

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS ECONÔMICOS CAUSADOS POR INUNDAÇÕES REPENTINAS EM UMA BACIA URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Marina Batalini de Macedo^{1} ; Priscilla Mota Costa² ; Samuel Marcos Tavares³ ; Marcos Roberto Benso⁴ ; Maria Clara Fava⁵ ; Anai Floriano Vanconcelos⁶ ; Beliana Cavalcante Sawada de Carvalho⁷ & Javier Tomasella⁸*

RESUMO – Megacidades em países em desenvolvimento enfrentam frequentemente inundações severas, com impactos sociais e econômicos relevantes. Avaliar cenários de inundação é essencial para apoiar estratégias de mitigação e adaptação que reduzam a exposição e a vulnerabilidade. Este estudo é focado na bacia do rio Aricanduva, na Região Metropolitana de São Paulo, Brasil, uma área de 102,5 km² caracterizada pela alta urbanização, elevada suscetibilidade a inundações e densidade populacional de cerca de 7.400 habitantes por km². O objetivo é estimar perdas econômicas e avaliar a vulnerabilidade socioeconômica. Mapas de inundação foram elaborados com o modelo hidráulico CADDIES, utilizando um modelo digital de terreno com resolução de 10 m. As manchas de inundações resultantes foram integradas a dados censitários e de infraestrutura para identificar elementos expostos. As perdas foram estimadas por funções que relacionam a profundidade de água aos danos em edificações, conteúdos e infraestrutura. Os resultados indicam que as perdas associadas aos bens residenciais e comerciais representam a maior parcela do dano total, seguidas pelas perdas em infraestrutura e edificações. Embora áreas de maior renda apresentem perdas individuais mais elevadas, o dano total concentra-se em setores de menor renda, devido à maior ocupação espacial, destacando a importância da integração entre modelagem hidrológica e dados socioeconômicos.

Palavras-Chave – Avaliação de danos por inundações; Vulnerabilidade socioeconômica; Gestão de risco de inundações

ABSTRACT– Megacities in developing countries frequently face severe flooding, with significant social and economic impacts. Assessing flood scenarios is essential to support mitigation and adaptation strategies that reduce exposure and vulnerability. This study focuses on the Aricanduva River basin, in the São Paulo Metropolitan Region, Brazil, an area of 102.5 km² characterized by high urbanization, high flood susceptibility, and a population density of approximately 7,400 inhabitants per km². The objective is to estimate economic losses and assess socioeconomic vulnerability. Flood maps were developed using the CADDIES hydraulic model, based on a digital terrain model with 10 m resolution. The resulting flood extents were integrated with census and infrastructure data to identify exposed elements. Losses were estimated using functions that relate water depth to damages in buildings, contents, and infrastructure. Results indicate that losses associated with household and commercial contents represent the largest share of total damage, followed by infrastructure and structural losses. Although higher-income areas present greater individual losses, total damage is

1) Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Itajubá, Brasil, marinamacedo@unifei.edu*

2) Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Itajubá, Brasil

3) Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Itajubá, Brasil

4) Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil

5) Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, Brasil

6) Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, São Carlos, Brasil

7) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, Brasil

8) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, Brasil

concentrated in lower-income sectors due to their greater spatial distribution, highlighting the importance of integrating hydrological modelling and socioeconomic data.

Key-words – Flood damage assessment; Socioeconomic vulnerability; Flood risk management

1. INTRODUÇÃO

O risco de inundação resulta da interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade, exigindo avaliações integradas (IPCC, 2014). Em regiões de rápida urbanização, fatores como crescimento desordenado e desigualdades socioeconômicas aumentam a vulnerabilidade às inundações (Der Sarkissian et al., 2022). Em megacidades como São Paulo, a expansão urbana frequentemente supera a implementação de medidas de mitigação, ampliando a suscetibilidade a eventos hidrometeorológicos (UN-Habitat, 2020).

Na Região Metropolitana de São Paulo, chuvas intensas combinadas com alta impermeabilização resultam em frequentes enxurradas e cheias fluviais (Borba et al., 2016). A bacia do rio Aricanduva destaca-se pela recorrência de inundações e elevada densidade populacional, gerando impactos significativos, como danos à infraestrutura e perdas econômicas (Haddad & Teixeira, 2015).

