

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DOS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO EM CANAL URBANO AMAZÔNICO: ESTUDO DO CANAL DA PENHA, PORTO VELHO/RO

*Luis Henrique Bergonzini Souza¹; Tatiane Emilio Checchia²; José Emanuel dos Santos Mourão³
& Diego Henrique de Almeida⁴*

RESUMO – A urbanização desordenada em cidades amazônicas intensifica problemas de drenagem urbana, sobretudo em bacias submetidas à impermeabilização do solo, à retificação de canais e à ocupação de áreas naturalmente suscetíveis a alagamentos. Este artigo avalia os impactos da urbanização na hidrodinâmica de um trecho do Canal da Penha, em Porto Velho/RO, por meio de caracterização fisiográfica, levantamento topográfico, dados de campo, Modelo Digital de Elevação e simulações com os softwares SewerGEMS e OpenFlows FLOOD. Foram analisados três cenários: sistema sem modificações, sistema com modificações estruturais e sistema modificado submetido a evento com tempo de retorno de 50 anos. Os resultados indicaram melhora no desempenho para o evento de calibração; contudo, no cenário TR 50, o sistema permaneceu hidraulicamente insuficiente, com transbordamento em 21 das 29 seções avaliadas, lâmina d'água/elevação de até 141,6%, vazões superiores a 52 m³/s e velocidades críticas em trechos da microdrenagem. Conclui-se que intervenções pontuais não asseguram resiliência hidrológica, sendo necessária abordagem integrada em escala de bacia hidrográfica.

Palavras-Chave – Drenagem urbana; modelagem hidrodinâmica; bacia urbana.

ABSTRACT– Unplanned urbanization in Amazonian cities intensifies urban drainage problems, especially in watersheds affected by soil sealing, channel rectification and occupation of flood-prone areas. This paper evaluates the impacts of urbanization on the hydrodynamics of a reach of the Penha Channel, in Porto Velho, Rondônia, Brazil, using physiographic characterization, topographic survey, field data, a digital elevation model and simulations with SewerGEMS and OpenFlows FLOOD. Three scenarios were analyzed: the system without modifications, the system after structural modifications and the modified system under a rainfall event with a 50-year return period. Results indicated improved performance for the calibration event; however, under TR 50, the system remained hydraulically insufficient, with overflow in 21 of 29 cross sections, water depth/elevation up to 141.6%, peak flows above 52 m³/s and critical velocities in stormwater pipes. It is concluded that isolated interventions do not ensure hydrological resilience, and an integrated watershed-scale approach is required.

Key-words – Urban drainage; hydrodynamic modeling; urban watershed.

¹) Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho/RO, luishenriquebergsouza@outlook.com

²) Docente do Departamento de Engenharia Civil, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho/RO, tatiane@unir.br

³) Discente de graduação do Departamento de Engenharia Civil, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho/RO, josemanueldossantosmourao@gmail.com

⁴) Docente do Departamento de Engenharia Civil, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho/RO, diego.almeira@unir.br

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de alagamentos, enchentes e inundações em áreas urbanas brasileiras está associada à deficiência do planejamento urbano, à ocupação inadequada de fundos de vale e à insuficiência dos sistemas de drenagem. Quando a expansão urbana ocorre dissociada da dinâmica natural das bacias hidrográficas, há alteração da relação entre precipitação, infiltração e escoamento superficial, com aumento dos picos de vazão e da frequência de extravasamentos (Tucci, 2002; Tucci e Bertoni, 2003).

A literatura recente também aponta que urbanização e mudanças climáticas atuam de forma combinada na ampliação do risco hidrológico em áreas urbanas. O IPCC (2023) destaca o aumento dos riscos associados a eventos extremos em sistemas urbanos, enquanto estudos sobre a Amazônia indicam intensificação de extremos hidrológicos, incluindo secas e cheias, com efeitos sobre infraestrutura, transporte, abastecimento e populações vulneráveis (Silva et al., 2023; Espinoza et al., 2024).

Em cidades amazônicas, esse problema apresenta particular complexidade devido à elevada variabilidade pluviométrica, à presença de igarapés urbanos, à ocupação de áreas de baixa declividade e à reduzida disponibilidade de séries históricas locais de chuva, nível e vazão. Em Porto Velho/RO, a bacia do Canal da Penha constitui exemplo representativo de interferência urbana sobre um sistema natural de drenagem, com histórico de alagamentos relacionado à retificação do igarapé, à urbanização consolidada e à insuficiência hidráulica de trechos da micro e da macrodrenagem.

