

CONTABILIZANDO PREJUÍZOS CAUSADOS POR INUNDAÇÕES RÁPIDAS EM PEQUENAS BACIAS URBANAS

Bruno, L. S.¹; Oliveira, P. T. S.¹; Ponton, A. F. H.¹; Rodrigues, D. B. B.¹

¹PPGTA - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Av. Costa e Silva, s/n, Campo Grande, MS.

Abstract: To develop more effective solutions to mitigate flash flood-related issues in urban areas, it is essential to understand not only the natural dynamics but also the economic impact potential associated with flood events. Based on this premise, we investigate potential damage scenarios caused by flash floods using damage curves (direct losses and damage factors) versus water level. Additionally, we propose a methodology to estimate the potential value of buildings in Brazil, facilitating the application of damage factor versus water level curves. A case study was conducted in a small urban watershed located in Campo Grande, MS, where hydrological and hydraulic models (HEC-HMS and HEC-RAS) were calibrated and validated, achieving NSE values of 0.92 and 0.87, respectively, for validation. Our results indicate that the damage potential in the basin increases exponentially with the return period (RP), reaching USD 479,000 in direct losses for a 100-year RP event. The existing flood protection measures reduce peak flow by 12% for a 5-year RP storm event, which is insufficient to prevent channel overtopping.

Resumo: Para que seja possível desenvolver soluções mais efetivas para mitigar os problemas relacionados as inundações-relâmpago em áreas urbanas, faz-se necessário conhecer não apenas as dinâmicas naturais, mas também o potencial econômico que os eventos de cheia podem causar. Com base no exposto, investigamos cenários de danos potenciais causados por eventos de inundações-relâmpago, com base em curvas de prejuízo (valores diretos e fator de dano) *versus* cota, além de propor uma metodologia para estimar o valor potencial de edificações no Brasil, facilitando a adoção de curvas baseadas em fator de dano *versus* cota. Para isso, exploramos um estudo de caso de uma pequena bacia hidrográfica urbana, em Campo Grande, MS, no qual calibraramos e validamos os modelos hidrológico e hidráulico HEC-HMS e RAS (NSE de 0,92 e 0,87, para a validação, respectivamente). Nossos resultados indicam que o potencial de dano na bacia cresce exponencialmente com o aumento do TR, atingindo US\$ 479 mil em danos diretos, para um evento de TR=100 anos. As medidas de proteção existentes reduzem o pico de vazão para uma chuva de TR=5 anos em 12%, o que se mostra insuficiente para evitar o transbordamento do canal.

Palavras-Chave – Inundações-relâmpago, Áreas Urbanas, Prejuízos

1. INTRODUÇÃO

Em regiões habitadas e propensas a inundações, a adoção de medidas para mitigar os efeitos das cheias é fundamental para não afetar o desenvolvimento econômico e o bem-estar social. Tais medidas podem ser estruturais, como barreiras e diques, ou não estruturais, como leis e diretrizes de uso e ocupação do solo (Mondal et al., 2021). Adicionalmente, estudos citam o papel de medidas complementares, como sistemas de alerta (Shih et al., 2019), soluções baseadas na natureza (Hankin et al., 2021) e construções de baixo impacto (Gonçalves et al., 2018).

A implementação dessas medidas requer estudos detalhados de mapeamento de áreas vulneráveis e custos. Contudo, Merz et al. (2010) apontam que as avaliações de danos econômicos potenciais são frequentemente negligenciadas, embora sejam uma parte chave da análise custobenefício. Para avaliar os danos em termos econômicos, utilizam-se as curvas de profundidade x dano, que relacionam a lâmina d'água incidente com o prejuízo causado. No Brasil, ainda são poucos os estudos que aplicam ou desenvolvem tais funções. Destaca-se o trabalho de Nascimento et al. (2007), que desenvolveu curvas de danos para cheias em Minas Gerais, posteriormente utilizadas como referência em um estudo de escala global (Huizinga et al., 2017).

