

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA COMO SUBSÍDIO À ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO EM ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE: O CASO DO JARDIM SÃO NORBERTO E BOM CLIMA – SÃO PAULO, SP

*Yasmin Marcos¹ ; Nicole del Busso Fernandes²; Luciana Rodrigues Fagnoni Costa Travassos³ &
Melissa Cristina Pereira Graciosa⁴*

RESUMO

Como uma maneira de fornecer subsídios para o estabelecimento de diretrizes de intervenção para o piloto previsto e selecionado no projeto Territórios da Água, este trabalho visou efetuar o diagnóstico hidrológico através da modelagem hidrológica-hidráulica. A bacia piloto selecionada é a do Ribeirão Parelheiros e objeto de estudo é a região do Jardim São Norberto e Bom Clima, localizada na bacia do Córrego Itaim, afluente da margem direita da bacia principal, nas fronteiras dos distritos Parelheiros e Grajaú, onde a precariedade dos cursos d'água, a ocupação nas áreas de preservação permanente e ocorrência recorrente de inundações configuram um cenário de risco hidrológico alto (R3, segundo a Defesa Civil). Além disso, motivada pelas inundações, a população executou uma barreira física em um ponto crítico e inverteu o fluxo de um dos córregos para a bacia vizinha. As simulações hidrológicas e hidráulicas foram realizadas utilizando os softwares HEC-HMS e HEC-RAS. Apesar da limitação de dados, as manchas de inundação resultantes destacaram as áreas já conhecidas como pontos críticos e reproduziram satisfatoriamente a realidade e possuem qualidade suficiente para contribuir nas tomadas de decisão quanto às estratégias de intervenção para a área.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológico-hidráulica; Manchas de inundação; Áreas de Preservação Permanente

ABSTRACT

In order to support the establishment of intervention guidelines for the pilot area selected under the Territórios da Água project, this study aimed to perform a hydrological diagnosis through hydrologic-hydraulic modeling. The selected pilot watershed is the Ribeirão Parelheiros basin, and the study area comprises the Jardim São Norberto and Bom Clima neighborhoods, located within the Itaim Stream sub-basin, a right-bank tributary of the main basin, on the border between the Parelheiros and Grajaú districts. In this area, the poor condition of watercourses, occupation within Permanent Preservation Areas (PPAs), and the recurrent occurrence of flooding characterize a high hydrological risk scenario (R3, according to the Civil Defense). In addition, driven by flood events, residents built a physical barrier at a critical point and diverted the flow of one of the streams into a neighboring basin. Hydrologic and hydraulic simulations were carried out using the HEC-HMS and HEC-RAS software packages. Despite data limitations, the resulting flood inundation maps highlighted areas already known as critical hotspots, adequately reproduced observed conditions, and proved sufficiently reliable to support decision-making regarding intervention strategies for the area.

1) Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC – UFABC, Al. da Universidade, s/n - Anchieta, São Bernardo do Campo – SP, 09606-045, marcos.yasmin@yahoo.com.br

2) Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do ABC - UFABC, Av. dos Estados, 5001, Bairro Bangu CEP: 09280-560, nicolebusso@gmail.com

3) Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC – UFABC, Al. da Universidade, s/n - Anchieta, São Bernardo do Campo – SP, 09606-045, luciana.travassos@ufabc.edu.br

4) Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC – UFABC, Av. dos Estados, 5001, Bairro Bangu, Santo André – SP, 09210-580, melissa.graciosa@ufabc.edu.br

Key-words – Hydrologic-hydraulic modeling; Flood inundation maps; Permanent Preservation Areas

INTRODUÇÃO

O Territórios da Água é um projeto de pesquisa, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através do Programa de Pesquisa em Políticas Públicas, cujo produto principal é a elaboração do Programa de Conservação e Recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APP) no Município de São Paulo como produto da Ação 1 do PLANPAVEL (SVMA, 2025) a partir de uma parceria entre a Universidade Federal do ABC, a Secretaria do Verde e Meio Ambiente (SVMA) da cidade de São Paulo e o Observatório Nacional dos Direitos à Água e do Saneamento (Ondas).

