

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE PROJETOS URBANOS MULTIFUNCIONAIS NA REDUÇÃO DO RISCO DE INUNDAÇÕES SOB PERSPECTIVAS FUTURAS

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MULTIFUNCTIONAL URBAN DESIGN PROJECTS IN REDUCING FLOOD RISK UNDER FUTURE PERSPECTIVES

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

¹Graduando em Engenharia Ambiental | lessaraiva@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; ²Doutoranda
em Engenharia Ambiental | beatrizamback@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; ³Doutor em
Engenharia Civil | matheus@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; ⁴Doutor em Engenharia Civil |
marcelomiguez@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:

As inundações urbanas são agravadas pelo efeito combinado de mudanças climáticas e processos de urbanização acelerada, sobretudo nas baixadas costeiras. Neste contexto, o presente estudo avalia a eficácia de um projeto urbano multifuncional na redução do risco de inundações diante de condições futuras, considerando projeções de crescimento populacional e alterações climáticas para o ano de 2050. O método consiste na aplicação do Índice de Risco de Inundações Simplificado, que cruza informações de exposição populacional e perigo – sendo o último obtido por modelagem hidrodinâmica com o modelo MODCEL. A área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, no município do Rio de Janeiro, com foco nas localidades do Jardim Maravilha e do Piraquê. Os resultados indicam que, mesmo sob condições críticas futuras, o projeto simulado no cenário de projeto promoveu redução significativa (em média, 28%) das lâminas de inundação e dos níveis de risco no Jardim Maravilha, sem agravar as cheias a jusante (Piraquê). Conclui-se que soluções multifuncionais bem planejadas podem contribuir de forma eficaz para a gestão integrada de cheias urbanas. Recomenda-se, para estudos futuros, a incorporação de múltiplos cenários climáticos e de indicadores socioeconômicos para melhor representar a vulnerabilidade social.

Palavras-chave:

Drenagem Urbana; Risco de Inundações; Mudanças Climáticas; Expansão Urbana; Projetos Urbanos Multifuncionais

Abstract:

Urban flooding has intensified in recent decades due to the combined effects of climate change and accelerated urbanization, particularly in low-lying areas. In this context, this study evaluates the effectiveness of a multifunctional urban design project in reducing flood risk under future conditions, considering population growth and climate change projections for the year 2050. The methodology integrates hydrological-hydrodynamic modeling, using the MODCEL model, with the application of the Simplified Flood Risk Index, which is based on population exposure and flood depth indicators. The study area is the Piraquê-Cabuçu River watershed, located in the municipality of Rio de Janeiro, with a focus on the neighborhoods of Jardim Maravilha and Piraquê. The results indicate that, even under critical future conditions, the project simulated in condition C2 significantly reduced flood depths and risk levels in Jardim Maravilha, without causing increased flood impacts downstream. It is concluded that well-planned multifunctional solutions can effectively support integrated urban flood management. Future studies should consider multiple climate scenarios and incorporate socioeconomic indicators to better represent inequalities in vulnerability.

Keywords:

Urban Drainage; Flood Risk; Climate Change; Urban Expansion; Multifunctional Urban Projects.

1. INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e as mudanças climáticas agravam as inundações urbanas, provocando perdas significativas para a cidade e seus habitantes e causando efeitos em cascata sobre os outros sistemas urbanos (Battemarco *et al.*, 2022). Estimam-se que, entre 2003 e 2022, ocorreram em média 170 desastres de inundações por ano no mundo, afetando cerca de 74,6 milhões de pessoas e culminando em 5.518 mortes anuais (EM-DAT, 2024). As mudanças climáticas amplificam a frequência e a severidade de eventos hidrológicos extremos. O IPCC (2023) projeta aumento da precipitação média global e da elevação do nível do mar nas próximas décadas, ameaçando especialmente regiões de baixada costeira.

Além das mudanças climáticas atuarem como um fator global, o efeito da urbanização local exerce influência direta e significativa sobre o agravamento das inundações. O estudo de Idowu e Zhou (2023), ao analisar doze megacidades em todos os continentes, demonstrou uma correlação estatisticamente significativa ($r=0,96$) entre a expansão urbana em áreas periféricas e a distribuição espacial de zonas de risco de inundação. Esse padrão de crescimento, característico de cidades sob intensa pressão demográfica, promove a impermeabilização do solo em áreas anteriormente naturais, frequentemente ocupando planícies de inundação sem a implantação de infraestrutura de drenagem adequada, exacerbando os riscos hidrológicos.

Desse modo, em áreas de expansão, o risco de inundações tende a ser elevado, pois o crescimento populacional aumenta tanto a degradação ambiental quanto a quantidade de pessoas expostas. Seguindo Sayers *et al.* (2013), define-se risco como função do perigo (probabilidade do evento) e da exposição (população, infraestrutura e ecossistemas vulneráveis). Assim, medir apenas a redução da lâmina d'água é insuficiente: é imprescindível considerar onde e quem está exposto.

Nesse contexto, é essencial incorporar adaptabilidade e resiliência no planejamento urbano, além de buscar minimizar os impactos da urbanização garantindo o melhor manejo do solo. A resiliência urbana a inundações, fundamental para a gestão de riscos, requer medidas integradas antes e após os eventos, combinando prevenção, mitigação de impactos e rápida recuperação (Guimarães, Miguez, 2020), ao mesmo tempo que busca restaurar a dinâmica original do ciclo hidrológico preservando o funcionamento da cidade (Bertilsson *et al.*, 2019). O aumento da resiliência contribui para a diminuição da vulnerabilidade do sistema exposto ao perigo, portanto atuando na redução de danos consequentes.

