AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS PADRÕES DE INUNDAÇÃO DA BACIA DO RIO MARANGUAPINHO, CEARÁ

Antony Gabriel Ferreira Sales [1] ; Thaís Antero de Oliveira [2]; Francisco de Assis de Souza Filho†; Samiria Maria Oliveira Da Silva[4]; Marcos Henrique Bandeira Ferreira[5]; José Kerlly Soares De Araújo[6]

RESUMO: Este estudo analisa os padrões espaciais de inundações na bacia urbana do rio Maranguapinho, na cidade de Fortaleza – CE, considerando chuvas de projeto associadas ao tempo de retorno de 50 anos e cenários climáticos futuros. A abordagem metodológica integrou o pós-processamento de um conjunto de modelos do CMIP6 e a modelagem hidráulica via software EPA-SWMM. Os resultados indicam que o sistema de drenagem já opera sob severo estresse estrutural no cenário atual, com falhas generalizadas. Enquanto os cenários intermediários (SSP5-8.5 Q50) mantêm o padrão de alagamento observado, o cenário extremo (SSP5-8.5 Q75) revela um agravamento pontual com o surgimento de novos pontos de inundação em áreas de elevada vulnerabilidade socioeconômica, evidenciando que as mudanças climáticas atuam como intensificadoras de deficiências infraestruturais já existentes.

ABSTRACT: This study analyzes the spatial patterns of flooding in the urban basin of the Maranguapinho River, in the city of Fortaleza – CE, using a 50-year return time (TR=50) for the project rainfall, increasing future climate scenarios. The methodological approach integrated the post-processing of an ensemble of CMIP6 models and hydraulic modeling via EPA-SWMM software. The results indicate that the drainage system already operates under severe structural stress in the current scenario, with widespread failures. While the intermediate scenarios (SSP5-8.5 Q50) maintain the observed flooding pattern, the extreme scenario (SSP5-8.5 Q75) reveals a punctual worsening with the emergence of new flood points in areas of high socioeconomic vulnerability, showing that climate change acts as an intensifier of preexisting infrastructural deficiencies.

Palavras-Chave – Drenagem urbana; Mudanças climáticas; EPA-SWMM.

1)Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: salesfgabriel@gmail.com
2) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623. e-mail:thais.antero@gmail.com
†) Falecido em 2026. O Prof. Assis contribuiu significativamente para a concepção, desenvolvimento e orientação deste estudo antes de seu falecimento.
4) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: samiriamaria@ufc.br
5) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: marcosbandeira@alu.ufc.br
6) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400- 900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: josekerlly@alu.ufc.br

INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem urbana foram historicamente dimensionados com base em séries observadas de precipitação e na suposição de estabilidade estatística do regime hidrológico ao longo do tempo, baseando-se no princípio da estacionariedade. Entretanto, evidências recentes indicam alterações no padrão de extremos de precipitação em diversas regiões, associadas ao aquecimento global e à intensificação do ciclo hidrológico, o que pode comprometer a adequação de projetos baseados exclusivamente em condições históricas (IPCC, 2021).

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP 6) confirma a influência antrópica nas mudanças climáticas, intensificadas nas últimas cinco décadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa. O aquecimento global afeta diretamente o ciclo hidrológico, resultando em eventos extremos que comprometem a disponibilidade hídrica (Sant Ana & Back, 2019). As projeções do CMIP 6 indicam que, com as políticas atuais, o aquecimento pode chegar entre 2,2°C e 3,5°C até 2100, com 1,5°C sendo alcançado já na década de 2030. As projeções climáticas do CMIP 6 baseiam-se nos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP), com cenários que variam de baixas (SSP1-1.9) a altas emissões (SSP5-8.5), podendo resultar em até 5,7°C de aquecimento no pior caso (Lee et al., 2021; Observatório do Clima, 2024).

Com isso, a ocorrência de alagamentos em áreas urbanas vem se tornando um dos principais problemas associados à drenagem em cidades brasileiras, resultando em prejuízos materiais, impactos à mobilidade e riscos à saúde pública. Além disso, têm-se a urbanização desenfreada e sem planejamento, principalmente no contexto brasileiro, estima-se que 85% dos brasileiros vivam em zonas urbanas, porém essa ocupação se deu de forma desordenada, provocando um mau planejamento urbano, o que é agravado ainda mais por esses extremos climáticos (IBGE, 2022).

