

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA APLICADA À ANÁLISE DE ALAGAMENTOS URBANOS NO BAIRRO DE BOTAFOGO, RIO DE JANEIRO, RJ

Eduarda Mulinari do Amaral¹; Yuri Guedes Maia¹; Fabio Santos Rangel Junior¹; Ingrid Leão Cabral Pinheiro¹; Carlos Eduardo Falcão de Carvalho Junior¹ & Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira¹

Abstract: Urban flooding is one of the main challenges in managing densely populated areas. Unplanned urban expansion, increasing soil impermeability, and deficiencies in drainage systems directly contribute to the growing frequency and severity of these extreme events. Hydrodynamic modeling has become an essential tool for identifying system failures and developing alternatives to mitigate flooding in urban regions. This study aims to develop a hydrodynamic model focused on the Botafogo neighborhood in Rio de Janeiro, Brazil. Due to limited data availability, model calibration will be based on the historical record of flooding events. The methodology is divided into five main stages: (1) survey of flood occurrences; (2) watershed delineation and definition of the study area; (3) spatial discretization and cell characterization; (4) structuring of the flow network; and (5) computational modeling and model calibration. The study area, defined using cartographic maps, was subdivided into 526 cells, categorized according to predominant land cover as urbanized and/or forested. The results demonstrate the potential of the modeling tool to identify flood-prone areas, even under data-scarce conditions, and allow for a more detailed diagnosis of stormwater behavior in the study region.

Resumo: As inundações e os alagamentos urbanos representam um dos principais desafios para a gestão de territórios densamente urbanizados. A ocupação desordenada, a crescente impermeabilização do solo e a deficiência dos sistemas de drenagem contribuem diretamente para o aumento da frequência e da severidade desses eventos extremos. O uso da modelagem hidrodinâmica torna-se uma ferramenta essencial para diagnosticar falhas no sistema de drenagem e desenvolver alternativas que possam mitigar alagamentos em regiões urbanas. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo hidrodinâmico com foco no bairro de Botafogo – RJ. Diante da escassez de dados, o processo de calibração do modelo será realizado com base no levantamento de ocorrências de alagamentos. A metodologia será dividida em cinco etapas principais: (1) levantamento de eventos de alagamento; (2) delimitação da bacia hidrográfica e definição da área de estudo; (3) discretização espacial e caracterização das células; (4) estruturação da rede de escoamento; e (5) modelagem computacional e verificação dos pontos de alagamentos. A área delimitada por meio de plantas cartográficas foi subdividida em 526 células, categorizadas conforme sua cobertura predominante em áreas urbanizadas e/ou florestadas. Os resultados evidenciam o potencial da ferramenta para diagnosticar alagamentos em áreas urbanas, mesmo em cenários com escassez de informações, além de possibilitar uma análise aprofundada das águas pluviais na região de estudo.

Palavras-Chave – Drenagem urbana; Alagamentos urbanos; Simulação Hidrodinâmica.

1) Afiliação: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. mulinari.eduarda@gmail.com

INTRODUÇÃO

As inundações e alagamentos urbanos representam um dos principais desafios para a gestão de territórios densamente urbanizados, especialmente em cidades costeiras, segundo o Relatório da Qualidade de Vida da População do Estado do Rio de Janeiro, elaborado pela Fundação CEPERJ, o município do Rio de Janeiro apresenta uma parcela de 26% dos domicílios situados em áreas de risco de inundações em seu território (CEPERJ, 2023).

A ocupação desordenada, a impermeabilização crescente do solo e a deficiência dos sistemas de drenagem contribuem diretamente para o aumento da frequência e da severidade desses eventos extremos (MIGUEZ et al., 2012). Bairros como Botafogo e Humaitá, localizados na Zona Sul da cidade, são constantemente afetados por alagamentos, não apenas por suas características topográficas — marcadas por áreas de vale encaixadas entre maciços — que favorecem o acúmulo de águas pluviais, mas também pela complexidade de sua rede de drenagem. Além de concentrarem importante função residencial, essas áreas se destacam por seu papel estratégico na mobilidade urbana da cidade, funcionando como corredores logísticos que interligam a Zona Sul a regiões centrais, à Grande Tijuca e à Zona Norte. Vias como a Rua São Clemente, Voluntários da Pátria e o Túnel Rebouças configuram-se como eixos fundamentais de fluxo diário de milhares de veículos, trabalhadores e estudantes (Pires et al., 2023). A Figura 1 apresenta registros de alagamentos nos bairros citados.