Para atuar nesse sentido, deve-se criar espaços na cidade para acomodação da dinâmica das águas pluviais urbanas, cujos volumes são significativamente majorados pela própria urbanização, evitando alagamentos em áreas habitadas. O Sistema de Espaços Livres, quando integrado a um sistema de infraestrutura verde e azul, oferece uma estratégia eficaz de mitigação de cheias, permitindo o armazenamento e a infiltração da água, além de proporcionar serviços ecossistêmicos e áreas de lazer para a população. Artmann *et al.* (2019) enfatiza que a preservação e a qualificação dos espaços livres não ocupados por construções é crucial para garantir a resiliência da cidade, especialmente em áreas de expansão urbana. Coordenar intervenções ao longo da bacia é igualmente necessário. Soluções locais não podem transferir vazões para jusante, principalmente onde já há ocupações urbanas.

Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar a redução do risco de inundações de um projeto urbano multifuncional focado na mitigação de cheias, incorporando perspectivas futuras de crescimento populacional e mudanças climáticas na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, na cidade do Rio de Janeiro.

2. MÉTODO

2.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método consiste em três etapas principais: (1) estimativa das condições futuras; (2) proposição do projeto com a construção de condições de avaliação; (3) cálculo do Índice de Risco de

Inundações Simplificado (IRIs). A aplicação ocorre na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, com foco adicional em trechos urbanos críticos.

Para a estimativa de condições futuras, foram considerados dois fatores principais: o crescimento populacional e os efeitos das mudanças climáticas, projetados para o ano de 2050. Em relação ao crescimento populacional, as estimativas utilizaram os métodos logístico e linear, com base nos dados dos três últimos censos demográficos do IBGE (2000, 2010, 2022). Esses métodos foram escolhidos para fazer frente às distintas dinâmicas de crescimento observadas em cada região administrativa. Em vez de considerar um crescimento homogêneo, a bacia foi dividida em áreas (baseadas nos limites administrativos), permitindo uma distribuição populacional mais realista. Com base nessas projeções, a intensificação da impermeabilização do solo foi representada no modelo hidrológico-hidrodinâmico por meio do ajuste dos coeficientes de escoamento superficial, presumindo que o adensamento urbano aumentará proporcionalmente ao crescimento demográfico em cada região. Em relação às mudanças climáticas, foram utilizados valores de referência estabelecidos pelo IPCC para estimar um aumento do nível do mar e da precipitação na região.

Foi, então, proposto um projeto urbano voltado para a mitigação de cheias, alinhado aos princípios da sustentabilidade e integrando uma infraestrutura híbrida – composta por elementos cinza (tradicionais), verdes e azuis. Três condições são simuladas:

- C0 – Condições Atuais: representa a situação atual da bacia, sem intervenções.
- C1 – Condições Futuras: considera as projeções de crescimento populacional e mudanças climáticas para 2050, sem a implementação do projeto.
- C2 – Condições Futuras + Projeto: inclui as projeções futuras com a implementação do projeto proposto.

Essas condições foram simuladas por meio do MODCEL – Modelo de Células de Escoamento para Cheias Urbanas (Miguez *et al.*, 2017), ferramenta de modelagem hidrológico-hidrodinâmica com abordagem *Quasi-2D*. O modelo adota uma estrutura em multicamadas, integrando processos hidráulicos superficiais e subterrâneos em uma estrutura pseudo-tridimensional, na qual planos horizontais de escoamento são interconectados verticalmente. A bacia hidrográfica é discretizada em células, correspondentes a áreas homogêneas com capacidade de armazenamento para balanço de massa, organizadas em uma rede de fluxo multidirecional. A escolha deste modelo específico deve-se à sua prática integração com *softwares* de Sistema de Informação Geográfica, permitindo a visualização e análise espacial dos resultados. Para as simulações, foi considerada uma chuva com tempo de recorrência de 25 anos, padrão adotado em projetos de macrodrenagem no Brasil (DNIT, 2006). O objetivo foi obter os níveis máximos de alagamento em cada célula em cada uma das três situações.

A calibração do modelo hidrológico-hidrodinâmico foi baseada em um evento de chuva intensa ocorrido em 2021. Foram utilizados dados de três estações pluviométricas (Bangu, Campo Grande e Guaratiba), operadas pelo Sistema Alerta Rio, com medições a cada 15 minutos. A chuva de projeto foi definida a partir de uma curva IDF com tempo de retorno de 25 anos. A maré observada durante o evento foi usada como condição de contorno, com dados registrados pela DHN no Porto de Itaguaí. Devido à falta de medições fluviométricas na bacia, o modelo foi validado com base em relatos dos moradores após a inundação, comparando com as lâminas de água modeladas (Alves *et al.*, 2021).

Por fim, foi aplicado o Índice de Risco de Inundações Simplificado, composto por dois indicadores principais: Indicador de Exposição (Ie) e Indicador de Perigo (Ip). Enquanto o primeiro utiliza os resultados referentes à estimativa de crescimento populacional, o segundo utiliza os resultados da modelagem hidrodinâmica. O Índice de Risco e seus componentes são detalhados no próximo item.

2.2. ÍNDICE DE RISCO

O Índice de Risco de Inundações Simplificado (IRIs) possibilita uma visualização espacializada dos trechos da bacia que demandam maior atenção em relação às cheias urbanas. Ele integra dois

componentes principais: a exposição da população, representada pelo Índice de Exposição, e a gravidade das inundações, representada pelo Índice de Perigo. Dessa forma, áreas que combinam inundações significativas com alta exposição de pessoas são classificadas como de maior risco.