Diante desse contexto, este artigo tem como objetivo avaliar os impactos da urbanização na hidrodinâmica de um trecho do Canal da Penha, em Porto Velho/RO, por meio da análise de cenários simulados de drenagem urbana, considerando a condição de calibração, o sistema com modificações estruturais e um evento de projeto com tempo de retorno de 50 anos.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Canal da Penha, localizada no município de Porto Velho, capital do estado de Rondônia, como mostrado na figura 1. O curso principal do canal possui aproximadamente 1,34 km de extensão, área total de contribuição de 225,22 ha e perímetro de 10,40 km.

O clima de Porto Velho é caracterizado por temperaturas elevadas, alta umidade relativa do ar e sazonalidade pluviométrica bem definida. Segundo as Normais Climatológicas do INMET para o

período de 1991–2020, a precipitação média anual no município é de aproximadamente 2.255,1 mm, com maiores acumulados entre novembro e abril. A estação menos chuvosa concentra-se principalmente entre junho e agosto, com acumulados médios mensais inferiores a 50 mm (INMET, 2022).

A combinação entre relevo suavemente ondulado, setores de baixa declividade, proximidade do lençol freático em determinados trechos e crescente impermeabilização urbana favorece a rápida geração de escoamento superficial. Essa condição é particularmente relevante em bacias urbanizadas com pequeno tempo de concentração, nas quais a rede de drenagem pode ser rapidamente sobrecarregada durante eventos intensos de curta duração.

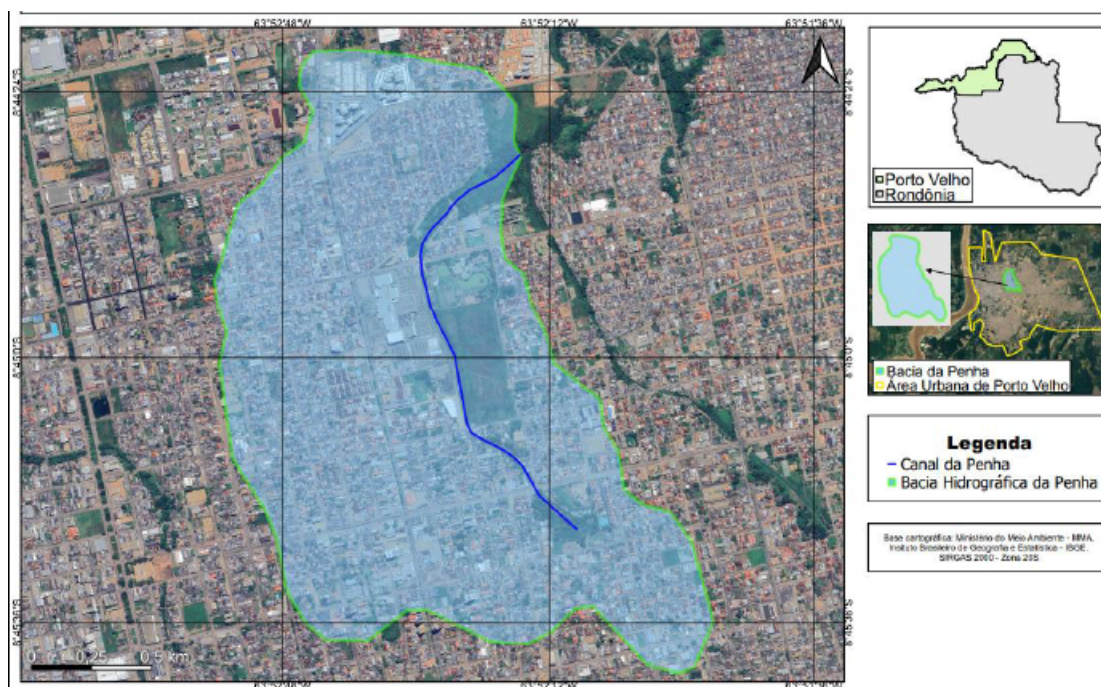


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Canal da Penha em Porto Velho/RO.