Figura 1 – Registros de alagamentos no estudo de caso



Diante desse cenário, a modelagem hidrodinâmica tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o diagnóstico e a proposição de soluções eficazes no controle de inundações. O uso do modelo MODCEL, um sistema computacional *Quasi-2D* desenvolvido por Miguez e Mascarenhas (2002), tem permitido simular, com alta precisão, os efeitos das chuvas intensas sobre áreas urbanas densamente construídas, representando o escoamento superficial por meio de células interligadas por equações hidráulicas.

O MODCEL é amplamente utilizado em estudos e projetos práticos e acadêmicos para simular inundações tanto naturais quanto urbanas, sendo frequentemente empregado em simulações de redes de drenagem pluvial (Sousa et al. 2022). É considerado um modelo celular multicamada Quasi-

bidimensional, capaz de simular de maneira unificada a camada da rede de drenagem pluvial com a camada de escoamento superficial. A aplicação deste modelo é reconhecida internacionalmente, sendo utilizado em estudos de caso no Brasil (Rezende et al. 2019; Fraga et al. 2022; Oliveira et al. 2023), Colômbia (Oliveira et al. 2019; Pérez-Montiel et al. 2022), Reino Unido (Sousa et al. 2022), Espanha (Miguez et al. 2017) e Itália (Scionti et al. 2018; Barbaro et al. 2021).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma base de simulação hidrodinâmica, utilizando o software MODCEL, para o bairro de Botafogo, com foco na simulação de eventos extremos para identificação das áreas de maior ameaça sob o ponto de vista de alagamentos, mesmo em cenários de falta de dados oficiais para calibração. A proposta visa contribuir para a formulação de estratégias de drenagem urbana mais eficientes, respeitando as peculiaridades da dinâmica costeira e da ocupação urbana da área estudada, e alinhando-se à necessidade urgente de adaptação das cidades aos efeitos das mudanças climáticas.

METODOLOGIA

Este estudo seguiu uma abordagem integrada para identificação de áreas de alagamentos nos bairros de Botafogo e Humaitá, na cidade do Rio de Janeiro, combinando levantamento de ocorrências reais com modelagem hidrológica e hidrodinâmica. A metodologia foi dividida em cinco etapas principais: (1) levantamento de eventos de alagamento, (2) delimitação da bacia hidrográfica e definição da área de estudo, (3) discretização espacial e caracterização das células, (4) estruturação da rede de escoamento e (5) modelagem computacional e verificação dos pontos de alagamentos.

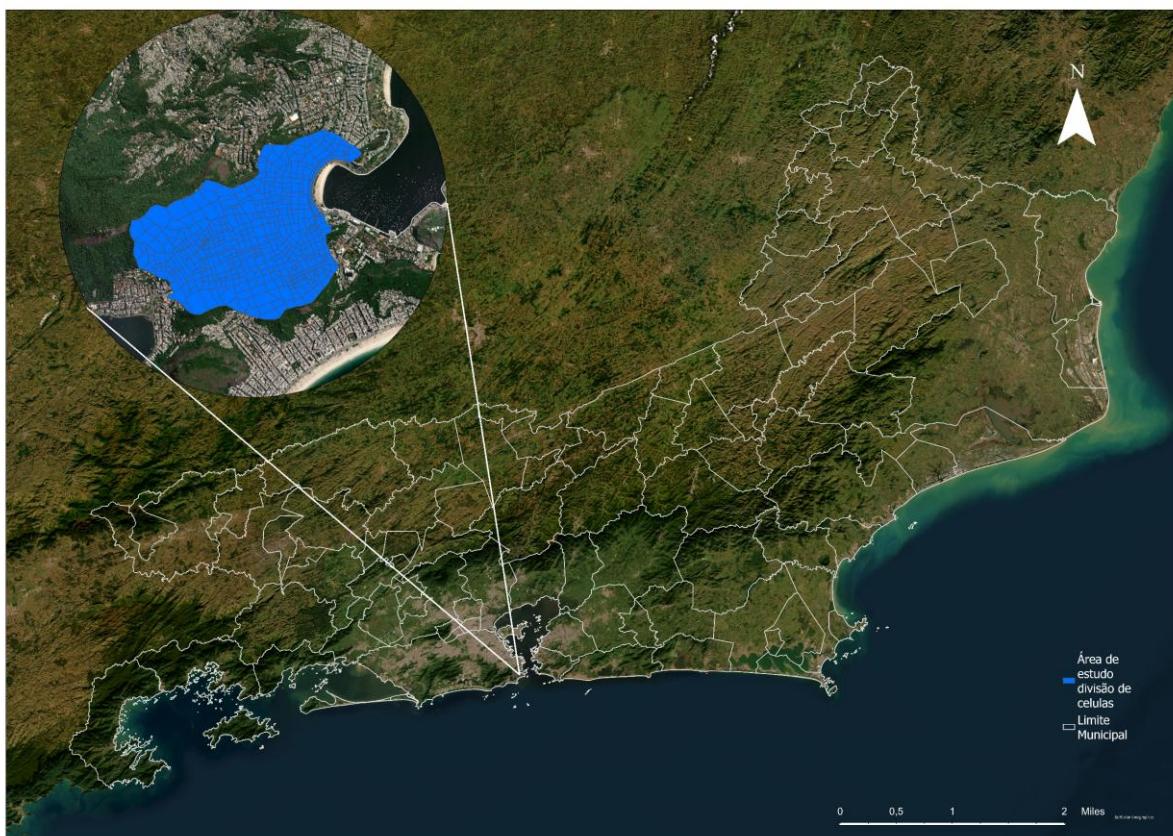
Levantamento de ocorrências de alagamento

