

ESTIMATIVA DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO HAND E O MUSKINGUM-CUNGE

Franz C. Gonçalves¹ ; Altair Rosa²; Maria C. Fava³ & Marina B. Macedo⁴ Leonardo M. C. Ribeiro⁵

RESUMO: As inundações abruptas contribuem como um principal vetor de riscos hidrológicos em bacias hidrográficas urbanas, tendo a sua ocorrência intensificada por conta de eventos extremos, mau uso na ocupação da solo e grande impermeabilização das superfícies. Para analisar esses fenômenos, existe a necessidade de integração de modelos hidrológicos, hidráulicos e topográficos que possam representar geração, propagação e distribuição espacial das cheias principalmente em ambientes urbanos. Esse estudo apresenta uma abordagem computacional desenvolvida em Python para integração da geração do escoamento, sua propagação no canal e distribuição espacial do volume extravasado. A geração do escoamento é feita pelo método SCS-CN e hidrograma unitário. A propagação da onda de cheia é calculada através do método de Muskingum-Cunge automatizado com algoritmos genéticos para o cálculo das seções do canal. Para análise espacial, foi utilizado o modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), permitindo uma estimativa de inundação ao longo do canal e das suas áreas próximas. A metodologia combina dados hidrometeorológicos, parâmetros geométricos do canal e informações topográficas para produzir estimativas hidrológicas e espaciais. A abordagem destaca-se por permitir uma avaliação espacial simplificada, para bacias com poucos dados ou séries parciais, onde a calibração de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos mais complexos não é possível. As simulações realizadas abrem a possibilidade de avaliação de padrões espaciais que podem sofrer inundações.

Palavras-Chave: Inundações urbanas, Inundações Rápidas, Modelagem hidrológica

ABSTRACT: Flash floods contribute as a major driver of hydrological risks in urban watersheds, with their occurrence intensified due to extreme events, improper land use, and extensive surface impermeabilization. To analyze these phenomena, it is necessary to integrate hydrological, hydraulic, and topographic models capable of representing the generation, propagation, and spatial distribution of floods, especially in urban environments. This study presents a computational approach developed in Python to integrate runoff generation, its propagation along the channel, and the spatial distribution of the overflowed volume. Runoff generation is performed using the SCS-CN method and unit hydrograph. The propagation of the flood wave is calculated using the Muskingum-Cunge method, automated with genetic algorithms for channel cross-section estimation. For spatial analysis, the HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) model was used, allowing the estimation of flooding along the channel and its surrounding areas. The methodology combines hydrometeorological data, channel geometric parameters, and topographic information to produce hydrological and spatial estimates. The approach stands out for enabling a simplified spatial assessment in basins with limited data or partial time series, where calibration of more complex

1) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (34) 98426-7447, fcg120@hotmail.com

2) Afiliação: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, (41) 99967-1218, altair.rosa@pucpr.br

3) Afiliação: Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, (16) 99750-9695, mcfava@ufscar.br

4) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (34) 99801-0110, marinamacedo@unifei.edu.br

5) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (71) 99124-2793, leo5991@hotmail.com

hydrological and hydrodynamic models is not feasible. The simulations performed open the possibility of evaluating spatial patterns that may be subject to flooding.

Key-words: Urban flooding; Flash Floods; Hydrological modeling.

INTRODUÇÃO

As inundações são classificadas como desastres naturais com constância elevada e apresentam grande frequência em áreas urbanas, onde causam enormes prejuízos econômicos e sociais, danos a infraestrutura dos locais atingidos. A recorrência desses eventos vem se intensificando nos últimos decênios devido ao aumento da impermeabilização do solo com a urbanização e ao aumento dos eventos extremos que estão associados às mudanças climáticas (IPCC, 2021; HIRABAYASHI et al., 2013). Em bacias de pequeno e médio porte, esses processos causam respostas hidrológicas rápidas em um evento de chuva intensa, causando assim o aumento das probabilidades de inundação. No entanto, modelos complexos carecem de calibração com dados observados, muitas vezes ausentes. No mais, a complexidade dos modelos pode ser uma limitação para sua aplicação prática por parte dos gestores para ações de gestão do risco de inundações. Assim, as cidades podem se beneficiar do desenvolvimento de abordagens mais simplificadas, mas que permitem uma representação da ocorrência dos eventos no tempo e espaço.