A escolha da bacia justifica-se pelo histórico de alagamentos, pela presença de áreas urbanizadas próximas ao canal e pela relevância do caso para a discussão sobre drenagem urbana em cidades amazônicas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A drenagem urbana tradicional é composta por sistemas de microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem compreende sarjetas, bocas de lobo, galerias pluviais e condutos, enquanto a macrodrenagem envolve canais, cursos d'água e estruturas de maior porte responsáveis pela condução dos volumes acumulados nas áreas urbanas (Tucci; Bertoni, 2003).

A substituição da cobertura vegetal por pavimentos, edificações e vias reduz a interceptação da chuva, diminui a infiltração e amplia o escoamento superficial. Esse processo altera o hidrograma da bacia, reduz o tempo de concentração e aumenta a vazão de pico, elevando o risco de alagamentos e transbordamentos (Tucci, 1995; Muñoz-Villers; McDonnell, 2013; Ferreira et al., 2022).

Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos constituem ferramentas essenciais para avaliar sistemas de drenagem em ambientes urbanos complexos. Estudos recentes indicam que a adequada representação da topografia, da infiltração e da capacidade hidráulica da rede é decisiva para simular inundações urbanas de curta duração e resposta rápida (Ming; Liang; Jiang, 2025). Modelos acoplados, que integram rede subterrânea de drenagem e escoamento superficial, permitem compreender como a estrutura da rede influencia vazões de pico, profundidades e áreas inundadas (Wu et al., 2025).

Além das soluções estruturais convencionais, a literatura recente tem reforçado a importância de soluções baseadas na natureza e de infraestrutura verde-azul para reduzir picos de escoamento, ampliar áreas de retenção e aumentar a resiliência urbana frente a eventos extremos (Manes et al., 2024; Zhou et al., 2024). Em bacias amazônicas urbanizadas, tais estratégias devem ser articuladas ao controle do uso do solo e à preservação de áreas de amortecimento natural.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa compreendeu cinco etapas: delimitação da área de estudo, caracterização fisiográfica da bacia, coleta de dados em campo, elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) e simulação hidrológica/hidrodinâmica dos cenários. A bacia possui 225,22 ha (2,25 km²), comprimento axial de 1,34 km, largura média de 0,86 km, perímetro de 10,40 km, coeficiente de compacidade de 1,94, fator de forma de 0,64 e índice de conformação de 1,25. As cotas variam de 72,8 m a 97,3 m, com amplitude altimétrica de 24,5 m e declividade média de 1,14 cm/m.

O tempo de concentração adotado foi de 24 min, obtido na simulação da seção de lançamento da microdrenagem. A equação de Kirpich foi considerada limitada para representar a área urbana modelada, pois a bacia apresenta trechos canalizados, condutos, áreas impermeabilizadas e interferências antrópicas que alteram a resposta hidrológica em relação a bacias naturais ou rurais.

Os levantamentos de campo envolveram obtenção de dados da geometria do canal e do sistema de drenagem, medições de vazão, levantamento topográfico com RTK e uso do equipamento ADCP M9 RiverBoat. O MDE permitiu representar a variação altimétrica da área de

estudo e evidenciou topografia predominantemente plana, condição que influencia o escoamento superficial e favorece a formação de áreas alagáveis em setores de menor cota.

As simulações foram realizadas nos softwares SewerGEMS, para representação 1D da micro e da macrodrenagem, e OpenFlows FLOOD, para simulação 2D da lâmina d'água superficial. O ajuste do modelo utilizou o evento de 28/03/2020, registrado na estação 863008/ANA, com duração de 6 h, maior lâmina de 24 mm em 15 min e tempo de retorno estimado em aproximadamente 17 anos.

A calibração foi realizada por aderência observacional, comparando as manchas de alagamento simuladas com registros disponíveis do evento, incluindo localização das áreas alagadas, pontos de transbordamento e coerência hidráulica dos trechos críticos. Foram avaliadas variáveis simuladas como relação lâmina d'água/altura da seção nos condutos, lâmina d'água/elevação no canal, vazões máximas e velocidades. Não foram aplicadas métricas estatísticas, como RMSE, NSE ou erro percentual, devido à inexistência de séries observadas contínuas de nível d'água e vazão no canal durante o evento, o que constitui limitação metodológica do estudo.