O índice é calculado por meio do produto ponderado desses fatores, conforme apresentado na Equação 1. Isso significa que, mesmo em áreas onde ocorrem inundações, se não houver população exposta, o risco será considerado nulo, uma vez que as lâminas d'água nesses locais não afetam o funcionamento da cidade ou a segurança das pessoas. O resultado desse índice (assim como de cada indicador) varia entre 0 e 1, sendo que, quanto maior o valor, mais crítica a situação.

$$IRIs = Ie^{0.5} \times Ip^{0.5} \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

IRIs = Índice de Risco de Inundações Simplificado (adimensional);

Ie = Indicador de Exposição (adimensional);

Ip = Indicador de Perigo (adimensional).

2.3. INDICADOR DE EXPOSIÇÃO

Esse indicador é representado pela densidade demográfica. No caso da situação atual (C0), os dados populacionais foram obtidos a partir do censo mais recente do IBGE (2022), utilizando a malha de setores censitários como base espacial. Já para as condições C1 e C2, que consideram condições futuras, o cálculo da exposição leva em conta projeção de aumento populacional.

Para a normalização desse indicador, estabeleceram-se dois referenciais metodológicos: (i) a densidade de 90 hab/ha foi definida como ponto de referência correspondente ao valor 0,8 na escala normalizada, por ser considerada a densidade demográfica urbana ideal para a otimização de serviços municipais em cidades latino-americanas no estudo de De Duren e Compeán (2015), além de se tratar de uma densidade elevada para uma bacia hidrográfica com predomínio de construções horizontais; (ii) a densidade de 450 hab/ha foi adotada como valor máximo (teto), equivalente a 1,0 na escala, seguindo as recomendações da ONU-Habitat (Grobbelaar, 2012), que recomenda esse valor como limite superior para um planejamento urbano sustentável. A Figura 1a mostra a normalização para o Indicador de Exposição (*Ie*).

2.4. INDICADOR DE PERIGO

O Indicador de Perigo é calculado a partir das profundidades de inundação simuladas para cada célula do modelo hidrodinâmico. Na normalização adotada, lâminas inferiores a 0,15 m — valor próximo à altura média do meio-fio, sem potencial de dano relevante — correspondem a zero, enquanto a profundidade de 1,0 m, associada a prejuízos materiais severos e risco à vida, recebe valor um, com os demais níveis interpolados entre esses extremos. A Figura 1b apresenta a normalização para o Indicador de Perigo (*Ip*).

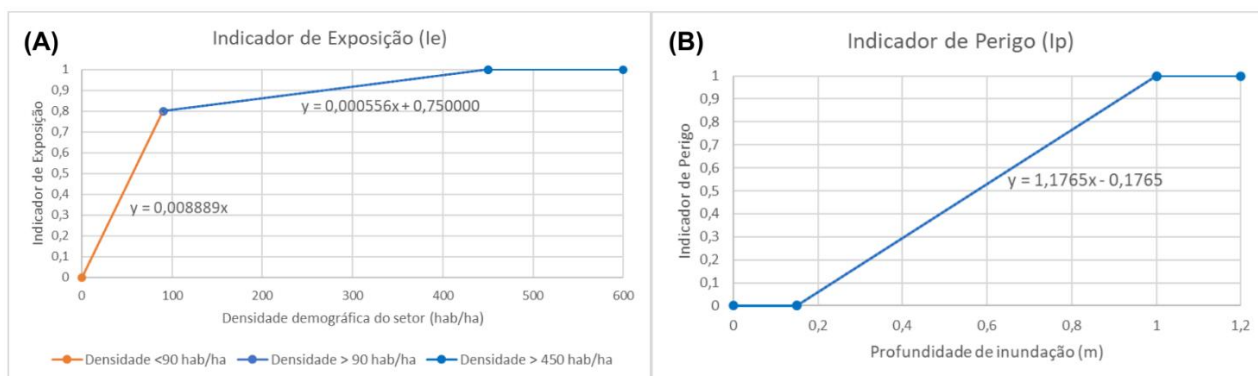


Figura 1: (a) Gráfico com a normalização do Indicador de Exposição.

(b) Gráfico com a normalização do Indicador de Perigo.

Fonte: Os autores (2025).

3. ESTUDO DE CASO E PRECEDENTES

Localizada na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, a Bacia Hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu abrange uma área de 108 km², percorrendo aproximadamente 12 km e cruzando duas regiões administrativas: Campo Grande (montante) e Guaratiba (jusante), conforme divisão territorial estabelecida pela administração municipal (PCRJ, 2025). A escolha dessa área como estudo de caso deve-se à sua criticidade em relação às inundações urbanas, uma vez que conjuga alta vulnerabilidade ambiental e social, além de intensa pressão por expansão urbana, resultado de um processo de urbanização acelerado e desacompanhado por investimentos em infraestrutura urbana (Amback *et al.*, 2025b).

As localidades do Jardim Maravilha e Piraquê, situadas em uma planície costeira de baixa declividade em Guaratiba, foram alvo de uma avaliação mais detalhada. De acordo com o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), a bacia hidrográfica abriga 284.048 habitantes, dos quais 32.357 residem no Jardim Maravilha (11,4%) e 12.829 no Piraquê (4,5%).

