

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DE EFEITOS COMBINADOS DE SOLUÇÕES PARA MITIGAÇÃO DE CHEIAS URBANAS: ESTUDO DE CASO EM GUARATIBA, RIO DE JANEIRO

Luiz Eduardo Siqueira Saraiva¹; Beatriz Cruz Amback²; Matheus Martins de Sousa³ & Marcelo Gomes Miguez⁴

Resumo – As inundações urbanas, agravadas pela rápida urbanização, representam desafios significativos para as cidades, exigindo soluções resilientes e sustentáveis de manejo de águas pluviais. Este estudo propõe um projeto de parque urbano multifuncional para mitigação de inundações sob uma abordagem resiliente e analisa seus efeitos combinados com medidas complementares, utilizando modelagem hidrodinâmica. A pesquisa tem foco no bairro Jardim Maravilha, no município do Rio de Janeiro – uma área de alto risco de inundações devido à baixa cota do terreno, pressões de expansão urbana e vulnerabilidade social. Foi utilizada modelagem hidrológico-hidrodinâmica, com o software MODCEL, para avaliar a redução de inundações e aspectos operacionais de dois cenários de projeto. O Cenário 1 (C1) integra um sistema de pôlder com áreas de armazenamento externas adicionais, enquanto o Cenário 2 (C2) combina o pôlder com o desassoreamento do rio principal. Ambos os cenários demonstraram reduções significativas nos níveis de inundações, sem a necessidade de sistemas de bombeamento. No entanto, o Cenário 2 mostrou-se mais eficiente, uma vez que melhora a capacidade de escoamento, apresentando menor tempo de abertura das comportas. Esse resultado indica que, embora um maior número de reservatórios geralmente esteja associado a uma maior resiliência, isso não é uma regra. É fundamental considerar como as diferentes soluções se combinam na bacia hidrográfica e garantir que sejam planejadas de forma integrada e coordenada.

Palavras-Chave – Manejo de Águas Pluviais, Modelagem Hidrológico-hidrodinâmica, Resiliência Urbana a Inundações.

Abstract – Urban flooding, exacerbated by rapid urbanization, presents significant challenges to cities, requiring resilient and sustainable stormwater management solutions. This study proposes a multifunctional urban park project for flood mitigation under a resilient approach and analyses its combined effects with complementary measures using hydrodynamic modelling. Focusing on the Jardim Maravilha neighborhood, in Rio de Janeiro – a high flood-risk area due to low terrain elevations, urban expansion pressures, and social vulnerability – the research employs hydrological-hydrodynamic modeling (MODCEL) to evaluate two design scenarios and assess operational aspects. Scenario 1 (S1) integrates a polder system with additional external storage areas, while Scenario 2

1) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

lessaraiva@poli.ufrj.br

2) Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

beatrizamback@poli.ufrj.br

3) Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

matheus@poli.ufrj.br

4) Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

marcelomiguez@poli.ufrj.br

(S2) combines the polder with dredging of the main river. Both scenarios demonstrated significant flood depth reductions (>0.5 meters) without relying on pumping systems. Scenario 2, however, proved to be more efficient. These findings contradict the usual reasoning that expects reservoirs to be associated with greater resilience. In fact, it can be expected, in general, but the local setup may lead to combining blue-green-gray measures in a more effective way to foster system resilience. In this case, improving conveyance of the main river allowed lower water level and an earlier opening of the flap gates, safeguarding internal polder storage capacity.

Key-words – Stormwater Management, Hydrologic-Hydrodynamic Modeling, Urban Flood Resilience.

1. INTRODUÇÃO

As inundações urbanas configuram-se como desastres socioambientais que causam danos significativos às cidades e aos seus habitantes (Battemarco *et al.*, 2022). Segundo dados do EM-DAT (2024), entre 2003 e 2022, o mundo sofreu, em média, 170 eventos de inundações por ano. No Brasil, entre 2000 e 2025, foram contabilizados, ao todo, 117 desastres associados a inundações, afetando diretamente mais de 12 milhões de pessoas e provocando 3.591 fatalidades.

A intensificação desses eventos hidrológicos decorre, em grande parte, do processo de urbanização acelerado e desacompanhado de preocupação ambiental, que modifica substancialmente os padrões de uso do solo e a paisagem (Al Jarah *et al.*, 2019). Em especial, nas áreas periféricas dos grandes centros urbanos, observa-se a ocupação recorrente de planícies de inundaçāo sem a devida implantação de sistemas de drenagem urbana adequados, agravando o risco de inundações nesses locais (Idowu e Zhou, 2023).

Frente a esse desafio, torna-se essencial priorizar a preservação das funções naturais dos ecossistemas, promovendo uma gestão sustentável das águas pluviais para fortalecer a capacidade de recuperação das cidades diante de adversidades. Para isso, torna-se crucial qualificar os espaços livres urbanos, reconhecendo-os como áreas estratégicas para a acomodação da dinâmica das águas, além de outras funções ecológicas e sociais (Battemarco *et al.*, 2023).