Pautado na necessidade de alteração na maneira como as APP são abordadas e na relevância de uma perspectiva multidisciplinar que considere todas as complexidades e individualidades de cada área de preservação permanente, é de extrema importância o desenvolvimento de propostas técnicas e científicas que possam subsidiar a mudança no processo de intervenções nessas áreas, assim como preconizado em Ferreira (2021). Nesse contexto, iniciou-se o desenvolvimento de um projeto piloto como um meio para a construção do programa, sendo suporte para a construção de tipologia, prioridades, diretrizes e propostas. A bacia hidrográfica escolhida foi a do Ribeirão Parelheiros, na zona do sul de São Paulo, e a articulação iniciada entre SVMA e a Secretaria Executiva do Programa Mananciais (SEPM) foi fortalecida pela assinatura de um Termo de Cooperação Técnica entre as secretarias.

É bastante consolidado o conceito de que os sistemas de drenagem urbana devem ser, de maneira imprescindível, integrados ao processo de planejamento urbano, além de dispor de critérios gerais de projeto, manutenção e operação (CANHOLI, 2014; BRAGA, 1994; SHEAFFER e WRIGHT, 1982). Quanto aos aspectos hidrológicos, geralmente estão envolvidas diretrizes relacionadas a quantificação do escoamento superficial, picos de vazão e obtenção de manchas de inundação (CANHOLI, 2014). E, sendo assim, como o objetivo principal deste trabalho é fornecer subsídios para a definição das estratégias de intervenções nas áreas de preservação permanente de cursos d'água da bacia piloto, a definição do deflúvio será realizada através da modelagem hidrológica-hidráulica.

ÁREA DE ESTUDO

Neste caso específico, a área de estudo se trata do Jardim São Norberto e Bom Clima, localizados nas fronteiras dos distritos de Parelheiros e Grajaú, inserido na bacia de um afluente sem denominação do Córrego Itaim, que por sua vez, é afluente da margem direita do Ribeirão Parelheiros,

que deságua na Represa Guarapiranga, e é objeto do projeto piloto. Além disso, é importante ressaltar que uma extensão significativa dos cursos d'água inseridos na área urbana do objeto de estudo possui suas áreas de preservação permanente ocupadas por assentamentos precários.

Na região há um ponto do curso d'água em que, por iniciativa da população residente na área e motivada pela ocorrência de inundações a jusante, foi executada uma barreira física que, associada ao antigo Ramal de Jurubatuba (antiga linha ferroviária Sul da Fepasa) e corte do divisor de águas para passagem da via férrea, resultou em uma mudança na direção do fluxo do escoamento do corpo hídrico sentido à bacia limítrofe (Ribeirão Varginha), uma contribuição de aproximadamente 0,42 km². Na figura a seguir está ilustrada a localização da área de estudo bem como o ponto de mudança de direção do córrego.