Inicialmente, realizou-se um levantamento sistemático em veículos de mídia online e redes sociais para identificar eventos de alagamento documentados nos bairros de Botafogo e Humaitá com destaque para reportagens veiculadas nos portais G1, O Dia e Extra, que documentaram episódios significativos de alagamento na região. O recorte temporal da investigação compreende o período de 2017 a 2025. Para cada ocorrência identificada, registraram-se a data, imagens fotográficas, bem como a descrição do evento. As coordenadas geográficas foram obtidas utilizando a ferramenta Google Earth, possibilitando o georreferenciamento dos pontos de alagamento.

Delimitação da bacia hidrográfica e da área de estudo

Para a delimitação da bacia hidrográfica do bairro de Botafogo, localizado na Zona Sul do município do Rio de Janeiro (RJ) (IBGE, s.d.), utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) fornecido pela Prefeitura do Rio de Janeiro com escala 1:2000, a partir do qual foram geradas curvas de nível com equidistâncias de 5 m e 1 m, através do Software QGIS (Quantum Geographic Information System), possibilitando a identificação dos divisores topográficos e posterior delimitação da área de contribuição da bacia hidrográfica, isolando a área de estudo. Além da topografia, plantas planialtimétricas elaboradas pelo IPP – Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos através do DATA RIO, portal de dados abertos da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, foram utilizadas para identificar as principais cotas altimétricas da área urbanizada e auxiliar no processo de delimitação da área de contribuição hidrológica de Botafogo. A Figura 2 apresenta a localização da área de estudo e discretização em células de escoamento.

Figura 2 – Localização da área de estudo e discretização em células de escoamento.



Discretização espacial e caracterização das células

A área delimitada foi subdividida em 526 células, categorizadas segundo sua cobertura predominante em áreas urbanizadas (prédios, ruas asfaltadas) ou florestadas (maciços vegetados, afloramentos rochosos, encostas íngremes). Em cada célula, foram atribuídos os seguintes parâmetros físicos: área total, área de armazenamento, cota de fundo, cota inicial, linha de matriz e coeficiente de escoamento superficial (runoff). Esses dados foram extraídos a partir de bases cartográficas vetoriais e cartas topográficas fornecidas pelo Instituto Pereira Passos (IPP), incluindo as folhas c287C45, c287F11, c287E23, c287E22, c287D34, c287D32, c287D31, c287C46, c287C43 e c287C42, todas no sistema SIRGAS 2000. Para uso em ambiente GIS, as cartas foram convertidas de PDF para TIFF e georreferenciadas por meio de pontos de controle reconhecíveis.

Estruturação da rede de escoamento superficial

Foram construídos *shapefiles* de pontos e linhas representando, respectivamente, os centros de ligação e as conexões hidrológicas entre as células. As linhas foram classificadas em dois tipos de ligação: tipo P (baseada na equação de Saint-Venant) e tipo V (baseada na equação de vertimento). Os parâmetros atribuídos às ligações incluem: tipo, largura (em metros) e coeficientes de rugosidade de Manning e de vertimento. Para as ligações tipo P, adotaram-se coeficientes de 0,016 para vias urbanas e 0,045 para áreas não urbanizadas, conforme recomendações da literatura técnica e do manual Instruções Técnicas da Prefeitura do Rio de Janeiro – Rio-Águas (Portaria O/SUB-Rio-Águas nº 004/2010, revisada em julho de 2019); para as ligações tipo V, foi utilizado o valor de 0,25.