Nesse contexto, o Ceará, localizado na região semiárida brasileira, tem situação hidrológica desafiadora, pois é caracterizado por um curto período de chuvas irregulares, concentradas principalmente no primeiro semestre do ano e por uma estação seca, que entra pelo segundo semestre. Na capital do estado, Fortaleza, em especial na bacia do Rio Maranguapinho, há uma combinação entre elevados índices pluviométricos, acima dos 1400 mm, e uma intensa área urbanizada e impermeável (Funceme, 2022), o que favorece problemas relacionadas a enchentes e alagamentos.

Para analisar a influência das mudanças climáticas na bacia do Rio Maranguapinho, foi utilizado o cenário SSP5-8.5, que representa uma condição com altas emissões de gases de efeito estufa, constituindo assim um contexto mais crítico para este presente estudo. Além disso, adotou-se

o tempo de retorno de 50 anos, pois ele é bastante utilizado em m projetos de drenagem e infraestrutura hidráulica, permitindo avaliar eventos de elevada magnitude e potencial impacto.

Este artigo tem como objetivo avaliar a resposta hidráulica da bacia urbana do rio Maranguapinho, em Fortaleza–CE, sob chuvas de projeto associadas ao tempo de retorno de 50 anos, comparando o cenário histórico com projeções futuras do cenário climático SSP5-8.5. Para isso, utiliza-se o modelo SWMM, buscando identificar áreas mais vulneráveis à intensificação dos alagamentos em decorrência das mudanças climáticas.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo e dados utilizados

A Bacia Hidrográfica do rio Maranguapinho está localizada no estado do Ceará, inserida majoritariamente na Região Metropolitana de Fortaleza, abrangendo áreas dos municípios de Maranguape, Caucaia e Fortaleza. Do ponto de vista físico-natural, a bacia apresenta características típicas do semiárido nordestino, com chuvas irregulares, e a bacia se encontra fortemente degradada, especialmente em seus trechos médio e inferior, com vegetação ciliar amplamente suprimida, restando apenas fragmentos isolados.

Com isso, foram analisadas as séries históricas das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) localizadas em toda a bacia da Região Metropolitana de Fortaleza. Para cada estação pluviométrica foi determinada a série de chuvas máximas anuais, médias e variâncias anuais, sendo excluídos da série os anos que apresentavam falhas nos registros de dados.

Para caracterizar adequadamente o regime pluviométrico, foi selecionado um posto para representar toda a bacia Metropolitana (Figura 1), com base no critério de maior número de anos com dados válidos. Posteriormente, esse posto foi adotado para a análise do regime de chuvas na porção da bacia hidrográfica do rio Maranguapinho do município de Fortaleza, em razão da proximidade espacial e da homogeneidade pluviométrica.

