

Comparação de propriedades de inundação entre modelos hidrodinâmicos *quasi-2D* e 2D. Estudo de caso para a Bacia do Piraquê-Cabuçu – RJ.

Luccas T. Velez¹, Francis M. Miranda², Matheus F.V. Campinho³, Bruno Magno⁴, Matheus M. Sousa⁵ & Osvaldo M. Rezende⁶

Resumo: As inundações urbanas representam um desafio crescente em regiões costeiras densamente ocupadas, agravado pela urbanização desordenada e pelas mudanças climáticas. Este artigo aborda a obtenção de propriedades do perigo de inundações através de duas diferentes abordagens em modelagem hidrodinâmica de bacias urbanas, sendo a primeira do tipo *quasi-2D* (MODCEL) e a segunda do tipo bidimensional completa (HEC-RAS), aplicadas ao trecho baixo da bacia do rio Piraquê-Cabuçu, Rio de Janeiro. Foram analisadas propriedades do perigo de inundação, incluindo lâmina, velocidade, fator de velocidade, tempo de chegada e tempo de permanência para o evento utilizando um evento de precipitação intensa (126,6 mm) ocorrido em 17 de dezembro de 2021. Os resultados indicam boa correspondência entre os modelos, permitindo concluir que a análise de propriedades de eventos de inundação, necessários para a caracterização do perigo e proposição de medidas estruturais e não estruturais, podem ser obtidas através de abordagem com maior detalhamento espacial (2D), tanto quanto por uma com enfoque na interpretação do modelador (*quasi-2D*).

Abstract: Urban flooding represents a growing challenge in densely occupied coastal regions, exacerbated by unplanned urbanization and climate change. This paper addresses the acquisition of flood hazard properties through two different approaches to hydrodynamic modeling of urban basins: the first is a *quasi-2D* type (MODCEL) and the second is a full 2D type (HEC-RAS), applied to the lower stretch of the Piraquê-Cabuçu river basin in Rio de Janeiro. Flood hazard properties were analyzed, including water depth, velocity, velocity factor, arrival time, and residence time for an intense rainfall event (126.6 mm) that occurred on December 17, 2021. The results indicate good correspondence between the models, leading to the conclusion that the analysis of flood event properties required for hazard characterization and the proposal of structural and non-structural measures can be obtained through an approach with greater spatial detail (2D), as well as through one focused on the modeler's interpretation (*quasi-2D*).

Palavras-Chave: inundações urbanas; risco de inundações; mapeamento do perigo de inundações;

Keywords: urban floods; flood risk; flood hazard mapping;

INTRODUÇÃO

As inundações urbanas configuram-se como uma problemática central para o desenvolvimento urbano e social, pois seus efeitos extrapolam o evento hidrológico e se traduzem em perdas materiais e humanas, interrupções na mobilidade e nos serviços, degradação sanitária e aprofundamento das vulnerabilidades em áreas já marcadas por desigualdades (WALLEMACQ, P.; HOUSE, R. 2018). Em grande medida, esses impactos decorrem da própria forma de urbanização: a

1) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (POLI/UFRJ). E-mail: luccastolentino@poli.ufrj.br

2) Programa de Engenharia Ambiental (PEA/POLI/UFRJ). E-mail: francismiranda@poli.ufrj.br

3) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (POLI/UFRJ). E-mail: mfvc@poli.ufrj.br

4) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (POLI/UFRJ). E-mail: brunomagno@poli.ufrj.br

5) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (POLI/UFRJ) e Programa de Engenharia Ambiental (PEA/POLI/UFRJ). E-mail: matheus@poli.ufrj.br

6) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (POLI/UFRJ) e Programa de Engenharia Ambiental (PEA/POLI/UFRJ). E-mail: omrezende@poli.ufrj.br

impermeabilização do solo, a expansão desordenada, a ocupação de áreas naturalmente inundáveis e a insuficiência de infraestrutura de drenagem e saneamento reduzem a capacidade adaptativa do território e tornam recorrentes os prejuízos (TUCCI, 2007). Esse quadro é agravado pelas mudanças climáticas, que tendem a aumentar a frequência e magnitude de precipitações extremas, ampliando incertezas e estresses sobre as redes de drenagem.

A modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta central na Gestão de Risco de Inundações porque permite transformar a dinâmica complexa das cheias em informação quantitativa e espacialmente distribuída, essenciais para mapear perigo, apoiar sistemas de alerta, e priorizar intervenções estruturais e não estruturais no território. Dentre os resultados da modelagem, destacam-se as propriedades da parcela do perigo, que pode ser expressa em função da lâmina de inundação, do tempo de permanência da inundação, da velocidade do escoamento, do fator de velocidade, dentre outros indicadores.