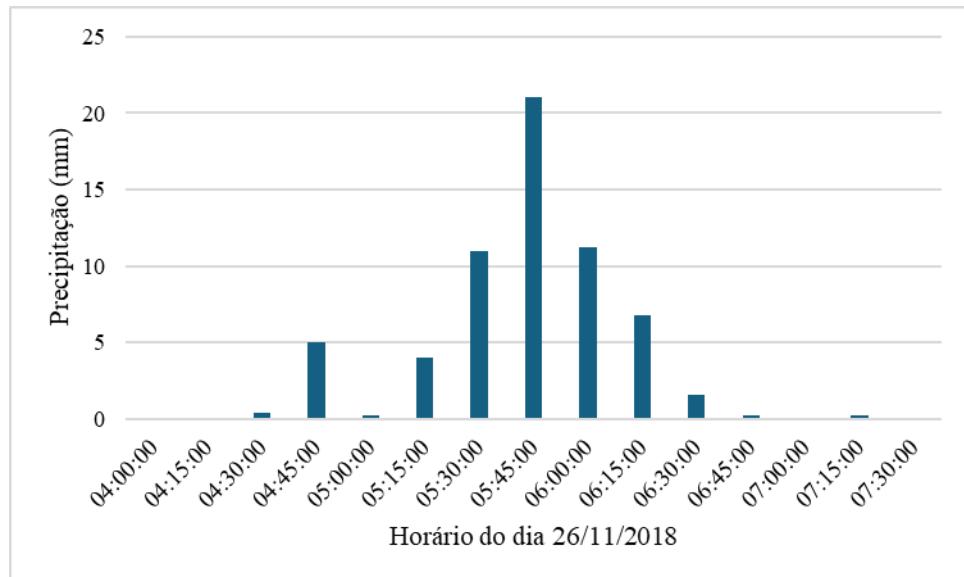
Cabe destacar que este estudo não considerou o escoamento subsuperficial por redes de drenagem, devido à ausência de informações disponíveis. No entanto, essa limitação representa um cenário de colapso total do sistema de microdrenagem da região, o que pode ser interpretado como uma abordagem conservadora, favorecendo a identificação das áreas mais suscetíveis a alagamentos.

Modelagem hidrológica e hidrodinâmica e verificação dos pontos de alagamentos

Para a transformação da chuva em vazão, foi utilizado o próprio MODCEL (Mascarenhas & Miguez, 2002) que possui módulos hidrológicos acoplados à simulação matemática. Diante da discretização das células realizada, foi possível aplicar o módulo que aplica o método racional para transformação de chuva em vazão em cada uma das células de escoamento. Os dados de chuva foram obtidos diante da avaliação de eventos pluviométricos recentes, destacando-se o evento ocorrido no dia 26/11/2018. A modelagem hidrodinâmica foi realizada também com o modelo MODCEL, um modelo quasi-bidimensional (quasi-2D) que representa o escoamento superficial por meio de células conectadas em rede. Essa estrutura permite a simulação de trocas laterais entre células, tanto em situações normais quanto sob condições de alagamento.

A calibração do modelo baseou-se na comparação entre os locais efetivamente alagados, conforme os registros midiáticos e observações de campo, e os resultados simulados. A simulação dos cenários foi conduzida com dados de precipitação do dia 26 de novembro de 2018 entre os horários de 04h15m até 07h30m referentes ao órgão da Prefeitura do Rio de Janeiro através da plataforma Sistema Alerta Rio, tendo como estação de coleta de dados da Urca, referente, localizada dentro do Instituto Militar de Engenharia (IME), localizado no bairro. Coletando os índices pluviométricos, visando compreender a dinâmica de alagamento e os caminhos preferenciais de escoamento na área de estudo. A Figura 3 apresenta o evento pluviométrico utilizado, cujas informações foram obtidas do posto pluviométrico de um bairro nas proximidades, Urca.

Figura 3 – Evento pluviométrico utilizado para simulação hidrológica e hidrodinâmica



Juntamente aos dados pluviométricos também foram analisadas as plantas cartográficas da região, em uma escala de 1:2.000, disponíveis no Instituto Pereira Passos (IPP), no Mapa Digital do Rio de Janeiro. Ambas as plataformas forneceram dados como topografia, geografia urbana e geolocalização, auxiliando na construção do banco de dados para criação dos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita evidenciam uma predominância de lâminas de inundação acima dos 10 cm nas áreas mais urbanizadas da bacia hidrográfica, justificada a partir de uma alta impermeabilização do solo associada a cotas altimétricas e declividades mais baixas.

