




Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica

Delimitation of flood spots in the Ipiranga's Stream Watershed, São Paulo – SP, Brazil, with hydrological-hydraulic modeling

Gustavo Lopes Urbani¹ , Melissa Cristina Pereira Graciosa¹ , Maria Cleofé Valverde¹ 

¹Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil. E-mails: gustavourbani@icloud.com, melissa.graciosa@ufabc.edu.br, maria.brambila@ufabc.edu.br

Como citar: Urbani, G. L., Graciosa, M. C. P., & Valverde, M. C. (2023). Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e13. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e13>

RESUMO: Delimitar regiões sujeitas a inundações relacionando quantitativamente a profundidade de submersão ao tempo de recorrência da chuva é essencial para subsidiar as decisões do poder público a fim de mitigar danos à população. Este trabalho tem como objetivo a delimitação de manchas de inundação para a bacia hidrográfica do Córrego Ipiranga, São Paulo – SP, com 23,1 km² de área de drenagem, que sofre recorrentemente com inundações e verificar o número de imóveis atingidos. Para isso, foi realizada a modelagem hidrológica para eventos de chuva com Tempo de Retorno (TR) de 10, 25 e 100 anos. As simulações foram realizadas, inicialmente, com parâmetros hidrológicos e hidráulicos estimados com base na bibliografia de referência e, posteriormente, calibrados com base em 11 eventos chuva-vazão monitorados na bacia. As vazões calibradas foram utilizadas para gerar as manchas de inundação correspondentes aos TRs estudados e apresentaram, em média, picos de vazão 10% superiores aos valores obtidos antes da calibração. As manchas de inundação apresentaram área de 1,79 km² para TR 10, 1,98 km² para TR 25 e 2,21 km² para TR 100 e, atingiram, respectivamente, cerca de 3.019, 3.423 e 3.854 edificações. Ao analisar somente as residências atingidas, nota-se que mais da metade são imóveis de padrão construtivo baixo e popular, fato que intensifica o impacto negativo das inundações para essa parcela da população. As manchas simuladas convergem em sua maioria com ocorrências de inundações mapeadas na bacia por outros autores, nos distritos do Ipiranga, Cambuci, Vila Mariana, Cursino e Saúde, indicando que os resultados obtidos estão coerentes com os observados e podem contribuir no planejamento de prevenção às enchentes na região. Assim, visto a diferença de pico antes e após a calibração, atenta-se para a necessidade dos dados observados para execução dessa etapa e, dado o número de imóveis atingidos, ressalta-se a importância de investir em medidas de prevenção de inundações baseadas em estudos de custo-benefício das intervenções.

Palavras-chave: Inundações Urbanas; Modelagem Hidrológica; Modelagem Hidráulica; Mancha de Inundação; Córrego Ipiranga; HEC-HMS; HEC-RAS.

ABSTRACT: The delineation of flood-prone areas by a quantitative relationship between the depth of inundation and the time of return of rain is essential to support the decisions of public authorities and to limit the damages to the population. The objective of this study is to delineate floodplains for the catchment area of the Ipiranga's Stream, São Paulo - SP, with 23.1 km² of catchment area that is repeatedly affected by flooding, and to verify the number of properties affected. For this purpose, hydrological modeling was performed for rainfall events with return periods (RP) of 10, 25 and 100 years. Simulations were first performed using hydrologic and hydraulic parameters estimated from the reference bibliography and later calibrated based on 11 rainfall-runoff events observed in the watershed. The calibrated discharges were used to generate floodplains that corresponded to the RPs studied and had, on average, 10% higher peak discharges than the pre-calibration values. The floodplains had an area of 1.79 km² for TR 10, 1.98 km² for RP 25, and 2.21 km² for RP 100, and reached approximately 3,019, 3,423, and 3,854 buildings, respectively. Looking only at the affected houses, we find that more than half of them are low-income buildings, which increases the negative impact of the flood on this part of the population. The simulated areas are mostly consistent with the flood events mapped by other authors in the districts of Ipiranga, Cambuci, Vila Mariana, Cursino and Saúde, suggesting that the results obtained are consistent with those observed and can contribute to flood control planning. Thus, given the difference between the peak flows before and after the calibration, the need for observational data to carry out this phase is

Recebido: Setembro 27, 2022. Revisado: Abril 03, 2023. Aceito: Maio 24, 2023.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

pointed out and, given the number of affected properties, the importance of investing in flood control measures is highlighted based on cost-benefit studies of the interventions.

Keywords: Urban Flooding; Hydrological Modeling; Hydraulic Modeling; Flood Spot; Ipiranga's Stream Watershed; HEC-HMS; HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

A inundação é um fenômeno natural caracterizado pelo transbordamento de um curso d'água para suas margens, devido ao aumento da sua vazão. As mudanças antrópicas no uso do solo associadas ao processo de urbanização, como a canalização e retificação de cursos d'água, a impermeabilização das áreas contribuintes e a ocupação das várzeas de rios contribuem diretamente para a ocorrência inundações nos centros urbanos (Feng et al., 2021; Handayani et al., 2020; Zhou et al., 2019), fenômeno esse que será mais frequente com a intensificação dos eventos extremos causado pelas mudanças climáticas (Wing et al., 2020; Tabucanon et al., 2021; Tabari, 2020).

Portanto, determinar as áreas suscetíveis a inundações em uma região se mostra fundamental para entender o fenômeno e auxiliar no processo de tomada de decisão para mitigar os problemas causados por esse fenômeno nas áreas urbanas (Huțanu et al., 2020). A abordagem quantitativa, que relaciona a profundidade de submersão e a extensão da mancha de inundação com a probabilidade de ocorrência da chuva correspondente, é fundamental para possibilitar a tomada de decisão assertiva em ações de mitigação e pode ser realizada com a modelagem hidrológica e hidráulica. Inicialmente, os modelos hidrológicos de chuva-vazão possibilitam estudar a formação do escoamento superficial e das vazões de cheia nos canais de drenagem para uma dada chuva e, complementarmente, os modelos hidráulicos possibilitam avaliar, para uma dada vazão, como será o desenvolvimento dos níveis de cheia na rede de drenagem e, assim, identificar possíveis regiões de inundação na bacia hidrográfica (Romali & Yusop, 2021; Nafari et al., 2017).

Este processo de obtenção de manchas de inundação via modelagem hidrológica e hidráulica vem sendo aplicado, ao longo do tempo, por diferentes autores e estudiosos do tema, à medida em que as ferramentas computacionais de simulação são aperfeiçoadas e que o monitoramento quantitativo de precipitação e vazão permite calibrações que tornam os modelos mais assertivos.

Ribeiro Neto et al. (2016) elaboraram mapas de inundação para TR 100 anos no município de Ipojuca, estado de Pernambuco, região Nordeste do Brasil, por meio de modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica e do curso d'água. Primeiramente, obtiveram as cheias correspondentes à chuva de projeto de TR 100 anos, via modelagem hidrológica de chuva-vazão, com o *software HEC-HMS 4.2 (Hydrologic Modeling System)* e, com as vazões obtidas, realizaram modelagem hidráulica do comportamento das seções do curso d'água ao receber essas vazões, para diferentes tempos de retorno, com o *software HEC-RAS 6.1 (River Analysis System)*. Já Namara et al. (2022) determinaram a mancha de inundação para a bacia do Rio Awash, localizada na região administrativa de Oromia na Etiópia, utilizando a extensão *HEC-GeoRAS*, no *software* de geoprocessamento *ArcGIS*. As vazões utilizadas na simulação foram obtidas via *HEC-HMS 4.2*, a partir dos dados de chuva registrados ao longo de 25 anos por estações meteorológicas locais. Metodologia semelhante foi utilizada por Jagadeesh & Veni (2021) para determinação da mancha de inundação para a bacia do Krishna inferior, no distrito de Krishna na Índia, para chuvas de projeto de TRs 2, 10, 25, 50 e 100 anos e por Huțanu et al. (2020) para planície de inundação do rio Jijia, no nordeste da Romênia, para chuvas de TRs 100 e 1000 anos.

Com isso, a fim de estudar esse tema no contexto brasileiro, a bacia hidrográfica do Ipiranga, localizada na cidade de São Paulo, na principal região metropolitana do Brasil, é uma local que sofre recorrentemente com inundações (Amaral & Ross, 2020) e foi escolhida para ser utilizada como estudo de caso neste trabalho. Assim, o objetivo deste artigo é verificar o número de imóveis atingidos por inundação na bacia do córrego Ipiranga em diferentes tempos de recorrência. Para isso, foi realizada a simulação da mancha de inundação calibrada, com dados observados, para TR 10, 25 e 100 anos, segundo diretrizes de drenagem urbana, utilizando modelagem hidrológico-hidrodinâmica, com os softwares *HEC-HMS 4.2* e *HEC-RAS 6.1*.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia hidrográfica do córrego do Ipiranga tem área de drenagem de 23,1 km² e está localizada na cidade de São Paulo, Estado de São Paulo, região Sudeste do Brasil, abrangendo parte dos bairros Cambuci, Cursino, Ipiranga, Jabaquara, Saúde e Vila Mariana (Figura 1).