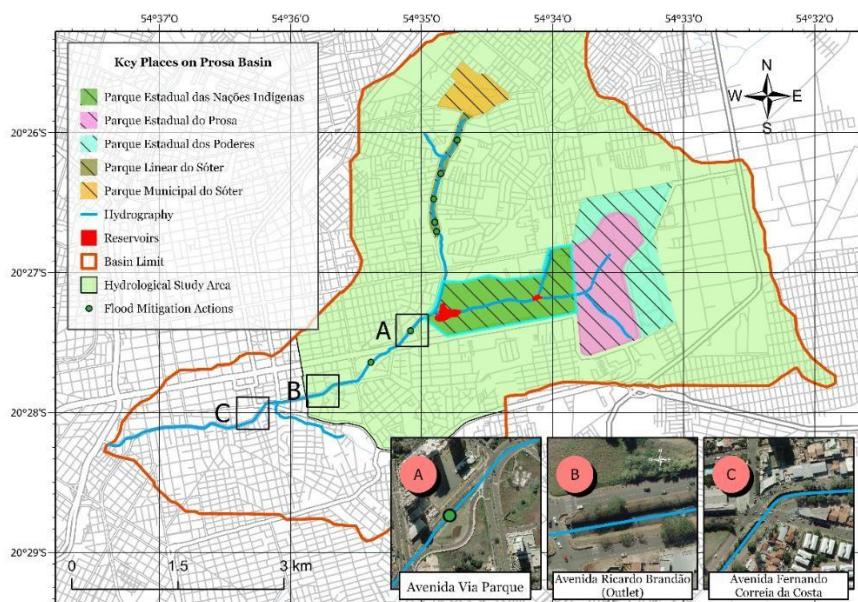
Tomando como exemplo o estudo de caso sobre inundações-relâmpago na bacia hidrográfica do córrego Prosa, em Campo Grande (MS), este estudo determinou os valores de danos potenciais diretos para cenários de inundação modelados (simulações para tempos de retorno de 5, 10, 50 e 100 anos), com uso de curvas de prejuízo versus cota. Como algumas curvas na literatura apresentam uma abordagem com uso de fator de dano, também propomos a utilização de metodologias descritas em norma, para avaliar o valor de alguns tipos de edificação (estrutural), permitindo assim utilizar esta tipologia de curva.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do córrego Prosa (figura 1) é uma pequena bacia urbana com área de 31,97 km², localizada no perímetro urbano de Campo Grande, MS. A bacia possui uma paisagem que varia de densamente urbanizada a matas nativas, e em 2016, 51% de sua área era impermeabilizada (Mattos, 2021). O clima é tropical com estação seca (Köppen-Geiger), com verões quentes e úmidos e invernos amenos e secos (Peel et al., 2007). Existem ao menos três locais com transbordamentos recorrentes dos canais, sendo os mais críticos na Via Parque (figura 1, A) e na Av. Ricardo Brandão (figura 1, B e C).

Figura 1 - Bacia do Prosa, com destaque para locais de interesse. Dos autores.



2.2 Modelos Hidrodinâmicos

Para criar os cenários de inundação, utilizamos simulações hidrológico-hidráulicas realizadas previamente pelos autores com os pacotes HEC-HMS e HEC-RAS. Os modelos apresentaram bom ajuste, com valores de NSE na validação de 0,92 para o HEC-HMS e 0,85 para o HEC-RAS. Para a caracterização da área e classificação dos imóveis nas áreas de risco, utilizamos ortofotos municipais de alta resolução, imagens do Google Earth, além de fotografias *in loco*. Adicionalmente, adicionamos cenários comparativos para verificar o impacto que medidas mitigatórias implantadas na bacia podem causar.

Ao todo, temos 8 cenários de simulação, baseados em duas configurações de terreno da bacia: “Prosa 2016” (com assoreamento total das lagoas de contenção, identificadores – IDs - 1 e 2) e “Prosa 2019” (com barragem e lagoas desassoreadas, IDs 3 e 4), além de 4 chuvas de projeto com tempos de retorno de 5, 10, 50 e 100 anos (IDs 5, 6, 7 e 8, respectivamente).