Nesse contexto, foi proposto um projeto urbano multifuncional voltado à mitigação de inundações no Jardim Maravilha, simulado na condição C2. A margem direita do rio é equipada com um dique e um reservatório interno, formando um polder, enquanto a margem esquerda abriga uma área de espraiamento, funcionando como um reservatório externo. Enquanto o polder busca reduzir os alagamentos no Jardim Maravilha, os reservatórios externos têm como objetivo atenuar os picos de vazão transferidos para a jusante, no Piraquê. O projeto busca reduzir os impactos das cheias por meio do armazenamento temporário de água durante eventos extremos, ao mesmo tempo em que qualifica o espaço urbano com funções de lazer e proteção ambiental. O estudo de Amback *et al.* (2025a) propõe e avalia três alternativas projetuais, e para o presente trabalho, foi adotada aquela com melhor desempenho quanto ao volume de armazenamento, integração entre parque e área urbana e, principalmente, menor incremento de vazão transferida para jusante, além de ter se mostrado eficiente para a redução de lâminas de inundação no Jardim Maravilha. Esse cenário de projeto escolhido prevê reservatórios com volume total de 520.833 m³, tempo de retenção de 14,5 horas e borda livre de 0,43 m (Amback *et al.*, 2025a).

A Figura 2 ilustra a localização da bacia hidrográfica, destacando as áreas de estudo (Jardim Maravilha no quadro A e Piraquê no quadro B) e as intervenções propostas para o Jardim Maravilha simuladas na C2.

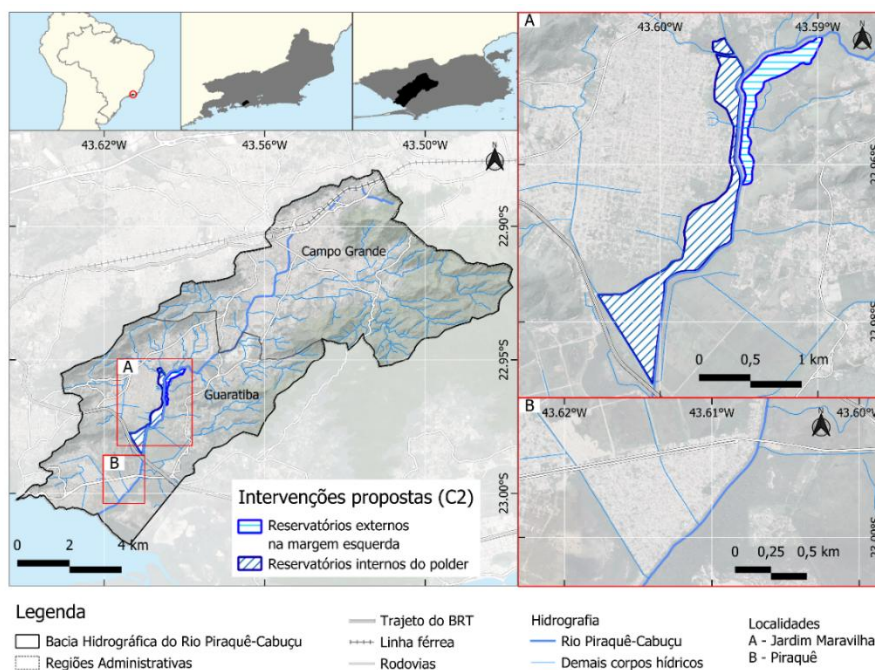


Figura 2: Localização da bacia hidrográfica do Piraquê-Cabuçu e intervenções propostas.

Fonte: Adaptado de Amback *et al.* (2025).

4. RESULTADOS

4.1. ESTIMATIVA DE CONDIÇÕES FUTURAS

A estimativa de crescimento populacional foi baseada na malha de setores censitários dos três últimos censos demográficos (2000, 2010 e 2022), disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e calculada separadamente para as duas regiões administrativas (RAs) da bacia hidrográfica: Campo Grande (RA-XVIII) e Guaratiba (RA-XXVI). Em Campo Grande, a desaceleração do crescimento levou à adoção do método logístico, que projetou uma população de 175.037 habitantes para 2050, um aumento de 3,01% em relação a 2022. Já em Guaratiba, a aceleração do crescimento populacional, ainda sem sinais de saturação, invalidou o uso do método logístico, que pressupõe um crescimento que desacelera próximo a um limite máximo. Por isso, adotou-se a regressão linear, que projetou um aumento de 54,35%, com 176.167 habitantes em 2050. Com isso, a população de Guaratiba será maior que a de Campo Grande no horizonte estipulado, correspondendo a 50,2% do total da bacia.

A expansão urbana foi associada à intensificação da impermeabilização do solo, o que implicou no ajuste dos valores de escoamento superficial no modelo hidrodinâmico. A projeção indicou um incremento de 2,8% no coeficiente de escoamento em Campo Grande e de 12,7% em Guaratiba, refletindo o maior adensamento e urbanização acelerada nesta última.

Além do crescimento populacional, as simulações das condições futuras (C1 e C2) consideraram um incremento de 20% na precipitação e uma elevação de 0,3 m no nível do mar. Estes são valores intermediários das projeções do IPCC (2023), dentro da faixa de incerteza, e os mesmos foram utilizados por De Oliveira *et al.* (2023) para um horizonte de 25 anos.

4.2. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO DE INUNDAÇÕES

Os resultados do Indicador de Exposição para todas as condições encontram-se na Figura 3.