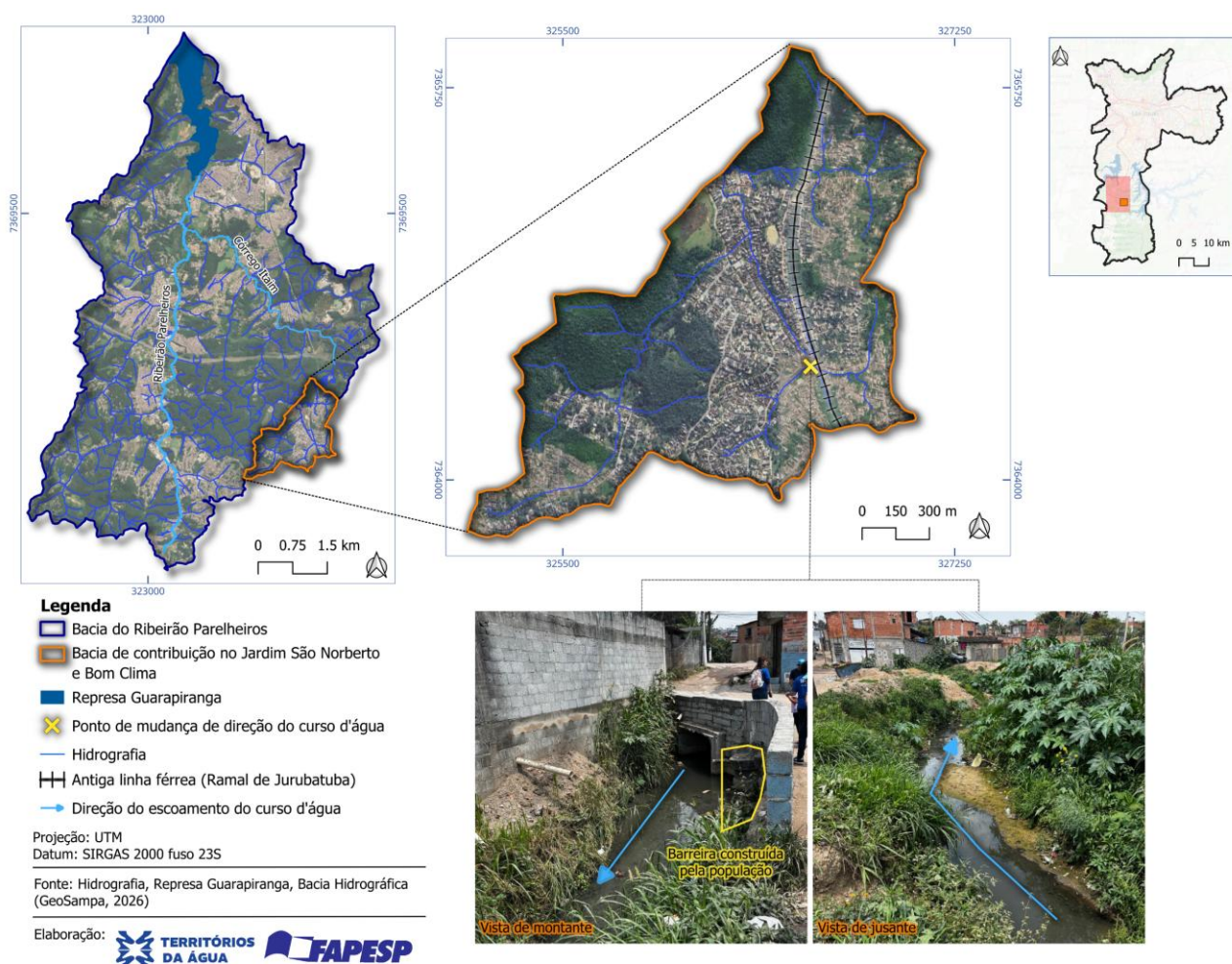


Figura 1 - Localização da área de estudo e do ponto de inversão de fluxo. Fonte: Elaborado pelas autoras.

A situação dos cursos d'água é bastante precária na região, fluindo em canal natural com profundidade baixa (cerca de meio metro, no máximo) e em alguns pontos com as margens ocupadas até quase a cota de fundo do córrego bem como por cima do curso d'água. Há presença de travessias implantadas pela própria população e alguns locais canalizados em galeria fechada, cujas

características hidráulicas e estruturais não obtivemos acesso. Também existem diversas vielas bastante declivosas na área que possuem propensão elevada para formação de enxurradas. Além disso, conforme avaliação da Defesa Civil (2023), há trechos do córrego que estão inseridos dentro de setor de risco hidrológico R3 (alto). Na figura a seguir estão ilustrados os limites do setor de risco bem como alguns registros fotográficos realizados *in loco*.



Figura 2 – Limites do setor de risco e registro fotográfico. Fonte: Elaborado pelas autoras.

METODOLOGIA

De maneira a quantificar os fluxos de escoamento superficial, principalmente nas Áreas de Preservação Permanente do projeto piloto, foram realizadas modelagens hidrológica e hidráulica com o objetivo de avaliar o impacto hidrológico na região bem como obter a delimitação de manchas de inundação para diferentes tempos de retorno (TR). É importante ressaltar que ambas as modelagens não foram calibradas com dados observados devido à falta destes, o que ocasiona uma limitação relevante nos resultados obtidos.