Avanços na modelagem hidráulica, aliados a dados socioeconômicos, permitem estimar perdas econômicas e avaliar vulnerabilidades (Merz et al., 2010). Nesse contexto, este estudo tem como objetivo estimar perdas econômicas e analisar a vulnerabilidade socioeconômica na bacia do Aricanduva, integrando modelagem hidráulica e dados censitários.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A bacia do Aricanduva está localizada na porção leste de São Paulo, Brasil, abrangendo aproximadamente 102,5–103 km² de território altamente urbanizado (Figura 1). A bacia é caracterizada por áreas densamente construídas, vegetação natural limitada e um histórico de inundações recorrentes. Essas condições a tornam um cenário representativo para estudos voltados aos processos hidrológicos e à dinâmica de inundações em megacidades.

O clima da região é classificado como subtropical úmido (Köppen), com temperatura média anual em torno de 19 °C. A variabilidade sazonal é bem marcada: as temperaturas variam de 17,2 °C em julho a 23,5 °C em fevereiro, enquanto a precipitação varia de 32,3 mm no mês seco de agosto a 292,1 mm em janeiro, o pico da estação chuvosa (INMET, 2020). A vazão média anual do rio Aricanduva é de aproximadamente 5,6 m³/s, e a largura do canal varia de 13,3 m próximo às nascentes a 18,3 m próximo à foz.

Além de sua relevância hidrológica, a bacia apresenta significativa vulnerabilidade socioeconômica. Com uma densidade populacional de cerca de 7.400 habitantes/km² (IBGE, 2022), eventos de inundações rápidas representam riscos substanciais de deslocamento populacional, ferimentos e perdas econômicas (Simas, 2017). A área também conta com um sistema de monitoramento bem estruturado, com dados de precipitação, vazão e nível d'água coletados em intervalos de 10 minutos ao longo de um período de 10 anos. Essa rede extensa de monitoramento fornece uma base robusta para modelagem detalhada de inundações e avaliação de risco.

