

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA A INUNDAÇÕES POR MODELAGEM HIDRODINÂMICA NO MUNICÍPIO DE MURICI/AL

*Bianca Maria Lima Cruz Pereira¹; Rafaela Faciola Coelho de Souza²; Ayrton Martim Oliveira
Dias Melo³; Juciela Cristina dos Santos⁴ & Vicente Fernandes de Moura Neto⁵*

Abstract: Flood events have become increasingly recurrent in urban areas due to the intensification of unplanned urbanization and the lack of territorial planning. In the municipality of Murici, located in the Mundaú River Valley in Alagoas, Brazil, this issue is aggravated by the low slope of the terrain, urban expansion over flood-prone areas, and insufficient drainage infrastructure. This study presents a flood inundation simulation for the urban area of Murici, using topobathymetric data, hydrological information, and hydraulic parameters from the Mundaú River basin. The simulation was conducted through integrated modeling using tools such as HEC-RAS and digital terrain models, enabling a detailed representation of surface runoff behavior under flood scenarios. The results revealed a significant overlap between the simulated flood area and regions classified as having high and medium flood susceptibility, reinforcing the consistency between the modeling outputs and the natural dynamics of the terrain. Furthermore, a considerable portion of the urban fabric is located in critical zones, highlighting the socio-spatial vulnerability of the local population. The integrated analysis of flood susceptibility and hydrodynamic simulation allows for the identification of priority areas for mitigation, urban requalification, and territorial planning. Therefore, hydrological and hydraulic modeling, combined with spatial vulnerability analysis, proves to be an essential tool for sustainable urban planning and the protection of populations exposed to extreme hydrometeorological events.

Resumo: Eventos de inundação tornaram-se mais recorrentes em áreas urbanas devido à intensificação do processo de urbanização desordenada e ausência de planejamento territorial. No município de Murici, localizado no Vale do Rio Mundaú, em Alagoas, essa problemática é intensificada pela baixa declividade do relevo, pela expansão urbana sobre áreas suscetíveis à inundação e pela insuficiência de infraestrutura de drenagem. Este estudo apresenta a simulação da mancha de inundação na área urbana de Murici, utilizando dados topobatimétricos, informações hidrológicas e parâmetros hidráulicos da bacia hidrográfica do Rio Mundaú. A simulação foi realizada por meio de modelagem integrada com ferramentas como o HEC-RAS e modelos digitais de terreno, permitindo a representação detalhada do comportamento do escoamento superficial em cenários de cheia. Os resultados revelaram significativa sobreposição entre a mancha de inundação simulada e as áreas classificadas com alta e média suscetibilidade à inundação, o que reforça a coerência entre os modelos utilizados e a dinâmica natural do terreno. Além disso, parte significativa da malha urbana encontra-se inserida em zonas críticas, evidenciando a vulnerabilidade socioespacial da população local. A análise integrada da suscetibilidade e da simulação hidrodinâmica permite identificar setores prioritários para ações de mitigação,

1) Laboratório de Regularização Fundiária, Campus de Engenharia e Ciências Agrárias/UFAL, bianca.pereira@ceca.ufal.br

2) Laboratório de Regularização Fundiária, Campus de Engenharia e Ciências Agrárias/UFAL, rafaela.ferreira@ceca.ufal.br

3) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia/UFAL, ayrton.melo@ctec.ufal.br

4) Laboratório de Regularização Fundiária, Campus de Engenharia e Ciências Agrárias/UFAL, juciela.santos@ceca.ufal.br

5) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Centro de Ciências Agrárias, Maceió, vicente.moura@ceca.ufal.br

requalificação e ordenamento territorial. Assim, a modelagem hidrológica e hidráulica, aliada à análise espacial da vulnerabilidade, apresenta-se como ferramenta essencial para o planejamento urbano sustentável e para a proteção de populações expostas a eventos hidrometeorológicos extremos.

Palavras-Chave – Enchentes; Inundações; Chuvas Intensas.

INTRODUÇÃO

Eventos de inundação têm se tornado mais frequentes em áreas urbanas, especialmente em contextos de crescimento acelerado e ausência de planejamento territorial. A impermeabilização do solo, o avanço sobre áreas de preservação e a substituição de superfícies permeáveis por estruturas pavimentadas contribuem para a ampliação dos impactos durante eventos de chuva (Abrão et al., 2021). Essas alterações no uso e ocupação do solo reduzem a capacidade de infiltração e aumentam a velocidade de escoamento superficial (Pessoa et al., 2021).

