

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SARAPUÍ DIANTE DE CENÁRIOS FUTUROS**

*Eduarda Mulinari do Amaral<sup>1</sup>; Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira<sup>2</sup>*

**Abstract:** Urban flooding represents a critical challenge in the state of Rio de Janeiro, particularly in the Baixada Fluminense, a flat and densely populated region where natural and anthropogenic factors exacerbate risks. Physiographic characteristics, such as low elevation relative to the level of Guanabara Bay, combined with unplanned urban development, hinder proper stormwater drainage. In this context, areas like the Sarapuí River Basin face increasing risks, especially during extreme rainfall events and rising bay levels. This study employs a future scenario simulation methodology based on hydrological and hydrodynamic models as an essential tool for evaluating stormwater management in the basin. The primary objective is to analyze scenarios that consider the combined impact of climate change and land-use changes, focusing particularly on the Alberto de Oliveira polder, whose implementation could play a strategic role in flood mitigation. Overall, the study's results underscore the necessity of integrating the polder's operations into the existing drainage system, contributing to mitigating the adverse effects of irregular urbanization and climate change while promoting greater territorial resilience. The relevance of the proposed methodology stands out in its ability to predict impacts and identify critical flood-prone areas under various potential future scenarios, providing valuable input for urban planning.

**Resumo:** As inundações urbanas representam um desafio crítico no estado do Rio de Janeiro, em especial na Baixada Fluminense, região plana e densamente povoada, onde fatores naturais e antrópicos intensificam os riscos. Características fisiográficas, como a baixa elevação em relação ao nível da Baía de Guanabara, somadas à ocupação urbana desordenada, comprometem o escoamento adequado das águas pluviais. Nesse contexto, áreas como a Bacia Hidrográfica do Rio Sarapuí enfrentam riscos crescentes, especialmente diante de chuvas extremas e elevações no nível da baía. Nessa circunstância, o presente estudo utiliza uma metodologia de simulação de cenários futuros baseada em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos como ferramenta essencial para avaliar o manejo de águas pluviais na bacia. O objetivo principal é analisar cenários que considerem o impacto combinado das mudanças climáticas, das alterações no uso do solo, principalmente no polder Alberto de Oliveira, cuja implementação pode ser estratégica na mitigação de inundações. De maneira geral, os resultados obtidos no estudo reforçam a necessidade de integrar o funcionamento do polder ao sistema de drenagem existente, contribuindo para mitigar os efeitos negativos da ocupação irregular e das mudanças climáticas, promovendo maior resiliência territorial. Destaca-se a relevância do uso da metodologia apresentada para prever impactos e identificar áreas críticas de inundações diante da possibilidade de ocorrência de diversos cenários futuros, fornecendo subsídios para o planejamento urbano.

**Palavras-Chave** – Drenagem urbana; Inundações; Baixada Fluminense.

1) Mestranda do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, mulinari-eduarda@gmail.com

2) Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Edifício Cardeal Leme, sala 301, Rua Marquês de São Vicente, 225, 22451-900 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil, +55 (21) 3527-1188, krishnamurti@puc-rio.br

## INTRODUÇÃO

A ocorrência de eventos de eventos extremos impulsionados por fenômenos naturais, especificamente as inundações urbanas, representam um grave problema para o estado do Rio de Janeiro. De acordo com a Secretaria de Estado da Defesa Civil (2019), tais eventos são os maiores responsáveis pelas decretações de emergência no estado, com uma porcentagem de 67% comparado a outros desastres naturais. Um dos fatores que mais agravam a ocorrência e a magnitude das inundações urbanas, é o desenvolvimento desenfreado e não planejado da urbanização, que alteram o funcionamento do ciclo hidrológico, principalmente através da impermeabilização do solo, da remoção das matas ciliares e da ocupação das áreas marginais aos corpos hídricos (Tucci, 2004 & Júnior; Santos, 2013).