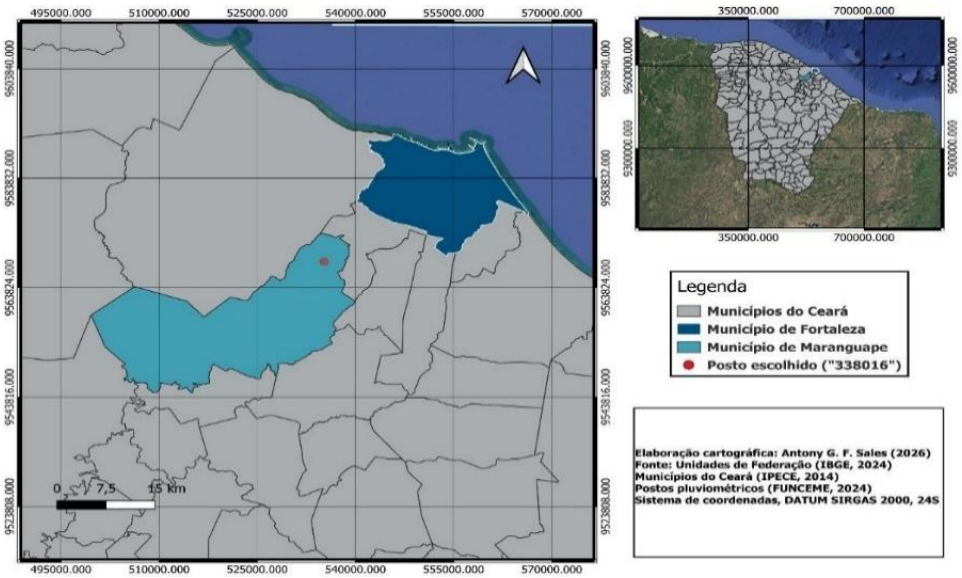


Figura 1 – Localização do posto pluviométrico

O posto escolhido (código: 338016) tem 114 anos válidos, que é acima do recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), que estabelece um período mínimo de 30 anos como referência para a análise estatística de séries climatológicas, conforme destacado por Pinto (1999) e se localiza no município de Maranguape, que fica a 26 km de Fortaleza.

Modelagem de dados e correção de viés

Para a modelagem hidrológica sob diferentes regimes climáticos, o estudo usa séries das de precipitação diárias provenientes de um robusto ensemble de 24 Modelos de Circulação Global (GCMs): ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, CanESM5, CESM2, CMCC-CM2-SR5, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg-LR, FGOALS-g3, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, IITM-ESM, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, KACE-1-0-G, MIROC-ES2L, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NESM3 e NorESM2-MM, selecionados da iniciativa CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) e extraídos do site Copernicus (Eyring et al., 2016):. O estudo foi conduzido com base em duas séries temporais distintas. A primeira série estabelece a climatologia atual utilizando dados do experimento Historical para o intervalo de 1850 a 2014. Este período serve como referência para a validação dos modelos e para a comparação com os cenários futuros. A segunda série abrange as projeções futuras, estendendo-se de 2015 a 2100.

Em relação às projeções futuras, foi escolhido o cenário mais negativo, o SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways), que configura o cenário pessimista de crescimento contínuo e acelerado de gases de efeito estufa. Os dados foram extraídos em formato de NetCDF (Network Common Data Form), um formato de arquivo padrão para dados científicos multidimensionais que inclui o próprio volume da chuva. No caso desse trabalho, a variável escolhida foi a precipitação total diária.

A representação da precipitação sobre a área de estudo foi obtida a partir das grades dos modelos climáticos, utilizando-se a média dos pixels incidentes na bacia. Para os modelos de menor resolução espacial, adotou-se o pixel mais próximo da área de interesse. As séries resultantes foram então processadas para a obtenção das precipitações máximas anuais de cada modelo, constituindo a base para a análise dos eventos extremos.

Porém, modelos de clima (GCMs/RCMs) apresentam erros inerentes, o que faz com que, se usados sem correção, levem a projeções enganosas e avaliações de risco falhas. A correção de viés das séries de precipitação simuladas, técnica estatística utilizada para ajustar os dados gerados por modelos climáticos ou previsões meteorológicas, foi realizada por meio do método Equal Quantile Matching (EQM), o qual pertence à família dos métodos de Quantile Mapping (QM). A equação do EQM utilizada para o ajuste dos valores de precipitação é apresentada abaixo, onde, $x*_{m-p}$ representa o valor da precipitação corrigida do modelo para o período futuro; x_{m-p} o valor bruto da precipitação do modelo climático para o período futuro; F denota a função de distribuição cumulativa (CDF), enquanto F^{-1} é sua função inversa; os subscritos o e m indicam dados observados e do modelo, respectivamente; os subscritos c e p referem-se ao período de calibração (histórico) e ao período projetado (futuro), respectivamente.

$$\hat{x}_{m-p} = x_{m-p} + F_o^{-1}\left(F_{m-p}(x_{m-p})\right) - F_c^{-1}\left(F_{m-p}(x_{m-p})\right) \quad (1)$$

Para a aplicação desta metodologia, foram utilizadas três séries temporais de precipitação diária: as séries históricas observadas do posto “338016” para o período em questão; a série de precipitação dos modelos CMIP6 do cenário historical para a grade correspondente a sub-bacia de Maranguapinho, para o mesmo período; e as séries de precipitação dos mesmos modelos para o período de projeção futura.