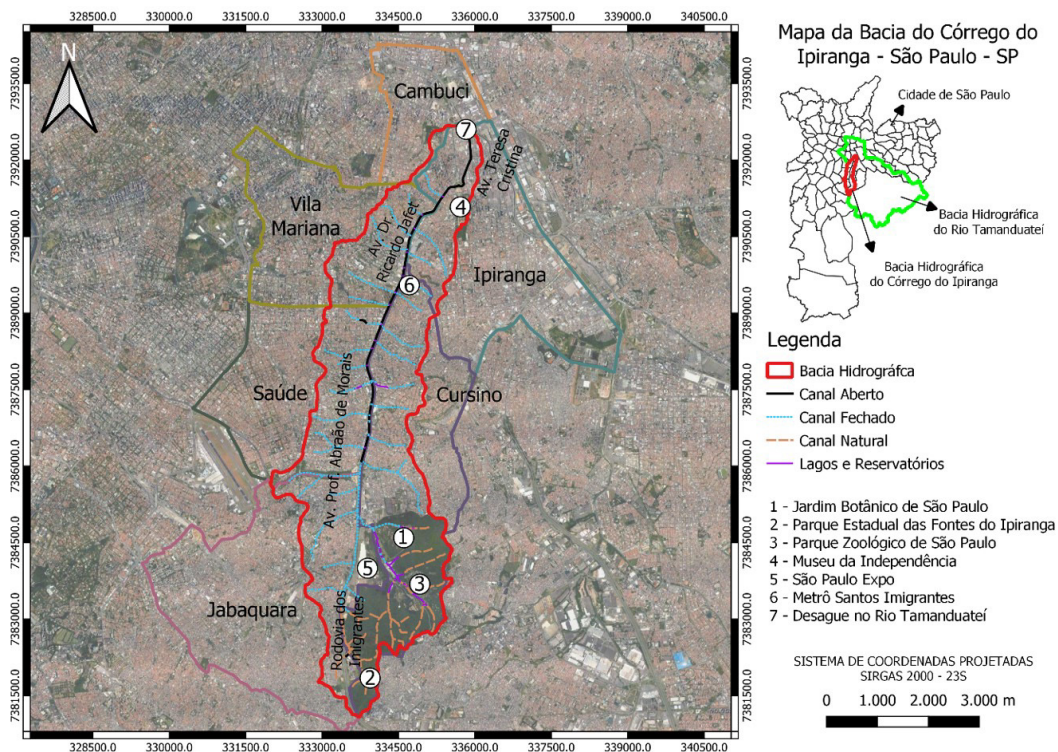


Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do córrego do Ipiranga

O Córrego Ipiranga, originalmente com 63 km de extensão e 1,8 km² de planície de inundação, escoava em leito parcialmente modificado pela ação antrópica, canalizado em sua maior parte e desagua no Rio Tamanduateí. Atualmente, o trecho natural é de apenas 9 km e 85% da planície de inundação está ocupada por vias e edificações (Figura 1). A nascente está localizada nas proximidades do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga / Jardim Botânico, junto à Rodovia dos Imigrantes. O curso d'água apresenta vias de fundo de vale marginais ao seu leito ao longo de toda a sua extensão, começando, a montante, com a Rodovia dos Imigrantes, depois com a Av. Prof. Abraão de Moraes e, em seu trecho inferior, a Av. Dr. Ricardo Jafet (Figura 1), ambas vias de intenso tráfego de veículos, ônibus e caminhões, que constituem um dos mais relevantes eixos de mobilidade na Zona Sul de São Paulo.

Dados Georreferenciados

A delimitação da bacia de estudo e sua hidrografia foram obtidas da plataforma GeoSampa (Mapa Digital da Cidade de São Paulo). Além disso, os dados do LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que também estão disponíveis na plataforma, foram usados para criar um modelo digital do terreno (MDT), etapa necessária para o entendimento da topografia da região e extração de dados para a modelagem hidráulica. A plataforma GeoSampa também disponibiliza camadas vetoriais, em formato *shapefile*, do sistema viário, quadras, lotes e áreas construídas das edificações. Com estas informações, após a simulação das manchas de inundação, foi possível determinar, por sobreposição de camadas, no *software* de geoprocessamento QGIS 3.20, quais edificações estão dentro da mancha de inundação e com qual profundidade de submersão.

Modelagem e simulação hidrológica

A modelagem hidrológica consiste na representação topológica de uma bacia hidrográfica, para que seja possível simular o processo de chuva-vazão nessa área de estudo (Azizi et al., 2021). Os elementos para a caracterização topológica da hidrologia da bacia são:

- Sub-bacias: recorte da bacia hidrográfica em sub-áreas de drenagem, afluentes ao curso d'água principal, divididas de acordo com critérios hidrológicos e também de sistema viário e de homogeneidade das características hidrológicas.
- Nós de simulação: pontos de interesse para se obter as vazões parciais, usualmente localizados no exutório das sub-bacias, onde se deseja conhecer os hidrogramas.

- Trechos: extensões do curso d'água entre os nós de simulação. Com a definição dos trechos é possível realizar a propagação da onda de cheia, por método hidrológico adequado, ao longo dos trechos de cursos d'água.

O modelo hidrológico utilizado foi o NRCS (Natural Resources Conservation Service, 1986), antigo SCS (*Soil Conservation Service*). A aplicação do modelo consiste de duas etapas: obtenção da precipitação efetiva e transformação chuva-vazão (Graciosa, 2010). A separação da precipitação total, P, em Precipitação Efetiva – PE e Perdas – Ia, sendo PE a parcela da precipitação que efetivamente se converte em escoamento superficial direto e Perdas, a parcela que é infiltrada, retida ou evapotranspirada no ciclo hidrológico.

O modelo NRCS considera, para o cálculo da Precipitação Efetiva, que as perdas correspondem a 20% do potencial de armazenamento da bacia, sendo este calculado a partir do número de deflúvio (*Curve Number*), denotado por CN, o qual varia de 0 a 100 e quanto maior o seu valor significa que mais impermeável é a bacia hidrográfica de estudo.

$$P_E = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S_D} \quad (1)$$

$$I_a = 0,2 * S_D \quad (2)$$

$$S_D = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

em que: P_E = precipitação efetiva [mm]; P = precipitação total [mm]; Ia = perdas iniciais por retenção na bacia (mm); S_D = máximo potencial de retenção da bacia após o início do escoamento superficial (mm) e CN = parâmetro *curve number*, indicativo da capacidade de infiltração do solo, variável de 0 a 100.

O parâmetro CN é expresso em função da permeabilidade do solo, da sua umidade anterior e do tipo de superfície. A permeabilidade é representada pelo tipo hidrológico do solo, classificado nos grupos A, B, C e D, sendo os solos do grupo hidrológico A mais propensos à infiltração, com maior percentual de areia em sua granulometria e, os solos de tipo D, menos propensos à infiltração, com maior percentual de argila e silte em sua composição (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012). A condição anterior de umidade varia de Condição I a III, de acordo com precipitação acumulada nos 5 dias anteriores ao evento. A Condição I refere-se a solo seco, com precipitação anterior inferior a 15 mm; a condição II refere-se ao solo medianamente úmido, com precipitação acumulada anterior entre 15 e 40 mm e a condição III, indica solo úmido, próximo à saturação, com precipitação acumulada anterior superior a 40 mm (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012). Os valores de CN das sub-bacias foram adotados, inicialmente, a partir de tabela referencial disponível em São Paulo (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012). Os valores foram, posteriormente, ajustados mediante calibração a partir de dados de monitoramento na bacia hidrográfica.

Para a transformação chuva-vazão, o modelo NRCS aplica o hidrograma triangular unitário, utilizando os princípios da proporcionalidade entre vazão decorrente da chuva de projeto e aquela resultante da chuva unitária e da superposição, para convalidar os hidrogramas parciais, de cada intervalo de tempo, ao longo de toda a duração do evento chuva-vazão. O método NRCS considera as seguintes relações para obtenção dos parâmetros do hidrograma unitário:

$$Q_p = C_p * \frac{A}{t_p} \quad (4)$$

$$t_p = \frac{d}{2} + 0,6 * t_c \quad (5)$$

$$t_b = t_p(1 + X) \quad (6)$$

em que: Q_p = vazão de pico (m^3/s); A = Área de drenagem (m^2); t_c = tempo de concentração da bacia hidrográfica (min); t_p = tempo de pico do hidrograma (min); t_b = tempo de base do hidrograma (min); $C_p = 2 / (1+X)$; $X = t_b/t_p$. No método NRCS, $X = 1,67$ e, portanto, $C_p = 0,75$.

A parcela $0,6 * t_c$ corresponde ao tempo de retardo em minutos (*lag time*), ou tempo decorrido entre o pico do hietograma e o pico do hidrograma. O cálculo do tempo de retardo como 60% do tempo de concentração é uma premissa que o método NRCS adota para a determinação do hidrograma unitário.

Tempo de Concentração

O tempo de concentração corresponde ao tempo decorrido, desde o início da chuva, até que toda a bacia esteja contribuindo para o exutório, podendo ser calculado por diferentes formulações, p.ex. métodos de Kirpich, Carter, Picking, Cinemático, David, *US Army Corps of Engineers*, dentre tantos outros. O Método Cinemático, no entanto, apresenta boa convergência com valores observados para bacias urbanas (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012), tendo sido aplicado para a modelagem deste estudo. Este, para a simulação hidrológica, é determinado pelo método cinemático (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012):

$$t_c = t_t + t_i \quad (7)$$

em que: t_c = tempo de concentração (min); t_t = tempo de traslado na rede de drenagem (min), e t_i = tempo inicial (min), ou tempo de escoamento superficial na bacia antes de atingir a rede de drenagem.

O tempo inicial foi estimado pela equação:

$$t_i = \frac{0,65 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{\frac{1}{2}}}{S^{\frac{1}{3}}} \quad (8)$$

em que: t_i = tempo inicial ou tempo difuso, em minutos; C = coeficiente de escoamento superficial do método racional; L = comprimento do talvegue inicial (m); S = declividade média do trecho em estudo.

O tempo de traslado pode ser estimado pela equação:

$$t_t = \frac{1}{60} \sum \frac{L_{t,i}}{v} \quad (9)$$

em que: L_t = comprimento do trecho i da rede de drenagem (m); v = velocidade de escoamento (m/s).

Modelo de propagação da onda de cheia no canal - Muskingum

A propagação da onda de cheia no trecho de um canal pode resultar em diferenças no hidrograma de saída quando comparado ao hidrograma de entrada deste mesmo trecho, devido à perda de energia por atrito com o fundo e paredes da calha de escoamento. Tal fato pode resultar em um rebaixamento na vazão de pico e um alargamento da base do hidrograma de saída, quando comparado ao hidrograma de entrada do trecho estudado (Song et al., 2011).

A fim de considerar tal fenômeno na modelagem hidrológica deste trabalho, utilizou-se o modelo de Muskingum, que se baseia na equação da continuidade e em relações aproximadas entre o armazenamento na calha e as vazões de entrada e saída.

Assim, a onda de cheia deve se propagar em um canal formando uma linha d'água que pode ser aproximada a dois volumes: um prisma e uma cunha de armazenamento. Matematicamente, podem-se expressar os volumes do prisma e da cunha de armazenamento em função dos parâmetros K e X , que representam respectivamente: o tempo de traslado da vazão de pico ao longo do trecho e o fator de ponderação das vazões de entrada e saída (Song et al., 2011; United States Army Corps of Engineers, 2021; Hamdan et al., 2021).

O parâmetro K pode ser representado pela equação:

$$K = \frac{L_T}{v} \quad (10)$$

em que: K = tempo de traslado da vazão de pico ao longo do trecho; v = velocidade de propagação (m/s) e L_t = comprimento do trecho de estudo (m).

Já o parâmetro X varia entre 0 e 0,5, em que 0 indica que o armazenamento depende apenas da vazão de saída, assumindo assim o seu valor máximo e 0,5 diz que o hidrograma de entrada e saída são iguais, indicando assim que não há amortecimento no trecho de estudo. Para canais naturais, adota-se o valor de X entre 0 e 0,3 (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012).