Nesse contexto, modelos de escoamento quasi-2D e 2D são utilizados frequentemente em para o mapeamento de perigo de inundações (Flood Hazard Mapping – FHM). O modelo hidrodinâmico quasi-2D representa o escoamento por meio de células interligadas através de relações hidráulicas unidimensionais, oferecendo menor custo computacional e maior necessidade de interpretação do modelador (MIGUEZ et al., 2017; SOUSA et al., 2022). Já o bidimensional descreve de forma mais contínua a propagação do fluxo em duas direções sobre a malha, capturando melhor heterogeneidades urbanas e padrões complexos de escoamento, ainda que exija maior detalhamento topográfico e processamento (USACE, 1993). Nesse sentido, a escolha entre ferramentas de modelagem do tipo quasi-2D e 2D deve ser orientada, principalmente, pelo objetivo do estudo e pelos recursos disponíveis.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo obter propriedades do perigo de inundações utilizando as duas abordagens de modelagem hidrodinâmica descritas, tendo o trecho baixo da bacia do rio Piraquê-Cabuçu – RJ como estudo de caso. Foi utilizado um evento de precipitação em 17 de dezembro de 2021, onde o acumulado de precipitação foi de 126,6 mm.

MÉTODOS

Para as duas abordagens utilizadas, foram considerados os mesmos hidrogramas calculados pelo método Curve Number (CN) como condição de contorno de montante. Para o domínio de modelagem, foi adotada a distribuição espacial da chuva por célula (no caso do ModCel) e por quadrícula do grid (no caso do HEC-RAS).

A distribuição temporal do evento de interesse, associado à precipitação ocorrida no dia 17 de dezembro de 2021 com 126,6 mm (Posto Campo Grande), assim como a condição de contorno de vazão afluente ao trecho baixo da bacia e a variação de maré correspondente, estão apresentadas na Figura 1. Para o processo de validação, foram utilizadas lâminas de inundação medidas pela Fundação Rio-Águas no dia do evento. Maiores informações sobre os resultados da validação estão apresentados em Tabet (2023), Carvalho & Campinho (2024) e Velez (2025).

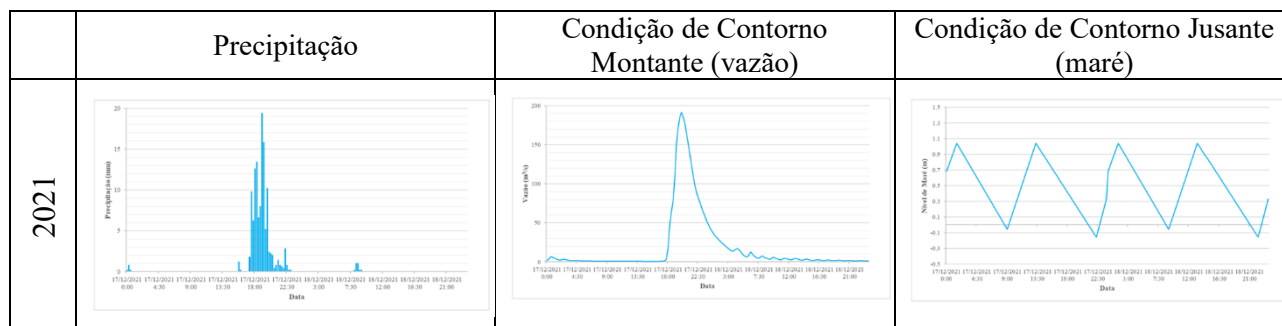


Figura 1 – Dados de entrada para a modelagem da bacia do BPC na região de interesse

Área de estudo: bacia do Rio Piraguê-Cabuçu – RJ

A BPC possui 108km², 257.553 hab (CENSO 2022) e é conhecida no contexto da Região Metropolitana do Rio de Janeiro em função do crescente processo de urbanização associado à problemática de inundações. A Figura 2 apresenta a localização e pontos de interesse na bacia.

