A inserção da calha no MDT permitiu que o modelo refletisse com maior precisão as condições de escoamento no canal, resultando em previsões de inundação mais condizentes com o comportamento físico esperado. Assim, evidenciou-se que detalhar adequadamente a geometria do rio no modelo é fundamental para aprimorar a precisão e a credibilidade das simulações de cheias.
- Para trabalhos futuros, recomendam-se algumas melhorias e extensões da metodologia com base nestes achados. Uma sugestão é o uso de hidrogramas de cheia para realizar simulações em regime não permanente no HEC-RAS, avaliando o desempenho do modelo sob condições de fluxo variáveis no tempo. Também seria pertinente testar a abordagem proposta em outras bacias hidrográficas ou em áreas de maior escala, a fim de verificar a aplicabilidade geral da metodologia e identificar eventuais particularidades regionais. Adicionalmente, a calibração do modelo com dados reais de inundação (como níveis d'água ou extensões de áreas alagadas observadas) pode refinar a confiabilidade das previsões. Por fim, recomenda-se aperfeiçoar a representação da calha fluvial no MDT por meio de levantamentos topo-batimétricos mais detalhados ou do uso de técnicas complementares como o método de “stream burning” (Chen et al., 2024), buscando melhorar a aproximação entre o modelo digital e a geometria real do rio, e consequentemente a precisão das manchas de inundação simuladas.

REFERENCIAS

- ALVES, R.; PEREIRA, M. (2022). *Desafios e oportunidades do ESG e das finanças sustentáveis: discussões no âmbito das empresas do Grupo Eletrobras*. In: *Anais do 21º Seminário de Planejamento Econômico-Financeiro e de Regulação do Setor Energético Brasileiro*, 2022.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. (2011). *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2ª ed. Porto Alegre: ABRH, 200 p.
- BRASIL. (2016). *Instrução Normativa nº 02, de 20 de dezembro de 2016*. Ministério da Integração Nacional.
- BRUNNER, G. W. (2002). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- CALADO, B.; VALVERDE, M. C.; VASCONCELOS, V. (2020). *Os desastres no Sudeste e Nordeste brasileiro e a sua relação com a precipitação e temperatura*. Relatório técnico.
- CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2023). *Pesquisadores fazem recomendações analisando as inundações e deslizamentos em Recife-PE após chuvas de maio de 2022*. Acesso em: <https://www.gov.br/cemaden>.
- CEPED/UFSC – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. (2012). *Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: volume Brasil*. Florianópolis: CEPED/UFSC, 94 p.
- CHELIZ, P.; RODRIGUES, J.; LADEIRA, F. (2023). *O papel do meio físico e relevo na ocupação humana: potencialidades, vulnerabilidades e impactos ambientais (enchentes, erosão e assoreamento) na trajetória histórica da região de Araraquara (SP)*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(1), p. 584–632.
- CHEN, Q.; MUDD, S. M.; ATTAL, M.; HANCOCK, S. (2024). *Extracting an accurate river network: stream burning re-revisited*. *Remote Sensing of Environment*, 312, 114333.
- DEFESA CIVIL DO RIO GRANDE DO SUL. (2024). *Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS (3/6/9h)*. Disponível em: <https://defesacivil.rs.gov.br>.

- DJI. (2024). *Phantom 4 Pro – Página de Suporte do Produto*. Disponível em: <https://www.dji.com/br/support/product/phantom-4-pro>.
- GRIM, S.; BARTLEY, S.; ZHANG, H. (2015). *Impacts of urbanization on flooding and sustainable mitigation strategies*. *Journal of Hydrology*, 524, p. 524–537.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2017). *Perfil dos Municípios Brasileiros: gestão de riscos e desastres*. Rio de Janeiro: IBGE.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2001). *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br>.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2006). *Aplicações de Sensoriamento Remoto e SIG*. Curso de Geoprocessamento. São José dos Campos: INPE.
- KNEBL, M. R.; YANG, Z. L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D. R. (2005). *Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin summer 2002 storm event*. *Journal of Environmental Management*, 75(4), p. 325–336.
- MARENGO, J. A.; ALCÂNTARA, E.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C. A.; et al. (2023). *Flash floods and landslides in Recife, Northeast Brazil, after heavy rain in May 2022: causes, impacts and disaster preparedness*. *Weather and Climate Extremes*, 39, 100545.
- MENDES, T. A.; SOUSA, M. B.; PEREIRA, S. A.; SANTOS, K. A.; FORMIGA, K. T. M. (2022). *Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas*. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(1), p. 141–157.
- MOURA, M.; CUNICO, C.; NÓBREGA, J. C.; DUARTE, C. (2016). *Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública*. *Caderno de Geografia*, 26(Esp. 2), p. 259.
- OLIVEIRA, P. T. S.; SILVA, C. M. S.; LOPES, A. V. B.; COELHO, C. H. M.; SANTOS, F. L. (2016). *Application of HEC-RAS for floodplain mapping in semi-arid region: case study in the Brazilian northeast*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2), p. 325–336.
- OMM – Organização Meteorológica Mundial. (2021). *Water-related hazards dominate disasters in the past 50 years*. Disponível em: <https://public.wmo.int>.
- ONU – Organização das Nações Unidas. (2020). *OCHA: Brasil está entre países com maior número de pessoas expostas a inundações*. Disponível em: <https://brasil.un.org>.
- PROJETO MAPBIOMAS. (2022). *Relatório Anual de Ocupações em Áreas de Risco – Coleção 7*. Disponível em: <https://mapbiomas.org>.
- SILVA, A. R.; PEREIRA, R. C.; SANTOS, M. E. (2017). *Avaliação das perdas econômicas decorrentes de desastres naturais no Brasil*. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 6(3), p. 462–481.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (2003). *Inundações Urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 175 p.
- USACE – U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *HEC-RAS: River Analysis System – User's Manual*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.
- USACE – U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS River Analysis System – 2D Modeling User's Manual*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.