O SCS-CN é um método hidrológico que é amplamente utilizado para estimar o escoamento superficial que é gerada pela precipitação e com as características do solo e uso do terreno (USDA, 1986; MISHRA; SINGH, 2003), enquanto o método de Muskingum-Cunge é aplicado para a propagação da onda de cheia ao longo do corpo hídrico onde utiliza parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento (CUNGE, 1969; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Já a análise espacial da bacia onde se busca áreas com alto potencial de inundação, o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), utiliza a topografia da região para identificar regiões com alta suscetibilidade de inundação (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011). Este trabalho consiste em unir essas abordagens em um ambiente computacional para permitir estimar de uma forma conjunta a geração do escoamento, propagação da onda de cheia e a distribuição espacial das áreas susceptíveis à inundações das bacias hidrográficas.

CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

O rio Belém possui sua bacia hidrográfica localizada em Curitiba, Paraná, sendo um importante afluente do rio Iguaçu. Sua nascente está no bairro Cachoeira, ao norte do município, seguindo em direção sul até desaguar no bairro Boqueirão (CURITIBA, 2018; FENDRICH, 2002). O rio tem cerca de 17 km de extensão e sua bacia ocupa aproximadamente 87,80 km², o que corresponde a cerca de

20% da área de Curitiba (CURITIBA, 2018; IPARDES, 2012). A bacia é relevante para a hidrologia urbana por atravessar regiões densamente povoadas e áreas centrais. Segundo Bollmann (2008), abriga grande parte da população e espaços importantes da cultura e administração, incluindo pontos turísticos como o Passeio Público, Jardim Botânico e Parque São Lourenço (BOLLMANN, 2008; CURITIBA, 2018).

A bacia conta com afluentes como os rios Juvevê, Ivo, Água Verde, Pilarzinho e Pinheirinho, que contribuem para o escoamento superficial (CURITIBA, 2018). Devido à intensa urbanização, ocorreram alterações como canalização, impermeabilização do solo e ocupação das margens, modificando o regime hidrológico e aumentando o risco de enchentes em períodos de chuvas intensas (BOLLMANN, 2008; IPARDES, 2012).

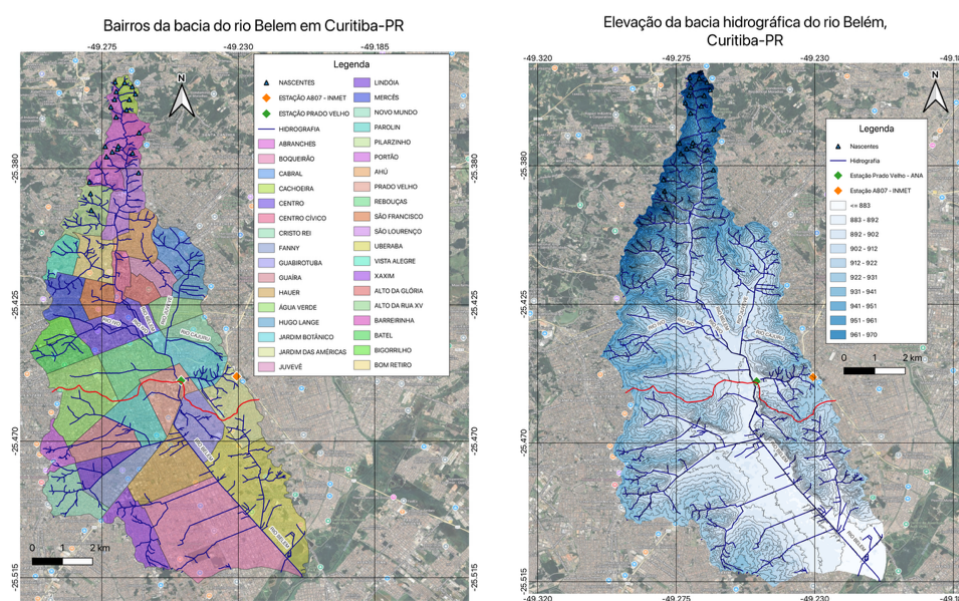


Figura 1 – Caracterização da bacia do rio Belém

MATERIAIS E MÉTODOS

Estrutura geral da modelagem

A metodologia foi desenvolvida para este estudo faz a integração entre diferentes componentes de métodos hidrológicos, hidráulicos e geoespacial simplificados, que foram implementados em ambiente *Python* de programação computacional. A estrutura do modelo do código pode ser dividida em quatro etapas:

1. Processamento de dados hidrológicos e topográficos
2. Modelagem chuva-vazão utilizando o método SCS-CN
3. Propagação de cheias ao longo do canal através o método do Muskingum-Cunge
4. Identificação das áreas inundáveis com base no índice HAND e parâmetros hidráulicos do canal

Com essa abordagem, é possível fazer a integração e representar de uma forma visual e simplificada os principais processos hidrológicos que podem formar cheias em bacias urbanas.

Dados hidrológicos e modelos do terreno

Foram utilizados dados de estações pluviométricas e uma estação fluviométrica localizadas na bacia do rio Belém fornecidas pela ANA, INMET, CEMADEM e IAT. As séries acumuladas possuem registros de precipitação acumulada onde o intervalo de tempo das medições é de uma hora e para vazão e cota, o intervalo de tempo é de um dia. Para a utilização, os dados hidrológicos passaram por um pré-processamento onde é feito a remoção de dados inconsistentes, preenchimento de lacunas em séries temporais, conversão de unidades e padronização temporal. Para o modelo de terreno de elevação, foram utilizados dados levantados através do LiDAR pela Prefeitura de Curitiba-PR

Modelagem chuva-vazão pelo método SCS-CN

Para termos o escoamento superficial provocado por chuvas na localidade, foi utilizado o método do *SCS-CN* (USDA, 1986; TUCCI, 2005; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). O armazenamento do solo pode ser definido por (1). As perdas iniciais do sistema hidrológico são estimadas por (2). E por fim, as precipitações efetivas acumuladas é calculada por (3):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3)$$

Onde: S é a capacidade de armazenamento em mm e CN é Curve o parâmetro adimensional que depende do tipo de solo, uso do solo e condição de umidade antecedente; P é a precipitação acumulada e P_e é a precipitação efetiva.

A resposta temporal do escoamento da bacia é representada por um hidrograma unitário triangular, um método amplamente utilizado para fazer a estimativa entre a variação temporal da vazão em função da precipitação efetiva que cai na determinada bacia, depois sendo feita a convolução para a determinação assim do hidrograma do local estudado (VILLELA; MATTOS, 1975).

O primeiro parâmetro necessário para a construção do hidrograma é o tempo de concentração da bacia (TUCCI, 2005). Esse parâmetro é estimado por (4). Posteriormente, o tempo de pico (t_p) do hidrograma foi determinado por (5). Já o tempo de base (t_b) do hidrograma foi calculado por (6). Por fim, a vazão de pico do hidrograma unitário é calculado por (7).

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (4)$$

$$t_p = 0,6t_c \quad (5)$$

$$t_b = t_p + 1,67t_p \quad (6)$$

$$Q_p = \frac{0,208A}{t_p} \quad (7)$$

Onde: L é o comprimento do canal estudado em km, desnível H em metros e A, corresponde a área da bacia em km².

Propagação da onda de cheia pelo método de Muskingum-Cunge

A onda de cheia propagada ao longo do canal foi simulada pelo método de Muskingum-Cunge, que representa o armazenamento e a atenuação da onda de cheia em canais naturais, adaptado do modelo clássico de Muskingum que se baseia em uma solução aproximada da equação de difusão em canais abertos com escoamento (CUNGE, 1969). Fazendo a combinação da equação da continuidade com parâmetros hidráulicos do canal, consegue-se assim fazer a representação do armazenamento e atenuação da onda de cheia ao longo da sua propagação no rio. O método pode ser descrito por (8):

$$Q_j^{t+1} = C_1 I_j^t + C_2 I_j^{t+1} + C_3 Q_j^t \quad (8)$$

Onde: I é a vazão de entrada, Q a vazão de saída e C1, C2 e C3 São coeficientes que dependem da característica do canal e do intervalo temporal (t) escolhido para a simulação. A determinação do número de seções j foram utilizados algoritmos genéticos automatizando assim a decisão da quantidade de seções, maximizando o método.