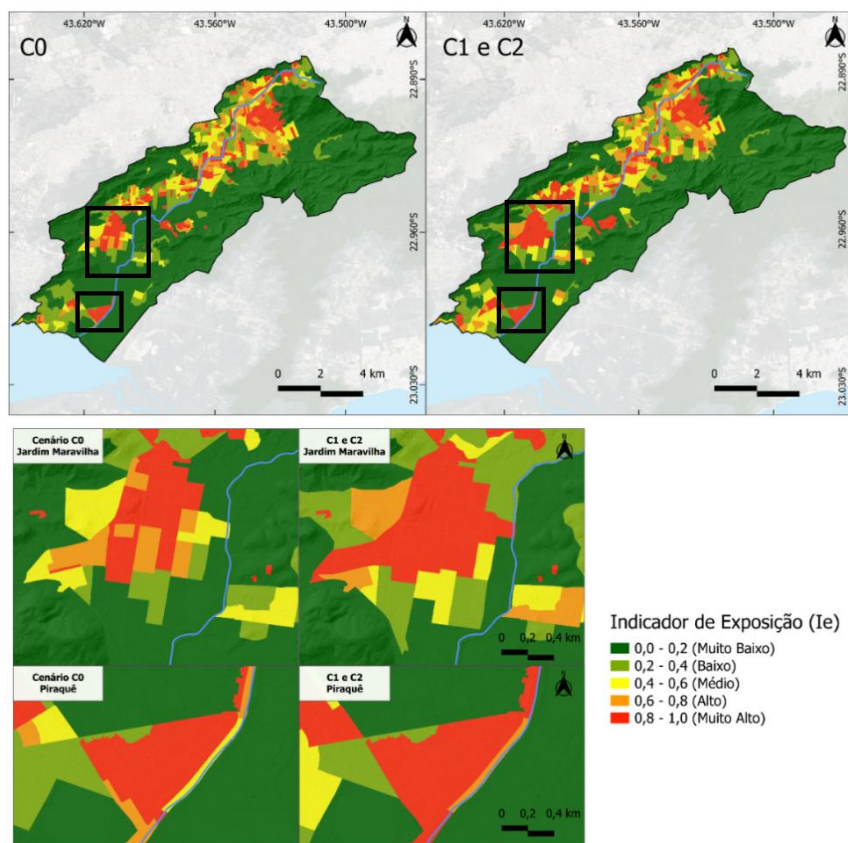


Figura 3: Indicador de Exposição em todos os cenários, destacando Jardim Maravilha e Piraquê.
Fonte: Os autores (2025).

Na condição atual (C0), observa-se, de modo geral, um maior adensamento populacional na região administrativa de Campo Grande, embora, na região de Guaratiba, parte do Jardim Maravilha e quase toda a comunidade do Piraquê já apresentem um indicador de exposição na faixa muito alta. Já nas condições futuras (C1 e C2), nota-se uma expansão significativa das áreas classificadas com exposição “muito alta” no Jardim Maravilha, refletindo a forte tendência de crescimento urbano nessa localidade.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial do Indicador de Perigo (Ip) para todas as condições.