A vulnerabilidade de áreas urbanas e periurbanas a inundações também está relacionada às características físicas das bacias hidrográficas. O formato da bacia, a extensão, a declividade e a estrutura da rede de drenagem influenciam diretamente o tempo de concentração e o volume de escoamento gerado a partir de um evento de precipitação (Ferreira et al., 2021). Bacias com relevo suavemente ondulado e drenagem ramificada tendem a responder de forma mais rápida, acumulando água nas áreas mais baixas (Bruno, 2022).

Para compreender a dinâmica das inundações, é necessário integrar informações sobre a bacia, a precipitação e o comportamento do escoamento superficial. Estudos aplicados à gestão de risco vêm utilizando análises morfométricas e modelos hidráulicos como ferramentas para identificar zonas críticas ao longo dos vales fluviais (Borges et al., 2024). O padrão espacial e temporal da precipitação exerce influência direta sobre a eficiência do escoamento, especialmente em municípios com sistemas de drenagem naturais comprometidos (Guirro e Michel, 2023).

O uso de dados pluviométricos confiáveis, aliado à modelagem geométrica e hidráulica, tem se mostrado eficaz para representar a extensão potencial das manchas de inundação. O desenvolvimento de ferramentas como o HEC-RAS e a disponibilidade de Modelos Digitais de Terreno (MDT), como o FABDEM, permitem simulações com maior nível de detalhamento e suporte à tomada de decisão em áreas urbanas e ribeirinhas (Amorim, 2022).

O acoplamento de modelos, como o hidrológico MGB-IPH e o hidráulico HEC-RAS, tem se consolidado como uma abordagem robusta para o mapeamento de áreas inundáveis, permitindo a estimativa dos níveis de cheia e das respectivas manchas de inundação para diferentes tempos de retorno. Essa metodologia, que integra ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, é fundamental para subsidiar planejadores urbanos e gestores na tomada de decisões em áreas de risco.

Variáveis como declividade, altitude e densidade de drenagem têm sido aplicadas na avaliação da suscetibilidade a inundações, permitindo identificar setores mais vulneráveis ao acúmulo de água em diferentes cenários hidrológicos (Brito et al., 2022). A aplicação de parâmetros morfométricos, mesmo na ausência de séries históricas completas, tem contribuído para a elaboração de produtos cartográficos úteis ao planejamento urbano e à gestão ambiental (Bortolini et al., 2021).

Dentro desse contexto, municípios da Região Metropolitana de Maceió vêm sofrendo consequências hidrológicas devido às mudanças climáticas, como é o caso de Murici. O município está localizado em uma área de topografia predominantemente baixa, inserida no Vale do Rio

Mundaú, que é um dos principais rios da região, e historicamente é responsável por diversos episódios de inundação em municípios ribeirinhos. O relevo mais plano nas áreas urbanas, somado à presença de cursos d'água, favorece o acúmulo de água em períodos de chuvas intensas.