Modelagem Hidrológica

Na fase de modelagem e simulação hidrológica, foi utilizado o software aberto e gratuito

HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* para simular os processos de transformação chuva-vazão na área de estudo. O método selecionado foi o NRCS (*Natural Resources Conservation Service* – antigo SCS, 1986) devido a sua facilidade de aplicação e maior simplicidade de parâmetros. Nesse método, o escoamento superficial é quantificado a partir da precipitação, baseando-se no *Curve Number* (CN), um parâmetro que varia de 0 a 100 e relaciona o grupo hidrológico do solo, a condição anterior de umidade e o uso e ocupação do solo.

Dessa forma, na tabela a seguir estão relacionadas as metodologias utilizadas para cada parâmetro necessário nas simulações, realizadas para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos e durações de 1 hora, 1 hora e 30 minutos e 2 horas. Para os resultados, foi considerada a duração de chuva que forneceu a maior vazão de projeto.

Tabela 1 - Características da simulação hidrológica na plataforma HEC-HMS

HEC-HMS	Parâmetro	Equação / Método	Fonte
Time Series Data: Precipitation Gages	$i_{t,T} = 32,77(t + 20)^{-0,8780} + 16,10(t + 30)^{-0,9306} .$		
	Chuva de projeto	$\left[-0,4692 - 0,8474 \ln \ln \left[\frac{T}{T-1} \right] \right] \quad (1)$ para $10 \leq t \leq 1440$ minutos. Onde: i é a intensidade da chuva (mm/min), t é a duração da chuva (min) e T é o período de retorno (anos).	Martinez e Piteri, 2015; DAEE, 2018
	Distribuição temporal da chuva	Método de Huff - 1º quartil	Huff, 1967
Loss: SCS Curve Number	Curve Number (CN)	Avaliação do coeficiente CN para a bacia do Alto Tietê, originada no âmbito do Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê (PDMAT) - cálculo ponderado por área da sub-bacia. Método Cinemático - áreas urbanas: $t_c = \frac{1}{60} \sum L_i \cdot V_i \quad (2)$ Onde: L_i é o comprimento de cada trecho (m) e V_i é a velocidade de escoamento no trecho “i” (m/s). Método de Kirpich - áreas rurais: $t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385} \quad (3)$ Onde: L é comprimento do talvegue (km) e S é a declividade do talvegue (m/km). Lag time - tempo de retardo: $lag\ time = 0,6 \cdot t_c \quad (4)$ Onde: <i>lag time</i> (ou tempo de retardo) é o intervalo entre o momento de maior intensidade da chuva e o pico de vazão (minutos) e t_c é o tempo de concentração (minutos).	Kutner <i>et al.</i> , 2001
Transform: SCS Unit Hydrograph	Tempo de concentração		Instrução Técnica DPO nº 11 (DAEE, 2017); São Paulo, 2012
Routing: Kinematic Waves	Amortecimento dos canais	Onda cinemática	(MacArthur e De Vries, 1993)

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Como já exposto anteriormente, o Jardim São Norberto e Bom Clima estão localizados dentro dos limites da bacia do Ribeirão Parelheiros, mais precisamente na sub-bacia de um dos afluentes do Córrego Itaim (Parelheiros). Na figura a seguir está ilustrada a topologia de simulação hidrológica com destaque para a área de estudo.