Foram avaliados três cenários: sistema sem modificações, sistema com modificações para o mesmo evento de 28/03/2020 e sistema modificado submetido à chuva TR 50 anos. As intervenções simuladas consistiram na reconfiguração geométrica das seções 3 a 8 do canal principal, em trecho associado à conexão entre microdrenagem e macrodrenagem. Essas alterações tiveram como finalidade ampliar a capacidade de armazenamento e condução, reduzir o represamento nas saídas da microdrenagem e melhorar a transferência do escoamento superficial para o sistema de macrodrenagem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No cenário de calibração, correspondente à condição do sistema antes das modificações estruturais, a simulação indicou a ocorrência de alagamentos e transbordamentos no canal principal, com lâminas d'água superficiais variando, aproximadamente, entre 0,10 m e 0,60 m, conforme apresentado na Figura 2. A distribuição espacial das áreas impactadas mostrou concentração dos alagamentos nas proximidades do canal e em setores urbanizados adjacentes, evidenciando a influência da baixa capacidade de escoamento e da ocupação urbana sobre a resposta hidrodinâmica da bacia.

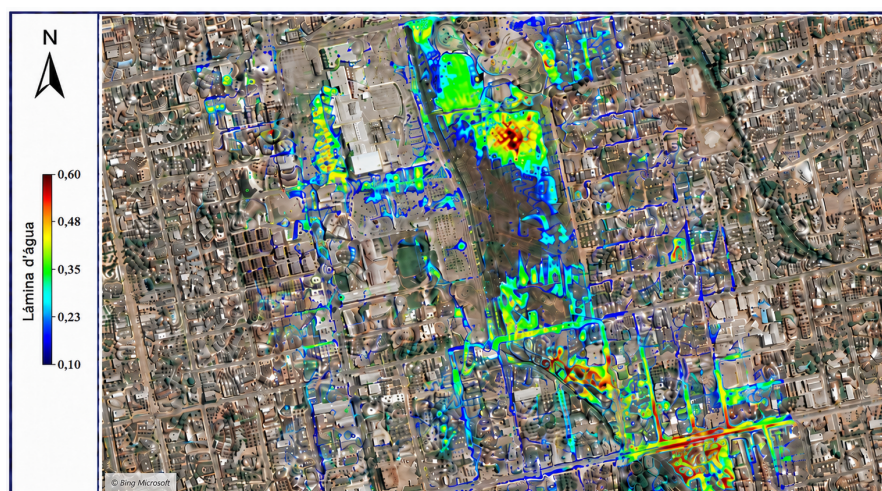


Figura 2. Área impactada no evento de calibração com sistema sem modificações. Escala de cores: lâmina d'água sobre a superfície, em metros, variando de 0,10 m a 0,60 m.

Na modelagem unidimensional, verificou-se que parte dos condutos próximos às áreas de lançamento operou em regime forçado, com relação entre a lâmina d'água e a altura da seção igual a 100%. No canal principal, aproximadamente metade das seções avaliadas apresentou lâmina superior à capacidade da seção, com valores máximos entre 100,4% e 132,2%, caracterizando transbordamento em diferentes pontos do sistema. Esses resultados indicam que, mesmo para o evento utilizado na calibração, o sistema de drenagem já apresentava limitações hidráulicas relevantes.

A resposta simulada mostrou coerência espacial com os registros fotográficos do evento de 28/03/2020, nos quais foram observados alagamentos no estacionamento do Porto Velho Shopping e em vias adjacentes. Dessa forma, a calibração do modelo foi realizada por aderência observacional, considerando a correspondência entre as áreas simuladas e os registros disponíveis do evento, além da consistência hidráulica das seções críticas. Não foram aplicadas métricas estatísticas convencionais, como RMSE ou NSE, devido à inexistência de séries observadas contínuas de nível d'água e vazão no canal durante o evento, o que constitui uma limitação metodológica do estudo e reforça a necessidade de monitoramento hidrológico contínuo em pesquisas futuras.

Após a inserção das modificações estruturais, observou-se redução das áreas impactadas para o mesmo evento de calibração, conforme apresentado na Figura 3. A simulação indicou melhora no comportamento hidráulico do sistema, com diminuição dos transbordamentos e redistribuição do escoamento em alguns setores. Entretanto, a melhoria foi parcial, pois ainda permaneceram trechos operando em condição crítica, especialmente nas proximidades das conexões entre microdrenagem e macrodrenagem.