Nesse sentido, destaca-se o conceito de resiliência urbana, que visa reduzir os impactos adversos de eventos extremos, ao mesmo tempo em que amplia a capacidade de resposta e recuperação dos sistemas urbanos frente a ocorrências inesperadas que ultrapassam as condições de projeto de referência (Disse *et al.*, 2020). Tal conceito é incorporado no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 das Nações Unidas, que propõe “tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis” (ONU, 2015).

Entre as estratégias de aumento da resiliência urbana, destaca-se a adoção de Infraestrutura Verde e Azul, que integra soluções baseadas na natureza ao ambiente urbano e proporciona múltiplos benefícios sociais e ecológicos que a infraestrutura cinza convencional não é capaz de oferecer (Gomes *et al.*, 2021). Além disso, para enfrentar de forma eficaz os desafios locais, é fundamental compreender o funcionamento de cada bacia hidrográfica. Muitas vezes, a solução mais eficiente envolve uma abordagem híbrida, que combina estratégias verdes-azuis com infraestrutura cinza tradicional (Wang *et al.*, 2022).

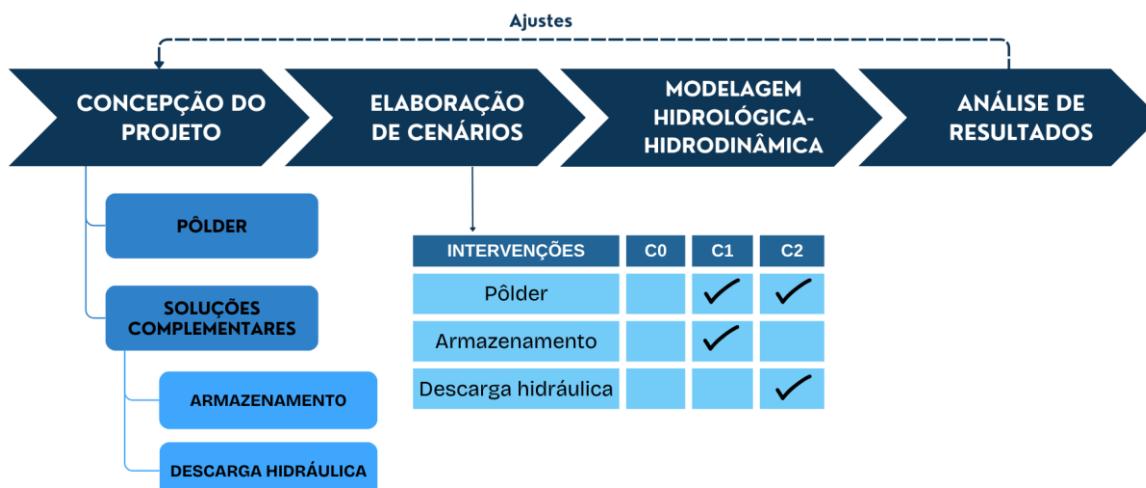
Sob essa perspectiva, este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos combinados de diferentes soluções para mitigação de cheias urbanas por meio de modelagem hidrológico-hidrodinâmica. A proposta central consiste em um projeto urbano multifuncional baseado em uma abordagem híbrida, que integra infraestruturas verdes, azuis e cinzas. São analisados os impactos hidrológicos dessa proposta quando associada a medidas complementares, voltadas tanto ao armazenamento quanto à melhoria da capacidade de escoamento.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi conduzida por meio das seguintes etapas: proposição de alternativa de projeto, construção de cenários, simulações utilizando modelagem hidrológico-hidrodinâmica e análise dos resultados. Adotando uma abordagem baseada em infraestruturas verdes e azuis e considerando as características do bairro Jardim Maravilha, a solução projetual proposta incorporou de forma consistente o sistema de pôlder, associado a distintas soluções complementares. O pôlder, por si só, não é uma solução verde-azul - sendo, na verdade, frequentemente classificado como infraestrutura cinza. Contudo, neste caso, sua adoção é fundamental devido à influência da maré em estuários, que, ao coincidir com eventos de cheia, intensifica o represamento fluvial e agrava as inundações nas baixadas costeiras urbanizadas. No entanto, o pôlder proposto está integrado a um parque fluvial urbano, configurando uma infraestrutura verde e azul multifuncional. Essa solução permite a acomodação controlada da dinâmica hidrológica, por meio de áreas destinadas ao armazenamento temporário e à infiltração das águas durante os eventos de cheia. Em períodos de estiagem, o espaço é revertido para uso público, oferecendo áreas qualificadas para contemplação e atividades de lazer da população local (Amback *et al.*, 2025).