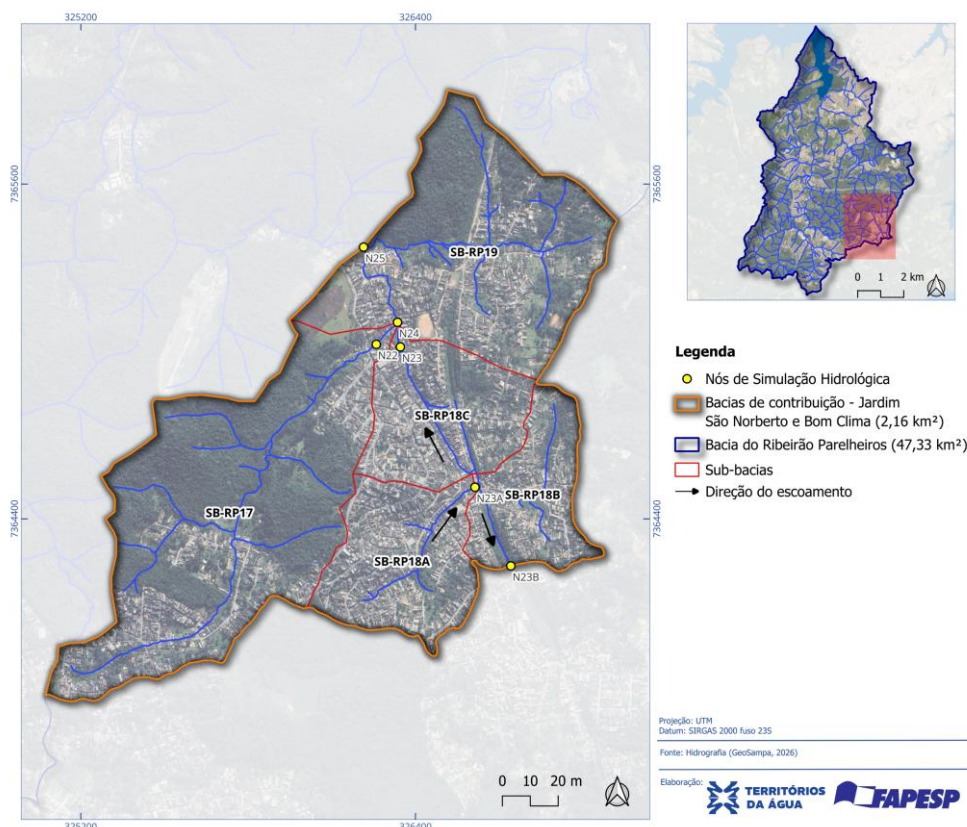


Figura 3 - Topologia de simulação hidrológica com enfoque para a área de estudo. Fonte: Elaborada pelas autoras.

Os parâmetros calculados e inseridos no modelo para simulação hidrológica estão relacionados na tabela a seguir.

Tabela 2 - Parâmetros de simulação hidrológica no HEC-HMS

Sub bacia	Área (km²)	Trecho	I (m/m)	Comprimento de talvegue (m)	Tempo de Concentração (min)	Lag Time (min)	CN
SB-RP17	0,84	Rural	0,396	2.180,10	25,69	15,42	72
SB-RP18A	0,26	Urbano	0,083	1.010,47	11,66	6,99	85
SB-RP18B	0,19	Urbano	0,223	949,37	7,72	4,63	85
SB-RP18C	0,26	Urbano	0,062	1.055,54	13,85	8,31	85
SB-RP19	0,61	Rural	0,758	1.219,47	13,30	7,98	77

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Modelagem Hidráulica

Após a modelagem hidrológica, prosseguiu-se com a modelagem hidráulica da área de estudo. O software utilizado foi o HEC-RAS® (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*)

desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* com o objetivo de simular o escoamento no curso d'água e obter as manchas de inundação para diferentes períodos de retorno e subsidiar as estratégias de intervenção na área de estudo.

Para a simulação hidráulica, foi elaborado um modelo digital de elevação (arquivo tipo *raster*) a partir da interpolação de dados de altimetria, tais como curvas de nível e pontos cotados, provenientes da plataforma GeoSampa, mapa digital do município de São Paulo, bem como do levantamento planialtimétrico topográfico parcial da área, disponibilizado pela Secretaria Executiva do Programa Mananciais (SEPM).

As seções transversais foram geradas utilizando ferramentas SIG (QGIS - 3.34.15 - Prizren) e exportadas ao HEC-RAS através de arquivos do tipo *shapefile* e os dados de geometria considerados foram considerados os do modelo digital de elevação elaborado. É importante ressaltar que as travessias existentes não foram consideradas devido à falta de informações provenientes do levantamento planialtimétrico utilizado.