2.3 Simulação do Dano Econômico

As edificações existentes nas vias de margens dos canais foram mapeadas como elementos em risco. As construções foram então homogeneizadas em classes adaptando a metodologia dos projetos-padrão da norma NBR 12721 (Tabela 1) para casar-se com as descrições das curvas de dano existentes na literatura. Com os imóveis mapeados e caracterizados, utilizamos então a sugestão de, recorrendo a adoção do custo unitário básico (CUB), ajustada por fatores de depreciação e área equivalente, para enfim estimar o valor estrutural das unidades.

Figura 2 - Resumo da classificação das edificações utilizadas no estudo. Dos autores.

STRUCTURAL CLASSIFICATION	STRUCTURAL TYPE		INTERNAL CONT. TYPE/EVALUATION			INTERNAL CONTENT CLASSIFICATION
	RESIDENTIAL	COMMERCIAL	R1A	R16	HIGH STANDART	
		R1M	R8	R8		RESIDENTIAL
		R1B	PP4	R1M	MEDIUM STANDART	
				R1B	LOW STANDART	
			C1M	PP4		
				C1M	FOOD SERVICES	COMMERCIAL
				C1M	GENERAL SERVICES	
			GI	C1M	SCHOOLS	
				C1M	INSTITUITIONAL	

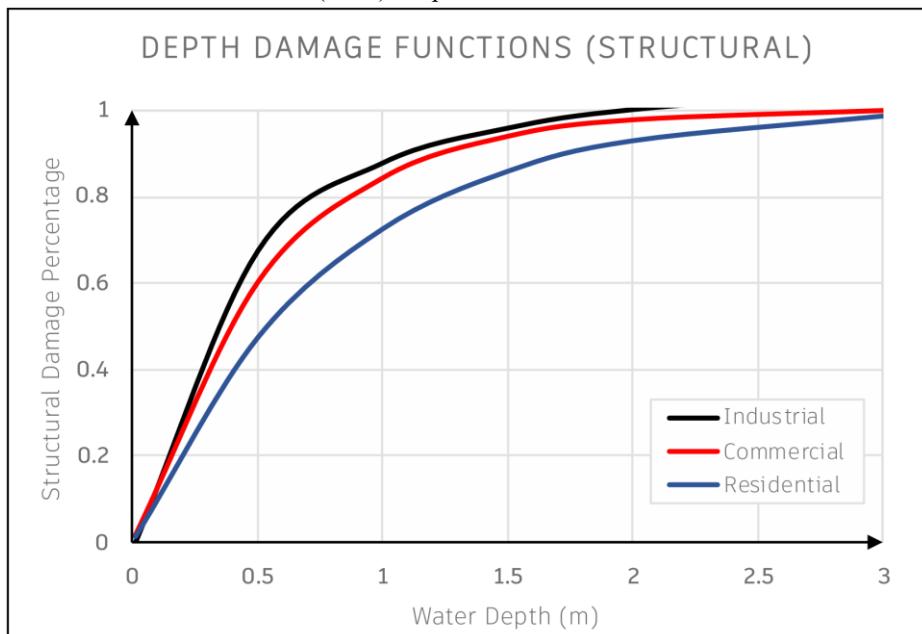
O CUB representa o valor por unidade de área de um projeto-padrão da NBR 12171, e é mensalmente atualizado para todos os estados do Brasil. Como as curvas de dano possuem correspondências de prejuízo em dólar americano, aplicamos o cambio relativo à data do estudo. Já o fator de depreciação, tenta corrigir as distorções de precificação devido a passagem do tempo, que deteriora a qualidade dos materiais construtivos e do interior. Além destes, temos o fator de ajuste de área, que corrige a superestimação dos valores devido a contabilidade de área pelo CUB, minimizando o efeito de varandas, marquises e mezaninos no valor final. Dessa forma, temos a equação (1) para estimar os prejuízos as estruturas:

$$P_{est} = (CUB \cdot A_t \cdot f_e) \cdot f_d \cdot F(h) \quad (1)$$

Onde P_{est} é o dano estrutural, CUB é o custo unitário básico, A_t é a área total, f_e é o fator de ajuste de área, f_d é um fator de depreciação e $F(h)$ é o resultado da função de dano relativo.