Nesse sentido, foram desenvolvidos dois cenários de projeto: o Cenário 1 (C1), que contempla o pôlder com áreas de armazenamento adicionais externas, localizadas na margem oposta do rio; e o Cenário 2 (C2), que incorpora intervenções para aumentar sua capacidade de escoamento. A eficiência do projeto na mitigação de inundações foi avaliada por meio da ferramenta de modelagem hidrológico-hidrodinâmica MODCEL - Modelo de Células de Escoamento para Cheias Urbanas (Miguez *et al.*, 2017). Ela integra escoamentos fluviais, superficiais e em galerias pluviais em uma rede de conexões unidimensionais, adotando uma abordagem pseudo-tridimensional por meio da interligação vertical dos planos horizontais de escoamento em canais abertos superficiais e galerias subterrâneas (De Sousa *et al.*, 2022). A bacia hidrográfica foi dividida em células, áreas territoriais com características relativamente homogêneas, capazes de fornecer áreas de armazenamento para o balanço de massa e de estabelecer conexões hidráulicas entre si. Durante todo o processo, foram realizados ajustes iterativos para refinar o projeto, otimizando os volumes de armazenamento do pôlder por meio de diversos testes, visando à máxima eficiência. É importante destacar que as simulações foram realizadas para um tempo de retorno de 25 anos, padrão adotado em projetos de macrodrenagem no Brasil. Foram simulados tanto a situação atual, sem intervenções (C0), quanto os dois cenários propostos (C1 e C2), em suas versões finais (após otimização). A Figura 1 sintetiza graficamente os procedimentos metodológicos adotados.

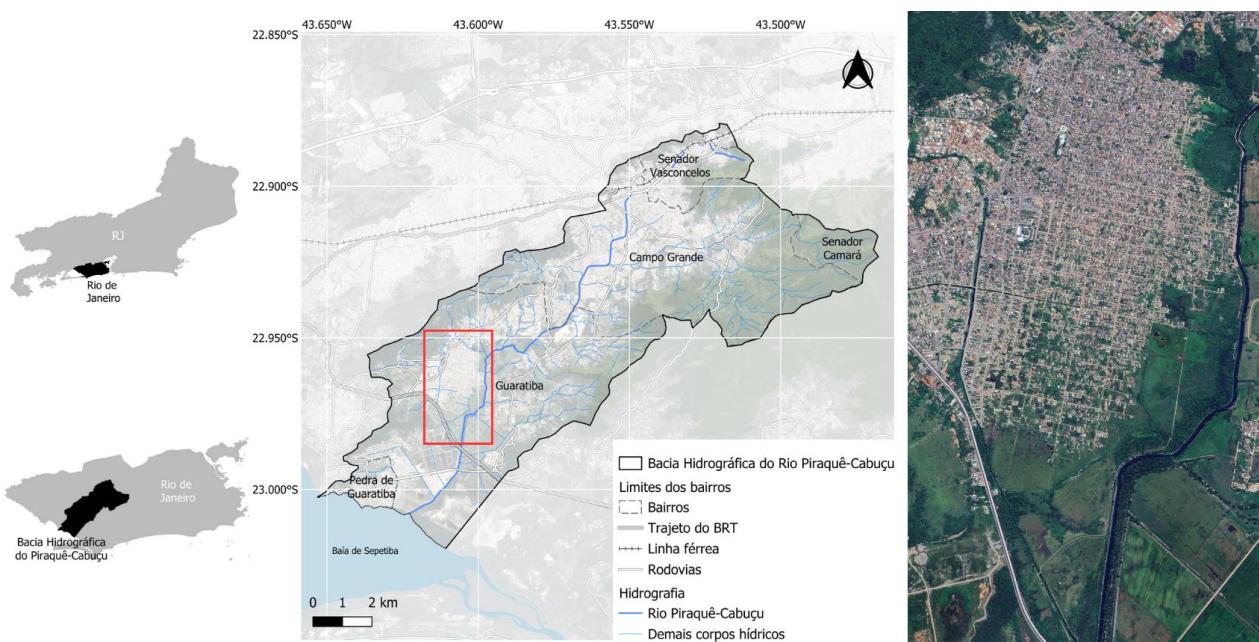
Figura 1 – Procedimentos Metodológicos



3. ESTUDO DE CASO: JARDIM MARAVILHA

A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, com foco na localidade Jardim Maravilha, situada no bairro de Guaratiba, zona oeste do município do Rio de Janeiro. O local é considerado o maior loteamento urbano da América Latina, com uma população superior a 32 mil habitantes. Foi escolhido como estudo de caso devido à combinação de alta vulnerabilidade ambiental - decorrente de sua baixa altitude e relevo plano a suavemente inclinado -, elevada vulnerabilidade social e uma forte tendência de expansão urbana, impulsionada por recentes investimentos em infraestrutura de transporte, fatores que, em conjunto, resultam em baixa resiliência às inundações. A bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, com uma área de 108 km², é uma das regiões mais críticas em termos de alagamentos no município do Rio de Janeiro, gerando preocupação por parte do poder público municipal. A Figura 2 ilustra a localização da Bacia Hidrográfica do Piraquê-Cabuçu no Rio de Janeiro, destacando o Jardim Maravilha.