Os coeficientes de rugosidade foram definidos conforme visita *in loco* bem como consulta na literatura técnica. Sendo assim, para o canal principal foi considerado, de acordo com Chow (1959) e Brunner (2020), o coeficiente referente a canais naturais com algumas pedras, vegetação, taludes e seções inefetivos, cujo valor de “n” é 0,048; e, para as margens direita (*right overbank* - ROB) e esquerda (*left overbank* - LOB) foi considerado o coeficiente de rugosidade para concreto sem acabamento com valor de 0,017.

A modelagem hidráulica foi realizada considerando escoamento em regime permanente uniforme e as vazões de projeto e condições de contorno consideradas (profundidade normal para todos os casos) estão expostas nas tabelas a seguir.

Tabela 3 - Condições de contorno de simulação hidráulica no HEC-RAS e vazões de projeto para chuva de duração de 2 horas

Curso d'água	Trecho	Vazões						Condições de contorno	
		TR002	TR005	TR010	TR025	TR050	TR100	Upstream ¹	Downstream ¹
Córrego Invertido	Reach 6	2.226	3.95	5.411	7.41	8.941	10.5	0.0077	0.0077
Córrego Rua do Canal	Reach 4	1.009	2.563	3.921	5.85	7.407	9.029	0.0123	Junction = Junction_1
Córrego São Norberto	Reach 5	1.299	2.308	3.042	4.153	5.011	5.885	0.0126	Junction = Junction_1
Córrego São Norberto	Reach 5.1	1.942	4.318	6.228	9.061	11.354	13.758	Junction = Junction_1	0.0089

¹Valores de declividade em m/m.

Fonte: Elaborado pelas autoras.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a execução das simulações hidrológica e hidráulica da área de estudo, foram obtidas as delimitações das manchas de inundação para a área do Jardim São Norberto e Bom Clima. Foi

considerada a inversão do córrego nas simulações, porém ainda não foi avaliado como essa peculiaridade impacta na bacia vizinha (Ribeirão Varginha). É possível afirmar de antemão que dois dos cenários para o prognóstico a ser realizado em breve é a consideração da reversão do córrego para seu fluxo inicial/natural ou validar a inversão do córrego e incorporar sua área de contribuição para a bacia vizinha.

Na figura a seguir estão ilustradas as manchas de inundação para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