O município de Duque de Caxias, localizado na baixada fluminense do Rio de Janeiro, que abriga atualmente um pouco mais de 3,5 milhões de pessoas (OBSERVATÓRIO/SEBRAE/RJ, 2016), teve o seu desenvolvimento intensificado a partir da década de 90, com intensas migrações populacionais ocasionadas por oportunidades de empregos e moradias próximas ao centro político e financeiro do estado que o município representava na época (Magalhães, 2024). Tal desenvolvimento desencadeou um crescimento exponencial na urbanização e no número de pessoas vivendo na região, sem o devido preparo do sistema de drenagem e de infraestruturas urbanas, anteriormente projetadas para o uso agropecuário pelo antigo Departamento Nacional de Obras de Saneamento – DNOS (Magalhães, 2024).

Em vista dos pontos citados, estudos focados em inundações urbanas, com foco no funcionamento da macrodrenagem da Bacia dos Rios Iguaçu-Sarapuí podem fornecer dados relevantes para a melhoria do planejamento urbano, da implementação de novas soluções estruturais e não estruturais e formulação de políticas públicas. Além de entender a relação entre as mudanças climáticas, urbanização e o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de uma ferramenta hidrológica-hidrodinâmica, diferentes cenários de manejo de águas pluviais na bacia hidrográfica do Rio Sarapuí, considerando diversas possibilidades de aproveitamento dos volumes do polder Alberto de Oliveira, um dos pôlderes presente na bacia do rio Sarapuí, devido à ocupação irregular desta região. Adicionalmente, serão verificados os efeitos das mudanças climáticas nos cenários apresentados.

## METODOLOGIA

### Modelo hidrológico e hidrodinâmico para a simulação de cheias urbanas

Neste trabalho, foi utilizado o modelo hidrodinâmico, utilizando o Modcel, do Projeto Iguaçu com poucas modificações, limitadas às adaptações necessárias para simular os cenários propostos.

O modelo hidrodinâmico MODCEL, desenvolvido por Miguez e Mascarenhas (2002), adota uma abordagem quasi-bidimensional para simular o escoamento superficial em ambientes urbanos. Sua estrutura baseia-se na discretização do território em células que interagem entre si por meio de conexões hidráulicas unidimensionais.

A aplicabilidade do modelo MODCEL tem sido comprovada por sua utilização em diferentes contextos de mitigação de cheias urbanas, tanto em estudos nacionais quanto internacionais. (Fraga et al., 2022; Oliveira et al., 2023; Sousa et al., 2022).

Destaca-se que a calibração e validação do modelo são etapas essenciais do processo de modelagem e em contextos com dados hidrológicos e hidráulicos limitados, a utilização do MODCEL possibilita que essas etapas sejam realizadas de forma satisfatória (Oliveira *et al.*, 2019). A calibração foi realizada com base nos dados de nível de três estações hidrometeorológicas do Sistema de Alerta

de Cheia da Baixada Fluminense (INEA, 2010), considerando a estação Catavento, GBM Nova Iguaçu e Ponte de Ferro Capivari, e utilizando o evento de chuva ocorrido entre os dias 30 e 31 de dezembro de 2009, entre às 18:30h do dia 30 e às 9:15h do dia 31, que apresentou resultados condizentes com as medições de campos existentes para o evento de 2009 (Marques *et al.*, 2009).

### **Simulação de cenários**

Para a análise do funcionamento do Pôlder Alberto de Oliveira, presente na Bacia do Rio Sarapuí, 6 cenários foram considerados, com suas respectivas adequações realizadas no modelo hidrodinâmico, quando necessário. Para cada cenário, dois perfis foram elaborados, um para o rio Sarapuí e outro para o canal auxiliar ao pôlder, com suas respectivas cotas de fundo e nível d'água, além de um mapa com as manchas de inundação, considerando uma precipitação com um tempo de recorrência de 25 anos. A seguir são apresentados os cenários simulados no presente estudo.