Software de simulação hidrológica

Para as simulações hidrológicas foi utilizado o *software* HEC-HMS 4.2 (*Hydrological Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (United States Army Corps of Engineers, 2021), da plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*), que se constitui de um conjunto de *softwares* de gerenciamento de recursos hídricos, desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

O módulo HEC-HMS 4.2 calcula a precipitação excedente e simula o processo chuva-vazão em sistemas de bacias e sub-bacias hidrográficas, dados a chuva de projeto, os parâmetros físicos da bacia e os parâmetros do modelo de simulação hidrológica selecionado. Este possibilita representar os elementos topológicos das bacias e sub-bacias e dispô-los de forma ordenada, de modo que a precipitação de entrada é transformada em vazão nas sub-bacias e conduzida, nó a nó, ao longo dos trechos, em direção a seus respectivos exutórios, até o exutório final da bacia. Essa etapa é realizada da seguinte maneira no *software*:

- Importa-se um arquivo vetorial com o mapa da bacia hidrográfica e suas sub-bacias;
- O elemento hidrológico “sub-bacia” é inserido em cada sub-bacia do mapa importado e, a cada elemento, é associado seu respectivo valor de área, CN, Tempo de Retardo ($Lag\ Time = 0,6 * \text{tempo de concentração } (t_c)$), fluxo de base de escoamento e constantes de recessão e de pico.
- O elemento hidrológico “nó” é inserido no exutório de cada sub-bacia;
- Cada elemento sub-bacia é conectada ao um nó.
- Cada nó é conectado ao nó a jusante, seja diretamente ou através de um elemento “trecho”, sempre que se desejar propagar as vazões entre dois nós.

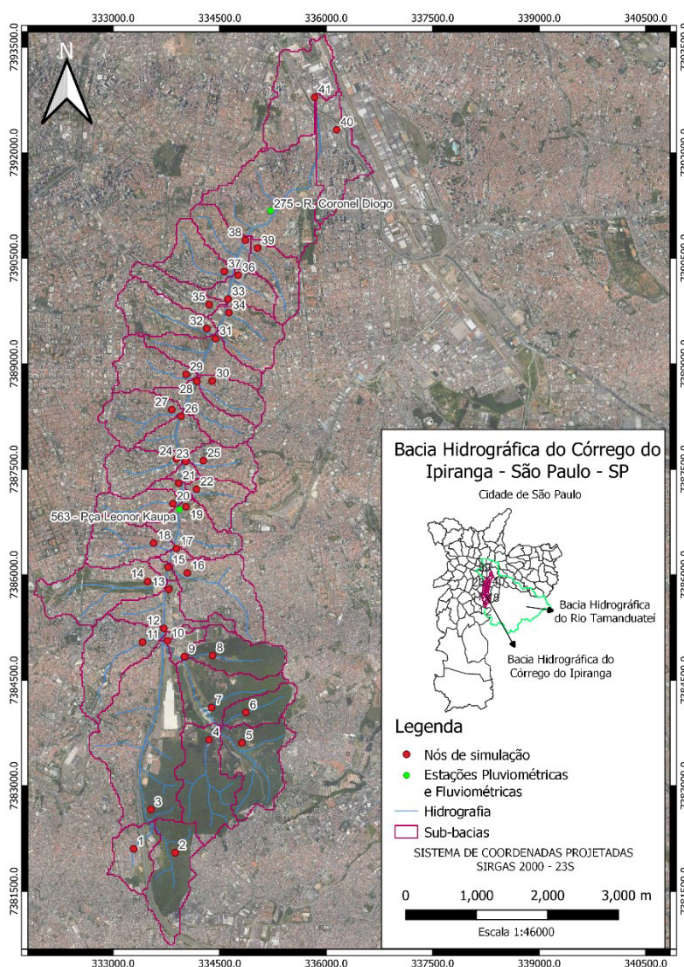


Figura 2 – Topologia de simulação hidrológica da bacia do Córrego do Ipiranga

A Figura 2 apresenta a planta de topologia da bacia do córrego Ipiranga para a simulação hidrológica, com a localização das sub-bacias, trechos e nós. Ao todo, para a representação topológica da bacia foram utilizadas 40 sub-bacias, 41 nós e 13 trechos.

A seguir, foi inserida a chuva de projeto para os tempos de recorrência – TRs 10, 25 e 100 anos. A chuva de projeto foi determinada a partir da IDF de São Paulo (Equação 4) (Governo do Estado de São Paulo, 2018).

$$i_{t,T} = 32,77(t + 20)^{-0,8780} + 16,10(t + 30)^{-0,9306}[-0,4692 - 0,8474 \ln [\ln \left[\frac{T}{T-1} \right]]] \quad (11)$$

em que: t = tempo de duração da chuva em minutos e T = tempo de retorno em anos.

Foi adotada a duração da chuva crítica t = 2 horas. A chuva de projeto foi discretizada em intervalos de 10 minutos. A discretização temporal foi realizada pelo método de Huff (1967). Para as chuvas de projeto na cidade de São Paulo, conforme recomendação de São Paulo (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012), adotou-se a distribuição de 1º quartil. Os hietogramas de projeto estão apresentados na Tabela 1 e Figura 3, respectivamente.

Tabela 1 – Hietograma de Projeto.

tempo		Huff 1º Quartil	P (mm)		
t (min)	t (h)		TR 10	TR 25	TR 100
10	0,17	0,13	10,25	12,19	15,05
20	0,33	0,27	21,24	25,26	31,19
30	0,50	0,21	16,12	19,16	23,66
40	0,67	0,12	9,00	10,70	13,21
50	0,83	0,07	5,51	6,55	8,08
60	1,00	0,05	4,11	4,89	6,04
70	1,17	0,05	3,56	4,24	5,23
80	1,33	0,03	2,17	2,58	3,18
90	1,50	0,02	1,86	2,22	2,74
100	1,67	0,02	1,86	2,21	2,73
110	1,83	0,02	1,25	1,49	1,84
120	2,00	0,01	0,61	0,73	0,90
total		1,0	77,5	92,2	113,9

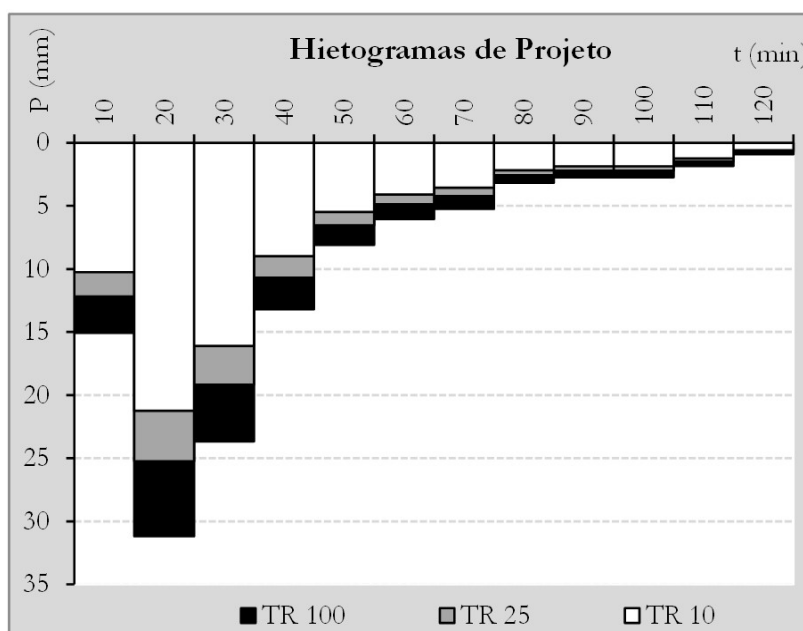


Figura 3 - Hietograma de Projeto.

Calibração da modelagem hidrológica

A calibração dos parâmetros utilizados na simulação hidrológica é fundamental para que o modelo utilizado descreva a hidrologia na região e esteja representando o mais próximo possível da realidade (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2012). O objetivo da calibração foi realizar o ajuste das

variáveis do modelo, de modo que o hidrograma simulado se aproxime do observado com o melhor ajuste possível. Ressalta-se que calibração foi feita no modelo hidrológico, que tem por principais variáveis o *Curve Number* (CN), o tempo de concentração (expresso, no modelo, em termos do *Lag Time*, considerando que o modelo adota o valor de *Lag Time* igual a 60% do tempo de concentração) e os parâmetros do modelo de Muskingum, *k* e *X*. Todos esses parâmetros foram calibrados na modelagem hidrológica, feita no *software HEC-HMS 4.2*.

Eventos chuva-vazão utilizados para a calibração do modelo

A modelagem foi calibrada a partir de dados observados de chuva na bacia, oriundos do monitoramento hidrometeorológico do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP), em dois postos pluviométricos e fluviométricos localizados em diferentes pontos no curso d'água: Posto 563 – Praça Leonor Kaupa (coordenadas: -46.627853, -23.619963) e 275 – Rua Coronel Diogo (coordenadas: -46.614164, -23.581933) (Figura 2). As variáveis calibradas foram o número de deflúvio CN e o tempo de concentração, *t_c*.

Foram selecionados para calibração 11 eventos de chuva-vazão significativos, que resultaram em cheia acima do nível de emergência, conforme classificação do SAISP. Os eventos estão sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Eventos selecionados para calibração do modelo.

DATA	Estação de Monitoramento	Hora de Início	Duração (min)	P total (mm)	I média (mm/h)	NA max, obs (m)	Qp obs (m ³ /s)
16fev2011	275	15:50	130	111,4	51,4	732,8	131,5
21fev2011	275	14:10	170	50,8	17,9	732,8	129,4
14dez2011	275	00:00	200	48,8	14,6	730,5	45,8
15jan2014	275	18:40	190	28,0	8,8	730,4	41,2
22dez2014	275	18:50	510	69,6	8,2	731,2	67,5
05dez2015	563	14:00	370	39,0	6,3	748,9	73,0
22dez2015	563	17:40	110	57,4	31,3	749,3	98,8
27jan2016	563	15:50	350	41,2	7,1	749,0	81,2
15fev2016	563	14:00	480	64,0	8,0	749,2	88,7
09mar2016	563	17:30	80	49,0	36,8	749,0	79,9
10mar2019	563	18:50	275	64,0	14,0	749,1	92,4

As estações monitoram o nível d'água no canal, a partir de sensores automáticos que operam por ecobatimetria. Por se dispor somente da curva-chave das seções na altura da estação de monitoramento 275 e, somente até 22/12/2014, assumiu-se, para a conversão nível-vazão das seções próximas a estação 563, a condição de escoamento permanente uniforme, adotando-se a Equação de Manning para a conversão dos valores de nível em vazão. A geometria das seções e a declividade do curso d'água foram obtidas a partir do projeto de canalização do córrego do Ipiranga (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2010).

$$Q = \frac{1}{n} * A_m * R_h^{2/3} * i^{1/2} \quad (12)$$

em que: *Q* é a vazão (m³/s), *n* é o coeficiente de Manning (s.m-1/3), *A_m* é a área molhada (m²), *R_h* é o raio hidráulico (m) e *i* é a declividade de fundo (m/m).