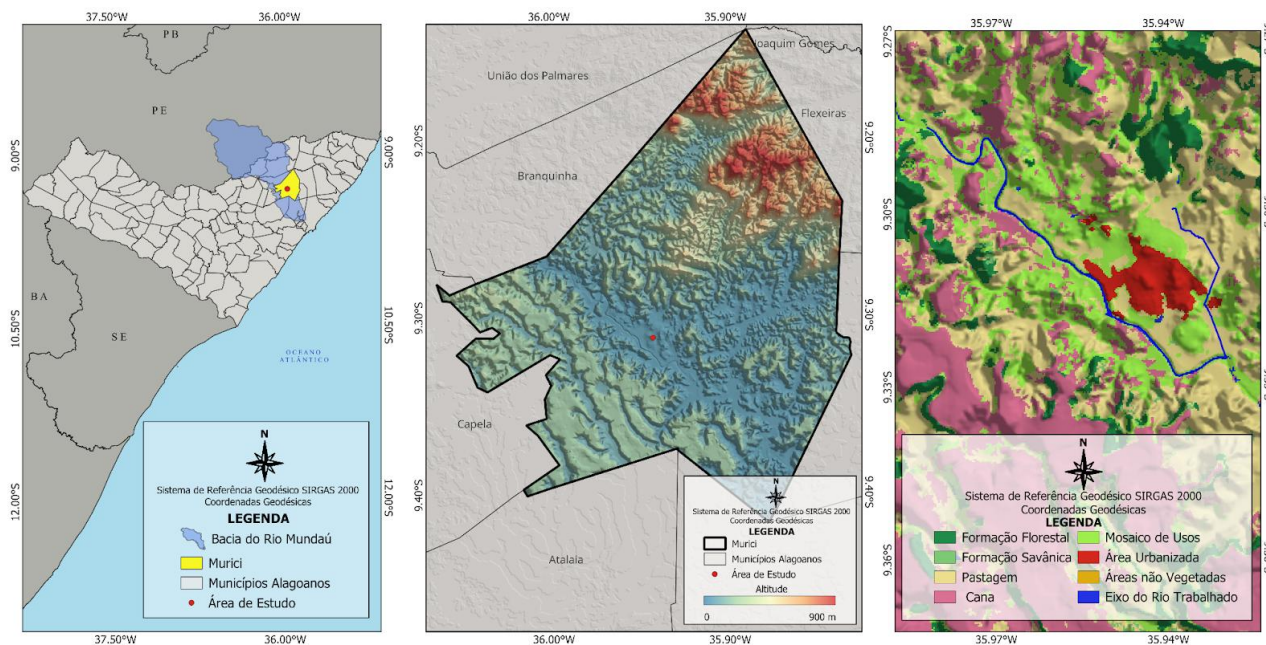
A região apresenta um regime de chuvas concentrado entre os meses de abril e agosto, com volumes significativos que, quando combinados à insuficiência de drenagem, provocam o transbordamento de rios e canais urbanos. Dessa forma, a modelagem hidrológica e hidráulica é uma ferramenta importante para a simulação e o entendimento do comportamento dos sistemas hídricos.

Portanto, considerando o cenário do município de Murici, este trabalho tem como objetivo simular a mancha de inundação a partir de dados topobatimétricos, informações hidrológicas e estruturas de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Mundaú, integrada com a construção geométrica do trecho, a parametrização hidráulica e a definição de um cenário de escoamento para a geração de uma mancha de inundação sob a área urbana do município de Murici.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo concentra-se no rio que passa pela área urbana do município de Murici, Alagoas, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHRM), como apresentado na Figura 1. Murici está inserido no trecho médio da bacia e apresenta uma posição estratégica no vale do rio Mundaú, o que o torna particularmente vulnerável a processos hidrológicos, como inundações sazonais. A geografia local caracteriza-se por planícies fluviais e relevo suavemente ondulado, com áreas urbanas e rurais situadas próximas a cursos d'água que, em épocas de chuvas intensas, podem transbordar.

Figura 1 – Localização do município de Murici; hipsometria do município; uso e cobertura do solo da área de estudo.



Em 2010, o município foi um dos mais afetados pelas enchentes que causaram destruição de moradias, perda de infraestrutura urbana e deslocamento de famílias. Partindo deste contexto, a área de estudo para a modelagem hidráulica no município foi definida pelo trecho do rio Mundaú que atravessa o perímetro urbano do município, com características geomorfológicas e hidrológicas que o tornam suscetível a inundações.

METODOLOGIA

O processo de simulação da mancha de inundação foi elaborado no *software* HEC-RAS (versão 6.6), com base em dados hidrológicos e dados geométricos e topográficos, estes obtidos a partir do modelo FABDEM, que possui resolução espacial de 30 metros. Esse MDT foi escolhido por apresentar melhor desempenho na representação da drenagem, conforme observado por Bortoloni, Silveira e Siame (2025).