Os pontos de alagamentos observados em veículos de comunicação, estão distribuídos na porção da bacia que apresenta declividade menor do que 1%, como pode ser observado na Figura 4, o que explica a dificuldade no escoamento da água acumulada em direção ao mar. À medida que se elevam as cotas em direção aos divisores da bacia, é possível identificar um aumento significativo da declividade, com predominância de declividades entre 45% e 759.6%. A rápida variação da declividade explica a dificuldade na retenção da precipitação na parte do território que possui áreas permeáveis, e aumenta o escoamento superficial para as áreas com maior impermeabilização da bacia, provocando alagamentos. Uma das principais vias afetadas pela ocorrência desses eventos é a R. Voluntários da Pátria, representada pelos pontos 17, 18 e 19 presentes nas Figuras 4 e 5, cujas lâminas de inundação estão caracterizadas por um intervalo de 10 cm a 75 cm, alturas que já apresentam riscos a mobilidade urbana e a população, além da possível perda de patrimônios materiais.

Dessa forma, por meio da realização da simulação hidrológica e hidrodinâmica, sem a consideração da microdrenagem existente na região, foi possível entender como o território responde a um cenário, no qual o sistema de drenagem não esteja funcionando adequadamente, demonstrando assim, as áreas mais suscetíveis a ocorrência de alagamentos e os principais pontos a serem considerados em possíveis intervenções públicas no bairro de Botafogo.

Figura 4 – Mapa de declividade da região de estudo.