Foi adotado o valor do coeficiente de Manning de 0,018 s.m-1/3 considerando a seção do canal composta por concreto liso. A declividade de fundo do canal, *i*, foi calculada, a partir do projeto de canalização, *i* = 0,0031 m/m.

Parâmetros da calibração hidrológica

A calibração foi realizada utilizando a ferramenta “modelo de otimização” do *HEC*. Foram calibrados os parâmetros: número de deflúvio, CN, *Lag Time* e *K* de Muskingum.

Para tanto, foram atribuídas estações de medição de nível e precipitação aos nós hidrológicos correspondentes, no *software HEC-HMS 4.2*. Os nós 19 e 36 da modelagem correspondem, respectivamente, às estações Praça Leonor Kaupa (PLK) e a Rua Coronel Diogo (RCD), no Córrego do Ipiranga.

Foram então inseridos os parâmetros a serem calibrados: CN, *Lag Time* e K de Muskingum. O método de otimização utilizado foi o *Simplex*, que otimiza os valores de todos os parâmetros de forma simultânea. A função objetivo utilizada foi a soma dos quadrados residuais (Equação 13), bastante utilizada para calibração de parâmetros de modelos hidrológicos (Graciosa, 2010) e que obtém o ajuste com a comparação do quadrado das diferenças dos valores simulados e observados, levando em consideração o instante do pico, magnitude da vazão de pico e volume do hidrogramas.

$$\text{Função Objetivo} = \min \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 \quad (13)$$

O número de iterações foi ajustado manualmente até se obter o melhor ajuste entre os hidrogramas simulados e observados, ficando definido em 5.000 iterações com tolerância de 0,01%.

Após a obtenção dos parâmetros calibrados, simulou-se novamente as chuvas de projeto para TRs 10, 25 e 100 anos, com os novos valores médios de CN, *Lag Time* e K de Muskingum obtidos para os 11 eventos simulados.

Modelagem Hidráulica

O modelo hidráulico utilizado foi unidimensional, para escoamento gradualmente variado, com as propriedades hidráulicas variando de maneira gradual ao longo do curso d'água, em virtude de alterações tanto de vazão em cada seção quanto de geometria (Canholi, 2012). O modelo gradualmente variado e a abordagem unidimensional foram adotados considerando-se que o curso d'água estudado apresenta calha prismática, relativamente constante, sem estuário ou várzea que ocasione variação significativa das propriedades hidráulicas, o que poderia indicar a adoção da abordagem bidimensional e modelo hidrodinâmico para melhor ajuste dos valores simulados. O modelo de utilizado possibilita a obtenção do nível d'água a partir das vazões de projeto simuladas nas diferentes seções de interesse, da geometria das seções e da rugosidade das paredes e fundo, expressa pelo coeficiente n de *Manning*. As condições de contorno adotadas foram as informações de vazão *versus* nível d'água nas seções inicial e final do curso d'água (Canholi, 2012). O sistema de equações foi solucionado pelo método iterativo *Standard Step Method*.

Software de simulação hidráulica

A modelagem hidráulica foi realizada no *software HEC-RAS 6.1 (River Analysis System)*, que possibilita a simulação uni ou bidimensional do escoamento em canais abertos, sob o regime permanente e não-permanente (Namara et al., 2022; Graciosa, 2010).

Para isso, as seções topobatimétricas do córrego do Ipiranga (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2010) foram inseridas, de maneira georreferenciada, com o auxílio da extensão *HEC-GeoRAS 10.2* instalada no *software ArcMap 10.8*, conforme metodologia desenvolvida em trabalhos similares (Namara et al., 2022; Jagadeesh & Veni, 2021). O coeficiente de rugosidade n de *Manning* adotado foi de 0,018 considerando o canal composto por concreto liso e a condição de contorno utilizada foi a curva-chave, nas seções a montante e jusante do curso d'água, a partir dos dados fluviométricos observados nos postos de monitoramento Praça Leonor Kaupa e Rua Coronel Diogo expresso na Tabela 3.

Tabela 3 – Curvas chaves adotadas para a conversão nível-vazão nas seções de controle

Pça Leonor Kaupa		R. Coronel Diogo	
NA (m)	Q (m ³ /s)	NA (m)	Q (m ³ /s)
0	0	0	0
0,8	1,7	0,8	5,5
1,2	3,5	1,0	8,1
2,4	15,4	2,3	28,3
3,8	57,7	3,5	62,4
4,3	84,8	4,6	99,9
-	-	5,3	127,9

Edificações atingidas por inundação

Utilizando a mancha de inundação obtida na modelagem hidráulica e a camada vetorial de base cadastral de imóveis disponível no GeoSampa, é possível determinar todos os imóveis atingidos por inundação para os diferentes TRs com a ferramenta de intersecção no *software* QGIS 3.20. Com a seleção feita, através dos polígonos que representam tais construções, é possível determinar a área construída de cada um com a ferramenta de determinar área no *software* QGIS 3.20.

Assim, com base na área de cada um deles é possível atribuir um padrão construtivo a cada imóvel se utilizando da NBR 12.721/2005 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005), cuja as faixas de área e seus respectivos padrões estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valor CUB de acordo com a classificação de cada imóvel

Classificação NBR 12.721/2005 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005)	Classificação do Imóvel	Faixa de Área (m ²)
R1 - A	A	≥ 224,82
R1 - N	B	224,82 > A ≥ 106,44
R1 - B	C e D	106,44 > A ≥ 58,64
RP1Q	E	A ≥ 39,56

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Calibração do Modelo Hidrológico

A calibração da modelagem hidrológica resultou em uma variação nos valores dos parâmetros calibrados mostrados nas tabelas a seguir. Na Tabela 5 se encontram os resultados da calibração do K Muskingum, parâmetro este que variou minimamente em 4 dos 12 trechos em relação aos valores iniciais. Os demais valores se mantiveram constantes, indicando que o K Muskingum calculado inicialmente foi suficiente para descrever os trechos delimitados na bacia hidrográfica do Córrego do Ipiranga.

Nota-se que para as 35 sub-bacias a montante dos postos de monitoramento (Figura 2), as Tabelas 6 e 7 não apresentam valores para eventos a partir de 05/dez/2015 após a sub-bacia 17. Isso ocorre, pois, a partir desta data, o posto de monitoramento 275 parou de fornecer a informação de vazão observada, restando assim somente o posto de monitoramento na Praça Leonor Kaupa, que possui a seu montante somente as sub-bacias de 1 a 17. O mesmo ocorre, analogamente, para os trechos, na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros K, inicial e calibrado, dos trechos.

Sub-Bacias	Valores Iniciais	K Muskingum Calibrado (hora)											média
		16/fev/11	21/fev/11	14/dez/11	15/jan/14	22/dez/14	05/dez/15	22/dez/15	27/jan/16	15/fev/16	09/mar/16	10/mar/19	
T-01	0,28	0,29	0,31	0,22	0,26	0,26	0,18	0,26	0,32	0,27	0,31	0,36	0,28
T-02	0,12	0,12	0,12	0,09	0,11	0,14	0,07	0,13	0,15	0,11	0,14	0,24	0,13
T-03	0,07	0,08	0,07	0,04	0,06	0,09	0,03	0,08	0,08	0,05	0,08	0,11	0,07
T-04	0,06	0,08	0,06	0,04	0,05	0,09	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,06
T-05	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,03
T-06	0,07	0,11	0,06	0,06	0,06	0,08	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,07
T-07	0,06	0,11	0,05	0,05	0,05	0,06	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,06
T-08	0,07	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,06
T-09	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,04
T-10	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,04
T-11	0,05	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,054
T-12	0,22	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0,218

Observando-se os valores médios, percebe-se que o parâmetro número de deflúvio *Curve Number* (CN) foi o que apresentou maior variação entre os valores inicialmente adotados e os calibrados, permanecendo dentro de uma faixa de 72,56 a 95,58, sendo que o intervalo de variação definido para

as iterações foi de 65 a 99. Esse aumento significativo do CN nas sub-bacias de 1 a 17, pode estar associado a subestimação dos valores deste nas sub-bacias de 2 a 8, que por estarem sob a região dos parques (Figura 1), foi atribuído um valor de CN = 66 a elas, e a partir daí o *software* realizou uma compensação dos valores e causou um aumento nos valores de CN das bacias próximas, de modo a compensar as vazões simuladas com as observadas. O parâmetro *Lag Time*, que é calculado com base no Tempo de Concentração, diminuiu em 29 das 34 sub-bacias após a calibração, indicando que houve uma superestimação dos valores deste parâmetro nos cálculos.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros *Curve Number*, inicial e calibrado, das sub-bacias.