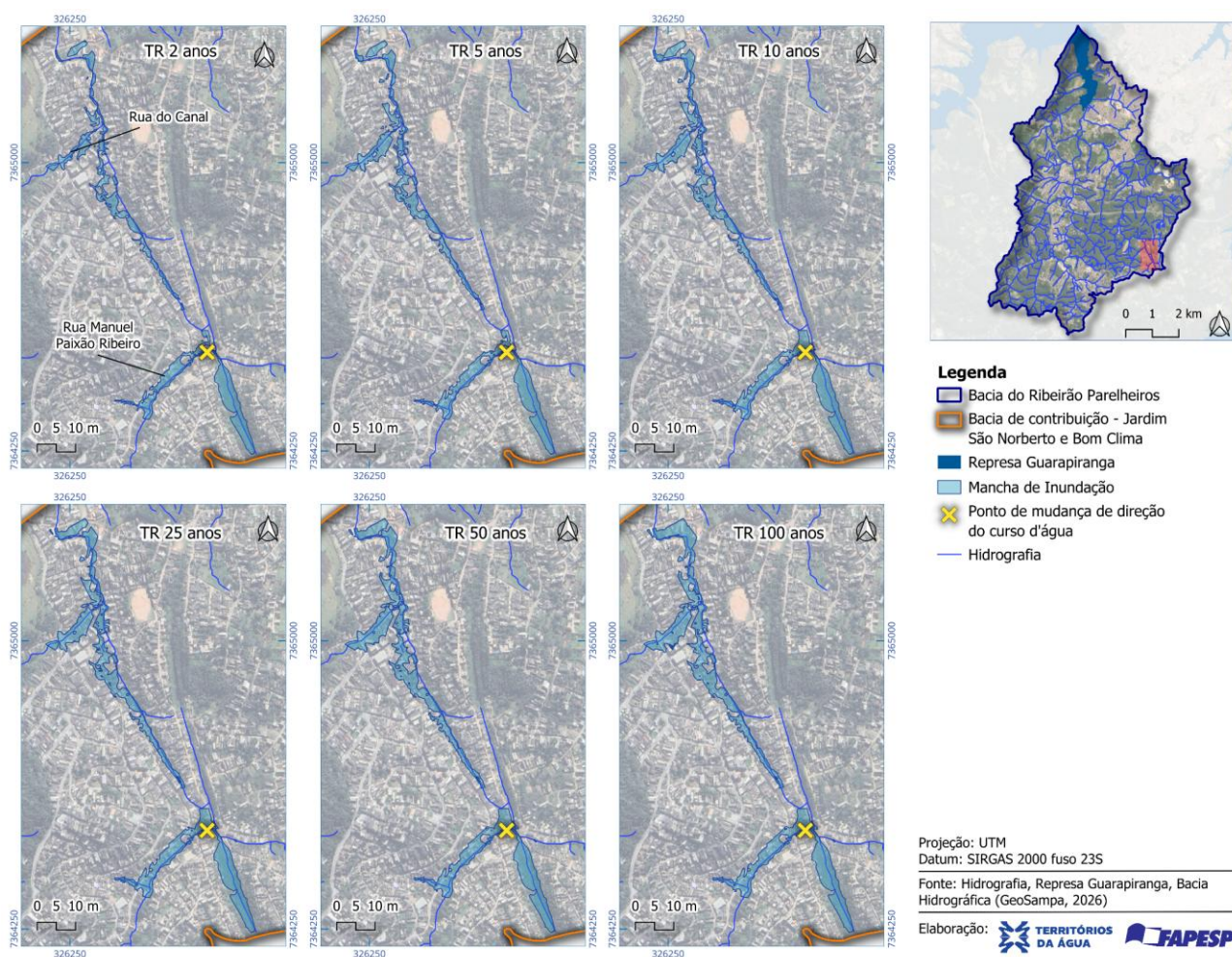


Figura 4 - Manchas de inundação no Jardim São Norberto e Bom Clima. Fonte: Elaborada pelas autoras.

A partir dos resultados obtidos é possível observar uma progressão no tamanho da mancha para cada tempo de retorno (do menor para o maior). O destaque seria para as Ruas Manuel Paixão Ribeiro e do Canal (indicadas sobre a mancha de TR 2 anos na Figura 4), cujos relatos da população residente já apontavam ocorrências de inundação e observadas nos resultados dessas simulações.

De acordo com os Relatórios HPA-05 e HPA-06 da Defesa Civil do Município de São Paulo (2023), aproximadamente 210 moradias são afetadas pelos eventos de inundação. Vale ressaltar que

essa quantidade se refere apenas ao perímetro de risco delimitado, excluindo a Rua do Canal, por exemplo.

Apesar da falta de dados de todos os trechos do córrego, principalmente das estruturas existentes e extensões canalizadas, os resultados foram satisfatórios para atender ao seu propósito, visto que as manchas incorporaram as principais localidades que eram conhecidas como pontos de inundação e fornece o panorama geral do restante da área.

Dessa forma, os resultados aqui obtidos possuem qualidade suficiente para subsidiar as estratégias e tomadas de decisão quanto às intervenções a serem realizadas nessas áreas de preservação permanente bem como diagnosticar quais moradias e quantos cidadãos estão expostos ao risco desses eventos.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que a modelagem hidrológica-hidráulica desempenhou um papel adequado como ferramenta para o diagnóstico das áreas críticas de inundação no Jardim São Norberto e Bom Clima, permitindo identificar e validar de maneira apropriada os principais pontos críticos na região, mesmo que não sendo possível calibrá-los com dados observados. Além disso, mesmo diante das limitações associadas à ausência de dados completos das estruturas hidráulicas e trechos canalizados, as simulações resultaram em manchas de inundação que apresentaram consistência suficiente para serem utilizadas como subsídio para o planejamento de diretrizes e intervenções nas áreas de preservação permanente da bacia piloto.