Aquisição de dados

As estações fluviométricas utilizadas no presente estudo foram selecionadas a partir da plataforma da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do complemento *ANA Data Acquisition* (versão 1.0) na ferramenta de filtragem espacial no *software* QGIS (versão 3.40.6). Consideraram-se apenas as estações com séries históricas superiores a 15 anos. Para fins de análise hidrológica, adotou-se como referência a estação localizada mais a montante do curso d'água em questão. Os dados de vazão e de cota foram obtidos no portal HidroWeb, integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Construção do modelo geométrico

O modelo geométrico foi construído pelo HEC-RAS *Mapper*. Para apoio à vetorização, foram utilizadas imagens de satélite oriundas do *plugin* QuickMapServices. No refinamento do MDT, realizou-se integração dos seguintes elementos: eixo do rio, no sentido montante-jusante; margens esquerda e direita; caminhos de fluxo laterais; e seções transversais, posicionadas perpendicularmente ao curso do rio. Os dados foram salvos e posteriormente integrados à interface principal do HEC-RAS.

Parametrização hidráulica

Os coeficientes de rugosidade de Manning foram definidos conforme as orientações dos responsáveis pelo HEC-RAS (US Army Corps of Engineers - USACE, e aplicados nas seções transversais a partir do raster de uso e ocupação do solo obtido no site do Projeto MapBiomias.

Definição das condições de escoamento

Adotou-se para o projeto o regime de escoamento permanente (*Steady Flow*). A vazão de entrada foi definida a partir do trabalho de Monte (2013), que modelou as vazões da bacia do Rio Mundaú para vários tempos de retorno. Adotou-se a vazão correspondente a um tempo de retorno de 25 anos. Como condição de contorno a montante, foi utilizada uma curva-chave (relação cota-vazão), enquanto a condição de jusante foi representada pela profundidade normal, estimada com base na declividade média do trecho total, que foi de 5,0402%.

Execução da simulação e análise dos resultados

A simulação foi configurada e executada a partir da função *Steady Flow Analysis*, com o regime de fluxo misto ativado (*Mixed Flow*). Os resultados da modelagem hidrodinâmica foram exportados em formato raster por meio do HEC-RAS *Mapper* e posteriormente processados no QGIS.

A simulação da mancha de inundação foi subsequentemente comparada com as áreas de risco de inundação previamente identificadas e mapeadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