Figura 2 – Localização do Jardim Maravilha, na Bacia Hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, RJ

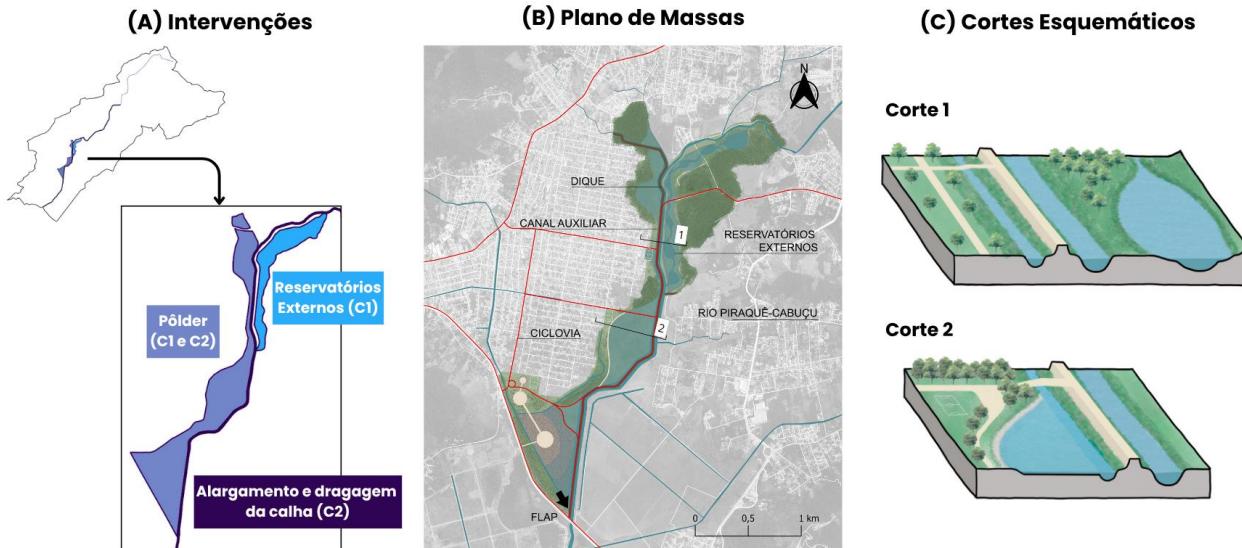


4. RESULTADOS

4.1. Cenários de projeto

Conforme descrito no método, as intervenções propostas foram definidas da seguinte forma: o sistema de pôlder associado ao parque fluvial alagável na margem direita do Rio Piraquê-Cabuçu está incluído tanto no cenário C1 quanto no C2. O C1 ainda inclui reservatórios externos ao pôlder, na margem esquerda do rio, enquanto o C2 conta com intervenções na calha para otimização da descarga hidráulica, o que inclui dragagem de 0,5 metro e alargamento de 5 metros. A Figura 3 apresenta a localização, o plano de massas e os cortes esquemáticos do projeto multifuncional proposto para o Jardim Maravilha e intervenções complementares.

Figura 3 – Projeto de pôlder com soluções complementares para o Jardim Maravilha



4.2. Calibração do modelo hidrológico-hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrológico-hidrodinâmico foi realizada considerando um evento de chuva intensa ocorrido em 2021, utilizando dados das três estações pluviométricas mais próximas: Bangu, Campo Grande e Guaratiba, todas operadas pelo Sistema Alerta Rio. As medições foram feitas a cada 15 minutos. Assim, a chuva de projeto foi calculada a partir de uma curva IDF (intensidade-duração-frequência), com base nos dados registrados por esses três postos e ajustada para um tempo de recorrência de 25 anos (Alves *et al.*, 2021). Além disso, a maré observada durante o evento de precipitação utilizado para a calibração foi adotada como condição de contorno do modelo. As variações de maré foram medidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) no Porto de Itaguaí, situado na Baía de Sepetiba.

4.3. Avaliação

Ambos os cenários projetuais demonstraram uma redução significativa nas profundidades de inundação, confirmando a eficácia das intervenções combinadas propostas na mitigação de cheias, conforme ilustrado pelas manchas de inundação nas Figuras 4 e 5. Em particular, a comparação entre os cenários de projeto e a situação atual, apresentada na Figura 5, destaca que as profundidades de alagamento diminuíram em mais de 0,5 metro em diversas áreas do Jardim Maravilha.