Cenário 1      2009      Situação do pôlder Alberto de Oliveira em 2009 sob um evento de TR 25 sem a consideração das Mudanças Climáticas (MC)

Cenário 2      2009 MC      Situação do pôlder Alberto de Oliveira em 2009 sob um evento de TR 25 com a consideração das Mudanças Climáticas

Cenário 3      2024      Situação do pôlder Alberto de Oliveira em 2024 sob um evento de TR 25 sem a consideração das Mudanças Climáticas

Cenário 4      2024 MC      Situação do pôlder Alberto de Oliveira em 2024 sob um evento de TR 25 com a consideração das Mudanças Climáticas

Cenário 5      OT      Situação hipotética do pôlder Alberto de Oliveira na configuração original do Projeto Iguaçu sob um evento de TR 25 sem a consideração das Mudanças Climáticas

Cenário 6      OT MC      Situação hipotética do pôlder Alberto de Oliveira na configuração original do Projeto Iguaçu sob um evento de TR 25 com a consideração das Mudanças Climáticas

### **ESTUDO DE CASO – PÔLDER ALBERTO DE OLIVEIRA**

A bacia hidrográfica do rio Sarapuí está distribuída entre 6 municípios da baixada fluminense (Belford Roxo, Nova Iguaçu, Mesquita, Nilópolis, São João de Meriti e Duque de Caxias) e o município do Rio de Janeiro.

O Pôlder Alberto de Oliveira, objeto de estudo do presente trabalho, se localiza majoritariamente no município de Duque de Caxias, o mais populoso dentre os existentes na Baixada Fluminense, de acordo com dados do Censo Demográfico de 2022, com 808.161 mil habitantes e uma representação percentual de 22,53% do total de pessoas residentes na sub-região da região metropolitana do Rio de Janeiro (IBGE, 2023), e no bairro Olavo Bilac na margem direita do rio Sarapuí, entre a linha de transmissão da Light, que divide os municípios de Duque de Caxias e São João de Meriti e a Av. Presidente Kennedy, que liga os municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias e Rio de Janeiro.

O pôlder Alberto de Oliveira possui atualmente uma área total que representa aproximadamente 42 % da sua área de projeto inicial de 1.200.000 m<sup>2</sup> e é distribuída em seis partes de tamanhos variados, pois ao longo dos anos, a área destinada para a construção do Pôlder Alberto de Oliveira, sofreu pressões contínuas de ocupação urbana e aterramentos, tanto para construção de novas habitações, quanto para outros fins (COPPE, 2013). Dessa forma algumas intervenções foram estudadas para a recuperação da área de armazenamento do pôlder. Na Figura 1 é possível observar as 6 divisões do pôlder e as intervenções propostas no terreno diante do cenário atual.



Figura 1 – Localização das diversas áreas que compõem o novo reservatório pulmão e intervenções propostas



Fonte: COPPE, 2013

É possível identificar através de imagens de satélites por meio da ferramenta Google Earth, as constantes transformações e perdas de áreas de armazenamento no polder, anteriormente citadas. As Figuras 2 e 3 apresentam a variação do uso e ocupação do solo na região.

Figura 2 - Polder Alberto de Oliveira em entre 1985 e 2004



Fonte: Google Earth, 2024

Figura 3 - Polder Alberto de Oliveira em entre 2022 e 2024



Fonte: Google Earth, 2024

O primeiro ano analisado, 1985, (sendo este o primeiro ano disponível na escala temporal na região) possuía uma cobertura vegetal que visivelmente ocupava a maior parte da área de armazenamento do polder, com exceção de uma pequena parcela, que possivelmente já indicava o avanço da urbanização nas suas imediações. Nos anos de 2003 e 2004, próximos anos com imagens disponíveis, e é possível observar a expansão da urbanização na porção oeste da área de armazenamento do polder, ocupando quase que 50% da área prevista em projeto, com a presença de aterramentos, separação de lotes e aberturas de vias. Adicionalmente é possível identificar uma ocupação a leste do polder, que se mantém durante os dois anos. A principal diferença entre os dois anos é a recuperação, em 2004, de uma área anteriormente ocupada a sudeste do polder no ano de 2003. A partir de 2008, a área anteriormente modificada na porção oeste do polder começava a