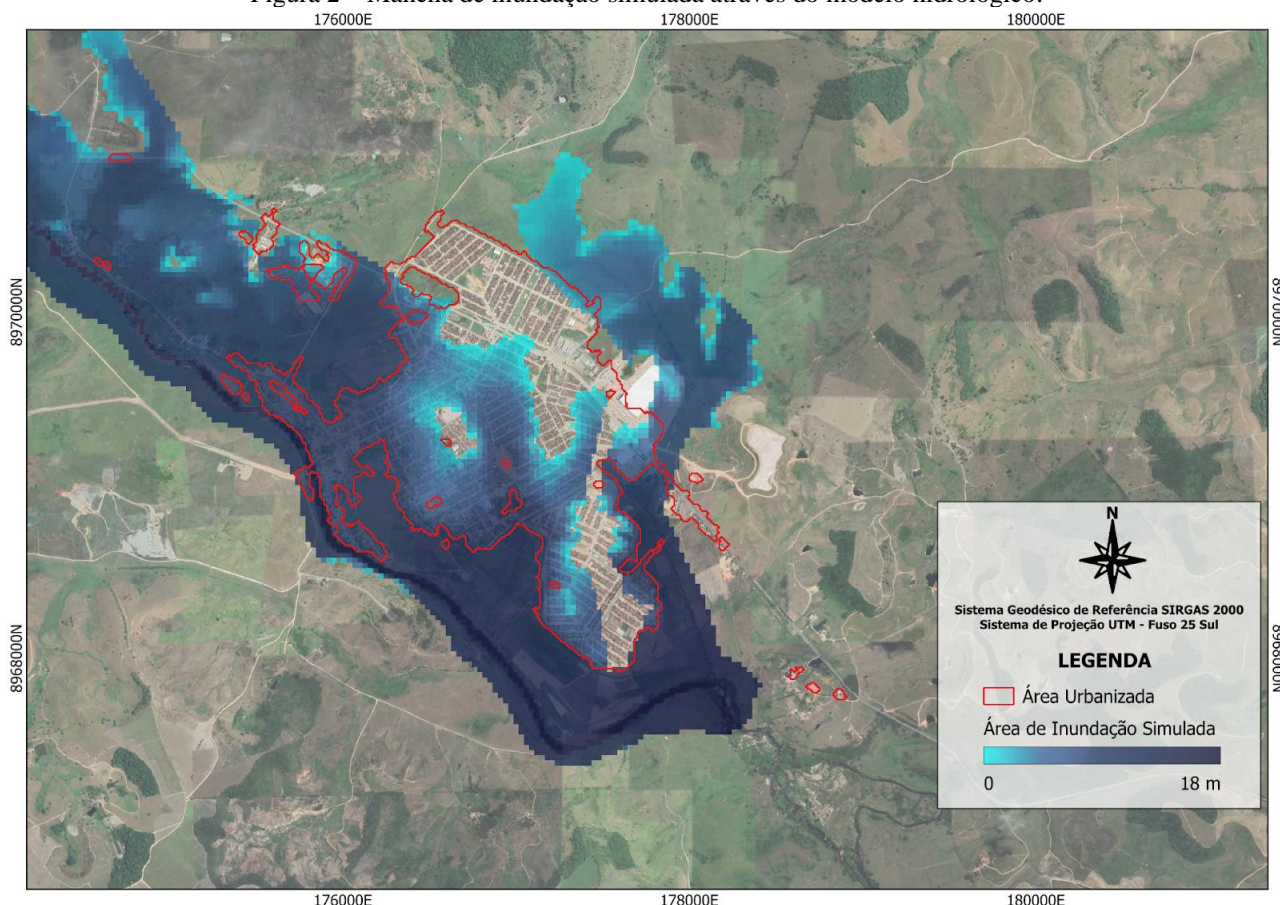
Modelagem hidráulica

A mancha de inundação é mostrada na Figura 2 com a delimitação da área urbanizada destacada em vermelho e a mancha de inundação em diferentes tons de azul, que indicam níveis variados de

alagamento. A análise técnica desse mapa permite identificar uma significativa sobreposição entre a mancha de inundação e a área urbanizada, especialmente nas porções central, oeste e sudoeste do núcleo urbano. A direção predominante da inundação se dá no sentido noroeste-sudeste, evidenciando o papel do relevo local e dos cursos d'água no direcionamento e acúmulo do escoamento superficial. As áreas representadas em azul mais escuro indicam maior profundidade da lâmina d'água e, conseqüentemente, maior risco para as edificações e para a integridade física da população, localizadas especialmente a jusante do relevo.

A partir da simulação, foi possível determinar a extensão e a profundidade das zonas potencialmente impactadas na área urbana do município de Murici. A análise revelou que, para a vazão de 25 anos de retorno, a mancha de inundação simulada atingiu 2 km² da área urbana do município, o que corresponde a aproximadamente 65% do total da mancha urbana, elevando a altitude do espelho d'água em 17,25 metros.

Figura 2 – Mancha de inundação simulada através do modelo hidrológico.



A partir da análise dos perfis transversais, verificou-se que a simulação alcançou uma extensão de até 1350 metros a partir do eixo do rio.

O mapa apresentado na Figura 3 ilustra a suscetibilidade à inundação no município de Murici, com a classificação espacial das áreas em três níveis de risco (alta, média e baixa), além da simulação da delimitação da mancha de inundação. Observa-se que a maior parte da mancha de inundação coincide com áreas classificadas como de alta e média suscetibilidade, o que indica coerência entre