Figura 4 – Manchas de inundação em todos os cenários

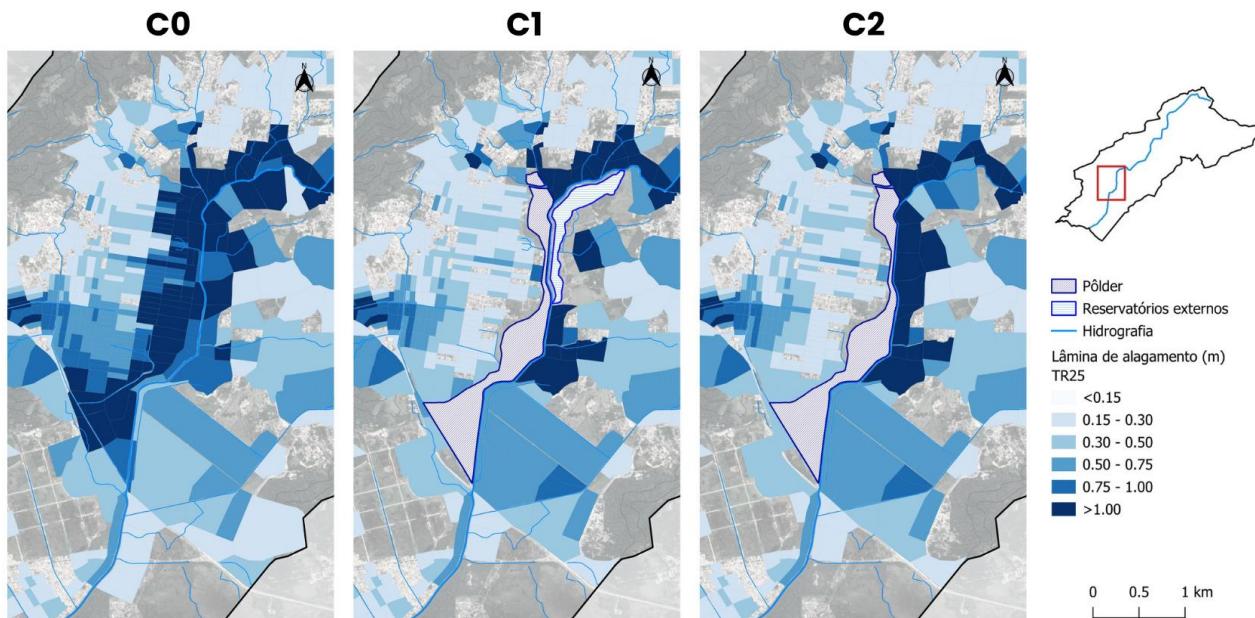
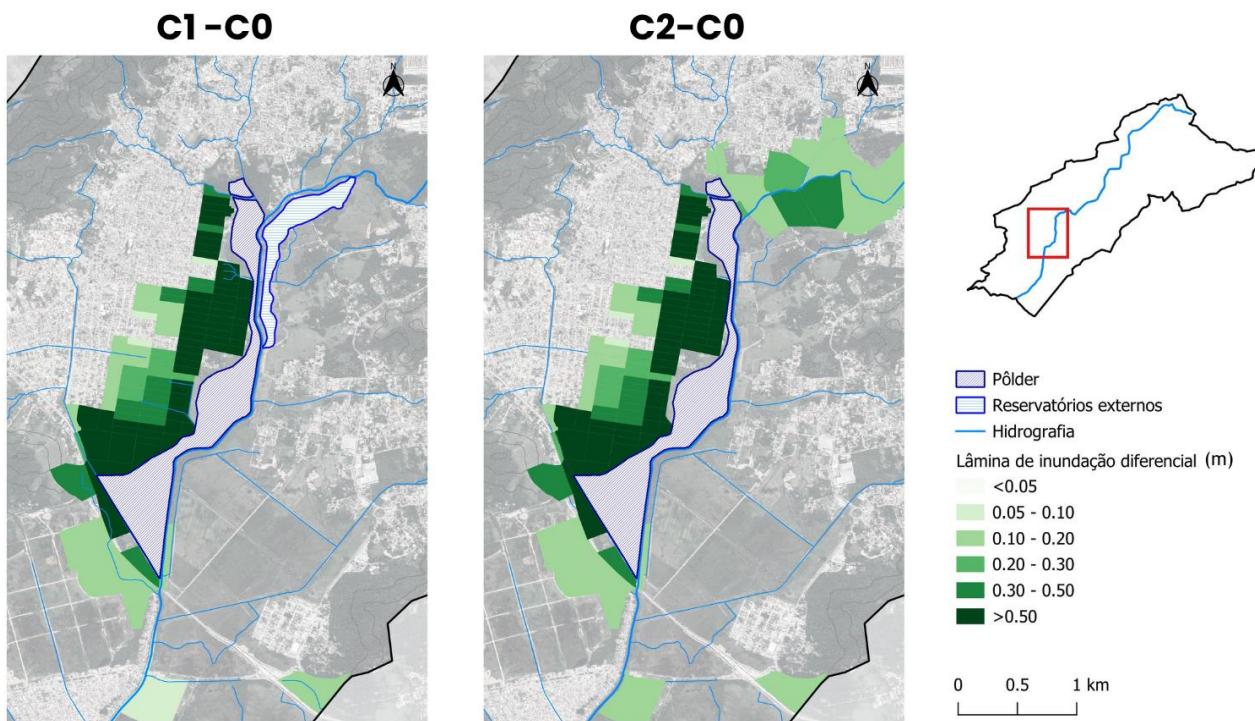