Extração da rede de drenagem e do índice

A bacia topográfica foi caracterizada através do método HAND, que representa a altura relativa do terreno em relação ao canal de drenagem próximo (RENNÓ et al., 2008). O índice é descrito através de (9). Valores relativamente baixos de HAND informam que aquela área é bem próxima ao nível do canal, apresentando assim uma suscetibilidade grande de inundação.

$$HAND = z_{\text{terreno}} + z_{\text{drenagem}} \quad (9)$$

Onde: z_{terreno} corresponde à altura que o pixel de terreno se encontra e z_{drenagem} é a altura do pixel que se encontra dentro da rede de drenagem.

O processamento da imagem raster da localidade foi feita em conjunto tanto no ambiente em um software de geoprocessamento e em *Python* onde o uso das bibliotecas *rasterio*, *GeoPandas* e *shapely*. Após a retirada dos dados iniciais, foram usadas técnicas de processamento espacial para a definição e identificação do canal principal.

Modelagem hidráulica das seções do canal

O método de Muskingum-Cunge gera vazões de cheia ao longo das seções do corpo hídrico, com isso, é gerado parâmetros hidráulicos estimados para que se consiga avaliar a capacidade de escoamento. Para cada trecho foi calculada a vazão máxima transportada através da equação de

Manning (CHOW, 1959; TUCCI, 2005). Os dados para o cálculo foram retirados da modelagem do terreno, através do *Python*. A equação utilizada para a determinação da vazão máxima é descrita em (10):

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (10)$$

Onde: n é o coeficiente de rugosidade, S a declividade do canal, A a área molhada e R o raio hidráulico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resposta hidrológica da bacia à chuva observada

O evento pluviométrico analisado apresenta uma elevada concentração temporal, com o seu núcleo principal ocorrendo entre os minutos 300 e 360. Nesse intervalo, registou-se um acumulado de 36,2 mm, o que representa aproximadamente 83% da precipitação total do evento (43,4 mm), caracterizando-o como um fenômeno de alta intensidade e curta duração, representado na Figura 2.

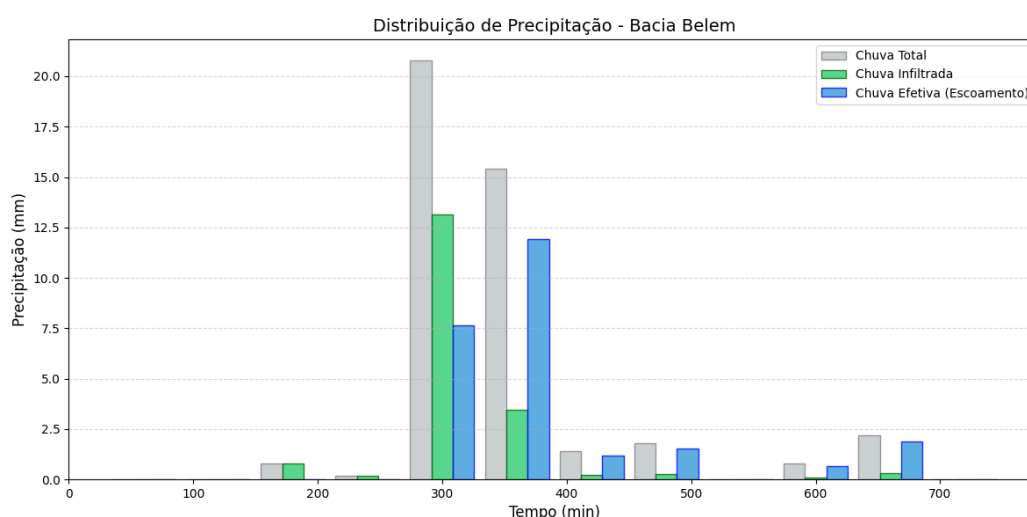


Figura 2 – Distribuição de precipitação da bacia

Previamente a este pico, no intervalo entre os 60 e 240 minutos, o volume precipitado foi inferior a 1,0 mm. Este montante foi insuficiente para gerar uma resposta hidrológica significativa, sendo integralmente retido pelas perdas iniciais da bacia — comportamento evidenciado pelas vazões nulas no hidrograma (Figura 3), um padrão expectável mesmo em bacias com elevado índice de urbanização. O pico de precipitação ocorre imediatamente após o tempo de concentração da bacia (estimado em 230,92 minutos). Esta sincronia temporal favorece a sobreposição do escoamento superficial de diferentes setores da bacia no exultório, resultando num pico de cheia mais severo. Como destaca Tucci (2005), este alinhamento entre a intensidade máxima da chuva e o tempo de resposta da bacia é o principal fator determinante da magnitude de um evento de cheia.