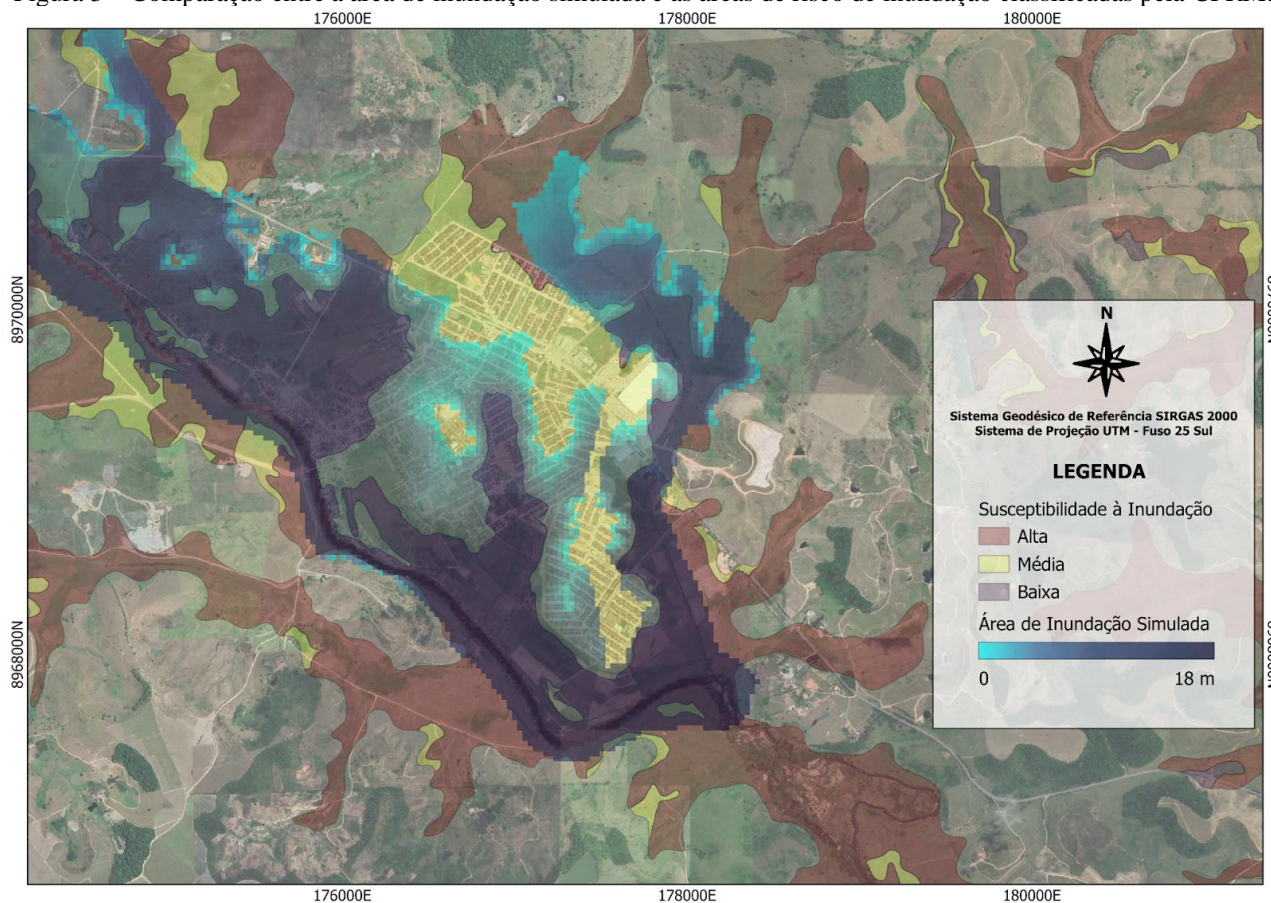
os resultados da simulação hidráulica e os critérios morfométricos e topográficos utilizados para a avaliação da vulnerabilidade.

Os resultados quantificam a elevada vulnerabilidade do município de Murici a eventos de cheia, confirmando que mesmo um evento de recorrência moderada, com tempo de retorno de 25 anos, tem potencial para impactar uma porção significativa de sua área urbana.

Dessa forma, pode-se afirmar que a malha urbana, localizada principalmente no centro do mapa, encontra-se inserida em sua maior parte em áreas de susceptibilidade média e alta, o que demonstra que o processo de urbanização avançou sobre zonas naturalmente predispostas ao acúmulo de água e com baixa capacidade de escoamento superficial.

Na sobreposição dos dois mapas (Figura 3) fica evidente a forte concordância entre a zona de alta susceptibilidade à inundação, dados gerados pela CPRM, e a área efetivamente inundada na modelagem HEC-RAS do evento de cheia ocorrido em 2010. Quase toda a área determinada como de risco alto foi preenchida pela simulação de cheia, o que demonstra que o modelo hidrodinâmico reproduziu com acurácia as áreas que, em estudo regional, já foram identificadas como as mais vulneráveis. Além disso, as transições de susceptibilidade média e baixa também correspondem a parte da área de inundação simulada.