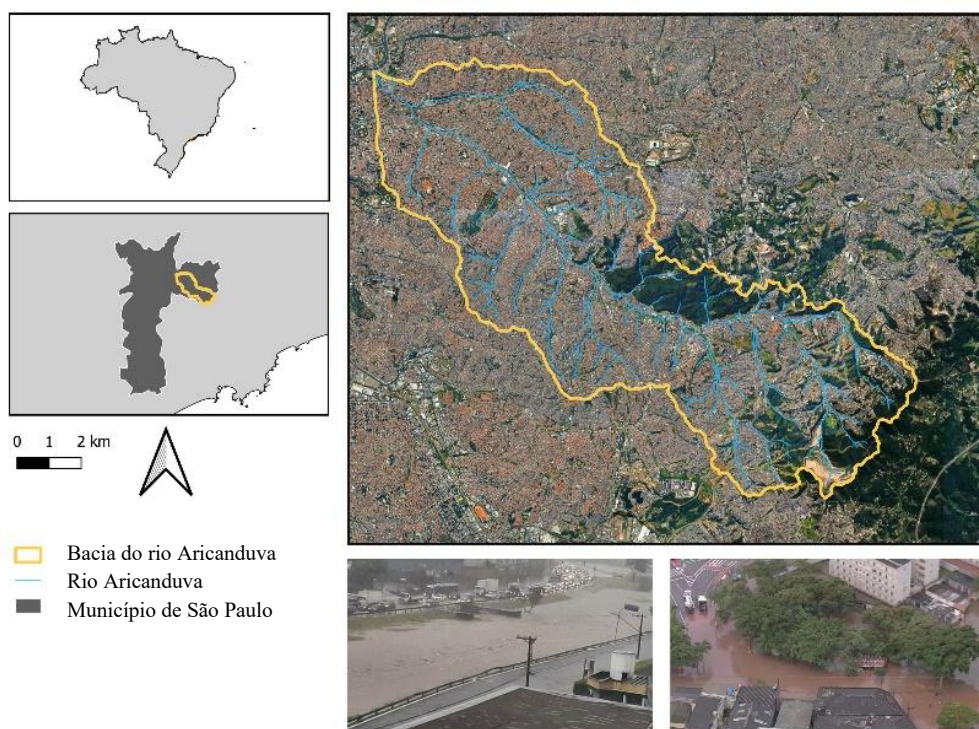


Figura 1 - Localização da bacia do Aricanduva e imagens de eventos de inundação

2.2 Modelagem e mapeamento de inundações

A modelagem de inundações para a bacia do Aricanduva foi conduzida utilizando séries temporais hidrológicas, interpolação espacial da precipitação e simulações hidráulicas bidimensionais. Os dados hidrológicos foram obtidos da rede telemétrica do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP), com medições de intensidade de chuva e nível d'água a cada 10 minutos. Para este estudo, foi selecionado um evento histórico de 06/04/2017, com precipitação total de 84 mm e intensidade máxima de 66 mm/h. As profundidades de água registradas em quatro estações fluviométricas foram utilizadas na avaliação do modelo, enquanto os dados de 12

pluviômetros foram interpolados pelo método do inverso da distância (IDW), com coeficiente de potência igual a 2.

A dinâmica das inundações superficiais foi simulada com o modelo Cellular Automata Dual Drainage System (CADDIES), também conhecido como CAFLOOD, um modelo hidráulico bidimensional baseado em autômatos celulares ponderados (WCA2D). O modelo opera em uma grade com estrutura de vizinhança de Von Neumann e simula a propagação do escoamento pela aproximação da onda difusiva das equações de Saint-Venant combinada com a equação de Manning. Essa abordagem, embora simplificada, garante um bom equilíbrio entre precisão e eficiência computacional, sendo adequada para escoamentos rasos em áreas urbanas densas.

O modelo requer como entradas o modelo digital de elevação (MDE), a precipitação média e condições de contorno de vazão ou nível d'água. Considerando a área urbanizada da bacia (103 km²) e seu alto grau de impermeabilização, a precipitação foi agregada em intervalos de 10 minutos. Um único coeficiente de rugosidade de Manning foi adotado em todo o domínio, e os parâmetros de estabilidade numérica foram mantidos nos valores padrão recomendados.

2.3 Valoração econômica dos bens e ativos afetados

A valoração econômica dos ativos expostos às inundações na bacia do rio Aricanduva considerou danos às estruturas das edificações, aos bens e à infraestrutura pública básica. Para isso, dados de perigo e exposição foram integrados por meio de geoprocessamento no QGIS, incluindo mapas de inundação obtidos por modelagem hidrodinâmica, indicadores socioeconômicos e estimativas do número e tipo de edificações por área, a partir do Censo Brasileiro de 2022 (IBGE, 2022). O fluxo de trabalho integrou o raster de profundidade de inundação com dados censitários e camadas de área ocupada pelas edificações, permitindo uma avaliação espacialmente explícita da exposição econômica.

Os indicadores socioeconômicos foram baseados na renda média familiar por setor censitário, permitindo a classificação em classes econômicas segundo faixas compatíveis com padrões nacionais (A – acima de 20 salários mínimos; B – de 10 a 20; C – de 4 a 10; D – de 2 a 4; E – abaixo de 2). Os microdados do Censo também permitiram identificar a localização e o tipo das edificações, agregadas em categorias residenciais e não residenciais por setor.

Ao final, cada setor censitário passou a conter informações sobre profundidade de inundação, número de edificações, renda média, classe socioeconômica e percentual de área afetada.

A estimativa dos danos às edificações foi realizada a partir do cruzamento entre a área construída afetada por classe socioeconômica (padronizada conforme a NBR 12.721/2006) e o custo

unitário básico de construção fornecido pelo Sinduscon (atualizado em março de 2025), conforme apresentado na Tabela 1.