Análise do hidrograma de cheia

O hidrograma representado na Figura 3 mostra uma grande acentuação da vazão, a partir de 300 minutos, aonde chega no pico máximo em aproximadamente 65 m³/s em aproximadamente 450 minutos.

Quando fazemos a diferença entre o centro do evento da chuva que é aproximadamente 330 min e o pico de vazão que é aproximadamente 450 minutos, temos um tempo de resposta de aproximadamente 120 minutos, que é um valor coerente com bacias urbanas de pequeno e médio porte. Ao observarmos junto com o tempo de concentração, vemos que a resposta da bacia ocorre em aproximadamente 50% do tempo de concentração demonstrando uma eficiência alta na geração do escoamento superficial.

Entre 300 e 450 minutos a vazão aumenta de valores próximos a zero para aproximadamente 65 m³/s. Em números, esse aumento representa uma variação média superior a 0,4 m³/s por minuto de crescimento, caracterizando assim uma resposta hidrológica rápida e altamente crítica. Após o pico temos uma recessão gradual chegando a valores próximos de zero entre 900 e 1000 minutos, sendo o tempo de recessão (550 min) menor que o tempo de subida (150min), mostrando um hidrograma assimétrico, típico de eventos de cheias em bacias urbanas

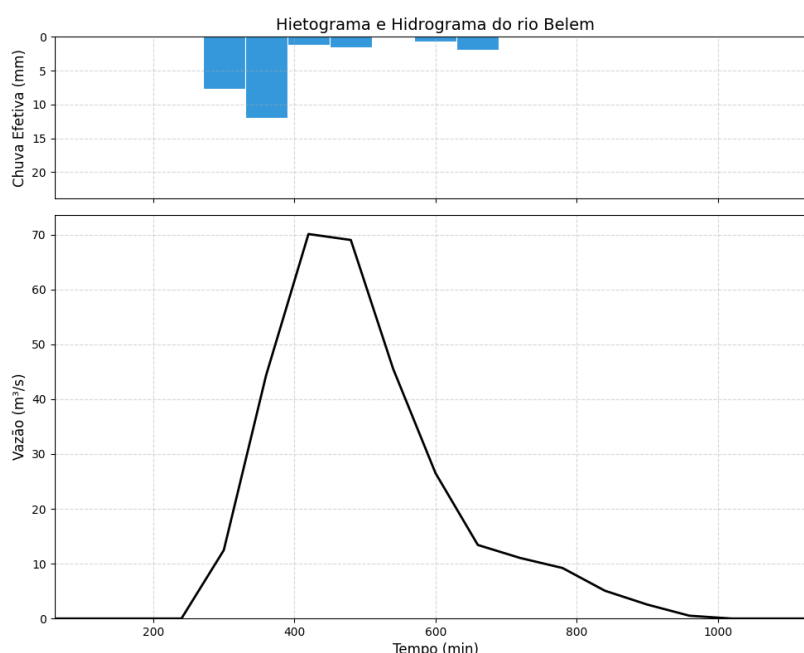


Figura 3 – Hidrograma do rio Belém

Propagação da onda de cheia pelo canal

A propagação da onda de cheia (Figura 4) nos evidencia uma pequena atenuação da onda de cheia ao longo do canal do rio. Nas seções iniciais o pico varia entre o valor de 67 m³/s, decaindo para 64 a 65 m³/s, demonstrando uma redução inferior a 5%. O baixo amortecimento mostra que o canal tem uma capacidade limitada para o armazenamento hidráulico, favorecendo assim quase na íntegra a transferência da onda de cheia, como mostra a Figura 3.