As curvas de profundidade x dano foram extraídas de Huizinga et al. (2017) para danos estruturais e de Nascimento et al. (2007) para danos ao conteúdo. Estas últimas curvas foram obtidas a partir de um evento de inundação-relâmpago ocorrido em janeiro de 2000, logo, os valores monetários precisaram ser atualizados. Considerando que a maior parte do conteúdo interno das edificações é composta por bens de consumo em geral (eletrodomésticos, móveis, alimentos, eletrônicos, itens de decoração), utilizou-se o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) como fator de correção. De acordo com o Banco Central do Brasil, a inflação acumulada de janeiro de 2000 até maio de 2021 foi de 261,3%, correspondendo a um fator de multiplicação de 3,613. Após a atualização dos valores pela inflação, também foi realizada a conversão cambial para expressar os valores em dólares.

Figura 3 – A: Curvas que relacionam o nível da água com a fração total da edificação afetada (de 0 a 1). B: Curvas para o conteúdo interno, em dólares. Adaptado de Huizinga; De Moel e Szewczyk (2017) e Nascimento et al. (2007), respectivamente.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2 Análise das Medidas Estruturais de Controle de Cheias

A modelagem de um evento com TR de 5 anos, comparando o cenário com obras (ID 5) e sem obras (ID 7), revelou que as intervenções reduziram o pico do hidrograma em 15,11% na região da Via Parque. As barragens no córrego Sóter também contribuíram para um atraso no pico de 12 minutos. Verificou-se que uma chuva com TR=5 anos sem as barragens é suficiente para causar a mesma profundidade de um evento com TR=100 anos na configuração atual.

A jusante (Av. Ricardo Brandão), o aumento do escoamento superficial induz inundações em todos os cenários. Uma barragem extra construída no final de 2016 contribuiu para uma redução do pico do hidrograma na saída do estudo de 5,82% e um atraso de 3 minutos. No geral, o conjunto de medidas de mitigação promoveu uma atenuação da vazão de 12,42% em comparação ao cenário sem obras. Observa-se também que a população local demonstra conhecimento empírico sobre as causas das inundações, adotando características construtivas que reduzem o risco de submersão, como fundações elevadas.

3.3 Avaliação do Dano Econômico

Considerando a extensão e a profundidade das inundações modeladas, estimamos os danos aos edifícios. Para a geometria atual, chuvas com TR de 5 anos podem gerar perdas de US\$ 15,76 mil. Com um TR=50 anos, as perdas aumentam para mais de US\$ 382 mil, e com uma chuva catastrófica de TR=100 anos, os danos materiais ultrapassam US\$ 479 mil. Os altos danos ao conteúdo dos edifícios podem ser explicados pelos tipos de estruturas vulneráveis, que incluem concessionárias de veículos, escritórios e depósitos.

A presença de medidas de proteção desempenha um papel fundamental. A simulação do dano para o evento de 5 anos sem as medidas de proteção (ID 7) resulta em um valor estimado de US\$ 21.712,94, aproximadamente 27,4% maior do que com a presença das barragens e reservatórios. O custo das obras na bacia do Prosa, corrigido e convertido, foi de US\$ 9.589.885,43 (apenas recursos federais). Com base nesse valor e na diferença de dano, observa-se que foram gastos aproximadamente US\$ 349,99 mil para cada 1% de redução de dano na área de estudo. Isso evidencia a necessidade deste tipo de estudo para avaliar a relação custo-benefício das medidas de proteção.

4. CONCLUSOES

Neste estudo, avaliamos as inundações na bacia do Prosa em relação às interações com a sociedade e sob aspectos econômicos. No âmbito social, foi discutido o histórico dos eventos e as medidas adotadas ao longo do tempo. As seguintes conclusões podem ser destacadas:

- a) A bacia do Prosa consolidou-se como uma área propensa a inundações, e a implementação sucessiva de medidas convencionais mostrou-se ineficiente para lidar com o problema.
- b) Dentre as medidas adotadas, as barragens de contenção foram as que apresentaram mais resultados, com uma redução de aproximadamente 15% para um cenário de chuva com TR = 5 anos.