Análise das chuvas extremas e aplicação na drenagem urbana

A análise das chuvas extremas foi realizada por meio do método das máximas anuais (Annual Maximum Series – AMAX). Para cada série de precipitação considerada, foi extraído, em cada ano, o maior valor de precipitação diária, compondo-se assim uma série anual de máximos (Tucci, 2013; Chow et al., 1988). As séries de máximas anuais foram construídas para o cenário de referência e para os cenários futuros corrigidos, servindo de base para as análises subsequentes.

Neste presente trabalho, a distribuição de Gumbel (Extreme Value Type I – EV1) foi a escolhida pois ela é amplamente utilizada para descrever eventos extremos, inclusive com precipitações máximas diárias e estimativas relacionadas ao tempo de retorno (Gumbel, 1958; Chow et al., 1988). A função de distribuição acumulada (CDF) da distribuição de Gumbel é dada por:

$$F(x) = exp[-exp(-\frac{x-\mu}{\beta})] \quad (2)$$

onde x representa a precipitação máxima anual, μ é o parâmetro de localização e β é o parâmetro de escala.

A partir dos parâmetros estimados para a distribuição de Gumbel, foram calculadas as precipitações associadas ao tempo de retorno, no presente estudo, foi adotado TR= 50 anos para cada série analisada. Para a distribuição de Gumbel, o nível de retorno correspondente a um tempo de retorno T pode ser obtido por:

$$x_t = \mu - \beta \ln [- \ln(1 - \frac{1}{T})] \quad (3)$$

onde x_t corresponde à precipitação associada ao tempo de retorno T.

Com base nas estimativas da chuva de projeto para TR=50 anos, foi realizada a cenarização climática para aplicação na drenagem urbana. Considerou-se um cenário de referência e dois cenários futuros resultantes da combinação entre o cenário climático SSP5-8.5 e os quantis Q50 e Q75. Esses dados foram introduzidos no software SWMM (Storm Water Management Model), aplicado exclusivamente à bacia do rio Maranguapinho, no trecho inserido no município de Fortaleza, cujo modelo da bacia foi disponibilizado previamente (modelo-base) pelo Plano Municipal De Saneamento Básico- Fortaleza (2025), sendo adotado como estrutura de simulação para o presente estudo.

A capacidade hidráulica dos condutos foi avaliada a partir dos resultados das simulações no EPA-SWMM (Rossman, 2015), permitindo identificar situações de sobrecarga do sistema. Para os nós representativos de poços de visita, a ocorrência de alagamento foi caracterizada quando o nível d'água ultrapassou a cota do respectivo dispositivo. Já para os nós associados aos canais e cursos d'água, foi desenvolvido um procedimento computacional que comparou o nível máximo d'água simulado com a cota da residência mais próxima. Quando o nível d'água excedeu a cota da edificação, o imóvel foi classificado como inundado; caso contrário, foi considerado não inundado.

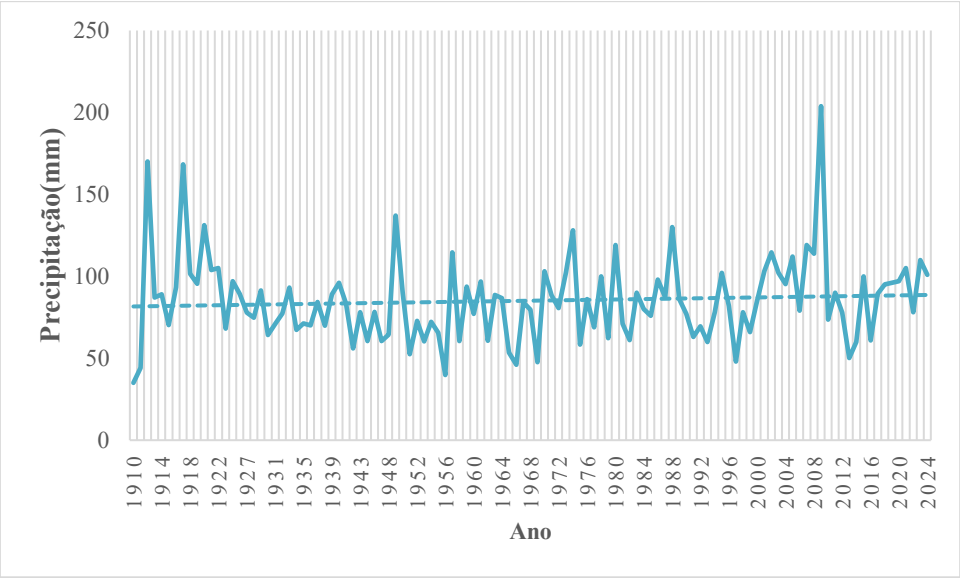
No modelo SWMM, os dados de entrada hidrológicos não foram inseridos no formato de precipitação, mas sim na forma de vazões na unidade de L/s. Para incorporar os cenários de mudanças climáticas, os aumentos projetados para as chuvas foram convertidos em um fator percentual. Com isso, o fator foi aplicado e multiplicado de forma direta nas vazões afluentes em cada ponto de contribuição do modelo, constituindo assim a simulação.