Figura 5 – Manchas de inundação diferenciais nos cenários de projeto (C1 e C2) em relação à situação atual (C0)



Notavelmente, nenhum dos cenários exigiu o uso de sistema de bombeamento, comprovando que o sistema de pôlder pode operar de forma eficiente apenas por gravidade, independentemente das medidas externas implementadas. Entretanto, a principal diferença de desempenho entre os dois cenários torna-se evidente na análise dos hidrogramas. O gráfico da Figura 6 indica que, embora o armazenamento externo na margem esquerda possibilite atenuar o pico de vazão no rio no C1, a base da curva é bem mais larga do que no C2 - em que o escoamento é acelerado -, apontando um tempo maior até que o nível do rio diminua significativamente, fazendo com que a comporta tipo *flap*

permaneça fechada por mais tempo. Observando-se as figuras 7 e 8, nota-se que, no Cenário 2, a comporta *flap* abre 2,5 horas mais cedo do que no C1 devido ao desassoreamento e alargamento do Rio Piraquê-Cabuçu, o que aumenta a capacidade de escoamento e reduz o nível do rio antes do C1. Em contraste, o armazenamento externo no Cenário 1 atenua a vazão de pico, mas resulta em uma abertura mais tardia das comportas. Desse modo, o C2 oferece maior resiliência ao reduzir o volume de armazenamento necessário no pôlder, já que, nesse cenário, o pôlder pode suportar eventos mais intensos mantendo os mesmos volumes de armazenamento implementados, operando com menor probabilidade de ocorrência de falhas operacionais em comparação ao C1.

Figura 6 – Hidrograma de vazão no Rio Piraquê-Cabuçu em trecho imediatamente a jusante à comporta flap