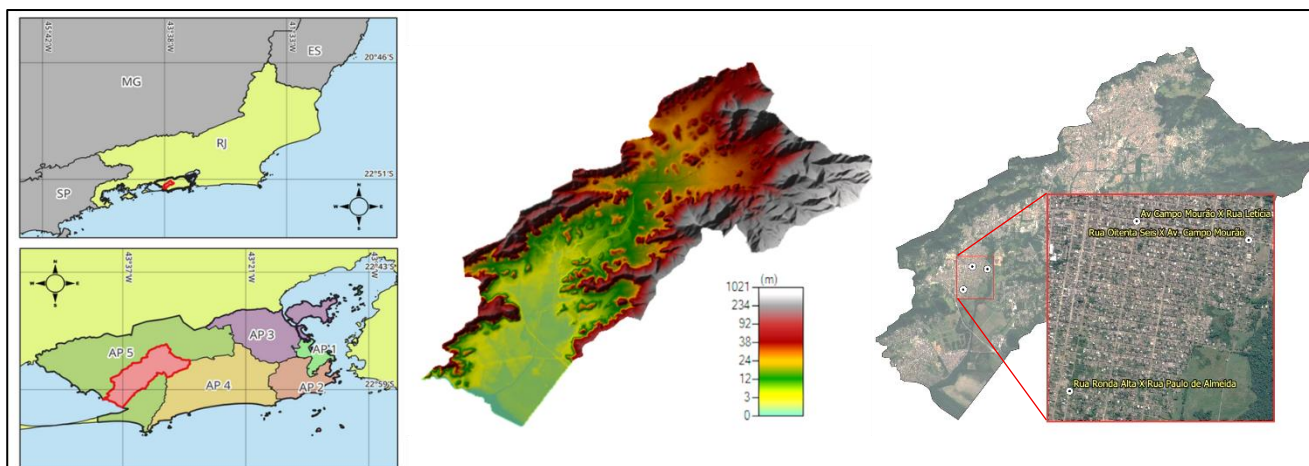


Figura 2– Localização, elevação e pontos de calibração na bacia do rio Piraguê-Cabuçu

Modelagem Hidrodinâmica *quasi-2D*

A abordagem *quasi-2D* realizada pelo MODCEL (MIGUEZ et al., 2017), representa a bacia por células de escoamento conectadas por ligações hidráulicas tipo Saint-Venant 1D e empíricas (vertedor, orifício, etc), que permitem simular de forma integrada extravasamentos e o espalhamento da água sobre a superfície urbana. Nesta aplicação, o domínio foi discretizado em 1184 células, com 1184 centros e 2038 ligações construídas para representar o escoamento de toda a bacia de interesse (VELEZ et al., 2025). A construção do banco de dados utiliza informações de topografia, uso do solo e desenho urbano para definir as células e, em seguida, o modelo é calibrado/recalibrado por ajustes em parâmetros como Manning e runoff, com base em eventos observados. A Figura 3 apresenta a Representação esquemática do processo de modelagem pelo MODCEL para a bacia de interesse.

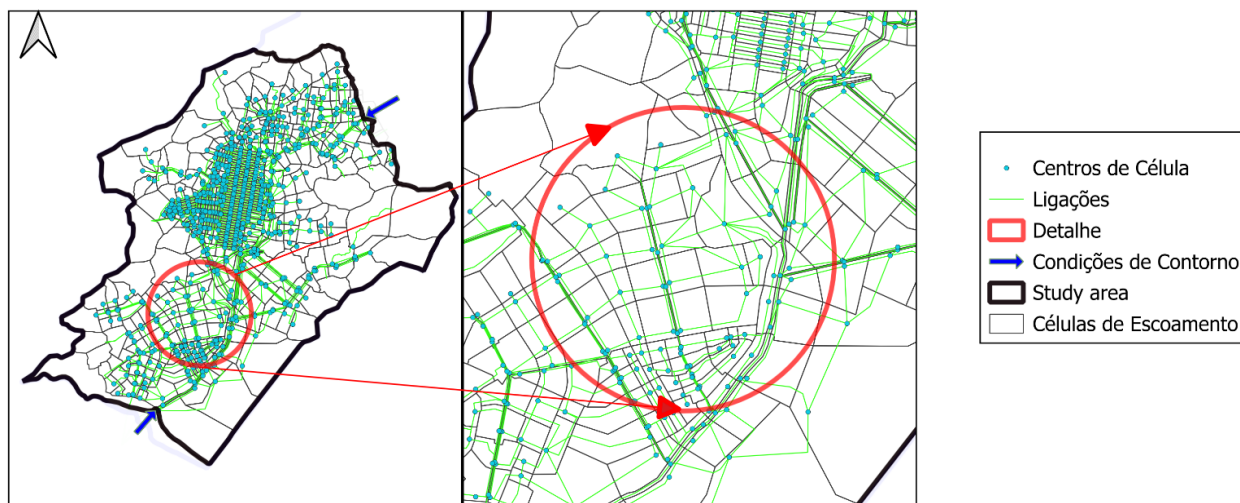


Figura 3 – Representação esquemática do processo de modelagem pelo MODCEL.