RESULTADOS

A série de máximas anuais foi construída a partir de dados que começaram em 1910 e seguiram até 2024, com isso foi registrado o maior valor de chuva registrado em cada ano da série histórica. A série obtida foi utilizada como base para o ajuste da distribuição de Gumbel e para a

estimativa das chuvas de projeto para diferentes períodos de retorno.

Figura 2 – Chuvas históricas do posto pluviométrico de Maranguape.



A análise estatística baseada na série histórica de 114 anos (1910–2024) do posto pluviométrico 338016 (Maranguape-CE) permitiu ajustar a distribuição de Gumbel e estabelecer a precipitação de projeto de referência para o tempo de retorno de 50 anos (TR=50), fixada em 143,56 mm. A projeção do comportamento das chuvas intensas para o horizonte futuro (2020–2100) demandou a utilização de dados de precipitação diária simulados por um *ensemble* composto pelos 24 Modelos de Circulação Global (GCMs) vinculados ao CMIP6. Após a aplicação do pós-processamento com correção de viés via método *Equal Quantile Matching* (EQM) no *ensemble*, a cenarização climática futura projetou acréscimos nas chuvas extremas para o horizonte de 2020-2050. Os valores encontrados são expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de cenarização climática

Cenário	Quantil	TR(anos)	TR50 (mm)	Δ abs vs OBS (mm)	Δ vs OBS (%)
Observado		50	143,56		
Q50 - SSP8.5	q50	50	150,54	6,98	4,9
Q75 - SSP8.5	q75	50	170,17	26,62	18,5

Fonte: autor (2026).

Com isso, os percentuais de aumentos foram aplicados ao modelo fornecido do PMSB no software SWMM, sendo obtido o primeiro mapa para avaliação dos pontos de alagamento na bacia, identificados na Figura 2.