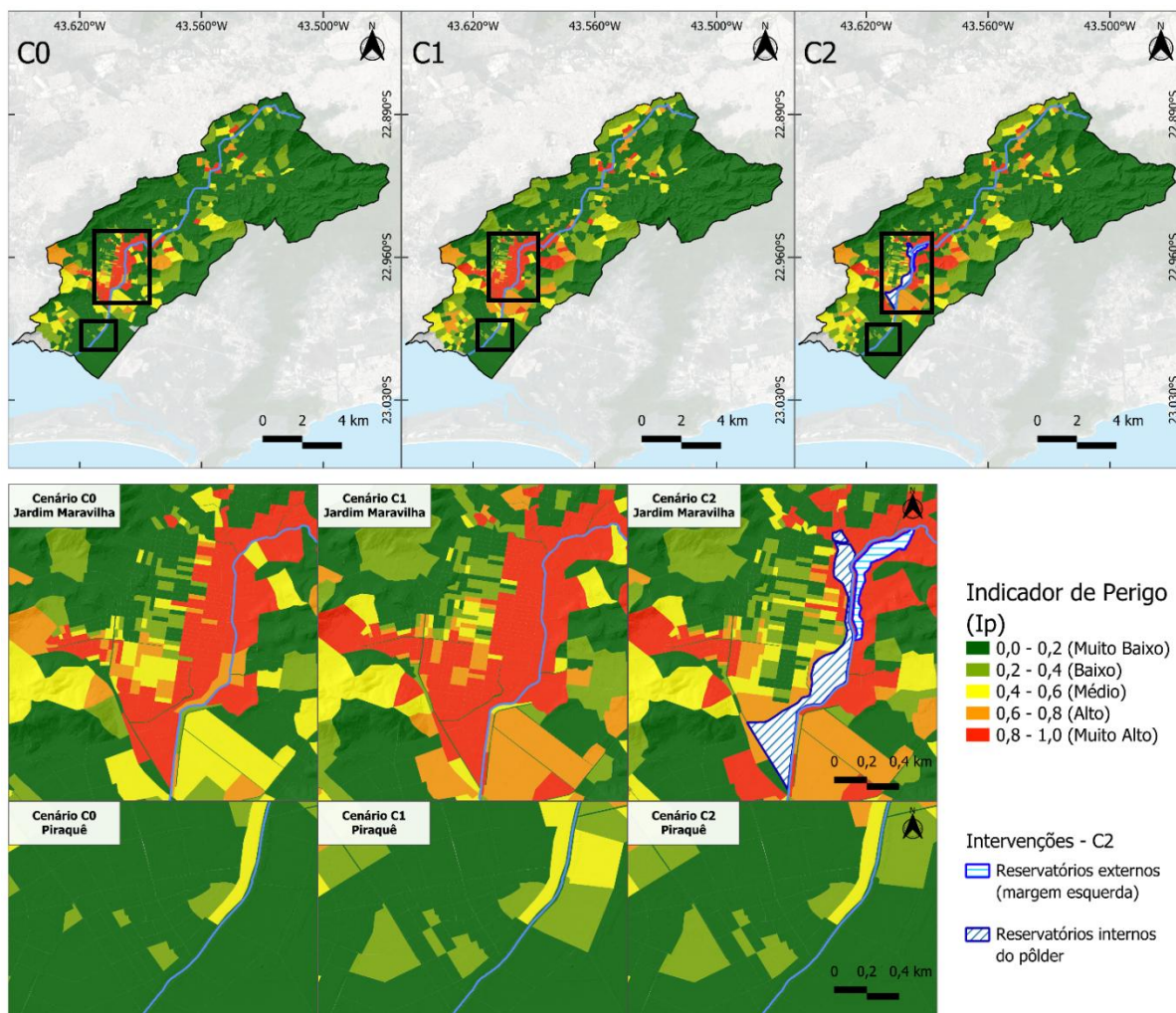


Figura 4: Indicador de Perigo em todos os cenários, destacando Jardim Maravilha e Piraquê.

Fonte: Os autores (2025).

A partir da análise do indicador de perigo, verifica-se que o Jardim Maravilha se sobressai como a região da bacia hidrográfica com as maiores lâminas de inundação, muitas vezes excedendo 1,00 metro de altura (classificação de perigo muito alto) já na situação atual (C0). Na C1, observa-se uma intensificação das áreas inundadas, especialmente nos setores centrais do loteamento. Em contrapartida, a C2 demonstra uma redução considerável das profundidades (até mesmo superiores a 0,5m em várias regiões do bairro), efeito direto das intervenções projetadas. No Piraquê, as lâminas de inundação mantêm-se relativamente baixas em todas as condições, não ultrapassando a categoria de perigo médio.

Após obter os indicadores de exposição e de perigo, foi elaborada a distribuição espacial do índice de risco, exibida na Figura 5. A análise espacial do Índice de Risco indicou o Jardim Maravilha como a área de maior pontuação em toda a bacia hidrográfica, com valores máximos de 0,903 na C0, 0,923 na C1 e 0,901 na condição C2. Observa-se nessa localidade a presença de extensas áreas contíguas classificadas com risco muito alto. Tal destaque se deve à combinação de elevada

densidade urbana (exposição muito alta) com profundidades significativas de inundação (perigo muito alto). Contudo, cabe destacar que alguns pontos isolados em Campo Grande também apresentaram risco muito alto de inundações.

A quantificação agregada dos resultados por região permite a comparação do Índice de Risco de Inundações nas três condições. Na situação atual (C0), as médias de IRIs por localidade foram: (i) Campo Grande (0,314); (ii) Jardim Maravilha (0,494); (iii) Piraquê (0,322). Na C1, as médias foram: (i) Campo Grande (0,403); (ii) Jardim Maravilha (0,582); (iii) Piraquê (0,348). Já na C2, os resultados foram: (i) Campo Grande (0,403); (ii) Jardim Maravilha (0,487); Piraquê (0,345). Portanto, nota-se que, em Campo Grande, a montante das intervenções sugeridas, houve manutenção do risco entre a C1 e a C2. Contudo, no Jardim Maravilha, o projeto promoveu uma redução significativa de risco (0,487 na C2 contra 0,582 na C1), sendo o IRI médio do loteamento até mesmo menor na C2 do que na C0. Além disso, houve estabilidade do risco na comunidade do Piraquê entre a C1 e a C2.