Além dos danos estruturais, foram consideradas as perdas associadas ao conteúdo das edificações, com base em Cançado (2009), conforme apresentado no PDAU-RMGV (2021), atualizadas pelo IPCA para março de 2025 (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de construção e de conteúdo dos bens segundo diferentes classes econômicas

Classe econômica	Padrão construtivo	Categoria (NBR 12.721/2006)	Custo Unitário Básico (R\$/m²)	Valor do conteúdo (R\$)
A	Alto	R1-A	3504,24	139.508,61
B	Normal	R1-N	2813,71	58.567,10
C	Baixo	R1-B	2348,89	18.054,41
D e E	Popular	RP1Q	2403,41	14.253,28

Por fim, a estimativa da proporção de danos às edificações e aos seus conteúdos em função da profundidade da inundação foi baseada nas Equações 1 e 2, propostas a partir do trabalho de Machado (2005) e adaptadas por PDAU-RMGV (2021).

$$Dano\ Percentual_{construções} = 0,0125h + 0,0819 \quad (1)$$

$$Dano\ Percentual_{conteúdos} = 0,2183\ln(h) + 0,4986 \quad (2)$$

Quanto aos danos relacionados à infraestrutura pública básica, de acordo com dados do Banco Mundial baseados em ocorrências reais de inundações em estados brasileiros, as perdas nesse setor representam entre 12,5% e 30% dos custos totais de danos. Para garantir uma avaliação mais conservadora do risco, foi adotado o percentual de 30% das perdas totais estimadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A extensão da inundação simulada pelo modelo CADDIES para o evento analisado é apresentada na Figura 2. Os resultados indicam que o modelo representa adequadamente a hidrodinâmica da bacia, com canais bem definidos e representação de elementos urbanos, como edificações, malha viária e bacias de retenção. Áreas com maiores profundidades refletem o acúmulo de água nessas estruturas, confirmando sua representação no modelo. Uma validação detalhada é apresentada por Benso et al. (2024).

Apesar disso, a Figura 2 mostra que as bacias de retenção são insuficientes para atenuar completamente eventos dessa magnitude. As inundações se estendem por grandes áreas, especialmente a jusante (zoom em vermelho), onde as profundidades fora do canal atingem entre 2 e 4 m. Limitações semelhantes já foram observadas em bacias urbanas sob eventos extremos (Bhusal

et al., 2023). Essas áreas também concentram maior densidade de edificações comerciais e níveis de renda mais elevados, aumentando o potencial de perdas.

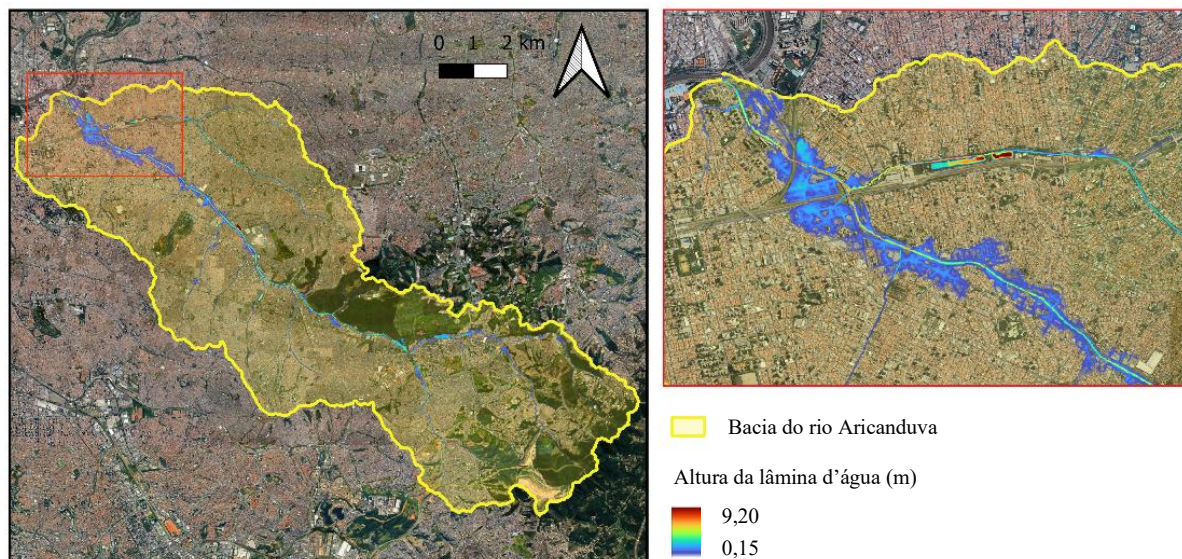


Figura 2 - Extensão da inundação e profundidade da água obtidas pelo CADDIES — à direita, apresenta-se um zoom da área mais afetada da bacia.