No canal principal, apesar da redução geral da criticidade, ainda foram simulados transbordamentos em determinados setores, com valores de lâmina d'água/elevação de até 117,8%. Esse resultado demonstra que as modificações estruturais contribuíram para melhorar o desempenho hidráulico diante do evento de calibração, mas não eliminaram totalmente os gargalos do sistema.

O cenário com tempo de retorno de 50 anos, apresentado na Figura 4, evidenciou as principais limitações do sistema modificado frente a um evento de maior magnitude. A simulação indicou novamente a formação de áreas alagadas, com lâminas d'água variando entre 0,10 m e 0,60 m, principalmente em setores de menor cota e próximos ao canal principal. Esse comportamento demonstra que, embora as modificações tenham melhorado o desempenho para o evento de calibração, elas não foram suficientes para garantir segurança hidráulica diante de uma chuva de projeto associada à macrodrenagem.

Na microdrenagem, os tempos para atingir as vazões máximas variaram de 0,25 h a 0,95 h no trecho norte e de 0,40 h a 0,95 h no trecho sul. Já o valor médio de 1 h e 34 min, obtido para o canal principal, corresponde ao instante médio de ocorrência do transbordamento máximo nas seções avaliadas no cenário TR 50, e não ao tempo de resposta da bacia. Para a bacia, o tempo de concentração adotado foi de 24 min.

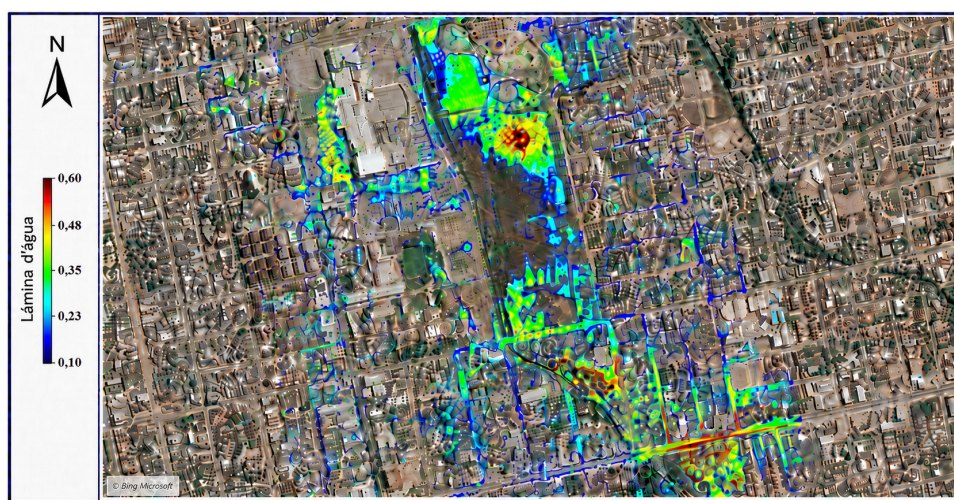


Figura 3. Área impactada no evento de calibração com sistema modificado. Escala de cores: lâmina d'água sobre a superfície, em metros.

A análise do canal principal indicou que, das 29 seções avaliadas, 21 apresentaram transbordamento no cenário TR 50. Os maiores percentuais de lâmina d'água/elevação ocorreram no conjunto de seções mais críticas do canal, alcançando valor máximo de 141,6%. As vazões máximas simuladas variaram de 21.141,32 L/s a 52.230,17 L/s, enquanto as velocidades máximas no canal principal variaram entre 0,69 m/s e 3,52 m/s. Esses resultados confirmam que o sistema

modificado não atende satisfatoriamente ao evento de projeto, mesmo tendo apresentado melhora para o evento de recorrência aproximada de 17 anos.