Sub-Bacia	Valores Iniciais	Curve Number (CN) Calibrado											média
		16/fev/11	21/fev/11	14/dez/11	15/jan/14	22/dez/14	05/dez/15	22/dez/15	27/jan/16	15/fev/16	09/mar/16	10/mar/19	
SB-01	85,0	97,8	97,6	98,6	96,0	93,4	91,1	91,3	94,4	93,3	99,0	98,9	95,6
SB-02	66,0	72,7	71,3	70,7	71,7	67,9	83,0	83,7	91,7	87,4	74,7	83,9	78,1
SB-03	66,0	68,9	69,5	68,0	68,9	65,3	80,7	81,5	98,6	86,6	73,3	93,1	77,7
SB-04	66,0	68,3	67,8	67,0	66,9	65,2	80,2	78,3	95,3	86,7	70,9	99,0	76,9
SB-05	66,0	68,0	66,9	65,9	65,2	66,0	80,8	75,3	92,4	87,5	70,5	98,6	76,1
SB-06	66,0	69,6	67,0	65,1	64,0	66,1	82,1	73,6	88,7	85,6	71,2	93,8	75,2
SB-07	66,0	70,0	67,3	65,5	63,2	65,9	85,6	72,1	84,8	82,8	71,6	88,2	74,3
SB-08	66,0	69,1	67,5	65,9	62,7	65,1	78,7	72,2	80,7	79,7	72,8	83,9	72,6
SB-09	85,0	84,6	87,7	82,1	80,0	81,9	98,9	91,2	98,4	98,3	93,0	99,0	90,5
SB-10	85,0	83,0	88,5	79,3	80,2	78,6	97,8	93,1	98,9	98,6	99,0	94,2	90,1
SB-11	85,0	83,5	89,0	78,1	82,4	74,1	96,5	94,0	98,7	99,0	98,0	92,5	89,6
SB-12	85,0	82,2	89,8	76,7	84,6	69,4	97,2	95,7	98,7	97,6	98,3	97,6	89,8
SB-13	85,0	81,5	91,1	75,1	86,5	67,4	98,8	97,3	99,0	98,7	99,0	98,6	90,3
SB-14	85,0	80,2	92,6	74,8	88,0	66,6	98,5	96,8	97,8	98,7	98,8	98,9	90,2
SB-15	85,0	80,4	92,9	73,2	88,8	65,1	98,5	96,1	98,5	98,9	99,0	97,6	89,9
SB-16	85,0	80,5	92,7	75,6	89,5	67,2	96,2	94,4	94,5	97,5	98,1	95,2	89,2
SB-17	85,0	79,8	93,0	75,1	89,8	65,1	94,6	94,1	92,1	98,9	99,0	98,3	89,1
SB-18	85,0	79,9	92,8	77,6	90,1	65,5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	81,2
SB-19	85,0	79,8	92,5	80,8	90,4	65,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	81,8
SB-20	85,0	79,7	92,2	84,0	90,5	66,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	82,5
SB-21	85,0	79,9	91,8	90,1	90,8	65,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	83,6
SB-22	85,0	80,7	91,4	89,7	91,3	66,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	83,9
SB-23	85,0	74,8	91,0	89,7	91,5	66,2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	82,6
SB-24	85,0	73,6	90,6	89,8	91,7	68,5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	82,8
SB-25	85,0	68,7	90,1	90,0	92,0	73,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	82,8
SB-26	85,0	65,1	88,9	86,4	92,4	75,8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	81,7
SB-27	85,0	59,9	88,0	77,8	92,7	78,5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	79,4
SB-28	85,0	59,0	87,0	74,9	92,7	81,2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	79,0
SB-29	85,0	61,3	86,4	73,9	92,8	90,2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	80,9
SB-30	85,0	63,3	85,5	72,8	93,3	96,4	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	82,3
SB-31	85,0	67,0	85,0	76,0	92,8	98,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	83,8
SB-32	85,0	71,6	84,2	78,6	92,8	98,9	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,2
SB-33	85,0	76,6	83,6	78,0	91,8	98,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,6
SB-34	85,0	84,5	82,6	81,1	91,4	97,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	87,3
SB-35	85,0	88,0	81,6	79,3	92,1	98,9	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	88,0
SB-36	85,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,0
SB-37	85,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,0
SB-38	85,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,0
SB-39	85,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,0
SB-40	85,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	85,0

Tabela 7 – Valores dos parâmetros *Lag Time*, inicial e calibrado, das sub-bacias.

Sub-Bacias	Valores Iniciais	Lag Time Calibrado (min)											média
		16/fev/11	21/fev/11	14/dez/11	15/jan/14	22/dez/14	05/dez/15	22/dez/15	27/jan/16	15/fev/16	09/mar/16	10/mar/19	
SB-01	8,6	8,7	8,2	7,6	9,3	10,0	9,2	9,5	9,1	9,6	9,7	10,7	9,2
SB-02	17,0	17,2	16,3	14,5	18,5	19,4	17,6	17,5	17,4	18,0	19,5	22,1	18,0
SB-03	25,0	24,8	24,0	20,8	27,2	27,6	24,8	25,1	24,9	25,4	28,2	32,0	25,9
SB-04	17,5	16,8	16,9	14,2	18,9	18,5	16,1	16,0	16,9	17,0	18,7	22,9	17,5
SB-05	15,6	14,7	15,1	12,3	16,6	16,1	14,4	13,5	14,7	14,5	16,4	19,6	15,3
SB-06	13,8	13,3	13,5	10,7	14,7	13,9	12,3	11,5	12,7	12,5	14,3	16,8	13,3
SB-07	13,5	12,8	13,4	10,4	14,1	13,3	11,1	10,9	11,6	12,4	13,8	16,6	12,8
SB-08	15,3	14,4	15,5	11,7	15,5	14,6	12,2	12,3	12,9	14,0	15,4	18,6	14,3
SB-09	7,5	7,0	7,6	5,6	7,6	7,4	5,5	5,9	6,3	6,9	6,6	9,2	6,9
SB-10	12,2	11,5	12,4	9,2	12,2	12,1	9,3	9,4	10,2	10,7	10,5	14,3	11,1
SB-11	5,1	4,9	5,2	3,8	5,0	5,2	3,9	3,9	5,2	4,5	4,5	5,9	4,7
SB-12	8,4	8,1	8,8	6,4	8,0	8,7	6,5	6,3	8,6	7,3	7,4	9,7	7,8
SB-13	13,1	12,6	14,0	10,0	12,0	13,6	9,3	9,1	13,3	11,5	11,8	15,1	12,0
SB-14	5,4	5,2	5,9	4,3	46,1	5,6	4,0	3,9	5,5	4,8	49,2	6,2	12,8
SB-15	12,4	12,1	13,8	10,0	9,8	12,5	9,5	9,4	12,4	11,3	11,6	13,8	11,5
SB-16	4,6	4,6	5,4	3,7	3,4	4,7	3,5	3,8	4,5	4,3	4,5	4,6	4,3
SB-17	9,7	9,5	11,4	8,0	6,8	9,9	7,8	8,5	10,4	9,2	9,8	10,6	9,2
SB-18	9,9	9,9	11,5	8,2	6,9	9,9	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,2
SB-19	10,0	10,6	11,3	8,4	6,7	9,8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,4
SB-20	6,2	6,4	6,9	5,3	4,1	6,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5,7
SB-21	8,9	9,2	9,8	7,6	5,9	8,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,2
SB-22	5,4	5,8	6,0	4,6	3,5	4,9	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5,0
SB-23	9,4	10,1	10,3	8,1	6,1	8,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,6
SB-24	8,7	8,2	9,6	7,4	5,8	7,5	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	7,7
SB-25	8,0	7,7	8,8	6,6	5,3	6,8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	7,0
SB-26	9,2	9,0	10,2	7,7	6,1	7,6	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,1
SB-27	10,1	10,0	11,2	8,6	6,7	8,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,0
SB-28	9,1	9,1	10,0	8,0	6,1	7,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,1
SB-29	8,3	8,1	9,1	7,4	5,6	6,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	7,4
SB-30	9,9	9,6	10,8	9,0	6,7	7,9	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,8
SB-31	10,3	10,1	11,2	9,4	7,0	8,6	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,3
SB-32	9,2	9,2	8,5	8,7	6,8	7,8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,2
SB-33	10,2	10,4	10,0	9,7	9,0	8,9	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,6
SB-34	7,4	7,5	7,5	7,0	7,0	6,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	7,2
SB-35	9,7	9,8	9,9	9,2	9,5	9,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,5
SB-36	8,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8,7
SB-37	9,2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9,2
SB-38	17,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	17,0
SB-39	7,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	7,7
SB-40	11,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	11,0

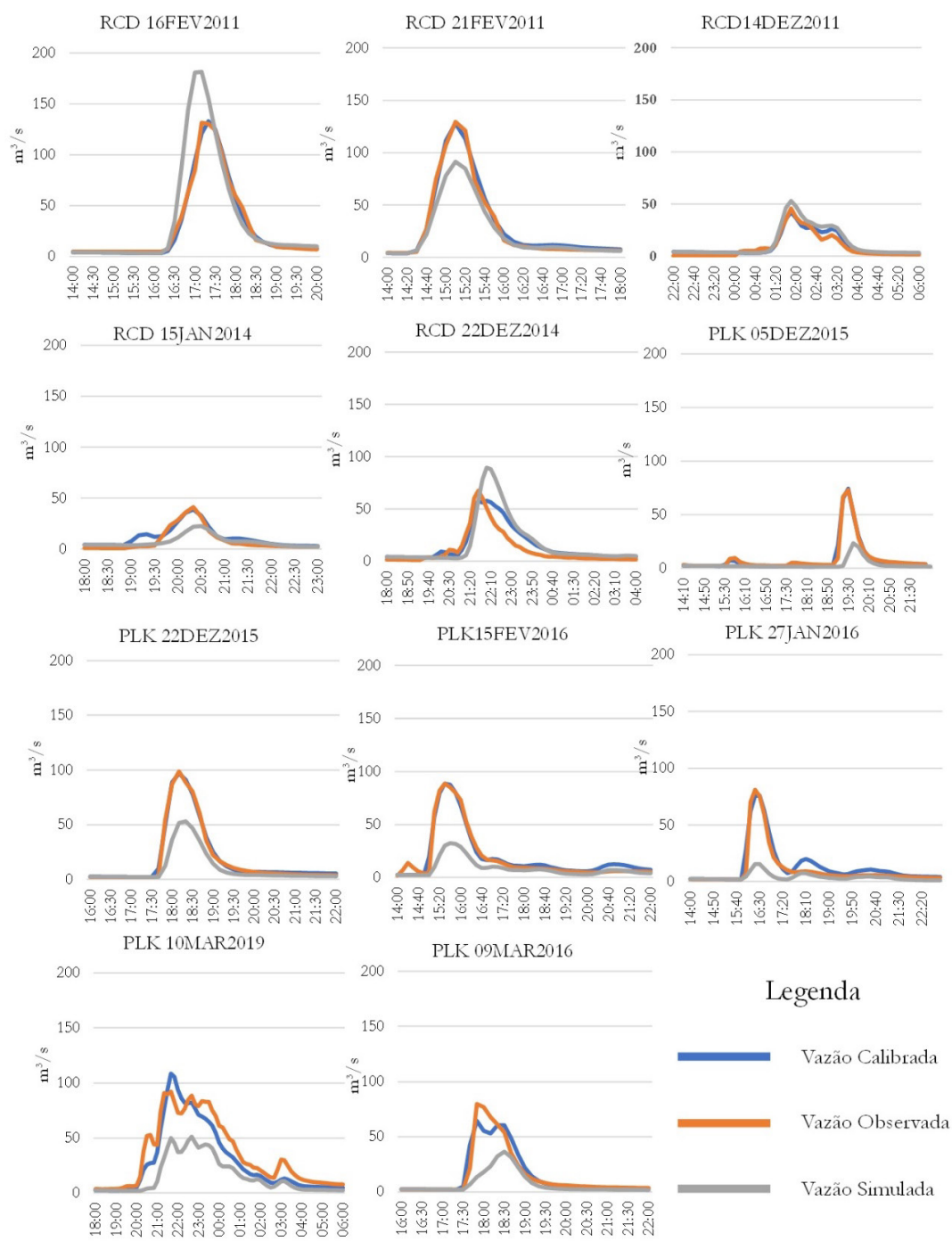


Figura 4 – Comparação dos hidrogramas simulados, observados e calibrados para todos os eventos analisados, sendo PLK os eventos calibrados a partir dos dados da Praça Leonor Kaupa e RCD da Rua Coronel Diogo.