A partir da interseção entre a mancha de inundação e os dados do Censo de 2022, foram estimadas as perdas econômicas associadas a danos estruturais, infraestrutura e bens, em função da profundidade da inundação. Os resultados agregados (Tabela 2) indicam que os maiores danos estão associados aos bens, seguidos pela infraestrutura e pelas estruturas das edificações, em concordância com estudos internacionais (Merz et al., 2010). As perdas máximas atingiram R\$ 52,4 mil (construção), R\$ 58,6 mil (bens) e R\$ 33,3 mil (infraestrutura), enquanto alguns setores apresentaram perdas desprezíveis.

Para análise em nível de edificação, as perdas médias foram de R\$ 5.649,4 (construção), R\$ 22.500 (bens) e R\$ 8.444,9 (infraestrutura). A Figura 3 mostra a distribuição das perdas por classe socioeconômica, indicando maiores prejuízos individuais na classe B, especialmente para danos totais e à construção. A classe E apresentou maior dispersão dos prejuízos, principalmente relacionados à infraestrutura e aos danos totais, evidenciando maior variabilidade entre os eventos analisados. As classes C e D apresentaram valores intermediários, com ocorrência de alguns valores extremos. Esse padrão está alinhado com estudos que mostram maiores perdas por ativo em grupos de maior renda, mas maior impacto acumulado em grupos de menor renda (Kreibich et al., 2014).

Tabela 2 – Estatísticas dos danos econômicos na bacia do Aricanduva

	Danos econômicos (milhões de R\$)		
	Construção	Conteúdo	Infraestrutura
Total	194,4	774,3	290,6
Média	0,01	0,02	0,01
Mínimo	0,00	0,01	0,00
Máximo	0,05	0,06	0,03
Desvio padrão	0,01	0,02	0,01

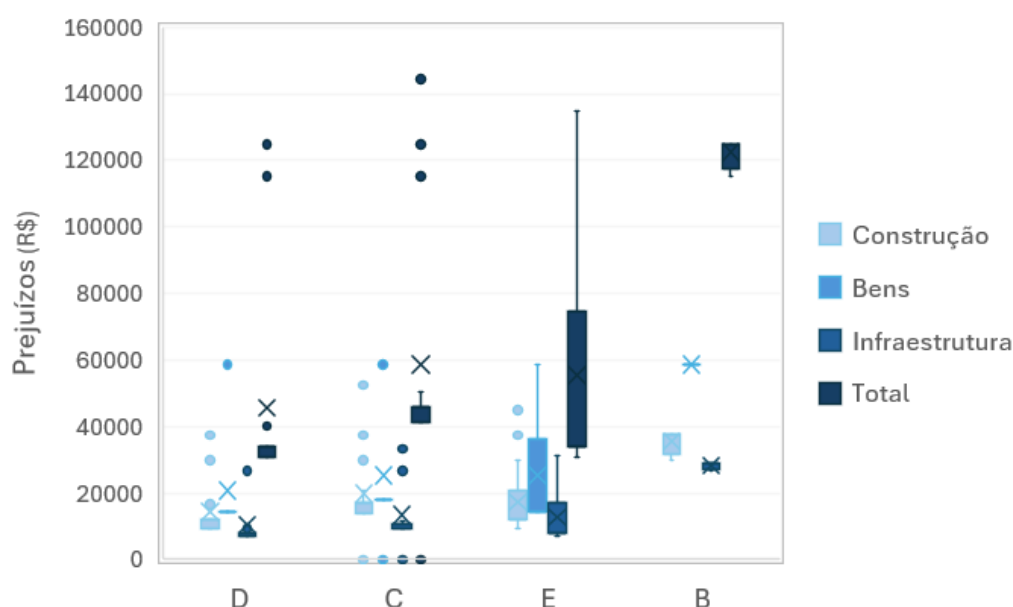


Figura 3 - Danos da inundação por classe econômica e tipo de perdas na bacia do Aricanduva

Embora a classe B apresente maiores perdas individuais por edificação, a classe D concentra os maiores prejuízos totais devido à maior quantidade de domicílios expostos, evidenciando a influência da distribuição populacional na magnitude dos impactos econômicos (Winsemius et al., 2016).