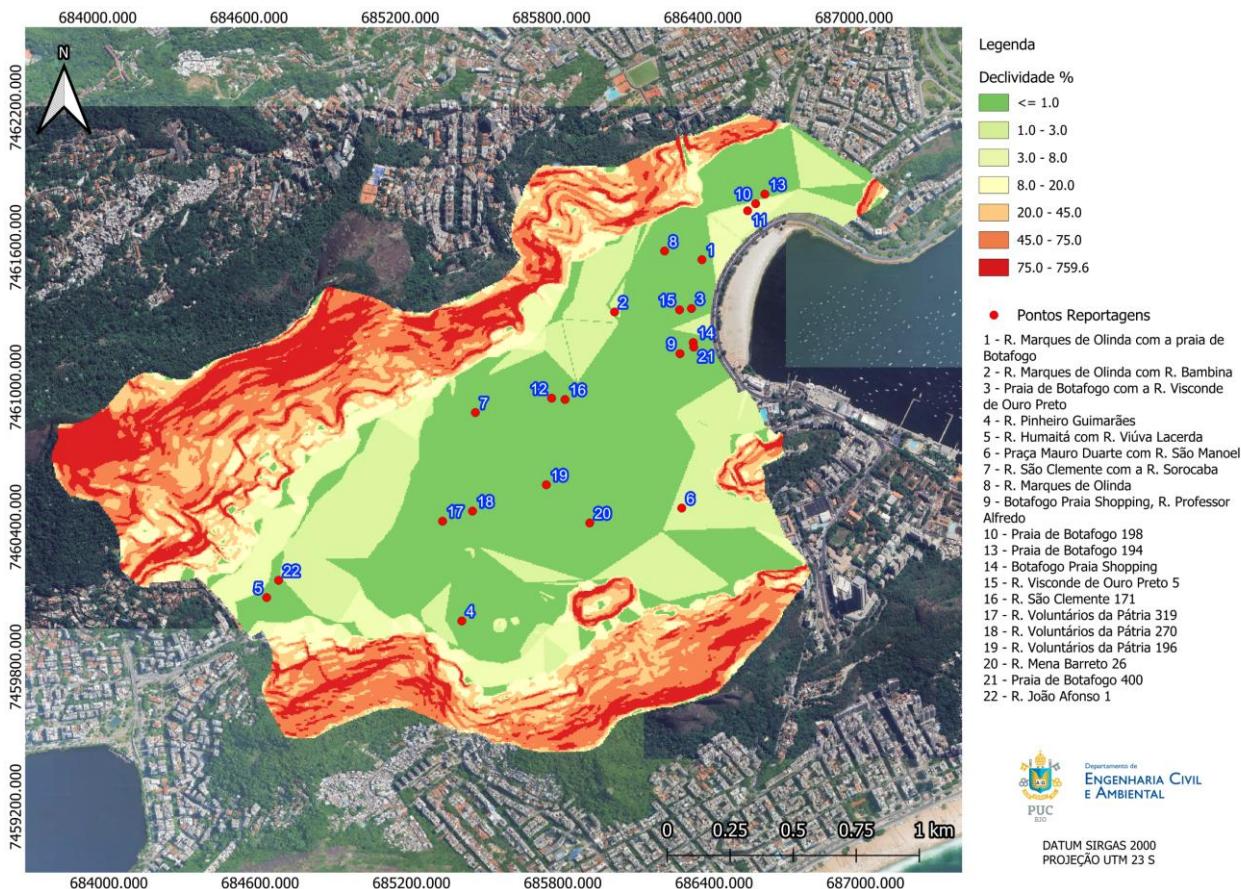
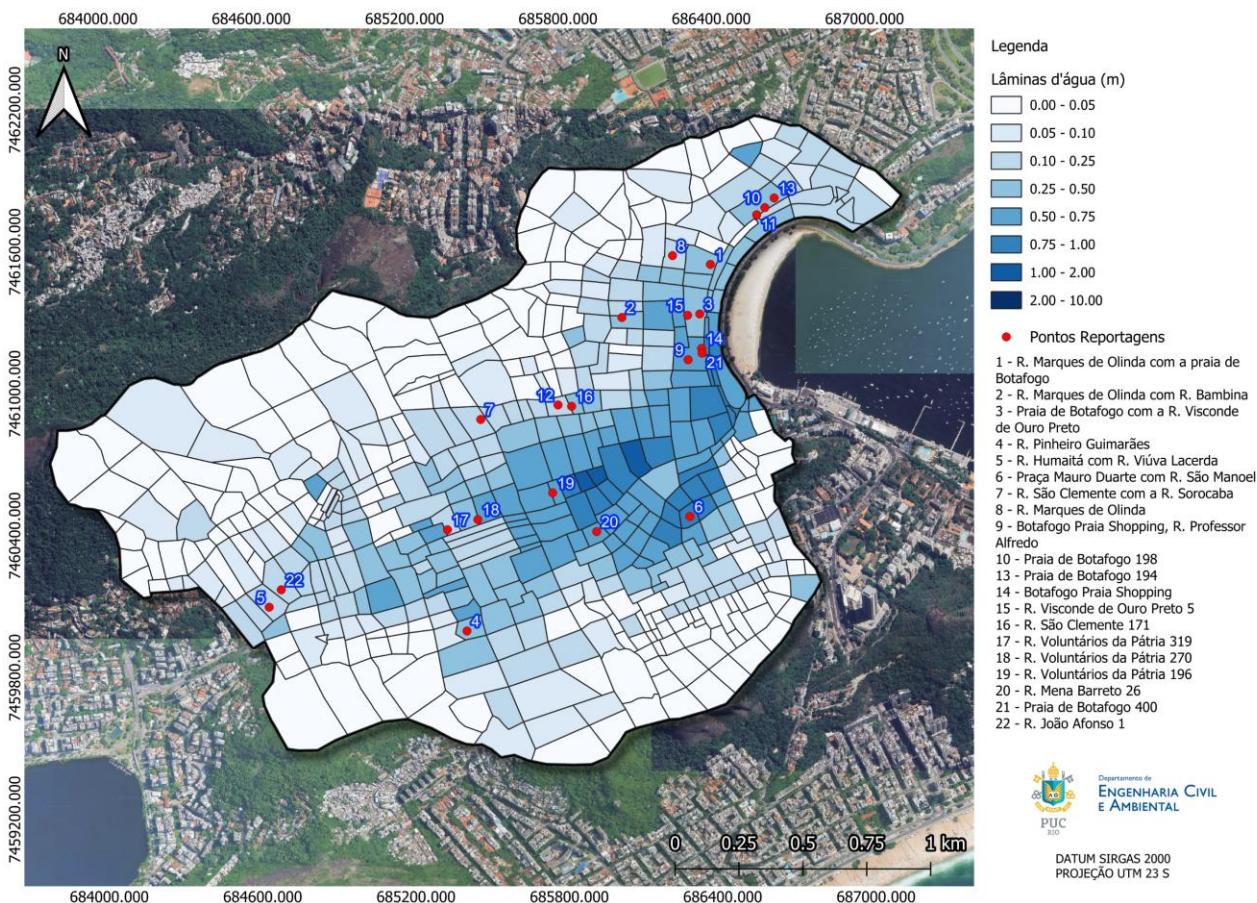