- c) Medidas de proteção individuais desempenham um papel no aumento da resiliência da área a eventos de inundações.
- d) Eventos de cheias-relâmpago no Prosa podem gerar perdas de até US\$ 479 mil (TR = 100 anos), e a presença de medidas de contenção reduziu em 27,4% o dano potencial modelado para um TR de 5 anos.
- e) A segurança contra inundações a longo prazo nesta bacia dependerá de tecnologias específicas e deve ser discutida com a população para proporcionar um ambiente ótimo onde as medidas possam ser mais eficazes.

5. REFERÊNCIAS

- AWAD, M. M. C. (2017). *Valores de edificações de imóveis urbanos 2017*. São Paulo.
- CAROLINA, A.; BUARQUE, S.; BHATTACHARYA-MIS, N.; CLARA, M.; AUGUSTO, F.; SOUZA, A. De; ... BHATTACHARYA-MIS, N. (2020). "Using historical source data to understand urban flood risk : a socio-hydrological modelling application at Gregório Creek , Brazil". *Hydrological Sciences Journal* 65(7), pp. 1075–1083.
- CHEN, J.; WANG, L.; LI, Y. (2020). "Natural resources, urbanization and regional innovation capabilities". *Resources Policy* 66, 101643.
- DI BALDASSARRE, G.; VIGLIONE, A.; CARR, G.; KUIL, L.; SALINAS, J. L.; BLÖSCHL, G. (2013). "Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions". *Hydrology and Earth System Sciences* 17(8), pp. 3295–3303.
- FROTA, R. L.; ASSIS, F. De; FILHO, S.; BARROS, L. S.; MARIA, S.; SILVA, O.; ... SILVA, O. (2021). "“ Network ” socio-hydrology : a case study of causal factors that shape the Jaguaribe River Basin". *Hydrological Sciences Journal* 66(6), pp. 935–950.
- GONCALVES, M. L. R.; ZISCHG, J.; RAU, S.; SITZMANN, M.; RAUCH, W. (2018). "Modeling the Effects of Introducing Low Impact Development in a Tropical City : A Case Study from". *Sustainability* 10(3), 728.
- GRANDE, C. (2015). *Plano Diretor de Drenagem Urbana de Campo Grande, MS*.
- HANKIN, B.; PAGE, T.; MCSHANE, G.; CHAPPELL, N.; SPRAY, C.; BLACK, A.; COMINS, L. (2021). "How can we plan resilient systems of nature-based mitigation measures in larger catchments for flood risk reduction now and in the future?". *Water Security* 13, 100091.
- HUIZINGA, J.; DE MOEL, H.; SZEWCZYK, W. (2017). *Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines*. Joint Research Centre (JRC).
- MARTÍNEZ-GOMARIZ, E.; FORERO-ORTIZ, E.; GUERRERO-HIDALGA, M.; CASTÁN, S.; GÓMEZ, M. (2020). "Flood depth-damage curves for Spanish urban areas". *Sustainability (Switzerland)* 12(7).
- MATTOS, T. S. (2021). *Improving urban flood resilience*. (UFMS).
- MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. (2010). "Assessment of Economic Flood Damage". *Natural Hazards and Earth System Science* 10(8), pp. 1697–1724.
- MOKHTARI, F.; SOLTANI, S.; MOUSAVI, S. A. (2017). "Assessment of Flood Damage on Humans, Infrastructure, and Agriculture in the Ghamsar Watershed Using HEC-FIA Software". *Natural Hazards Review* 18(3), 04017006.
- MONDAL, M. S. H.; MURAYAMA, T.; NISHIKIZAWA, S. (2021). "Examining the determinants of flood risk mitigation measures at the household level in Bangladesh". *International Journal of Disaster Risk Reduction* 64, 102492.
- NAGEM, F. R. M. (2008). *Avaliação Econômica Dos Prejuízos Causados Pelas Cheias Urbanas*.
- NASCIMENTO, N.; MACHADO, L. M.; BAPTISTA, M.; DE PAULA, A. (2007). "The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context". *Urban Water Journal* 4(3),