recuperar a sua cobertura vegetal, ocupando progressivamente as clareiras abertas nos processos de separação de lotes e abertura de vias. Entretanto, a área que tinha sido recuperada a sudeste do polder, observada nesses mesmos anos, 2003 e 2004, começava a sofrer, novamente, com o avanço da ocupação urbana de 2008 a 2009. De 2013 a 2017, a ocupação urbana continuou avançando lentamente, em todos os pontos em que as pressões antrópicas já ocorriam nos anos anteriores. De 2018 a 2021, a diminuição da cobertura vegetal e a presença de aterramentos avançou de maneira mais abrupta, ocupando a área de armazenamento do polder a leste, que mesmo sendo ocupada lentamente ao longo dos anos, mantinha grande parte de sua área. Há um destaque para o avanço da urbanização ocorrida entre 2019, que diminuiu consideravelmente a área de armazenamento disponível. Entre 2022 e 2024 as áreas de armazenamento perdidas até 2021, recuperaram parte de sua cobertura vegetal, porém sem impactos positivos na sua capacidade de retenção de água, uma vez que essas áreas sofreram uma sequência de aterramentos e impermeabilizações ao longo dos anos, deteriorando completamente o funcionamento do sistema do polder

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em vista das transformações sofridas pela área do polder e das intervenções propostas ao longo do projeto Iguaçu, o território foi analisado com 3 possibilidades de áreas distintas. A área em laranja corresponde a área de armazenamento efetivamente disponível do polder Alberto de Oliveira em 2009, que foi utilizada nos 2 primeiros cenários propostos. A área em vermelho representa a área de armazenamento atual do polder Alberto de Oliveira que foi utilizada na simulação dos cenários 3 e 4, considerando todas as transformações ocorridas no uso e ocupação do território, até o ano de 2024, discutidas anteriormente. Finalmente, a área em verde equivale a área de projeto do reservatório-pulmão, considerando as intervenções propostas na atualização do projeto Iguaçu, nas páginas 222 a 224 do livro Projeto Iguaçu, e corresponde ao cenário otimista que foi considerado nos cenários 5 e 6.

A Figura 4 apresenta o mapa com as 3 áreas trabalhadas nos 6 cenários propostos.

Em todos os cenários, a célula 1162 foi utilizada para ilustrar as oscilações nos níveis de inundação, considerando os diferentes cenários e modificações implementadas, por se tratar de uma área urbana consolidada, próxima a área do polder.

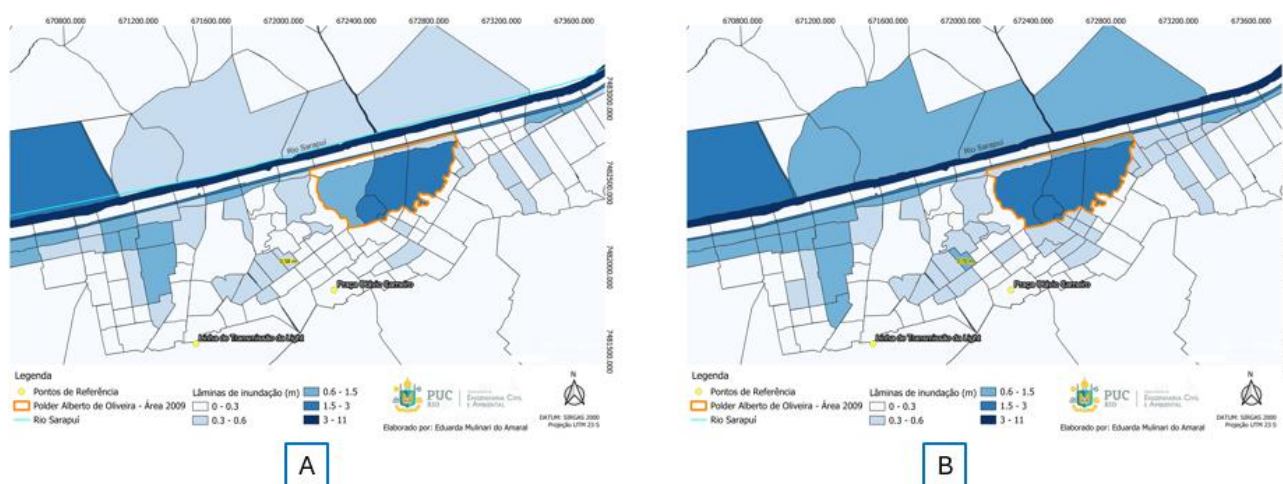
A Figura 5 – A representa o mapa com as manchas de inundação (considerando os níveis máximos de água para o evento de TR25 em todo o período simulado) do primeiro cenário de simulação, no ano de 2009, sem a influência das mudanças climáticas. Nesse contexto a célula urbana de referência (1162) apresentou um pouco mais de meio metro de lâmina de inundação (0,58 m). Altura que já impacta significativamente o deslocamento em vias, causando transtornos à população. Em relação a contribuição das mudanças climáticas nas configurações territoriais observadas em 2009 (Figura 5 – B), em comparação com o cenário anterior, é possível identificar um maior acúmulo de água no território, em razão do aumento do nível do mar e da intensidade de precipitação. A célula urbana de referência nessas condições apresentou uma lâmina de inundação de 0,70 m, representando um aumento de quase 21% considerando a lâmina de inundação anterior, que não leva em conta a influência das mudanças climáticas.