Ao trazermos em termos temporais, a defasagem dos picos para esse canal é bem pequena, em torno de 20 a 40 minutos entre a montante e a jusante, implicando uma velocidade acentuada da propagação da onda, se fazendo uma necessidade de alertas para região ainda mais acentuados. A leve suavização das curvas ao longo das seções, indica uma redistribuição temporal do escoamento, porém essa dissipação não é suficiente para reduzir os máximos de vazão. Assim a baixa atenuação (<5%) e a rápida propagação (<40 min) demonstra um sistema que tem uma alta transmissão de cheias, elevando o risco de impactos ao longo do canal (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

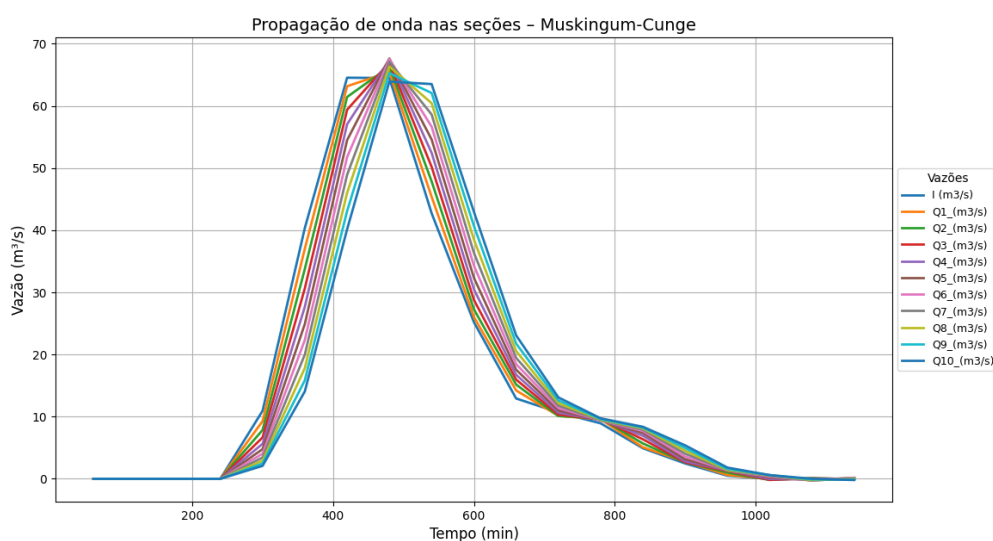


Figura 4 – Movimentação da onda de cheia provocada pela chuva no canal do rio Belém

Análise espacial das áreas com probabilidade de inundação

O mapa de possíveis áreas suscetíveis a inundação, tem uma distribuição com coerência aos resultados hidráulicos e hidrológicos calculados. A análise indica que os pontos classificados com as vazões elevadas (aproximadamente $65 \text{ m}^3/\text{s}$) ultrapassando o valor da calha. Vale ressaltar que os pontos mostrados no mapa da Figura 5 é uma estimativa, onde o cálculo leva em consideração as alturas da lâmina de água e a cota HAND do local. É possível identificar na Figura 5 toda a pixelização e a mancha de onde ocorreu a possível inundação.

Do ponto de vista quantitativo, o evento analisado demonstra que a bacia possui um comportamento altamente responsivo, com a transformação rápida de chuva em escoamento e consequentemente uma baixa capacidade de dissipação hidráulica. Com isso, é importante destacar que eventos de chuva concentrada nessa bacia, mesmo que possua um curto espaço de tempo é suficiente para gerar transtornos no local.