Modelagem Hidrodinâmica 2D

O HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) é um modelo computacional amplamente utilizado para simulações hidráulicas em canais, rios e planícies de inundação (USACE, 1993). O programa permite análises em regime permanente ou variável, unidimensional (1D), bidimensional (2D) ou combinado (1D/2D). Uma de suas principais aplicações é a modelagem de bacias hidrográficas e a definição de manchas de inundação, por meio da resolução das equações de Saint-Venant, também chamada de ondas rasas (SWE – Shallow Water Equations), sendo capaz de representar com detalhamento a propagação do escoamento superficial em superfícies complexas.

Para o presente estudo foi utilizada uma malha computacional do tipo quadrangular com células de 25 x 25 metros, totalizando 75.485 células (Figura 3), e o refinamento topográfico foi realizado por meio de *breaklines* para preservar feições lineares importantes (CARVALHO & CAMPINHO, 2024). Para a simulação hidráulica, optou-se pela formulação Saint-Venant completa 2D (SWE-ELM – Shallow Water Equations Eulerian-Lagrangian Method), garantindo maior precisão na propagação do fluxo superficial. A Figura 4 apresenta a Representação esquemática do processo de modelagem pelo HEC-RAS para a bacia de interesse.

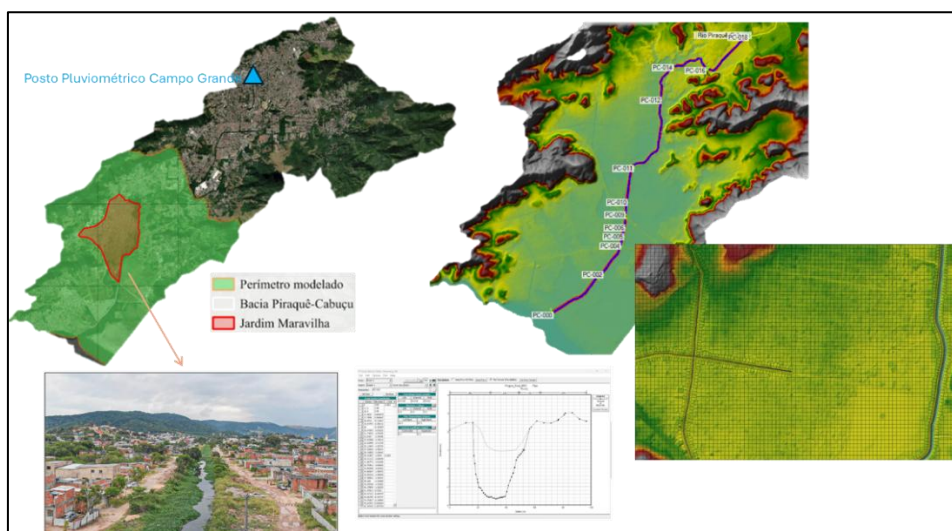


Figura 4 – Representação esquemática do processo de modelagem pelo HEC-RAS 6.6

Propriedades do Perigo de Inundações

A caracterização do perigo associado a inundações não pode ser reduzida a uma única variável, como a altura d'água ou a vazão do curso hídrico. Pelo contrário, o perigo é um fenômeno multifacetado que depende de um conjunto de propriedades hidrodinâmicas e temporais, cada qual influenciando de maneira distinta os danos potenciais e a capacidade de resposta da população. Compreender adequadamente a extensão da lâmina, sua altura, velocidade, tempo de permanência, tempo de chegada e taxa de ascensão é fundamental para a elaboração de mapas de risco, sistemas de alerta antecipado e medidas de proteção civil eficazes. A seguir, essas propriedades são detalhadas individualmente no Quadro 1.