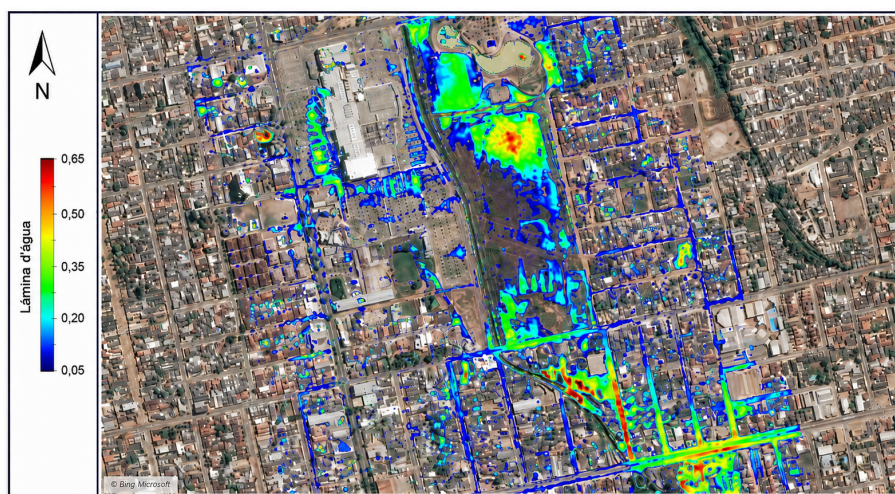


Figura 4. Área impactada no evento TR 50 com sistema modificado. Escala de cores: lâmina d'água sobre a superfície, em metros.

A comparação entre os cenários quanto à relação lâmina d'água/altura da seção nos condutos é apresentada na Figura 5a. Observa-se que, no cenário de calibração sem modificações, já havia trechos operando próximos à capacidade máxima. No cenário modificado, a criticidade foi reduzida em alguns segmentos, demonstrando efeito positivo das intervenções. Entretanto, no cenário TR 50, a ampliação dos trechos com elevada ocupação hidráulica indica que a rede passa a operar próxima ou acima da sua capacidade, reforçando a insuficiência do sistema diante de eventos mais severos.

A Figura 5b apresenta a comparação entre os cenários quanto às velocidades máximas nos condutos. Foram observadas velocidades superiores ao limite de referência de 5 m/s para condutos de concreto, conforme indicado pelo Manual de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba (2002). No cenário de calibração sem modificações, a velocidade máxima simulada atingiu 6,76 m/s; após as modificações, persistiram valores superiores a 5 m/s em trechos específicos, com máximo de 6,33 m/s; e, no cenário TR 50, a velocidade máxima atingiu 7,30 m/s.

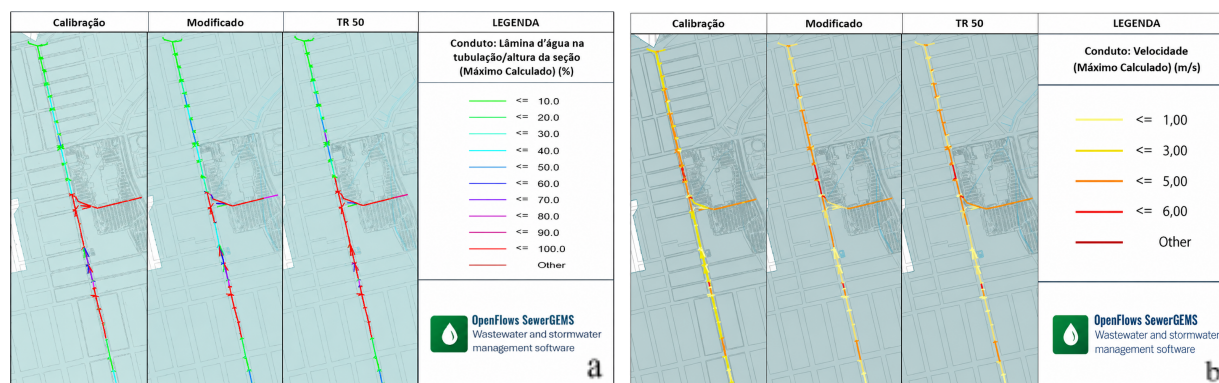


Figura 5. Comparação entre os cenários quanto à relação lâmina d'água e velocidade máxima nos condutos (m/s).

Esses valores indicam risco potencial de instabilidade hidráulica, desgaste estrutural dos condutos e ocorrência de processos erosivos localizados. Portanto, além do redimensionamento hidráulico, recomenda-se avaliar a necessidade de dispositivos de dissipação de energia, adequação das conexões entre microdrenagem e macrodrenagem e adoção de medidas complementares de controle do escoamento superficial.