Portanto, este estudo reforça a importância de integrar abordagens técnicas, territoriais e institucionais na formulação de estratégias de conservação e recuperação ambiental. Como encaminhamento futuro, recomenda-se o aprofundamento nos estudos acerca da inversão do fluxo do córrego para a bacia limítrofe, bem como o refinamento da base de dados provenientes do levantamento planialtimétrico cadastral visando a melhor confiabilidade nos estudos de cenários futuros e qualificar tecnicamente da melhor maneira o processo decisório no âmbito do projeto Territórios da Água.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio para o desenvolvimento da pesquisa (Processo FAPESP nº 2024/20951-4) e a todos os colegas pesquisadores do projeto intitulado “Territórios da Água: Programa de Conservação e Recuperação de Áreas de Preservação Permanente no Município de São Paulo” (Processo FAPESP nº 2023/10072-0).

REFERÊNCIAS

- BRAGA, B. D. F. (1994). “Gerenciamento urbano integrado em ambiente tropical” in Anais do Seminário de Hidráulica Computacional Aplicada a Problemas de Drenagem Urbana, São Paulo, Ago. 1994.
- BRUNNER, G. W. (2020). “HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual”. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA, 482 p.
- CANHOLI, A.P. (2014). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2 ed., 384 p.
- CHOW, V. T. (1959). “Open-Channel Hydraulics”. McGraw-Hill, New York, 680 p.
- CURTI, D. K.; SILVA, O. B. (2023). “Mapeamento de risco de enchente e inundação em assentamentos precários: Relatório HPA-05 Jd. São Norberto I”. São Paulo: Coordenação Municipal de Defesa Civil - COMDEC.
- CURTI, D. K.; SILVA, O. B. (2023). “Mapeamento de risco de enchente e inundação em assentamentos precários: Relatório HPA-06 Jd. São Norberto II”. São Paulo: Coordenação Municipal de Defesa Civil - COMDEC.
- DAEE - CTH. (2018). “Precipitações Intensas na Bacia do Alto Tietê”. São Paulo, 75 p. Disponível em: <https://www.spaguas.sp.gov.br/site/hidrologia/>
- DAEE (2017). “Instrução Técnica DPO nº 11, de 30 de maio de 2017”. São Paulo, 10 p.
- FERREIRA, R.C. (2021). “A preservação das margens dos rios urbanos na legislação da Federação Brasileira: atritos entre o território normado e o território como norma”. Boletim Campineiro de Geografia 11(1), pp. 45–58.
- HUFF, F.A. (1967). “Time distribution of rainfall in heavy storms”. Water Resources Research, 3 (4), p. 1007-1019.
- KUTNER, A. S.; CONTE, A. E.; NITTA, T. (2001). “Análise geológica e caracterização dos solos para avaliação do coeficiente de escoamento superficial na Bacia do Alto Tietê” in Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, Nov. 2001.
- MARTINEZ, F.; PITERI, R. F.; LOBO, G. A. (2015). “Precipitações intensas na Bacia do Alto Tietê” in Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Nov. 2015.
- MACARTHUR, R.; DE VRIES, J. J. (1993). “Introduction and Application of Kinematic Wave Routing Techniques Using Hec-1 - TD-10”. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA, 68 p.
- NRCS (1986). “TR-55 - Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55”. 2º ed. USDA: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO – SECRETARIA MUNICIPAL DO VERDE E MEIO AMBIENTE – SVMA (2025). “Projeto Territórios da Água”. Disponível em: https://capital.sp.gov.br/web/meio_ambiente/w/projeto-territ%C3%B3rios-da-%C3%A1gua
- SHEAFFER, J. R.; WRIGHT, K. R. (1982). *Urban storm drainage management*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- SÃO PAULO (2012). “Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos”. São Paulo, SMDU, 220 p. il. v.2.