Quadro 1 – Síntese das propriedades do perigo de inundações

Extensão da lâmina	A extensão da lâmina d'água define a área territorial efetivamente submersa durante uma inundação, sendo fundamental para o zoneamento de áreas de risco. Quanto maior a extensão, maior o número de edificações, infraestruturas e pessoas potencialmente expostas. O mapeamento dessa variável permite planejar rotas de fuga e alocação de recursos de resposta.
Altura da lâmina	A altura da lâmina d'água corresponde à distância vertical entre a superfície da água e o solo ou piso de referência, influenciando diretamente a acessibilidade e a capacidade de evacuação de pessoas e veículos. Valores superiores a 0,5 m já inviabilizam a travessia de pedestres, enquanto acima de 1,0 m podem arrastar automóveis. Essa propriedade também determina os danos estruturais em edificações e a contaminação de interiores.
Velocidade e fator de velocidade	A velocidade da água é um dos parâmetros mais críticos, pois combina o deslocamento horizontal do fluxo com a força de arrasto sobre pessoas, veículos e construções. O fator de velocidade, frequentemente expresso pelo produto profundidade $\times$ velocidade ($h \cdot v$), permite classificar o risco de instabilidade e derrubamento de pedestres. Valores de $h \cdot v$ superiores a 0,5 m ² /s já representam perigo significativo para um adulto em pé.
Tempo de permanência	O tempo de permanência indica por quanto tempo determinada área permanece submersa, afetando a resistência dos materiais, o risco de desabamento e a viabilidade de operações de resgate. Períodos prolongados aumentam a probabilidade de contaminação hídrica, proliferação de vetores e danos irreversíveis ao patrimônio. Essa propriedade também condiciona a duração dos planos de contingência e abastecimento emergencial.
Tempo de chegada	O tempo de chegada é o intervalo entre o início do evento (ou emissão do alerta) e o momento em que a lâmina d'água atinge uma determinada localidade, sendo crucial para a emissão de avisos antecipados e a evacuação preventiva. Valores muito curtos (minutos) caracterizam inundações bruscas (flash floods), nas quais a margem para resposta é praticamente nula. Incorporar essa variável aos sistemas de monitoramento permite salvar vidas por meio de alertas localizados.
Taxa de ascensão da lâmina	A taxa de ascensão mede a rapidez com que o nível da água se eleva, geralmente em cm/h ou m/h, determinando a reação necessária da população e dos sistemas de drenagem. Taxas elevadas (superiores a 0,5 m/h) indicam evolução rápida da inundação, inviabilizando medidas de proteção passiva como a colocação de barreiras ou a remoção de bens. Esse parâmetro é essencial para calibrar modelos hidrodinâmicos e definir níveis críticos de alerta gradual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados de simulação obtidos pelas duas tipologias de modelagem, o presente item apresenta de forma comparativa as propriedades da inundação obtidas para BPC para três pontos localizados na área urbana da região (Figura 1). É possível observar que os resultados apresentam comportamento semelhante, conforme apresentado na Figura 5.

O resultado da velocidade de escoamento (Figura 6) e fator de velocidade (Figura 7) na modelagem quasi-2D é realizada com base nas ligações entre as células, enquanto para o tempo de chegada (Figura 8) e tempo de permanência (Figura 9), os resultados são apresentados por células. Para a abordagem 2D, todos os resultados são apresentados por meio de grid.

A partir da interpretação dos resultados, é possível observar que as duas abordagens apresentaram resultados similares, destacando o potencial dos modelos quasi-2D assim como

reforçando a importância do modelador na escolha do software de modelagem e das equações de representação dos escoamentos.