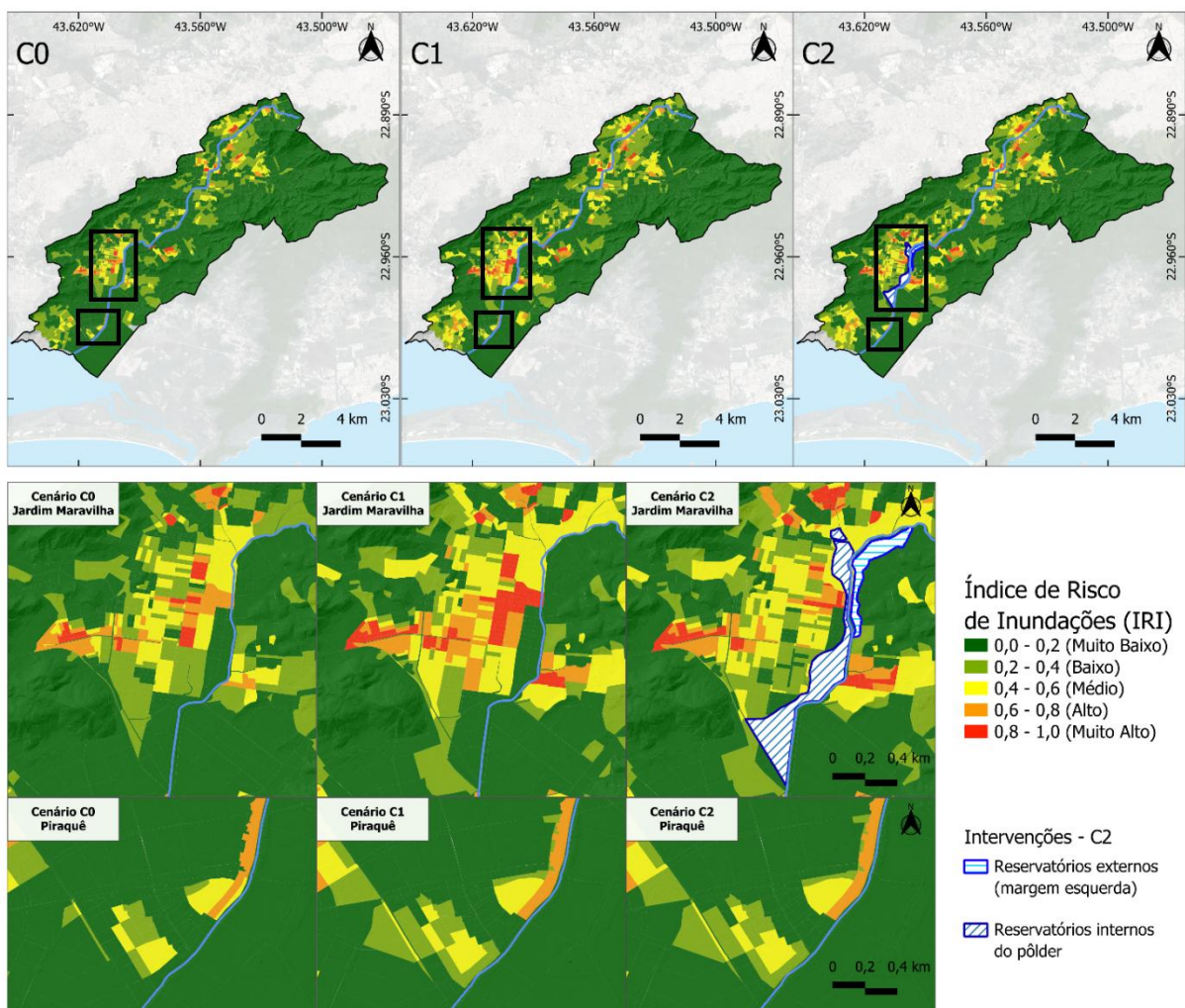


Figura 5: Índice de Risco de Inundações Simplificado em todos os cenários, destacando Jardim Maravilha e Piraquê. Fonte: Os autores (2025).

No caso do Piraquê, embora apresente exposição muito alta em razão de sua elevada densidade demográfica, os índices de risco não atingiram a categoria muito alta em nenhuma das situações analisadas, apresentando valores inferiores aos do Jardim Maravilha. Isso se explica pela magnitude relativamente baixa do indicador de perigo. Além disso, a comparação entre as condições C1 e C2 não evidenciou agravamentos no Piraquê, sugerindo que as intervenções propostas no Jardim Maravilha não resultaram em efeitos negativos significativos para áreas ocupadas a jusante.

A comparação entre as condições evidencia um agravamento generalizado do risco em toda a bacia na C1, em relação à situação atual (C0), como consequência direta da intensificação das mudanças climáticas e do adensamento urbano. No entanto, ao comparar as duas condições futuras (C1 e C2), observa-se uma redução média de 0,18m (ou 28%) do risco de inundações no Jardim Maravilha, resultado da implementação do projeto urbano multifuncional. Essa redução está diretamente associada à diminuição do indicador de perigo em diversas áreas, refletindo a efetividade das soluções adotadas para mitigação de cheias.

A comparação entre as condições simuladas revelou que, mesmo diante do agravamento previsto pelas mudanças climáticas e do adensamento urbano futuro (C1), a implementação das intervenções na condição C2 resulta em uma expressiva redução tanto das lâminas de inundação quanto dos índices de risco na região. O conjunto de soluções propostas demonstrou capacidade de mitigar os impactos das cheias de forma eficaz, protegendo áreas densamente habitadas sem comprometer a integração com o espaço urbano. Outro aspecto relevante identificado foi a ausência de agravamento do risco de inundações na comunidade do Piraquê. Embora o dique represente uma restrição à calha do rio na margem direita, o projeto contemplou uma área de espraiamento na margem esquerda, que funcionou como mecanismo de compensação hidráulica. Essa solução foi determinante para evitar a transferência de risco, demonstrando coerência hidrológica em escala de bacia e confirmando o potencial das estratégias multifuncionais para a gestão integrada de inundações.

4.3. DISCUSSÃO

A avaliação do risco a inundações é crucial no planejamento urbano, sendo aqui realizada de forma simplificada, porém eficiente, cruzando apenas a densidade demográfica e a lâmina de alagamento. Essa análise nos permite não apenas identificar áreas alagadas, mas também entender onde as inundações representam um risco para a população exposta, já que a presença da água, por si só, não é uma ameaça sem a presença de pessoas bens ou infraestrutura vulneráveis.

Dada a pressão de expansão urbana na área de estudo, a análise das tendências de crescimento populacional e mudanças climáticas foi fundamental. Embora as previsões tenham sido baseadas em simplificações devido às incertezas futuras, elas foram importantes para criar prognósticos e antecipar cenários, etapa crucial no planejamento urbano. A avaliação do cenário de projeto demonstrou sua eficácia, mesmo sob condições futuras de maior impermeabilização do solo e população mais exposta, mostrando a adaptabilidade da proposta.

Outra qualidade do estudo foi a avaliação da transferência de alagamentos, um aspecto essencial para evitar que a mitigação de inundações em uma área acabe transferindo o problema para regiões a jusante. Isso reforça a necessidade de coordenação entre todas as ações dentro de uma mesma bacia hidrográfica, garantindo que intervenções em uma área não agravam a situação em outras.

5. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a eficácia de um projeto urbano multifuncional na mitigação do risco de inundações em condições futuras marcadas por mudanças climáticas e crescimento populacional, com aplicação na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu. Os resultados evidenciaram que o Jardim Maravilha, área mais crítica da bacia, apresentou significativa redução dos níveis de perigo e, conseqüentemente, de risco na condição com intervenção (C2), mesmo diante de condições hidrológicas mais severas. Além disso, verificou-se que as medidas adotadas — em especial a articulação entre o dique de proteção e a área de espraiamento — evitaram a transferência de inundações para jusante, mantendo estável o risco na comunidade do Piraquê.