Figura 5 – Mancha de Inundação considerando o evento ocorrido no dia 26/11/2018



A simulação hidrodinâmica permitiu identificar a ocorrência de alagamentos concentrados, sobretudo, nas regiões centrais e no setor leste do bairro de Botafogo. Essas áreas coincidem com zonas de menor declividade, o que reduz a capacidade de escoamento superficial e favorece a sobrelevação dos níveis de água durante eventos intensos. As encostas localizadas nas bordas da bacia contribuem com respostas hidrológicas rápidas, intensificando a chegada de volumes expressivos de escoamento superficial às regiões mais baixas, que apresentam dificuldade de drenagem.

Além disso, observou-se que a Rua Praia de Botafogo e a via expressa localizada no limite leste da bacia funcionam, na prática, como barreiras físicas ao escoamento superficial, assumindo o papel de diques urbanos. Nessa configuração, o escoamento das águas acumuladas torna-se dependente do funcionamento do sistema de microdrenagem local.

A coerência entre os resultados da simulação e os registros históricos de alagamentos reforça a hipótese de que a rede de microdrenagem da região não opera de forma satisfatória. Esse mau funcionamento pode estar associado tanto ao subdimensionamento das galerias pluviais quanto à ausência de manutenção preventiva, que favorece o acúmulo de sedimentos e resíduos sólidos, comprometendo significativamente a capacidade hidráulica do sistema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados no presente estudo, obtidos por meio da modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia de Botafogo, demonstram a significativa influência das características geomorfológicas e da impermeabilização do solo na dinâmica dos alagamentos em Botafogo.

A rápida transição de declividade evidenciada anteriormente, contribui para o aumento expressivo do escoamento superficial dentro da bacia, intensificando os impactos nas zonas planas e impermeabilizadas.

O entendimento das dinâmicas de escoamento no território evidenciadas no presente artigo subsidia a elaboração de estratégias para o planejamento urbano, envolvendo o aprimoramento e manutenção da microdrenagem existente e implementações de soluções baseadas na natureza, como pavimentos permeáveis, que auxiliem na mitigação dos escoamentos superficiais.

Os resultados da simulação hidrodinâmica indicam que as áreas centrais e leste do bairro de Botafogo são as mais suscetíveis a alagamentos, devido à menor declividade e à concentração do escoamento superficial proveniente das encostas. A presença de vias como a Rua Praia de Botafogo e a via expressa no limite da bacia atua como barreira ao escoamento, restringindo a drenagem ao sistema de microdrenagem. A compatibilidade entre os resultados simulados e os registros observados reforça que a rede existente apresenta falhas, possivelmente associadas ao subdimensionamento e à falta de manutenção, com acúmulo de sedimentos e resíduos reduzindo sua eficiência. Esses achados ressaltam a necessidade de intervenções estruturais e operacionais para aumentar a resiliência da drenagem urbana na região.

Embora o uso de registros de alagamentos não permita a calibração quantitativa do modelo hidrodinâmico, ele contribui para aumentar a confiabilidade dos resultados, ao indicar que o modelo é capaz de representar alagamentos nas regiões com registros frequentes de ocorrência. Ainda assim, é necessário aprimorar o processo de calibração e validação com base em dados quantitativos, como registros de níveis de alagamento durante eventos pluviométricos intensos.

Além disso, as etapas futuras envolvem a realização de novos estudos que considerem a atuação da rede de microdrenagem e cenários futuros de mudanças climáticas, de modo a entender a influência desse fenômeno na presente bacia e embasar políticas públicas eficazes para a mitigação dos riscos de alagamentos no bairro.

REFERÊNCIAS

Barbaro, G., Miguez, M. G., de Sousa, M. M., Ribeiro da Cruz Franco, A. B., de Magalhães, P. M. C., Foti, G. & ... Occhiuto, I. 2021 Innovations in best practices: Approaches to managing urban areas and reducing flood risk in Reggio Calabria (Italy). *Sustainability* 13 (6), 3463

EXTRA. *Chove forte em diversos bairros do Rio.* Extra Globo, Rio de Janeiro, publicação web. Disponível em: <https://extra.globo.com/noticias/rio/chove-forte-em-diversos-bairros-do-rio-22514621.html>. Acesso em: 23 jun. 2025.