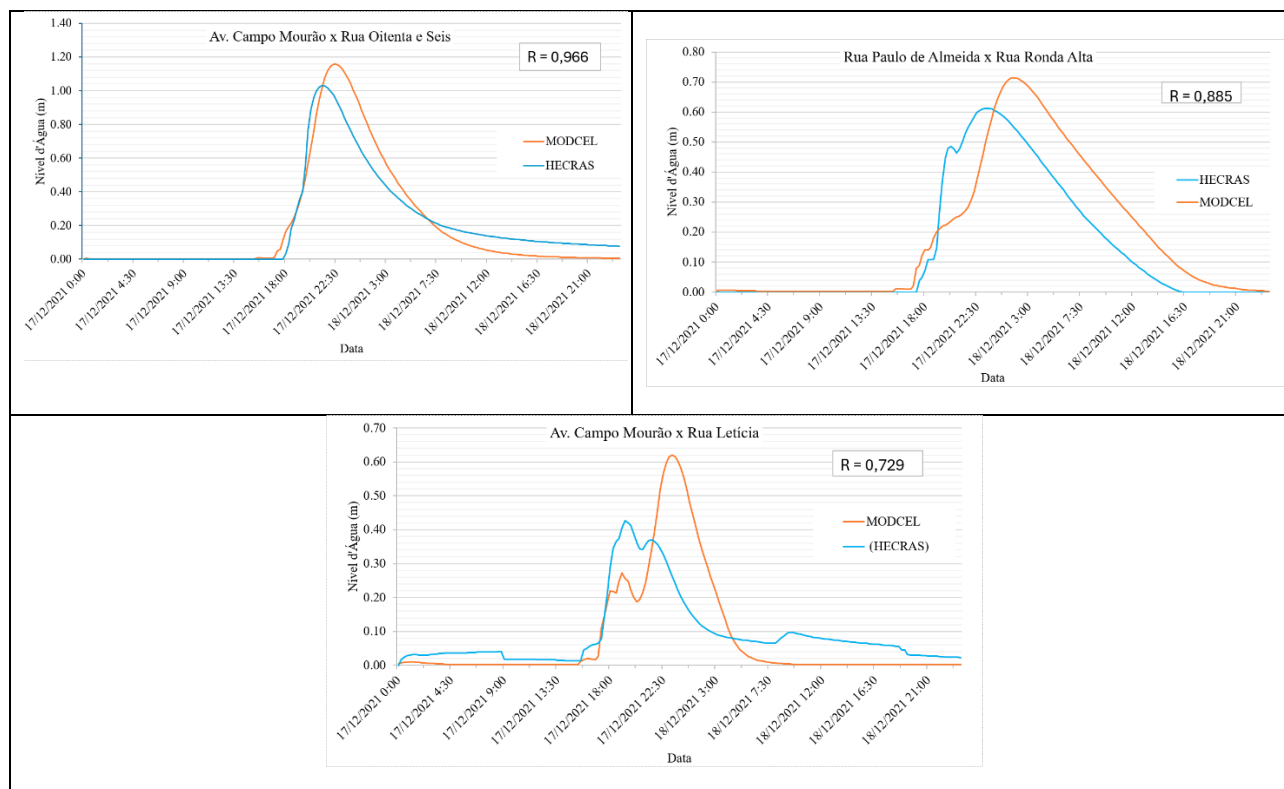


Figura 5 – Lâminas de inundação: MODCEL (Azul) e HEC-RAS (Laranja)

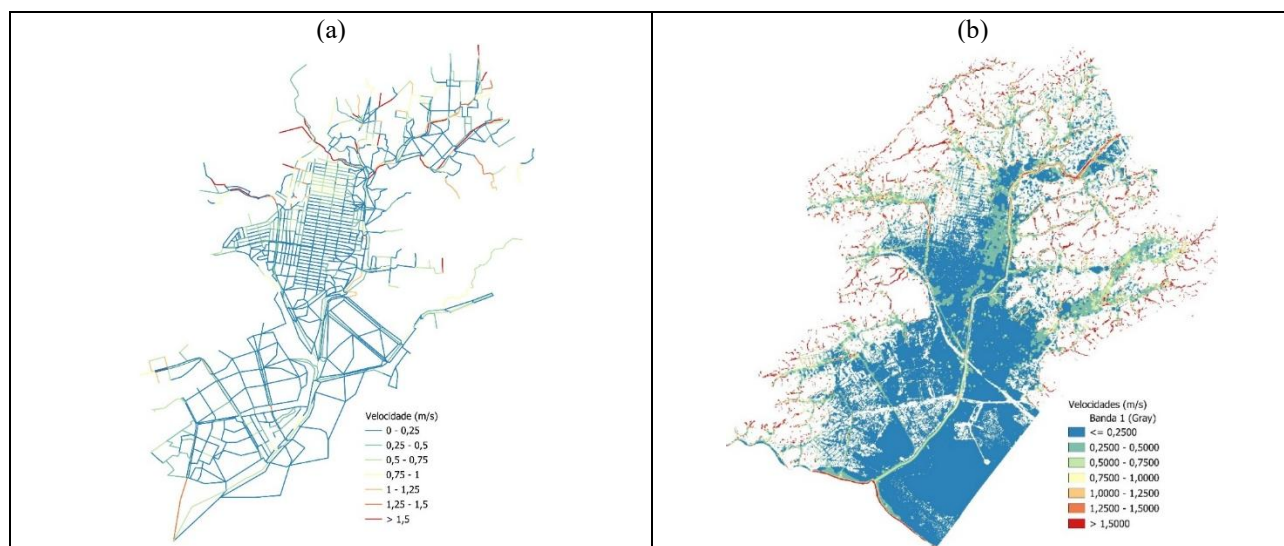


Figura 6– Velocidade de escoamento: a) ModCel; b) HEC-RAS.