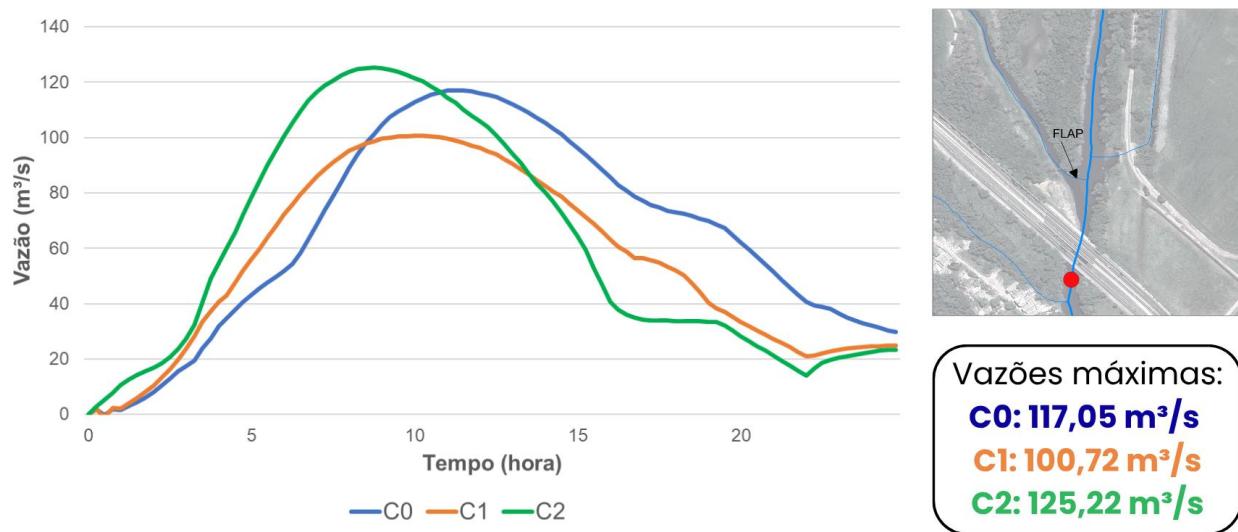


Figura 7 – Hidrograma de vazão na comporta flap

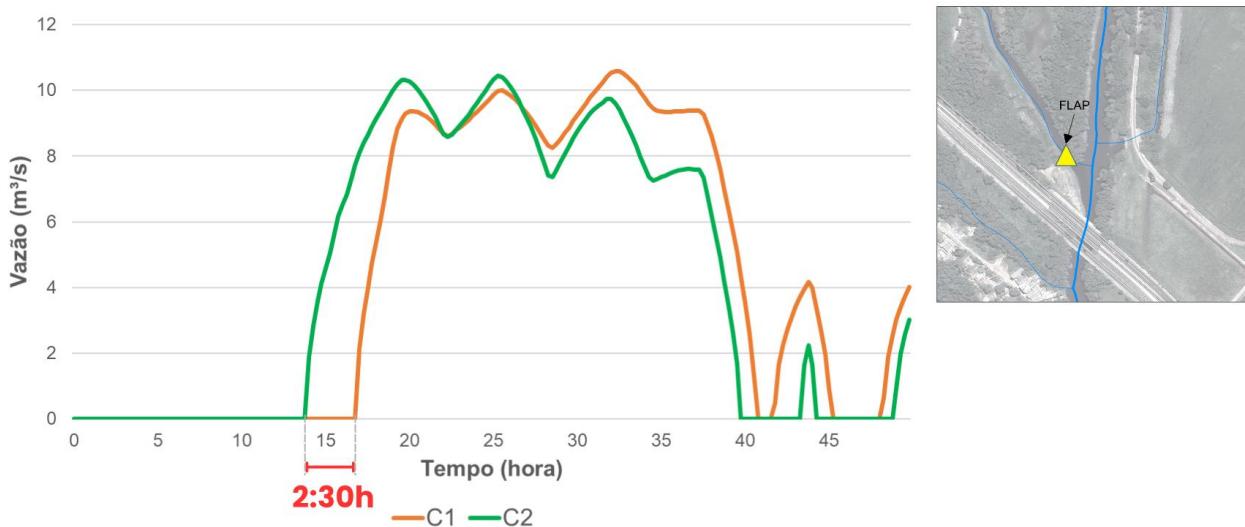
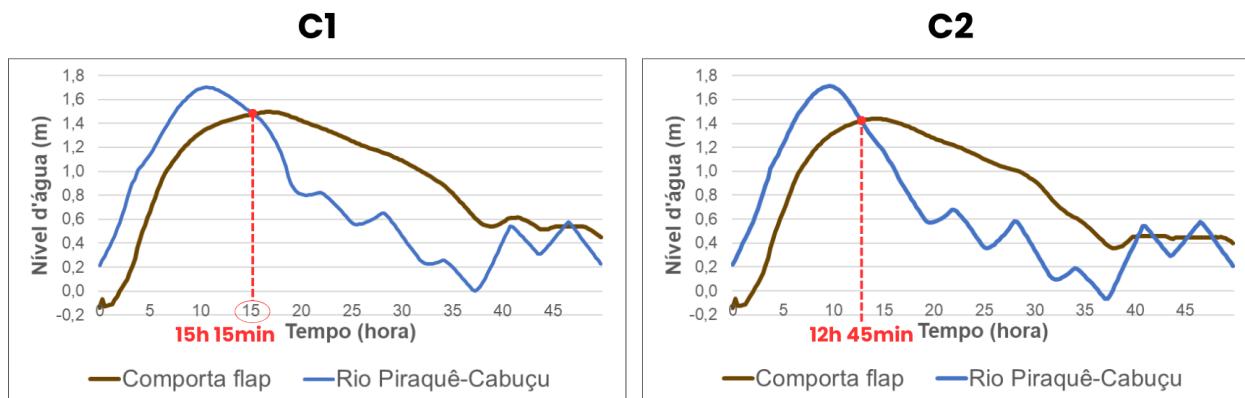


Figura 8 – Gráficos de nível d'água na comporta flap e no rio principal



5. DISCUSSÃO

Ambos os cenários de soluções combinadas demonstraram eficácia na redução das inundações, conforme evidenciado pelos mapas de lâminas de inundação e lâminas diferenciais. No entanto, a diferença no tempo de abertura da comporta flap implica em um prolongamento do tempo de operação do pôlder no Cenário 1, além da necessidade de uma área de armazenamento maior.

Esses resultados demonstram a importância da coordenação de ações ao longo da bacia hidrográfica para que as soluções funcionem de forma combinada. A implementação isolada de medidas pode reduzir os alagamentos em determinadas áreas, mas potencialmente causar impactos negativos em regiões a jusante.

Além disso, diferentemente do que se presume em muitas abordagens tradicionais, o projeto mais resiliente não é necessariamente aquele que apresenta maior capacidade de armazenamento de água. No caso desta pesquisa, verificou-se justamente o contrário: o Cenário 2 tende a conferir maior resiliência ao projeto por demandar um menor volume de armazenamento no pôlder, mitigando riscos e impactos de possíveis falhas operacionais. Dito isso, a resiliência urbana a inundações depende da eficiência operacional do sistema como um todo, sendo fundamental considerar os efeitos combinados das intervenções na dinâmica da bacia.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância de abordagens integradas e adaptativas no enfrentamento de inundações urbanas, sobretudo em áreas de alta vulnerabilidade socioambiental, como o Jardim Maravilha, no Rio de Janeiro. A análise comparativa entre os cenários simulados evidenciou que a resiliência do sistema não depende exclusivamente do volume de armazenamento, mas sim da eficiência operacional da solução adotada. Ressalta-se que, neste estudo, o pôlder foi projetado para não ser dependente de bombeamento, minimizando o risco de falha do sistema devido à manutenção insuficiente.