Fraga, J. P. R., Okumura, C. K., Guimaraes, L. F., Arruda, R. N. D., Becker, B. R., de Oliveira, A. K. B. & ... Miguez, M. G. 2022 Cost-benefit analysis of sustainable drainage systems considering ecosystems services benefits: Case study of canal do mangue watershed in Rio de Janeiro city, Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy* 1–18

FUNDAÇÃO CENTRO ESTADUAL DE ESTATÍSTICAS, PESQUISAS E FORMAÇÃO DE SERVIDORES PÚBLICOS DO RIO DE JANEIRO. Relatório da Qualidade de Vida da População do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CEPERJ, 2025.

G1 RIO DE JANEIRO. *Chuva provoca deslizamentos, queda de muro e árvores no Rio de Janeiro.* G1, Rio de Janeiro, 26 nov. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2018/11/26/chuva-provoca-deslizamentos-queda-de-muro-e-arvores-no-rio-de-janeiro.ghtml>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IBGE. *Bairro de Botafogo: Rio de Janeiro (RJ).* [S. l.]: [s. n.], [19--]. 1 fot. (preto e branco). Série Acervo dos municípios brasileiros. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=440213>. Acesso em: 23 jun. 2025.

Mascarenhas, Flavio & Miguez, Marcelo. (2002). Urban Flood Control through a Mathematical Cell Model. *Water International*. 27. 208-218. 10.1080/02508060208686994.

Miguez, M. G., Battemarco, B. P., Sousa, M. M., Rezende, O. M., Veról, A. P. & Gusmaroli, G. 2017 Urban flood simulation using MODCEL – an alternative quasi-2D conceptual model. *Water* 9 (6), 445.

MIGUEZ, M. G., Rezende, O. M., & Veról, A. P. (2012). Interações entre o rio dos macacos e a lagoa rodrigo de freitas sob a ótica dos problemas de drenagem urbana e ações integradas de revitalização ambiental. *Oecologia Australis*, 16(3), 615–650. <https://doi.org/10.4257/oeco.2012.1603.16>

O DIA – RIO DE JANEIRO. *Chuva causa pontos de alagamento e queda de árvore na cidade do Rio.* O Dia, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://odia.ig.com.br/rio-de-janeiro/2024/01/6780060-chuva-causa-pontos-de-alagamento-e-queda-de-arvore-na-cidade-do-rio.html>. Acesso em: 23 jun. 2025.

O GLOBO. *Após temporal no Rio, chuva ainda intensa em alguns pontos; cidade volta ao estágio de atenção.* O Globo, Rio de Janeiro, publicação web. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/rio/apos-temporal-no-rio-chuva-ainda-intensa-em-alguns-pontos-cidade-volta-ao-estagio-de-atencao-1-25457702>. Acesso em: 23 jun. 2025.

Oliveira, A. K. B., Carneiro Alves, L. M., Carvalho, C. L., Haddad, A. N., de Magalhães, P. C. & Miguez, M. G. 2023 A framework for assessing flood risk responses of a densely urbanized watershed, to support urban planning decisions. *Sustainable and Resilient Infrastructure* 8 (4), 400–418.

Oliveira, A. K. B., Rezende, O. M., de Sousa, M. M., Nardini, A. & Miguez, M. G. 2019 An alternative flood model calibration strategy for urban watersheds: The case study of Riohacha, Colombia. *Water Science and Technology* 79 (11), 2095–2105.

Pérez-Montiel, J. I., Cardenas-Mercado, L. & Nardini, A. G. C. 2022 Flood modeling in a coastal town in Northern Colombia: Comparing MODCEL vs. IBER. *Water* 14 (23), 3866

PIRES, A. L.; OLIVA, I. S. “Projeto conceitual para mitigação de inundações na bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigues de Freitas, com foco no bairro do Jardim Botânico”. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2023

Rezende, O. M., de Oliveira, A. K. B., Jacob, A. C. P. & Miguez, M. G. 2019 A framework to introduce urban flood resilience into the design of flood control alternatives. *Journal of Hydrology* 576, 478–493

Scionti, F., Miguez, M. G., Barbaro, G., De Sousa, M. M., Foti, G. & Canale, C. 2018 Integrated methodology for urban flood risk mitigation in Cittanova, Italy. *Journal of Water Resources Planning and Management* 144 (10), 05018013.

Sousa, M. M., de Oliveira, A. K. B., Rezende, O. M., de Magalhães, P. M. C., Pitzer Jacob, A. C., 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* 24 (5), 976–991