Figura 4 – Mapa com as 3 áreas trabalhadas nos 6 cenários propostos

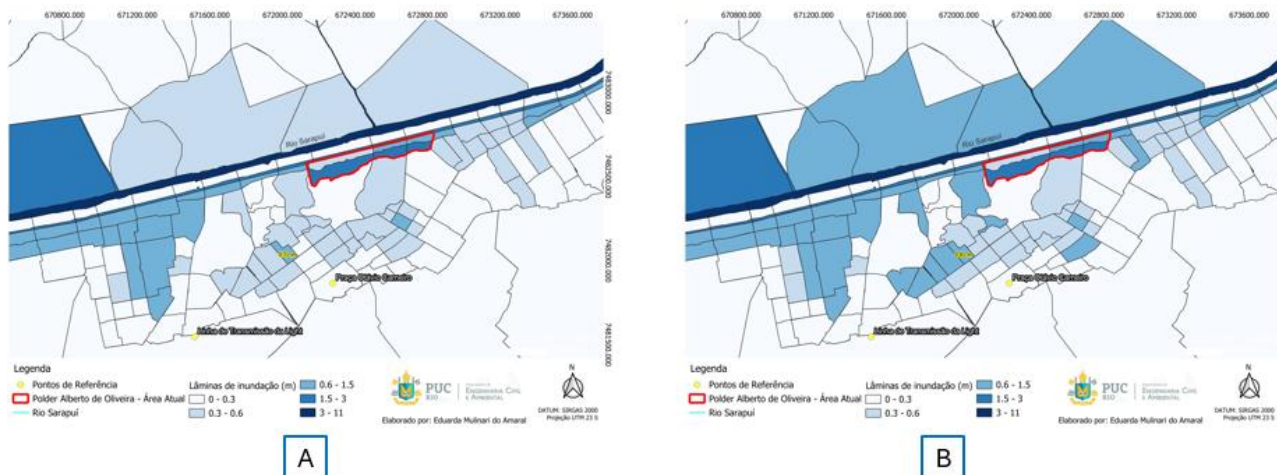


Figura 5 – A – Mapa de Inundação para o cenário de 2009 com TR25; B – Mapa de Inundação para o cenário de 2009 com TR25 + MC



Os dois próximos cenários que levam em conta todas as transformações que a área de armazenamento recebeu até 2024. É possível observar que na Figura 6 – A, a mancha de inundação se equipara em alguns pontos ao 2º cenário observado. Nessa ocasião, a célula de referência apresenta uma lâmina de inundação de 0,71m, que em comparação ao 1º cenário (2009) sofreu um aumento de aproximadamente 22,4% no seu nível, mas em comparação ao 2º cenário (2009 + MC) sofreu um aumento de apenas 1,4%. Com a contribuição das mudanças climáticas nas configurações atuais (Figura 6 – B), o nível d'água se eleva nas células e a célula urbana de referência passa a possuir 0,81m de lâmina de inundação, descrevendo um aumento de 14,1% em comparação ao cenário atual sem mudanças climáticas e de 40% considerando o primeiro cenário (2009).