Em síntese, os resultados demonstram que as modificações estruturais melhoraram o desempenho do sistema para o evento de calibração, mas não foram suficientes para garantir segurança hidráulica no cenário TR 50. Assim, a gestão da drenagem na bacia do Canal da Penha não deve se restringir a intervenções localizadas no canal ou nos condutos, devendo incorporar medidas integradas em escala de bacia hidrográfica, como controle da impermeabilização, preservação de áreas de amortecimento, implantação de dispositivos de retenção e detenção e soluções baseadas na natureza.

6. CONCLUSÃO

A avaliação dos impactos da urbanização na hidrodinâmica de um trecho do Canal da Penha demonstrou elevada vulnerabilidade a alagamentos e transbordamentos, resultante da combinação entre baixa declividade, concentração do escoamento em áreas mais baixas, impermeabilização do solo, ocupação de várzeas, retificação do canal e insuficiência da infraestrutura de drenagem.

As simulações indicaram que as modificações estruturais melhoraram o desempenho hidráulico para o evento de calibração, reduzindo áreas alagadas e transbordamentos. Entretanto, no cenário TR 50, o sistema permaneceu insuficiente, com transbordamento em 21 das 29 seções do canal principal, lâmina d'água/elevação de até 141,6% e vazões máximas superiores a 52 m³/s em trecho de jusante. Esses resultados indicam que intervenções localizadas no canal não são suficientes para garantir resiliência hidrológica frente a eventos de projeto associados à macrodrenagem.

Ressalta-se que a calibração foi baseada em aderência observacional e consistência hidráulica, devido à ausência de séries contínuas de nível d'água e vazão durante o evento analisado. Recomenda-se que estudos futuros incorporem monitoramento hidrológico contínuo para aplicação de métricas quantitativas de desempenho do modelo e para maior robustez na validação dos cenários simulados.

Conclui-se que a gestão da drenagem urbana na bacia do Canal da Penha deve ser conduzida em escala de bacia hidrográfica, articulando redimensionamento hidráulico, controle da ocupação

do solo, preservação de áreas de amortecimento natural, implantação de bacias de retenção, recuperação de áreas vegetadas e soluções baseadas na natureza.

REFERÊNCIAS

- ESPINOZA, J.-C.; JIMENEZ, J. C.; MARENGO, J. A.; SCHONGART, J.; RONCHAIL, J.; LAVADO-CASIMIRO, W. et al. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, v. 14, artigo 8107, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.
- FERREIRA, C. S. S. et al. *Nature-Based Solutions for Flood Mitigation and Resilience in Urban Areas*. Cham: Springer, 2022.
- INMET. Normais climatológicas do Brasil 1991–2020. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2022.
- IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva: IPCC, 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- MANES, S.; VALE, M. M.; PIRES, A. P. F. Nature-based solutions potential for flood risk reduction under extreme rainfall events. *Ambio*, 2024.
- MANUAL DE DRENAGEM URBANA: Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2002.
- MING, X.; LIANG, Q.; JIANG, J. Large-scale high-resolution hydrodynamic modelling of urban floods: some practical considerations. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 59, 2025.
- MUÑOZ-VILLERS, L. E.; MCDONNELL, J. J. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, p. 3543-3560, 2013.
- SILVA, S. S.; BROWN, I. F.; SILVA, P. H. C.; MOREIRA, J. G. V.; OLIVEIRA, I.; COSTA, A. A.; FEARNESIDE, P. M. Amazon climate extremes: increasing droughts and floods in Brazil's state of Acre. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 21, n. 4, p. 311-317, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.006>.
- SOUZA, L. H. B. Avaliação dos impactos da urbanização na hidrodinâmica de um trecho do Canal da Penha em Porto Velho/RO. 2023. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2023.
- TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
- TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- WU, P.; WANG, T.; WANG, Z.; SONG, C.; CHEN, X. Impact of drainage network structure on urban inundation within a coupled hydrodynamic model. *Water*, v. 17, n. 7, 2025.
- ZHOU, K.; KONG, F.; YIN, H.; DESTOUNI, G.; MEADOWS, M. E.; ANDERSSON, E. et al. Urban flood risk management needs nature-based solutions. *npj Urban Sustainability*, v. 4, 2024.