Após a calibração dos parâmetros, obteve-se um ajuste considerável quando se compara as vazões calibradas (*cal flow*) às observadas (*obs flow*) como indicado nos eventos da Figura 4 onde é possível observar que, nos eventos (8 de 11), a vazão simulada (*sim flow*), com os parâmetros iniciais, são significativamente inferiores aos valores observados. Com a calibração dos parâmetros, observa-se como uma pequena variação em cada um deles produziu resultados próximos aos observados, com vazões de pico e tempo para o pico praticamente iguais na maioria dos casos.

A discrepância entre os valores simulados com os parâmetros iniciais (*sim flow*) e observados (*obs flow*) pode estar associado a:

- incertezas na estimativa dos parâmetros;
- No processo de conversão do nível d'água em vazão, por meio da Equação de *Manning*, quando o ideal é utilizar uma curva-chave calibrada para tal;

- Incertezas no processo de medição dos sensores que fazem esse trabalho;
- Utilização de valores constantes de CN para todos os eventos, o que significa adotar as mesmas condições de umidade anterior em todas as simulações.

Tabela 8 – Valores de vazão no exutório antes e depois da calibração dos parâmetros.

Nó de Simulação	Vazão de Projeto simulada com parâmetros iniciais			Vazão de Projeto simulada com parâmetros calibrados		
	TR 10 (m ³ /s)	TR 25 (m ³ /s)	TR 100 (m ³ /s)	TR 10 (m ³ /s)	TR 25 (m ³ /s)	TR 100 (m ³ /s)
N41	170,1	224,7	310,1	189,4	247,7	339,2

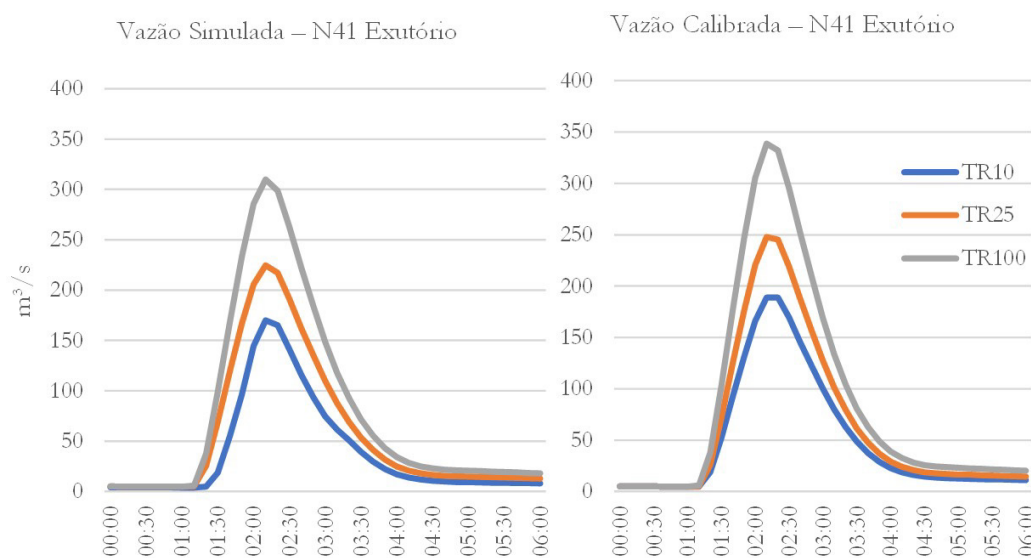


Figura 5 – Hidrograma simulado no exutório antes e depois da calibração (Nó N41)

Percebe-se que a calibração dos parâmetros de simulação é essencial para a modelagem hidrológica, pois a vazão aumentou em todos os nós após a simulação do modelo com os parâmetros calibrados. Analisando especificamente o exutório, nó de simulação 41, verifica-se que todos os picos de vazão aumentaram (Tabela 8), em cerca de 19,3 m³/s para TR 10, 23,0 m³/s para TR 25 e 29,1 m³/s para TR 100 (Figura 5).

Este processo mostra o quão importante é utilizar um valor de CN próximo à realidade da região de estudo, de modo que os resultados da simulação se aproximem do observado de tal forma que o projeto que utilizar essas vazões seja atendida as demandas locais. Para obter resultados cada vez mais precisos, a medição da vazão diretamente no córrego seria o ideal, pois o processo de obtenção dessa grandeza por meios indiretos é muito sensível a pequenas variações no modelo matemático utilizado, fato que aumenta a incerteza dos resultados obtidos.

Mancha de inundação

As manchas de inundação de TRs 10, 25 e 100 anos, apresentados no mapa da Figura 6, possuem as respectivas áreas de 1,79 km², 1,98 km², 2,21 km². Esse crescimento das áreas inundadas com o aumento das TRs é esperado, visto que as vazões do projeto são maiores à medida que a TR aumenta e, conseqüentemente, quando o córrego transborda, a água atinge maiores extensões. Como consequência deste último, o número de edificações afetadas por essas inundações simuladas também varia de acordo com a chuva de projeto, sendo 3019 para TR 10, 3423 para TR 25 e 3854 para TR 100 anos.

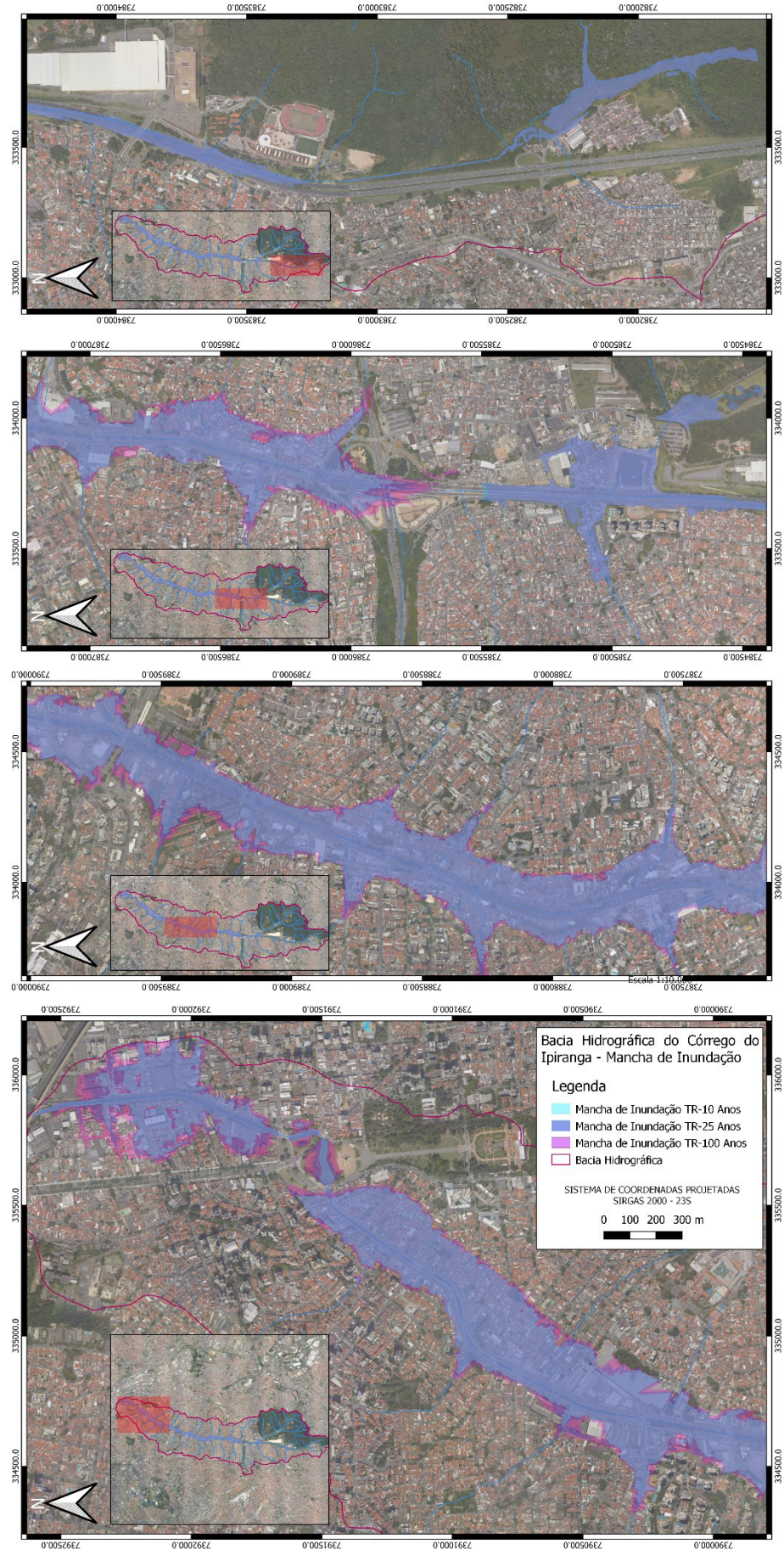


Figura 6 - Manchas de inundação de TRs 10, 25 e 100 anos

Ao comparar o resultado obtido com as manchas de inundação existentes para a região, no caso do Plano Diretor de Macrodrenagem do Alto Tietê 3 (PDMAT 3), de TRs 25 e 100 anos, indicadas na Figura 7A, percebe-se que ambas atingem parcialmente áreas semelhantes no setor mais a jusante da bacia próximo ao exutório, o que não ocorre nas regiões mais centrais e a montante da bacia. Essa diferença existe devido ao estudo do PDMAT 3 ter sido realizado para a calha do Rio Tamanduateí, cujo a cheia causa elevação da linha d'água no trecho final de seus afluentes, explicando assim a mancha de inundação no exutório do Córrego do Ipiranga. Por outro lado, as manchas de inundação apresentadas neste trabalho consideram somente a contribuição das chuvas na bacia hidrográfica do Córrego do Ipiranga, o que explica a diferença entre os resultados obtidos neste trabalho com os apresentados no PDMAT 3.

Outras duas fontes de dados válidas para serem comparadas com os resultados deste trabalho são as de ocorrência de eventos de inundação e as áreas suscetíveis a inundações, informações mapeadas respectivamente pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) Figura 7B (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018), dados disponibilizados pela Prefeitura da Cidade de São Paulo na plataforma GeoSampa. As informações fornecidas pelo CEMADEN são baseadas em registros de ocorrência de inundações na área de estudo, sem relacionar com algum evento específico ou recorrência conhecida.

Percebe-se que as regiões mais centrais da bacia apresentam uma maior similaridade dos dados observados com as regiões atingidas pela mancha de inundação simulada (Figura 6), onde estão concentrados a maioria das ocorrências de eventos de inundações na bacia do córrego do Ipiranga de acordo com os registros do CEMADEN.