Além de evidenciar a eficácia das soluções propostas, os resultados podem subsidiar políticas públicas voltadas à adaptação climática e à gestão de riscos urbanos, sobretudo em áreas de expansão com elevada vulnerabilidade socioambiental. A espacialização do risco de inundações, conforme realizada neste estudo, permite identificar zonas prioritárias para intervenção, o que pode

orientar revisões de planos diretores, planos municipais de redução de risco e planos locais de adaptação às mudanças climáticas.

Adicionalmente, como diretriz prática, destaca-se a utilidade da metodologia empregada — especialmente a aplicação do Índice de Risco de Inundações Simplificado — como ferramenta técnica para a priorização de áreas críticas para a implantação de Soluções baseadas na Natureza (SbN). Essa priorização territorial qualificada também fornece subsídios relevantes para revisões de legislações urbanísticas e regulamentos de drenagem urbana, ao evidenciar a importância de uma abordagem integrada e multifuncional no enfrentamento das inundações. A identificação de zonas de risco e a avaliação do desempenho de soluções híbridas podem ser incorporadas a planos diretores, códigos de obras e normas técnicas, promovendo uma ocupação do solo mais resiliente e compatível com a dinâmica hidrológica das bacias urbanas.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a consideração de um único cenário climático futuro, apesar da diversidade de projeções disponíveis no IPCC. Também vale mencionar que as estimativas do *runoff* futuro foram baseadas em dados populacionais, sem uma modelagem urbanística mais detalhada. Por fim, o índice de risco adotado foi absoluto, desconsiderando as desigualdades socioeconômicas entre setores da bacia.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o uso de múltiplos cenários climáticos, a integração com indicadores sociais (como renda média, Índice de Gini, escolaridade e acesso à infraestrutura urbana) e o mapeamento de impactos para mobilidade urbana, escolas e unidades de saúde. Essas etapas permitirão análises mais abrangentes e sensíveis às desigualdades territoriais, conferindo, portanto, uma compreensão mais realista da resiliência urbana a inundações na bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. M. C.; LOPES, A. C. R.; DE MELO, J. L.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. 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, 2021.

AMBACK, B.C.; DE MAGALHÃES, P.M.C.; SARAIVA, L.E.S.; DE SOUSA, M.M.; MIGUEZ, M.G. Assessing Drainage Infrastructure in Coastal Lowlands: Challenges, Design Choices, and Environmental and Urban Impacts. **Infrastructures (Switzerland)**, v. 10, n. 103, p. 103, 2025.

AMBACK, B.C.; VERÓL, A.P.; DE SOUSA, M.M.; SARAIVA, L.E.S.; MIGUEZ, M.G. A framework for urban planning structured by sustainable urban drainage: the proposal of a priority matrix for site selection. **Water Science and Technology**, v. 91, n. 10, p.1185-1202, 2025.

ARTMANN, M.; KOHLER, M.; MEINEL, G.; GAN, J.; IOJA, I.C. How smart growth and green infrastructure can mutually support each other — A conceptual framework for compact and green cities. **Ecological Indicators**, v. 96, p. 10-22, 2019.

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. Water dynamics and blue-green infrastructure (BGI): Towards risk management and strategic spatial planning guidelines. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, p. 129993, 2022.

BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; DE MOURA, I.T.; REZENDE, O.M.; VERÓL, A.P.; MIGUEZ, M.G. Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. **Journal of Hydrology**, v. 573, p. 970-982, 2019.

BRASIL. **Manual de Drenagem Urbana**. Vol. 1 e 2. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/724_manual_drenagem_rodovias.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

DE OLIVEIRA, A.K.B.; ALVES, L.M.C.; CARVALHO, C.L.; HADDAD, A.N.; DE MAGALHÃES, P.C.; MIGUEZ, M.G. A framework for assessing flood risk responses of a densely urbanized watershed, to support urban planning decisions. **Sustainable and Resilient Infrastructure**, v. 8, n. 4, p. 400–418, 2023.

EM-DAT. **Disasters in Numbers 2023: A Significant Year of Disaster Impact**. CRED, 2024.

GROBBELAAR, S. **Urban patterns for a green economy**. United Nations Human Settlements Programme, 2012.

GUIMARÃES, L.F.; MIGUEZ, M.G. Supporting decision-making on urban flood control alternatives through a recovery deficit procedure for successive events. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 2, p. e12596, 2020.

IBGE. **Censo IBGE 2000**, 2000.

IBGE. **Censo IBGE 2010**, 2010.

IBGE. **Censo IBGE 2022**, 2022.

IDOWU, D.; ZHOU, W. Global Megacities and Frequent Floods: Correlation between Urban Expansion Patterns and Urban Flood Hazards. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 3, p. 2514, 2023.

LIBERTUN DE DUREN, N.; GUERRERO COMPEÁN, R. Growing resources for growing cities: Density and the cost of municipal public services in Latin America. **Urban Studies**, v. 53, n. 14, p. 3082-3107, 2016.

MIGUEZ, M.G.; BATTEMARCO, B.P.; DE SOUSA, M.M.; REZENDE, O.M.; VERÓL, A.P.; GUSMAROLI, G. Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 6, p. 445, 2017.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **IPCC 2023: 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.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias et al., Eds.), 2023.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Regiões Administrativas**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/web/guest/regioes-administrativas>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SAYERS, P.; GALLOWAY, G.; PENNING-ROSWELL, E.; SHEN, F.; KANG, W.; YIWEI, C.; LE QUESNE, T. **Flood Risk Management: A Strategic Approach – Part of a series on strategic water management**, 2013.

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].