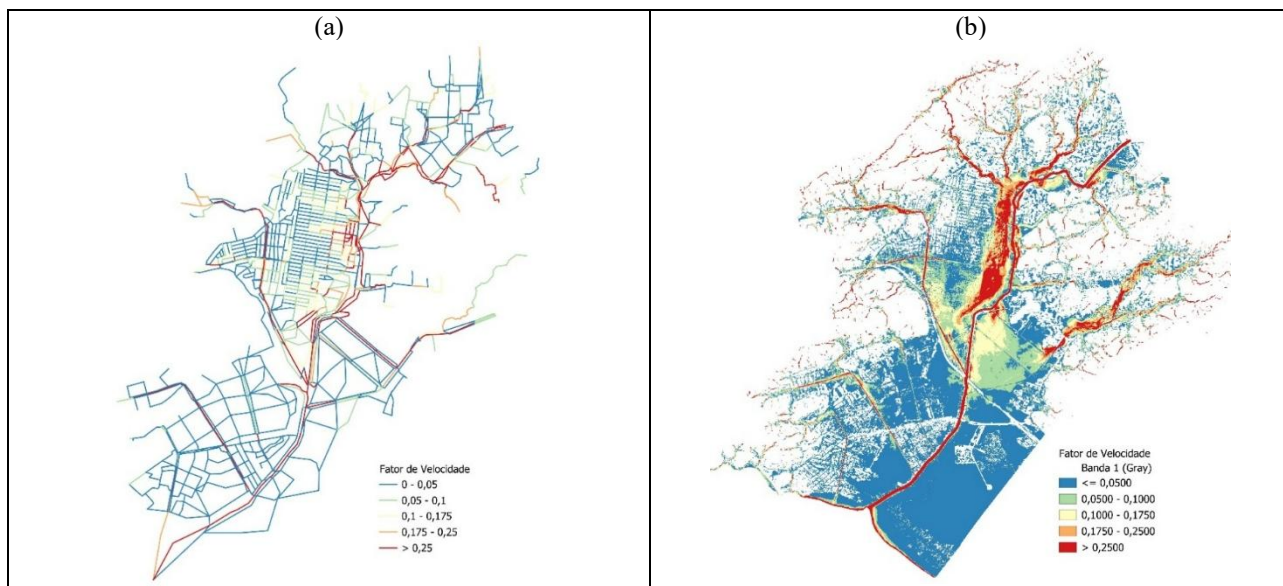


Figura 7 – Fator de velocidade: a) ModCel; b) HEC-RAS.

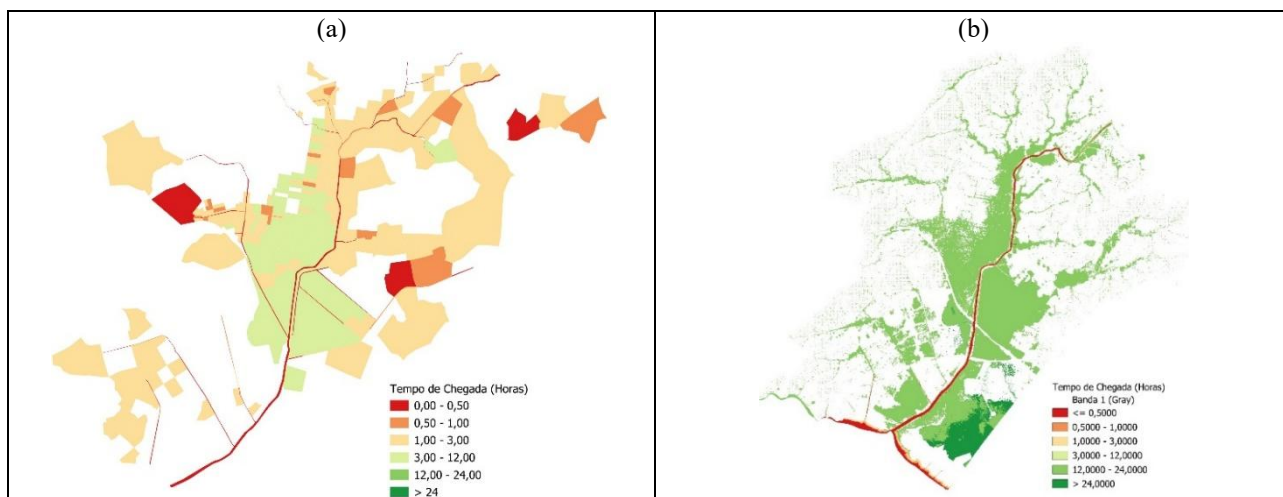


Figura 8 – Tempo de chegada: a) ModCel; b) HEC-RAS.