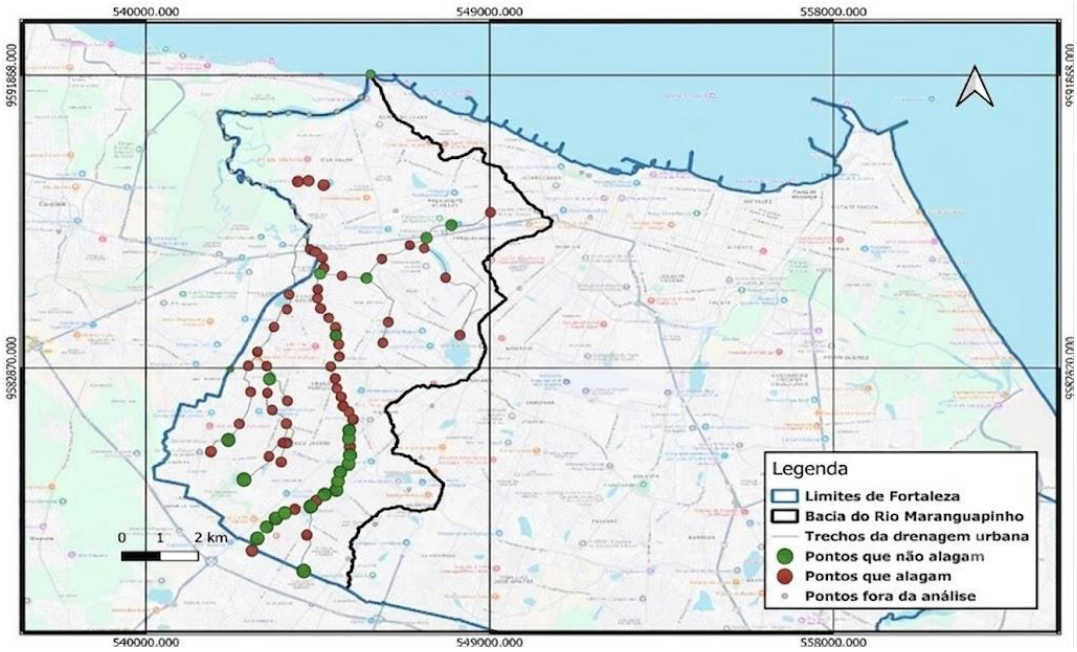


Figura 3 – Padrão de alagamentos do cenário Q50 – SSP5-8.5

Da mesma forma, um segundo mapa representa o resultado obtido pela simulação para o cenário mais crítico (Q75), no qual mais três pontos de alagamentos puderam ser identificados, como mostra a Figura 3. Esses novos pontos estão localizados nos bairros Genibaú, Henrique Jorge e Presidente Kennedy.

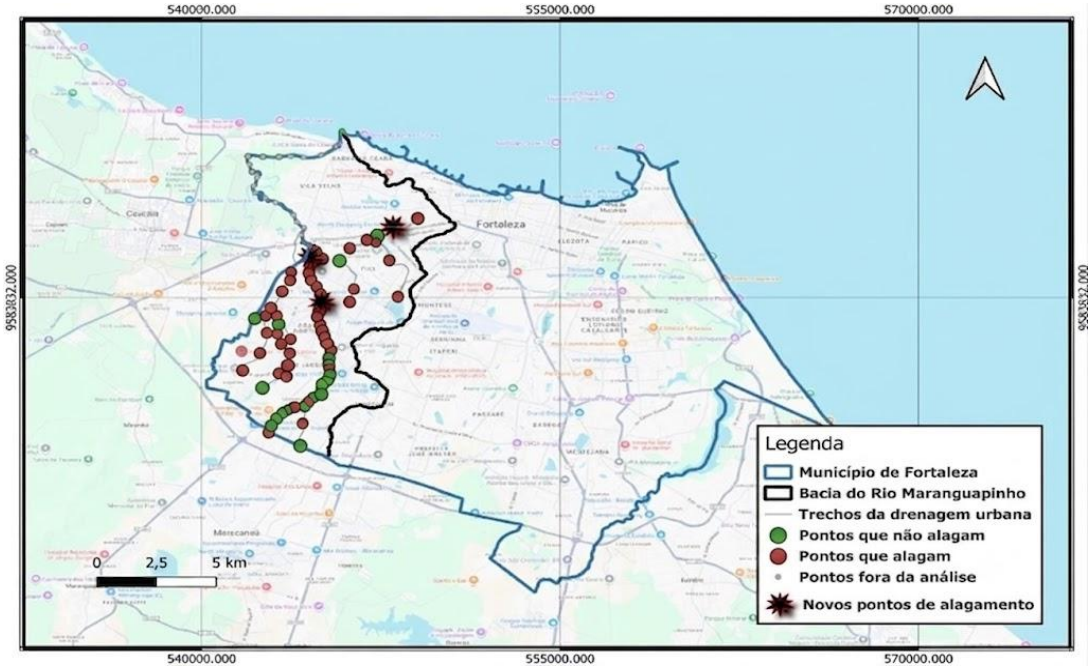


Figura 4 – Padrão de alagamentos do cenário Q75 – SSP5-8.5

Ao avaliar o primeiro mapa para o cenário SSP5-8.5 (Q50), os pontos de alagamento não foram alterados em relação ao cenário atual de precipitação, para o TR de 50 anos, indicando que os

incrementos moderados de até 4,9% na precipitação não foram suficientes para alterar de forma significativa a configuração espacial ou a extensão geográfica das inundações. Do ponto de vista da engenharia hidráulica, essa estabilidade decorre do fato de que os condutos, calhas e planícies de inundação naturais já se encontram operando acima de suas capacidades máximas de projeto desde a atualidade.