A proposta de um parque urbano multifuncional, associada ao sistema de pôlder, demonstrou-se tecnicamente viável e ambientalmente estratégica. Ao recuperar a funcionalidade ecológica do território e ao oferecer espaços públicos de qualidade durante os períodos de estiagem, a solução amplia os benefícios sociais e ambientais além da mitigação de inundações urbanas. Contudo, seu planejamento exige cuidado para garantir a resiliência de todo o sistema.

Finalmente, destaca-se que a abordagem proposta neste estudo pode ser adaptada a outras áreas urbanas vulneráveis com características semelhantes, como influência da maré, ocupações em planícies de inundação e carência de áreas de lazer para a população. A principal contribuição do trabalho está na integração entre parque urbano multifuncional, sistema de pôlder e medidas complementares, sob uma perspectiva sistêmica. Essa combinação inova ao demonstrar que a

resiliência do sistema está mais ligada à gestão dos efeitos combinados das soluções na bacia hidrográfica como um todo do que apenas à capacidade de armazenamento de reservatórios.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Cátedra UNESCO de Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Costeira, sediada na UFRJ, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior [Código de Financiamento: 88887.005426/2024-00].

REFERÊNCIAS

- AL JARAH, S. H.; ZHOU, B.; ABDULLAH, R. J.; LU, Y.; YU, W. (2019). “*Urbanization and urban sprawl issues in city structure: A case of the Sulaymaniah Iraqi Kurdistan region*”. *Sustainability* (Switzerland), 11 (2).
- ALVES, L. M. C.; LOPES, A. C. R.; DE MELO, J. L.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. (2021). “*Estudos hidrológicos para a elaboração de curvas IDF para a bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, município do Rio de Janeiro*” in Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Nov. 2021.
- AMBACK, B. C.; VERÓL, A. P.; DE SOUSA, M. M.; SARAIVA, L. E. S.; MIGUEZ, M. G. (2025). “*A framework for urban planning structured by sustainable urban drainage: the proposal of a priority matrix for site selection*”. *Water Science & Technology*, v. 91, n. 10, pp. 1185–1202.
- BATTEMARCO, B. P.; COELHO, R. T.; VERÓL, A. P.; DE SOUSA, M. M.; DA FONTOURA, C. V. T.; CUNHA, J. F.; BARBEDO, J. M. R.; MIGUEZ, M. G. (2022). “*Water dynamics and blue-green infrastructure (BGI): Towards risk management and strategic spatial planning guidelines*”. *Journal of Cleaner Production*, v. 333.
- BATTEMARCO, B. P.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G. (2023). “*Methodological framework for quantitative assessment of urban development projects considering flood risks and city responses*”. *Urban Water Journal*, v. 20.
- DE SOUSA, M. M.; DE OLIVEIRA, A. K. B.; REZENDE, O. M.; DE MAGALHÃES, P. M. C.; JACOB, A. C. P.; DE MAGALHÃES, P. C.; MIGUEZ, M. G. (2022). “*Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation*”. *Journal of Hydroinformatics*, v. 24, n. 5, p. 976–991.
- DISSE, M.; JOHNSON, T. G.; LEANDRO, J.; HARTMANN, T. (2020). “*Exploring the relation between flood risk management and flood resilience*”. *Water Security*.
- EM-DAT (2024). *Disasters in Numbers 2023: A Significant Year of Disaster Impact*. CRED.
- GOMES, M. V. R.; BATTEMARCO, B. P.; GUIMARÃES, L. F.; DE OLIVEIRA, A. K. B.; RUTIGLANI, V. A.; CABRAL, F. M.; BEZERRA, R. O. P.; LOURENÇO, I. B.; REZENDE, O. M.; DE MAGALHÃES, P. C.; MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. (2021). “*The use of blue-green infrastructure as a multifunctional approach to watersheds with socio-environmental vulnerability*.” *Blue-Green Systems*, v. 3, n. 1, p. 281–297.
- IDOWU, D.; ZHOU, W. (2023). “*Global Megacities and Frequent Floods: Correlation between Urban Expansion Patterns and Urban Flood Hazards*”. *Sustainability* (Switzerland), v. 15, n. 3.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. (2017). “Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model”. Water (Switzerland), v. 9, n. 6.

WANG, J.; LIU, J.; MEI, C.; WANG, H.; LU, J. (2022). “A Multi-Objective Optimization Model for Synergistic Effect Analysis of Integrated Green-Gray-Blue Drainage System in Urban Inundation Control”. Journal of Hydrology, v. 609.

ONU. (2015). “Transformando Nossa Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”.