Figura 3 – Comparação entre a área de inundação simulada e as áreas de risco de inundação classificadas pela CPRM.



CONCLUSÕES

A metodologia adotada, baseada no software HEC-RAS e em dados públicos, provou-se eficiente para delimitar a mancha de inundação, com resultados validados pelas cartas de risco

publicadas pelo Serviço Geológico do Brasil, reforçando seu potencial como ferramenta para a gestão de desastres em bacias com carência de dados.

As implicações de uma inundação com a extensão simulada podem afetar diretamente sistemas de saneamento, como redes de esgoto e áreas de descarte de resíduos, contribuindo para a proliferação de doenças de veiculação hídrica. Além das residências, escolas, hospitais e diversas outras estruturas podem ser atingidos, gerando custos de reparo e interrupção de serviços fundamentais.

Apesar da eficácia do modelo em delinear a extensão da inundação, a resolução do MDT inviabiliza uma representação detalhada em nível de edificações individuais, o que impede a avaliação precisa da exposição de infraestruturas específicas e a estimativa de danos potenciais. Recomenda-se, para trabalhos futuros, o uso de dados topográficos de maior resolução (e.g., LiDAR) para refinar a análise de vulnerabilidade da infraestrutura urbana.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, Cleiton M. Rodrigues; GARCÍA-RIVERO, Alberto E.; ACOSTA, Jorge Olivera; CHÁVEZ, Eduardo Salinas; BEREZUK, André. *Susceptibilidade de inundação na Unidade de Planejamento e Gerenciamento do rio Iguatemi, Mato Grosso do Sul, Brasil*. Revista Geográfica Venezolana, Mérida, v. 62, n. 1, p. 60–75, jan./jun. 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/353220838>. Acesso em: 23 jun. 2025.

AMORIM, Lais Ferrer *et al.* *Modelagem hidrológica a partir de dados de chuva distribuída para representação do escoamento em bacias hidrográficas urbanas*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 27, e30, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220060>. Acesso em: 23 jun. 2025.

BORGES, Larissa dos Santos *et al.* *A probabilistic model for flood forecasting based on hydrological data in the state of Maranhão, Brazil*. Meteorology Hydrology and Water Management, v. 12, n. 1, 2024. DOI: 10.26491/mhwm/190951. Acesso em: 23 jun. 2025.

BORTOLINI, Joseane *et al.* *Identificação do grau de perigo a enchentes e inundações com base na análise morfométrica e uso do SIG aplicados na bacia hidrográfica do rio Marrecas, Francisco Beltrão – PR*. RA'EGA – O Espaço Geográfico em Análise, Curitiba, v. 51, p. 17–40, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/69805>. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v51i0.69805>. Acesso em: 23 jun. 2025.

BRITO, Lucas A. V. *et al.* *FLORAS: urban flash-flood prediction using a multivariate model*. Applied Intelligence, v. 53, p. 16107–16125, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10489-022-04319-0>. Acesso em: 23 jun. 2025.

BRUNO, Leonardo Souza *et al.* *Hydrological and hydraulic modeling applied to flash flood events in a small urban stream*. Hydrology, Basel, v. 9, n. 12, p. 223, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology9120223>. Acesso em: 23 jun. 2025.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Murici, Alagoas*. [S. l.]: CPRM, 2012. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18409>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FERREIRA, Renan Gonçalves *et al.* *Performance of hydrological models in fluvial flow simulation.* Ecological Informatics, v. 66, 101453, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453>. Acesso em: 23 jun. 2025.

GUIRRO, Mel Oliveira; MICHEL, Gean Paulo. *Hydrological and hydrodynamic reconstruction of a flood event in a poorly monitored basin: a case study in the Rolante River, Brazil.* Natural Hazards, v. 117, p. 723–743, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05879-1>. Acesso em: 23 jun. 2025.

MONTE, Benício Emanuel Omena. *Mapeamento de inundações no município de Rio Largo (AL).* 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Maceió, 2013.

PESSÔA, Vinícius Marques Müller *et al.* *Contribuição de aspectos naturais e antrópicos para análise do perigo à inundação em Campinas-SP.* Revista Brasileira de Cartografia, v. 74, n. 1, p. 100–118, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv74n1-49026>. Acesso em: 23 jun. 2025.