Em contrapartida, o cenário mais severo (SSP5-8.5 – Q75) injetou um volume afluente expressivo que rompeu o equilíbrio hidráulico local, colapsando seções que até então resistiam ao cenário de referência e culminando no surgimento de três novos pontos de inundação crítica distribuídos na rede. Os três bairros afetados pelos novos pontos de alagamento indicam áreas onde a rede de drenagem apresenta maior vulnerabilidade sob eventos de precipitação mais severos. Além disso, é importante destacar que esses bairros e toda a bacia em geral estão na zona mais carente da cidade, onde as desigualdades sociais se fazem mais presentes, então construções irregulares são comuns, principalmente perto de córregos e canais. Esse contexto demonstra a vulnerabilidade da população, adicionado um grau a mais de preocupação em relação a drenagem urbana na capital cearense.

Por fim, a leitura integrada dos cenários simulados evidencia que as mudanças climáticas na bacia do rio Maranguapinho atuam predominantemente como um fator de intensificação e potencialização de falhas e vulnerabilidades estruturais preexistentes, e não como um motor capaz de reconfigurar de forma generalizada a rede de drenagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam que a bacia do rio Maranguapinho já apresenta uma condição crítica de drenagem no cenário atual, com ocorrência de alagamentos em diferentes setores da área estudada. A análise dos cenários futuros mostrou que a adoção do cenário Q50 não promove alterações expressivas na distribuição espacial das áreas inundadas, sugerindo uma manutenção do padrão de vulnerabilidade atualmente observado.

Por outro lado, o cenário Q75 evidenciou um agravamento localizado das condições de inundação, com o surgimento de três novos pontos críticos anteriormente não identificados. Esses resultados indicam que aumentos mais significativos na intensidade das precipitações podem ampliar os impactos sobre a drenagem urbana, reforçando a necessidade de medidas de adaptação e planejamento voltadas à redução da vulnerabilidade da bacia frente às mudanças climáticas.

Diante disso, recomenda-se para investigações futuras a avaliação de outros tempos de retorno e quantis mais severos, como TR 100, além da simulação de medidas de adaptação baseadas em

Soluções baseadas na Natureza (SBN), visando amortecer as vazões de pico e promover a resiliência socioambiental das populações expostas na bacia.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo financiamento da bolsa de iniciação científica que proporcionou o desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Dados hidrológicos e pluviométricos**. Brasília, DF.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. ***Applied Hydrology*****.** New York: McGraw-Hill, 1988.

Copernicus Climate Change Service**. CMIP6 climate projections database**. Disponível em plataforma Copernicus Climate Data Store.

EYRING, V. et al. **Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization.** ***Geoscientific Model Development***, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016.

FUNCEME**. Dados climatológicos e mapas de precipitação do estado do Ceará**. Fortaleza, 2022.

GUMBEL, E. J. ***Statistics of Extremes***. New York: Columbia University Press, 1958.

IBGE. ***Censo Demográfico 2022: Características da população e dos domicílios***. Rio de Janeiro, 2022.

IPCC**.** ***Climate Change 2021: The Physical Science Basis***. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

LEE, J. Y. et al. **Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In: IPCC.** ***Climate Change 2021: The Physical Science Basis*****.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

Observatório do Clima**. Análises e informações sobre cenários climáticos e emissões de gases de efeito estufa**. 2024.

Organização Meteorológica Mundial (OMM). ***Guide to Climatological Practices***. Geneva.

PINTO, N. L. S. et al. ***Hidrologia Básica***. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortalez**a. Fortaleza, 2025.

ROSSMAN, L. A**.** ***Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1***. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 2015.

SANT'ANA, V. A.; BACK, Á. J. **Tendências e projeções de extremos de precipitação sob mudanças climáticas.** 2019.

TUCCI, C. E. M. ***Hidrologia: Ciência e Aplicação***. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013.