A Figura 4 destaca setores com perdas superiores a R\$ 10 milhões. Observa-se concentração dessas perdas em áreas a jusante, associadas a maiores profundidades e maior densidade econômica. Esse padrão reflete a combinação entre intensidade da inundação e distribuição socioeconômica, conforme observado em estudos internacionais (Hallegatte et al., 2013; Jongman et al., 2012; Tellman et al., 2021).

De forma geral, os resultados mostram que o risco de inundação na bacia do Aricanduva é influenciado tanto por processos hidrológicos quanto pela distribuição espacial dos ativos. Embora

as bacias de retenção ofereçam benefícios locais, são insuficientes em eventos extremos, reforçando a necessidade de estratégias integradas de gestão do risco.

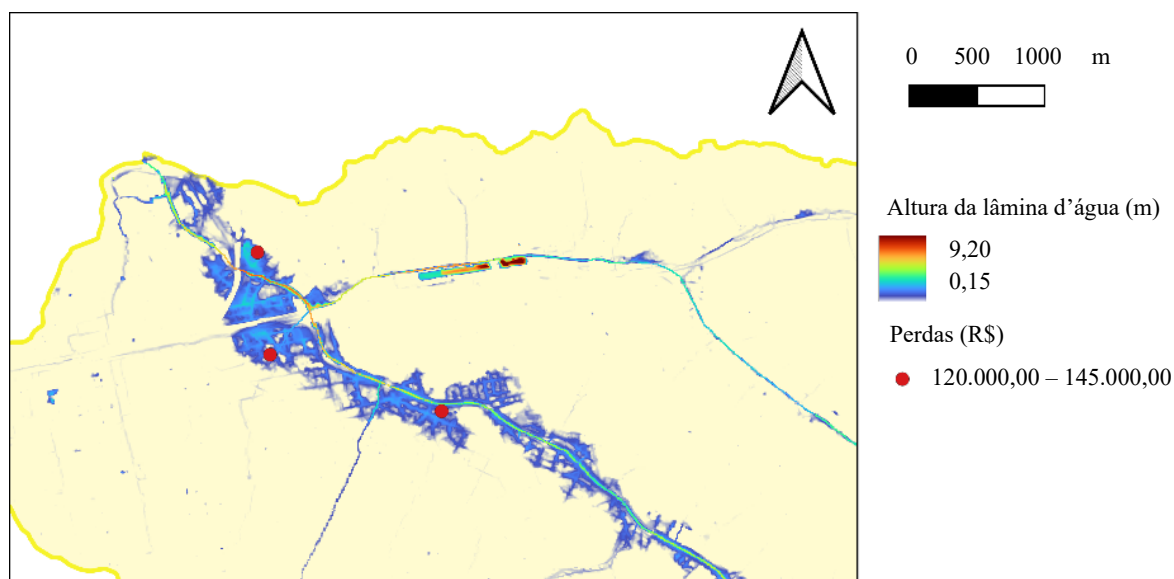


Figura 4 - Zoom nos três pontos mais afetados

4. CONCLUSÃO

Este estudo destaca o valor da integração de modelagem bidimensional de inundações em alta resolução com dados socioeconômicos para apoiar avaliações detalhadas de impactos em bacias altamente urbanizadas. A aplicação do modelo CADDIES na bacia do Aricanduva representou com sucesso processos hidrodinâmicos-chave, incluindo o escoamento em canais, a inundação de planícies aluviais e os efeitos das bacias de retenção. Ao combinar as profundidades de inundação simuladas com indicadores baseados no censo, os resultados mostram que as perdas associadas aos bens residenciais e comerciais constituem a maior parcela dos danos totais, seguidas pelos impactos na infraestrutura e pelos danos estruturais. Enquanto classes de maior renda apresentam maiores perdas individuais, os danos totais concentram-se nas classes de menor renda devido à sua maior extensão espacial e densidade populacional. Esses resultados reforçam a importância de integrar a modelagem física de inundações com indicadores de vulnerabilidade socioeconômica para subsidiar o planejamento urbano e as estratégias de gestão do risco de inundações.