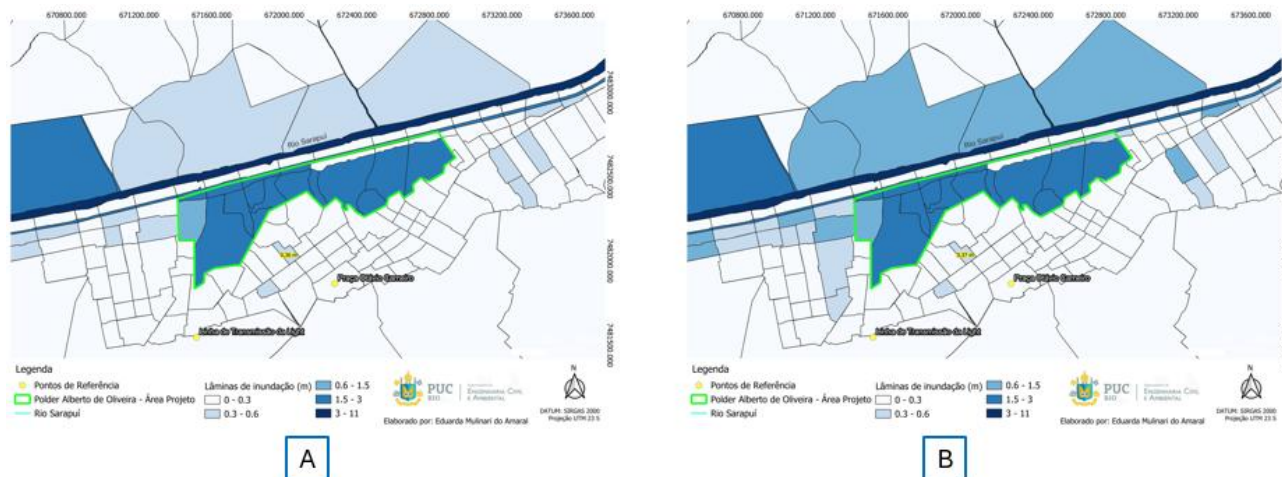
Figura 6— A – Mapa de Inundação para o cenário de 2024 com TR25; B – Mapa de Inundação para o cenário de 2024 com TR25 + MC



O cenário “otimista” (Figura 7 – A), que promove a recuperação da área da área prevista do polder Alberto de Oliveira, demonstra uma diminuição significativa das lâminas de inundação no entorno do sistema, recuperando a funcionalidade do polder. A célula urbana de referência passou a apresentar, nesse cenário, uma lâmina de inundação de 0,36 m, sendo a menor lâmina encontrada considerando todos os outros cenários, além de caracterizar uma redução significativa de 55,5% quando comparada com o 4º cenário (2024 + MC) e de 49,3% quando comparada com o 3º cenário (2024). É possível observar que a maioria das regiões urbanas do entorno do polder não possui acúmulos de água relevantes (< 30 cm) caracterizando uma melhoria significativa diante da implementação da alternativa. Acúmulos de água remanescentes podem significar falta de representação das redes de microdrenagem que não foi objeto do presente estudo. Quando introduzido o efeito das mudanças climáticas na situação de projeto (Figura 7 – B), os níveis de água aumentam, porém ainda se mantêm concentrados na área de armazenamento do polder. A célula de referência sai de 0,36 m para 0,37 m, sofrendo um aumento apenas de 2,7%, indicando um bom funcionamento do sistema frente às mudanças climáticas.



Figura 7 – A – Mapa de Inundação para o cenário otimista com TR25; B – Mapa de Inundação para o cenário otimista com TR25 + MC



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como principal objetivo a avaliação, por meio de ferramenta hidrológica e hidrodinâmica, de seis cenários possíveis de manejo de águas pluviais na bacia hidrográfica do Rio Sarapuí, considerando diversas possibilidades de aproveitamento dos volumes do polder Alberto de Oliveira, devido ao avanço da ocupação desta região e envolvendo a influência das mudanças climáticas em três destes. Com o uso dessa ferramenta foi possível entender os diferentes impactos gerados por mudanças específicas no território, como o avanço da ocupação urbana e constantes aterramentos e a influência das mudanças climáticas. A área do polder e seu entorno, representou um aumento de nível d'águas quando considerada a influência das mudanças climáticas na chuva de projeto e quando diminuída a sua capacidade de armazenamento, através da redução de sua área. Através da célula de referência também é possível perceber que nessas áreas o acúmulo de água cresce significativamente, de 0,58 m no cenário de 2009, 0,70 m no de 2009 + MC, 0,71 m no de 2024 até 0,81 m no de 2024 + MC. É importante destacar a similaridade entre os valores de 2009 + MC e 2024, pois tal resultado indica que a ocupação inadequada do território pode equivaler a um cenário de mudanças climáticas e a junção desses dois fatores pode gerar um cenário ainda mais impactante.