O mapeamento das áreas de inundação, obtido via aplicação de questionários em campo na bacia de estudo por Amaral & Ross (2020), aponta uma similaridade com os resultados da Figura 6 nas seções a jusante, próxima ao exutório, e partes centrais da bacia, nos distritos do Ipiranga, Cambuci, Vila Mariana, Cursino e Saúde (Trechos 1, 2 e 4).

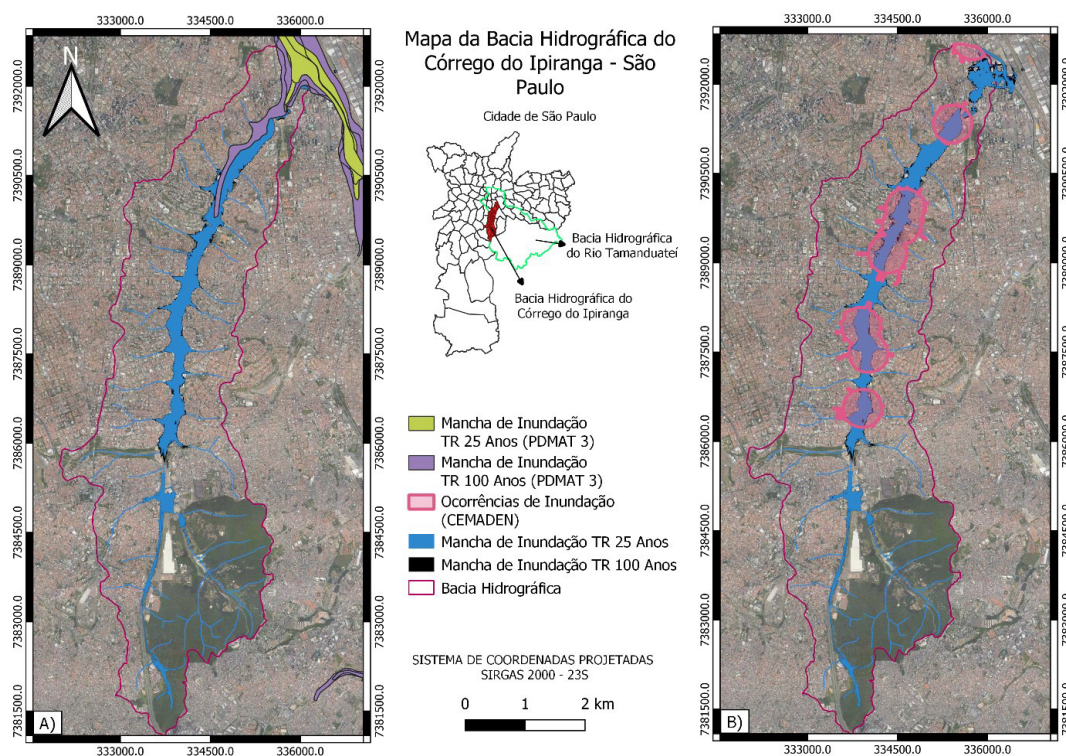


Figura 7 - a) Comparação entre as manchas de inundação simuladas com existentes do PDMAT 3, **b)** Comparação das manchas de inundação simuladas áreas com ocorrências de inundação. Fonte: Adaptado pelo autor com dados disponibilizados pelo CEMADEN (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018), PDMAT 3 (Urbani et al., 2021).

Por fim, Relatório Técnico HPI 2022 (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2022), que teve como finalidade identificar assentamentos precários sujeito a risco de inundação nas bacias hidrográficas da cidade de São Paulo, dentre elas a bacia do córrego do Ipiranga, teve como primeira etapa a elaboração de um mapa de suscetibilidade a enchente e inundação a partir da modelagem

hidrodinâmica simplificada do modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) para toda a bacia hidrográfica (Figura 8).

Mesmo com metodologias diferentes, nota-se uma semelhança entre as manchas de inundação obtidas neste trabalho com os resultados encontrado pela Defesa Civil no HPI 2022 para a mesma área de estudo, com as áreas mais propensas a inundação se concentrando nas marginais do córrego do Ipiranga e no desague no Rio Tamanduateí.

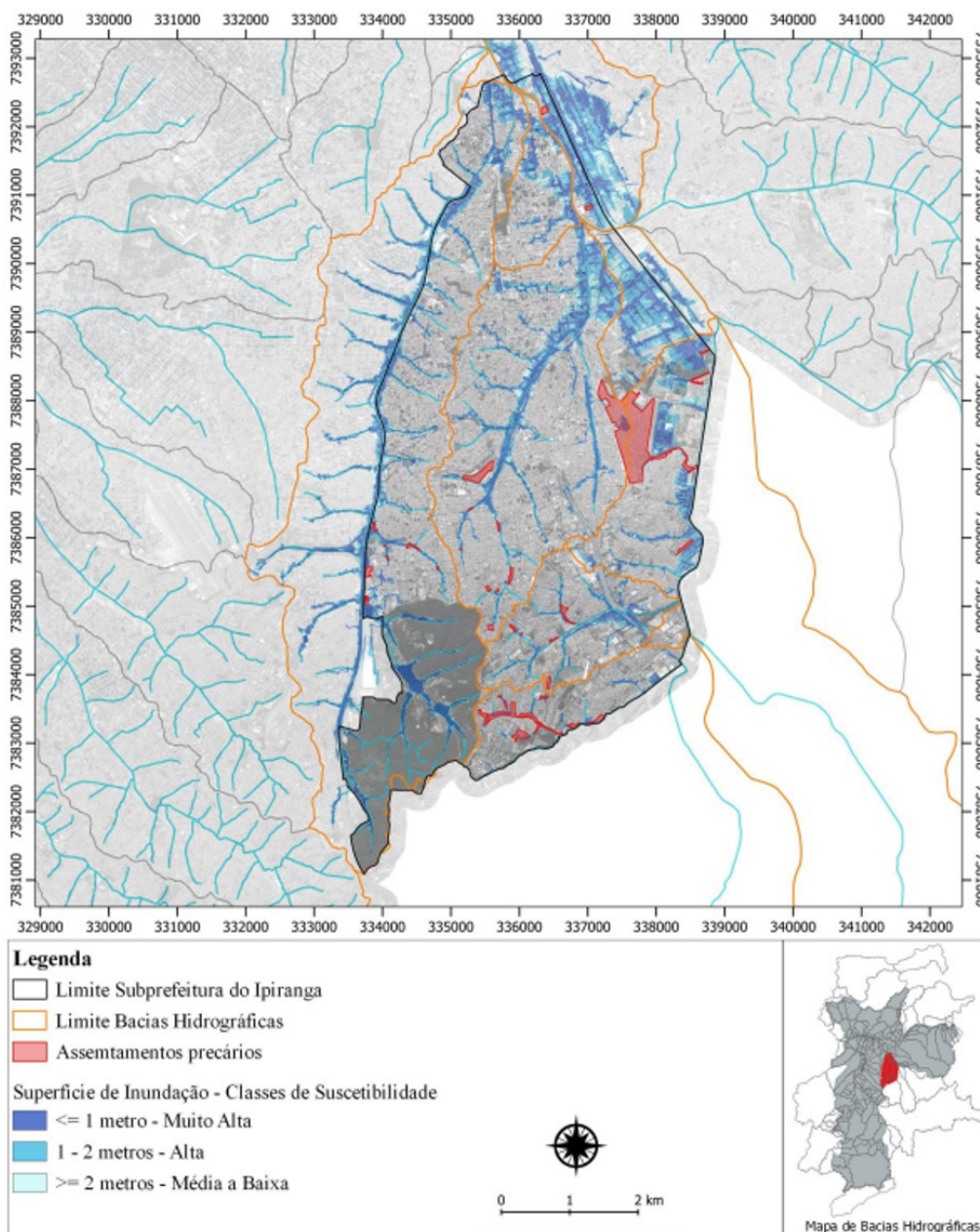


Figura 8 – Manchas de inundação obtidas no Relatório Técnico HPI 2022

Imóveis atingidos por inundação

A partir da classificação do uso do solo e da área de construção dos imóveis atingidos por inundação, limitando a análise a residências horizontais na Bacia do Córrego do Ipiranga e da área real de cada uma de acordo com a base cadastral disponível no GeoSampa, obteve-se a seguinte distribuição indicada na Tabela 9. A Tabela 10 aponta a distribuição dos imóveis mais atingidos pelos distritos que fazem parte da bacia de estudo para um tempo de recorrência de TR 25 anos. Optou-se por apresentar somente este para melhor visualização dos dados, além de ser representativo para a bacia de estudo.

Tabela 9 - Distribuição dos imóveis atingidos por inundação por projetos-padrão via NBR 12.721/2005 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005)

Classificação NBR 12.721 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005)	Total na Bacia	Residências atingidas por inundação							
		TR10		TR25		TR100			
Residência Padrão Alto	R1-A	6268	10%	180	9%	199	9%	474	12%
Residência Padrão Normal	R1-N	19594	32%	694	34%	787	34%	1266	33%
Residência Padrão Baixo	R1-B	16291	27%	560	28%	661	28%	1049	27%
Residência Popular	RP1Q	18177	30%	598	29%	680	29%	1046	27%
Total		60330	100%	2032	100%	2327	100%	3835	100%

Percebe-se que a maioria destes são habitados pela parcela da população com menor poder aquisitivo, Residência Padrão Baixo (R1-B) e Residência Popular (RP1Q), que foram agrupadas em apenas uma categoria devido à proximidade na Área Real de Construção, seguido por Residências Padrão Normal (R1-N) e a menor parcela em Residências de Padrão Alto (R1-A).

Tabela 10 - Distribuição dos imóveis atingidos por inundação por projetos-padrão via NBR 12.721/2005 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005) e distritos para TR 25 anos.

Classificação NBR 12.721 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005)	Distritos					
	Cursino	Ipiranga	Jabaquara	Saúde	Vila Mariana	Total
R1-A	123	144	1	90	67	425
R1-N	371	438	11	201	95	1116
R1-B	330	362	22	151	81	946
RP1Q	300	373	11	174	78	936
Total	1124	1317	45	616	322	3423

Os imóveis mais atingidos estão localizados no distrito do Ipiranga, seguidos em ordem pelos distritos Cursino, Saúde, Vila Mariana e Jabaquara. Apesar do Cambuci também compor a bacia de estudo, nestas simulações, não foi apresentado imóveis atingidos por inundação neste bairro, muito devido pela sua distância do córrego do Ipiranga.

A maior concentração dos imóveis atingidos por inundação no bairro do Ipiranga está localizada entre a rua Mont. Alverne e a avenida Dr. Ricardo Jafet, devido a proximidade desses imóveis do curso d'água somado ao fato que é uma região próxima ao exutório da bacia, onde as vazões tendem a ser maiores caso não haja reservação em trechos mais a montante.