Entretanto, este estudo está limitado à estimativa de danos diretos tangíveis e não considera os impactos indiretos das inundações. Não foram consideradas perdas relacionadas à interrupção de atividades econômicas, redução da mobilidade, perda de horas de trabalho e de renda, bem como efeitos sobre a saúde que afetam a capacidade laboral. Tais impactos podem aumentar significativamente o custo total das inundações em áreas urbanas. Pesquisas futuras devem buscar incorporar essas dimensões indiretas e intangíveis, potencialmente por meio da integração de dados

econômicos, de mobilidade e de saúde pública, a fim de fornecer uma avaliação mais abrangente do risco de inundação e de suas consequências socioeconômicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo nº 446029/2023-8) e da Universidade Federal de Itajubá pela concessão da bolsa de Iniciação Científica 2025/2026.

REFERÊNCIAS

- BENSO, M. R.; DE MACEDO, M. B.; LOPES, A. V.; FLORIANO, A.; VASCONCELOS, B. C. S. D. C.; COSTA, M. E. L.; FAVA, M. C. (2024). “Efeito da resolução de modelos digitais de elevação na acurácia de modelagem hidráulica em áreas urbanas” in *Anais do XV Encontro Nacional de Águas Urbanas*, Recife – PE, 2024.
- BHUSAL, A.; KALRA, A.; SHIN, S. (2023). “Resilience effect of decentralized detention system to extreme flooding events”. *Journal of Hydroinformatics* 25(3), pp. 971–988.
- BORBA, M. L.; WARNER, J. F.; PORTO, M. F. A. (2016). “Urban stormwater flood management in the Cordeiro watershed, São Paulo, Brazil: does the interaction between socio-political and technical aspects create an opportunity to attain community resilience?”. *Journal of Flood Risk Management* 9(3), pp. 234–242.
- DER SARKISSIAN, R.; AL SAYAH, M. J.; ABDALLAH, C.; ZANINETTI, J. M.; NEDJAI, R. (2022). “Land use planning to reduce flood risk: opportunities, challenges and uncertainties in developing countries”. *Sensors* 22(18), 6957.
- HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. (2015). “Economic impacts of natural disasters in megacities: The case of floods in São Paulo, Brazil”. *Habitat International* 45, pp. 106–113.
- HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R. J.; CORFEE-MORLOT, J. (2013). “Future flood losses in major coastal cities”. *Nature Climate Change* 3, pp. 802–806.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2022). *Municípios*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2020). *Normais climatológicas do Brasil*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais#>
- JONGMAN, B.; KREIBICH, H.; APEL, H.; BARREDO, J. I.; AERTS, J. C. J. H. (2012). “Comparing flood damage models: Towards a European approach”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, pp. 3733–3742.
- KREIBICH, H. et al. (2014). “Costing natural hazards”. *Nature Climate Change* 4, pp. 303–306.

- MACHADO, M. L. et al. (2005). “Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia”. *Revista de Gestão de Água da América Latina* 2(1), pp. 35–52.
- MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. H. (2010). “Assessment of economic flood damage”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, pp. 1697–1724.
- PDAU-RGMV (2021). *Plano Diretor de Águas Urbanas da Região Metropolitana da Grande Vitória*. Vitória, 2021.
- TELLMAN, B. et al. (2021). “Satellite imaging reveals increased human exposure to floods globally”. *Nature* 596, pp. 80–86.
- UN-HABITAT (2020). *World Cities Report 2020: The value of sustainable urbanization*. United Nations.
- VASHIST, K.; SINGH, K. K. (2024). “Flood Inundation Modeling: A Brief Review” in *Sustainable Management of Land, Water and Pollution of Built-up Area*, pp. 87–97.
- WINSEMIUS, H. C. et al. (2016). “Global drivers of future river flood risk”. *Nature Climate Change* 6, pp. 381–385.