Também é possível identificar que as regiões urbanas, quando considerado o cenário otimista, apresentam uma redução expressiva nos acúmulos de água do entorno do polder, apresentando, em sua maioria, lâminas de inundação menores que 30 cm. Além da redução na célula de referência utilizada, de 0,71 m (2024) para 0,36 m (Otimista). Tais características indicam uma melhoria significativa do funcionamento do sistema do polder Alberto de Oliveira, considerando as implementações propostas. Dessa forma, o presente estudo demonstra que, a correta implementação das intervenções propostas para o Projeto Iguaçu, adapta a região para a ocorrência de chuvas extremas, considerando também a influência das mudanças climáticas globais na definição da chuva de projeto. No entanto, para a execução do projeto se faz necessária a desapropriação da área destinada para o polder Alberto de Oliveira, em conjunto com programas de habitação e um programa de manutenção e fiscalização eficaz. Além disso, um estudo mais aprofundado sobre a capacidade atual do sistema de macrodrenagem da bacia do rio Sarapuí, como a presença de assoreamentos no leito do rio, pode aprimorar as leituras de nível, tanto do rio quanto do canal auxiliar, e aproximar mais o modelo da distribuição real da água no território do polder.



## REFERÊNCIAS

- BRITTO, A. L.; QUINTSLR, S.; DA SILVA PEREIRA, M. (2019). Baixada Fluminense: dinâmicas fluviais e sociais na constituição de um território. *Ver. Brasileira de História*, v. 39, n. 81, p. 47–70.
- CAXIAS24HS. Notícias 24hs na sua tela com o criador de conteúdo mais ativo de Duque de Caxias. Disponível em: <https://www.caxias24hs.com.br>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- COPPE. *Projeto Iguaçu - resumo técnico*. Rio de Janeiro: [s.n.].
- FRAGA, J. P. R. et al. 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.
- G1/GLOBO. Chuva no RJ causa alagamentos, queda de árvores e problemas no trânsito. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro>. Acesso em: 18 out. 2024.
- IBGE. Panorama do Censo 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 16 out. 2024.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Mapas GeoINEA. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- JÚNIOR, V. J. dos S.; SANTOS, C. O. (2013). A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas. *CORE*, v. 3, n. 1, p. 19–30.
- MAGALHÃES, P. C. de. (2024). O histórico das inundações na Baixada Fluminense, bacia dos rios Iguaçu-Sarapuí. p. 1–23.
- MARQUES, L. S. et al. (2009). Elaboração e calibração de um modelo hidrodinâmico para simulação de cheias fluviais na bacia dos rios Iguaçu e Sarapuí com uso do MODCEL. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, p. 1–8.
- OBSERVATÓRIO SEBRAE/RJ. *Painel regional: Baixada Fluminense I e II Elements*. Rio de Janeiro: [s.n.].
- OLIVEIRA, A. K. B. et al. (2019). An alternative flood model calibration strategy for urban watersheds: the case study of Riohacha, Colombia. *Water Science and Technology*, v. 11, n. 79, p. 2095–2105.
- OLIVEIRA, A. K. B. et al. 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.
- PEREIRA, P. S. P. M. L.; MENDES, L. D. (2018). Morfometria de bacia hidrográfica urbanizada: uma análise do rio Iguaçu-Sarapuí, na Baixada Fluminense (RJ), para avaliação de parâmetros de suscetibilidade à ocorrência de enchente e inundação. *Revista Continentes*, v. 2018, n. 13, p. 34–48.
- SECRETARIA DE ESTADO DA DEFESA CIVIL. *Identificação de áreas susceptíveis a inundações no Estado do Rio de Janeiro com uso do método AHP e SIG*. [S.l: s.n.].
- SOUSA, M. M. et al. 2022. Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation. *Journal of Hydroinformatics*, 24(5), 976–991.
- TUCCI, C. E. M. (2004). Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. *Rega: Revista de Gestión del Agua de América Latina*, Santiago, v. 1, n. 1, p. 59–73.