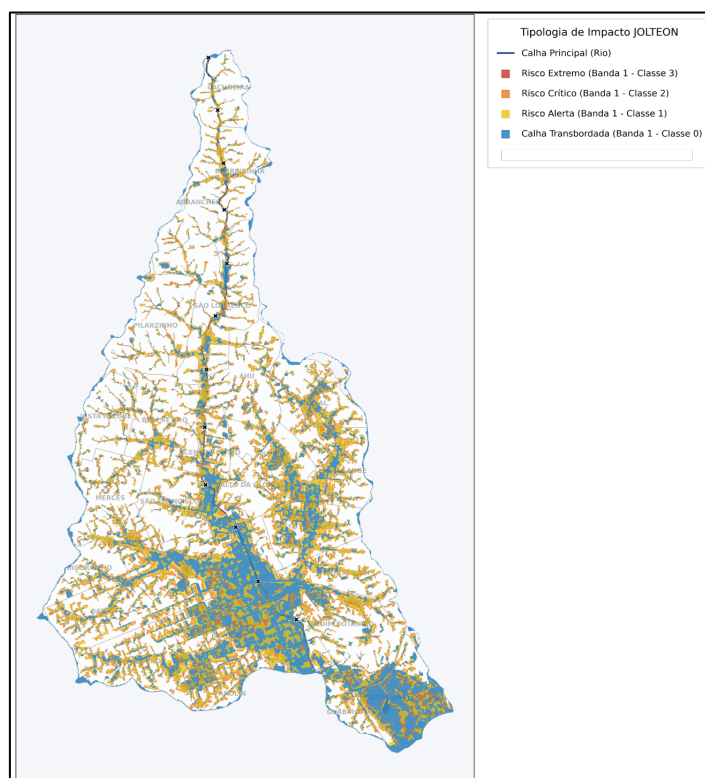


Figura 5 – Resultado da chuva na bacia do rio Belém

CONCLUSÃO

A bacia do rio Belém mostrou uma resposta hidrológica rápida e elevada sensibilidade a chuvas intensas. A concentração de aproximadamente de 83% da precipitação em 120 minutos, resultando em um pico de vazão próximo de $65\text{m}^3/\text{s}$ e o tempo de reposta reduzido de aproximadamente 120 minutos. A propagação de onda indicou uma baixa atenuação e uma transferência da onda, favorecendo assim a ocorrência de inundações no canal. Com o HAND, foi confirmada a suscetibilidade de uma área a ser inundada.

A integração da modelagem hidráulica, hidrológica e análise topográfica, mostrou eficiência em identificar áreas suscetíveis à inundação, colocando em evidência a vulnerabilidade da bacia a eventos extremos de curta duração.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio institucional fundamental ao desenvolvimento deste trabalho. Os autores agradecem o apoio dos seguintes projetos: CNPq 307637/2012-3 de Produtividade em Pesquisa e (5) CNPq/MCTI/FNDCT Nº 59/2022 – Benefícios da implementação de técnicas compensatórias para mitigar os problemas causados pelas mudanças climáticas, por meio da gestão dos aspectos qualitativos e quantitativos da drenagem urbana no Município de Curitiba – Paraná – Brasil.

REFERÊNCIAS

- BOLLMANN, H. A. (2008). “*Gestão de bacias hidrográficas urbanas: estudo da bacia do rio Belém em Curitiba*”. Curitiba: UFPR.
- CHOW, V. T. (1959). “*Open-Channel Hydraulics*”. New York: McGraw-Hill.
- CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W (1988). “*Applied hydrology*”. New York: McGraw-Hill.
- CUNGE, Jean A. (1969). “*On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)*”. Journal of Hydraulic Research, Delft, v. 7, n. 2, p. 205–230.
- HIRABAYASHI, Yukiko et al. (2013). “*Global flood risk under climate change*”. Nature Climate Change, London, v. 3, p. 816–821.
- CURITIBA. Prefeitura Municipal de Curitiba. (2018) “*Plano de drenagem urbana de Curitiba – Bacia do Rio Belém*.” Curitiba: Prefeitura de Curitiba. Disponível em: <https://mid.curitiba.pr.gov.br>. Acesso em: 9 mar. 2026.
- FENDRICH, R. (2002). “*Drenagem urbana e controle de enchentes em Curitiba*.” Curitiba: UFPR.
- GONÇALVES, F. C. et al. (2025). “*Método de Muskingum-Cunge integrado com algoritmos genéticos para onda de cheia em tempo real*”. XXVI SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. (2012) “*Caracterização das bacias hidrográficas urbanas de Curitiba*.” Curitiba: IPARDES.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021). “*Climate change 2021: the physical science basis*”. Cambridge: Cambridge University Press.
- MISHRA, Sharad K.; SINGH, Vijay P. (2003). “*Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*”. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- NOBRE, et al. (2011). “*Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model*”. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 404, n. 1–2, p. 13–29.
- RENNÓ et al. (2008) “*HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia*”. Remote Sensing of Environment, New York, v. 112, n. 9, p. 3469–3481.
- TUCCI, C. E. M. (2005). “*Hidrologia: ciência e aplicação*”. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (1986) “*Urban hydrology for small watersheds (TR-55)*”. Washington: USDA Natural Resources Conservation Service.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. (1975). “*Hidrologia aplicada*”. São Paulo: McGraw-Hill.