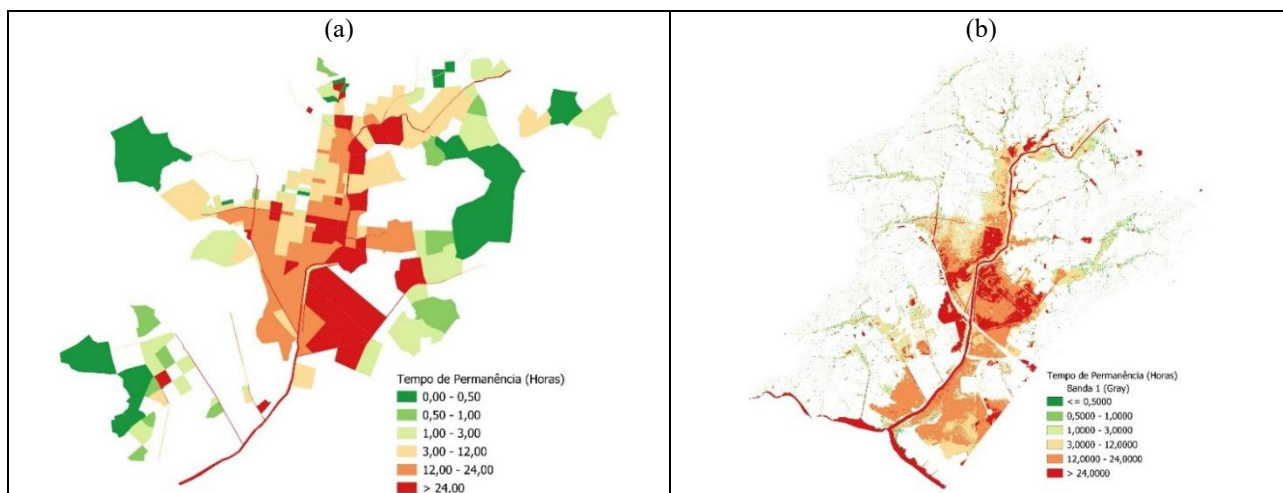


Figura 9 – Tempo de permanência, em horas: a) ModCel; b) HEC-RAS.

CONCLUSÃO

A comparação entre as abordagens quasi-2D (MODCEL) e bidimensional completa (HEC-RAS) aplicadas à bacia do rio Piraquê-Cabuçu demonstrou que ambos os modelos são capazes de representar as propriedades do perigo de inundações urbanas de forma consistente, apresentando comportamentos semelhantes quanto à ascensão da lâmina, picos de cheia e recessão dos hidrogramas nos pontos analisados. A modelagem 2D no HEC-RAS, mostrou-se particularmente mais adequada para capturar heterogeneidades espaciais do escoamento em superfícies urbanas complexas, enquanto o MODCEL, com discretização espacial em 1184 células, ofereceu menor custo computacional, todavia com maior necessidade de interpretação física pelo modelador. Os mapas de perigo produzidos, incluindo lâmina, velocidade, fator de velocidade, tempo de chegada e tempo de permanência, constituem ferramentas essenciais para a adoção de medidas estruturais e não estruturais na gestão do risco de inundações. Trabalhos futuros podem explorar a integração dessas ferramentas em cenários de mudanças climáticas e ocupação do solo, ampliando a capacidade adaptativa de regiões de baixada costeira tal como a bacia do rio Piraquê-Cabuçu.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de bolsas de apoio vinculadas ao Programa PIBIC-UFRJ. Agradecemos à Cátedra UNESCO sobre Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Litorânea, sediada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, à qual esta pesquisa está vinculada.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, B. M. S.; CAMPINHO, M. F. V. Mapeamento de inundações com utilização de modelagem hidrodinâmica 2D no HEC-RAS: estudo de caso da bacia do rio Piraquê-Cabuçu, Rio de Janeiro/RJ. Projeto de Graduação, UFRJ, 2024.
- MIGUEZ MG, BATTEMARCO BP, DE SOUSA MM, et al (2017) Urban Flood Simulation Using MODCEL - An Alternative Quasi-2D Conceptual Model. Water (Switzerland) 9:. <https://doi.org/10.3390/w9060445>
- SOUSA, M.M.; OLIVEIRA, A.K.B.; REZENDE, O.M.; MAGALHÃES, P.M.C.; PITZER JACOB, A.C.; MAGALHÃES, P.C.; MIGUEZ, M.G. (2022). "Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation". Journal of Hydroinformatics, 24(5), pp. 976–991.
- USACE. River Hydraulics: ENGINEER MANUAL. Washington, Dc: Department Of The Army/U.S. Army Corps Of Engineers, 1993.
- VELEZ, Luccas Tolentino; SOUSA, Matheus Martins de; MIGUEZ, Marcelo Gomes; REZENDE, Osvaldo Moura. Mapeamento de Inundações em Bacia Hidrográfica Urbana de Planície Costeira Utilizando um Modelo de Células – Caso do Jardim Maravilha - RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025, Vitória: ABRH, 2025.
- WALLEMACQ, P.; HOUSE, R. Economic Losses, Poverty & Disasters. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 31 p. 2018.
- TABET, Bruno. MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES COM USO DE MODELAGEM QUASI-2D- RASTER: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU, RJ. Projeto de Graduação, UFRJ, 2023.
- TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. Porto Alegre, RS: ABRH/RHAMA, 2007. 389 p.