Uma outra área, ainda no bairro do Ipiranga, que apresenta uma densidade de imóveis atingidas por inundação significativa, está localizado entre as avenidas Dom Pedro I e Teresa Cristina, região que se encontra próxima ao Rio Tamanduateí, no exutório do córrego do Ipiranga. Do total de 277 imóveis deste trecho analisado, 172 imóveis (62%) são imóveis de padrão construtivo baixo e residência popular.

Assim, chama-se atenção para o dano que as inundações podem causar considerando esse cenário simulado. O impacto que este fenômeno pode gerar na vida da população que habita em residências populares deve ser mais significativo do que nas famílias que vivem nos imóveis de maior padrão construtivo, principalmente na renda mensal, que deve ser afetada com essa nova despesa para se recuperar dos danos causados pela inundação.

Com isso, um futuro estudo sobre os prejuízos causados por inundações nessa bacia hidrográfica, pode aprofundar o entendimento dessa questão social, de como este fenômeno pode impactar a vida da população local e, a partir dessas informações, fornecer dados para o poder público e os tomadores de decisão analisarem o custo-benefício de se investir em medidas mitigadoras ao longo da bacia, a fim de se evitar danos a uma parcela da população que demora um período maior de tempo para se recuperar dos danos causados por inundação quando comparado às demais.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou manchas de inundação de TRs 10, 25 e 100 anos determinadas a partir de vazões de projeto obtidas com parâmetros de simulação calibrados a partir de dados observados. A área atingida por uma inundação causada por uma chuva que pode ocorrer a cada 10 anos na região

de estudo, atinge um total de mais de 3.000 imóveis. Ao analisar somente as residências sujeitas a inundação, percebe-se que as de padrão baixo e popular são as mais atingidas, essas que são as mais impactadas por eventos dessa natureza, mostrando assim a necessidade de mitigar os prejuízos que as inundações podem causar para a parcela com menor poder aquisitivo que habita a bacia do Córrego do Ipiranga.

Também pode-se perceber que esse estudo complementa resultados obtidos no PDMAT 3 ao obter a mancha de inundação simulada para um afluente do Rio Tamanduateí, o córrego do Ipiranga. Este trabalho também fornece mais um resultado, com diferente metodologia, para o mapeamento de risco de inundações em assentamentos precários do Município de São Paulo, visto que este último foi realizado com a metodologia HAND e este estudo utilizou o método NRCS na modelagem hidrológica HEC-HMS 4.2 e o modelo unidimensional no HEC-RAS 6.1.

Os registros de ocorrência compilados pelo CEMADEN convergem parcialmente com as manchas de inundação obtidas neste trabalho, indicando que a cabeceira da bacia do córrego do Ipiranga apresenta suscetibilidade a inundação, porém não possui registros.

A calibração das vazões foi realizada com a ferramenta interna do software HEC-HMS 4.2, por meio da função objetivo apresentada e com ajuste dos parâmetros dentro de um determinado limiar. Como o monitoramento de chuva e vazão ocorre nos mesmos pontos, há que se considerar que o efeito da chuva a montante pode variar entre os eventos, contribuindo significativamente para alterações no valor da vazão nas seções de controle. Este fator é apresentado como uma possível justificativa para ajustes diferentes a partir de um mesmo conjunto de parâmetros calibrados. Também, as condições anteriores da bacia variam entre os eventos, o que pode alterar principalmente o parâmetro CN. Tais análises poderiam ser realizadas com maior profundidade a partir de um conjunto maior de eventos, o que não se dispõe, dado que o monitoramento é recente na bacia. Como, no entanto, o objetivo do trabalho é avaliar o dano potencial na bacia, a partir da modelagem da mancha de inundação, considera-se que os resultados estão adequados no sentido de demonstrar as áreas de inundação frequente na bacia, ainda que, em alguns eventos, o hidrograma simulado não tenha se mostrado totalmente aderido ao observado.

Assim, com o avanço das mudanças climáticas e a tendência que indica um provável aumento na frequência desse tipo de evento extremo, se mostra fundamental que estudos dessa natureza sejam desenvolvidos para mais localidades a fim de auxiliar a formação de políticas públicas que aumentem a resiliência de áreas sujeitas a inundação para que os danos que as inundações causem sejam mitigados.

As limitações deste trabalho se encontram na baixa disponibilidade de dados observados para realização da calibração da mancha de inundação. O mapeamento realizado em campo após eventos de inundação, com data, volume e duração das chuvas, é fundamental para que os resultados da simulação se aproximem ao máximo da realidade. Além disso, determinar a classe social de um imóvel e da família que habita nele somente pela sua área construída não é suficiente e pode gerar distorções, sendo necessário a investigação de outros parâmetros complementares em trabalhos futuros.

Por fim, para se obter resultados mais precisos em trabalhos futuros, ter amplo acesso a dados fluviométricos e pluviométricos observados é fundamental para calibração das manchas de inundação, para que essas sejam cada vez mais precisas e otimizem a formulação de soluções para as áreas suscetíveis a este fenômeno.

REFERÊNCIAS

- Amaral, R., & Ross, J. L. S. (2020). Legislation and management for risks reduction related to floods in São Paulo/SP, Brazil. *Sociedade & Natureza*, 32(1), 501-514. Recuperado em 4 de julho de 2022, de http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132020000100501&lng=en&nrm=iso
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 12721: avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios*. Rio de Janeiro: ABNT. Recuperado em 13 de junho de 2012, de <https://central3.to.gov.br/arquivo/176706/>
- Azizi, S., Ilderomi, A. R., & Noori, H. (2021). Investigating the effects of land use change on flood hydrograph using HEC-HMS hydrologic model (case study: Ekbatan dam). *Natural Hazards*, 109(1), 145-160. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-021-04830-6>.
- Canholi, A. P. (2012). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Feng, B., Zhang, Y., & Bourke, R. (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards*, 106(1), 613-627. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>.

- Governo do Estado de São Paulo. Departamento de Águas e Energia Elétrica. (2018). *Precipitações intensas no Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE.
- Graciosa, M. C. P. (2010). *Modelo de seguros para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações* (Tese de doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Recuperado em 4 de julho de 2022, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-29032016-112054/?lang=pt-br>
- Hamdan, A. N. A., Almuktar, S., & Scholz, M. (2021). Rainfall-runoff modeling using the HEC-HMS model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*, 8(2), 58. <http://dx.doi.org/10.3390/hydrology8020058>.
- Handayani, W., Chigbu, U. E., Rudiarto, I., & Putri, I. H. S. (2020). Urbanization and increasing flood risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: an assessment towards better land use policy and flood management. *Land*, 9(10), 343-365. <http://dx.doi.org/10.3390/land9100343>.
- Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), 1007-1019. <http://dx.doi.org/10.1029/WR003i004p01007>.
- Huțanu, E., Mișu-Pintilie, A., Urzica, A., Paveluc, L. E., Stoleriu, C. C., & Grozavu, A. (2020). Using 1D HEC-RAS modeling and LiDAR data to improve flood hazard maps accuracy: a case study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*, 12(6), 1624-1645. <http://dx.doi.org/10.3390/w12061624>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2018). *População em áreas de risco no Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 4 de julho de 2022, de <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101589.pdf>
- Jagadeesh, B., & Veni, K. K. (2021). Flood plain modelling of Krishna Lower Basin using Arcgis, Hec-Georas and Hec-Ras. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 1112(1), 12-24. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1112/1/012024>.
- Nafari, R. H., Amadio, M., Ngo, T., & Mysiak, J. (2017). Flood loss modelling with FLF-IT: a new flood loss function for Italian residential structures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(1), 1047-1059. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-2017-92>.
- Namara, W. G., Damisse, T. A., & Tufa, F. G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for flood inundation mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1449-1460. <http://dx.doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>.
- Natural Resources Conservation Service. Conservation Engineering Division. (1986). *Urban hydrology for small watersheds. Technical release 55*. Washington: Natural Resources Conservation Service. Recuperado em 4 de julho de 2022, de https://www.oregon.gov/odot/hydraulics/Docs_Hydraulics_Manual/Hydraulics-07-G-Urban-Hydrology-Small-Watersheds.pdf
- Prefeitura Municipal de São Paulo. (2010). *Bacia hidrográfica do Córrego do Ipiranga, situação atual dos córregos, planta, seções típicas*. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo. Escala 1:500.
- Prefeitura Municipal de São Paulo. (2022). *Mapeamento de risco de enchentes e inundações em assentamentos precários do município de São Paulo*. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo.
- Prefeitura Municipal de São Paulo. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. (2012). *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos: fundamentos*. São Paulo: SMDU. Recuperado em 4 de julho de 2022, de http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/manual-drenagem_v2.pdf
- Ribeiro Neto, A., Batista, L. F. D. R., & Coutinho, R. Q. (2016). Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2), 377-390. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p377-390>.
- Romali, N. S., & Yusop, Z. (2021). Flood damage and risk assessment for urban area in Malaysia. *Hydrology Research*, 52(1), 142-159. <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2020.121>.
- Song, X.-M., Kong, F.-Z., & Zhu, Z.-X. (2011). Application of Muskingum routing method with variable parameters in ungauged basin. *Water Science and Engineering*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.001>.
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1), 13768. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>.

- Tabucanon, A., Kurisu, K., & Hanaki, K. (2021). Assessment and mitigation of tangible flood damages driven by climate change in a tropical city: Hat Yai municipality, southern Thailand. *Science of The Total Environment*, 789, 147983. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147983>.
- United States Army Corps of Engineers. (2021, 08 de abril). *Hydrologic modelling system – release notes*. Recuperado em 12 de julho de 2022, de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.8/release-notes/v-4-8-0-release-notes>
- Urbani, G. L., Graciosa, M. C. P., & Valverde, M. C. (2021). Curva de prejuízo por inundações para valoração de danos estruturais às edificações – estudo de caso da bacia do Córrego Ipiranga – São Paulo – SP. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (pp. 1-10). Santo André: UFABC. Recuperado em 12 de junho de 2022, de <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?job=12916>
- Wing, O. E. J., Pinter, N., Bates, P. D., & Kousky, C. (2020). New insights into US flood vulnerability revealed from flood insurance big data. *Nature Communications*, 11(1), 1444. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-15264-2>.
- Zhou, Q., Leng, G., Su, J., & Ren, Y. (2019). Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: importance of urban planning and drainage adaptation. *Science of The Total Environment*, 658, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184>.

Contribuições dos autores:

Gustavo Lopes Urbani: escrita do texto, execução da metodologia, discussão dos resultados e conclusão.

Melissa Cristina Pereira Graciosa: orientação na metodologia e correção do texto.

Maria Cleofé Valverde: orientação na metodologia e correção do texto.