MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO COCÓ EM FORTALEZA-CE: ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE PERCENTIS E MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS UTILIZANDO SWMM

Maria Thereza Rocha Chaves [1] ; Maria de Jesus Delmiro Rocha[*] [2], Teresa Raquel Lima Farias [3]& Iran Eduardo Lima Neto[4]

Palavras-Chave – Inundações urbanas, Eventos extremos, Drenagem urbana.

INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial e temporal da precipitação constitui elemento fundamental para o planejamento territorial, a gestão de recursos hídricos e a mitigação de desastres naturais e a saúde pública. Nesse contexto, as mudanças climáticas consolidaram-se como um dos principais desafios ambientais e socioeconômicos do século XXI, afetando diretamente os regimes climáticos e hidrológicos. Embora a maioria das capitais brasileiras apresente tendências significativas de aumento da temperatura (Souza et al., 2025), o aumento da frequência e da intensidade de eventos meteorológicos extremos tem sido amplamente documentado (IPCC, 2023; Maciel et al., 2024), influenciando diretamente a disponibilidade hídrica e a ocorrência de inundações e secas (Zanandrea et al., 2023). No Brasil, eventos como ondas de calor, chuvas intensas e estiagens prolongadas tornaram-se mais recorrentes e severos, tendência que deverá persistir nas próximas décadas (Dantas et al., 2025). Alterações nas séries de precipitação podem comprometer significativamente a caracterização hidrológica, reduzindo períodos de retorno de eventos extremos em até 85% (Ballarin et al., 2022), efeitos potencializados por fatores antropogênicos como desmatamento e gestão ambiental inadequada, em interação com fenômenos globais como o El Niño (Souza et al., 2025). Diante desse cenário, o objetivo deste artigo é avaliar a tendências de aumento de precipitações extremas na cidade de Fortaleza e modelar os impactos hidrológicos na Bacia do Cocó, por meio de modelagem com o *software Storm Water Management Model* (SWMM).

METODOLOGIA

Área de estudo

Este estudo foi conduzido na bacia do rio Cocó, localizada no Nordeste do Brasil, com área total de drenagem de 485 km² que abrange cinco municípios. As simulações hidrológicas foram realizadas utilizando o módulo chuva-vazão do modelo *Storm Water Management Model* (SWMM). Foram avaliados três trechos da rede de drenagem do rio Cocó e seus respectivos nós a jusante, situados em zonas densamente povoadas da área urbana, com foco na ocorrência de transbordamentos (alagamentos). Os condutos avaliados estão localizados em bairros populados e possuem diversas conexões com canais e galerias de drenagem. Por fazerem parte do Rio Cocó, ainda apresentam características de vegetação preservada em suas margens, apresentando altos coeficientes de rugosidade, o que ajuda a minimizar os efeitos de grandes volumes de escoamento. A profundidade máxima dos condutos é de 2,0 metros, com comprimentos variando de 1,6 km a 4,6 km

1) Universidade Federal do Ceará, mtchaves50@gmail.com
2) Universidade Federal do Ceará, mariadelmirorocha@gmail.com
3) Instituto Federal do Ceará, teresafarias@ifce.edu.br
4) Universidade Federal do Ceará, iran@deha.ufc.br

Análise de tendência de eventos extremos

A avaliação da tendência de aumento de eventos extremos na cidade de Fortaleza foi realizada com base em dados de precipitação diárias (série 1) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) na estação pluviométrica PICI, entre os anos de 1981 e 2025, situada na área urbana de Fortaleza, avaliaram-se as tendências dos percentis 20, 40, 60, 80 e 90, anualmente e por década. Foram utilizados os testes não paramétricos de Mann-Kendall (para significância da tendência) e o estimador de inclinação de Sen (para magnitude da tendência). Os testes foram realizados com níveis de significância de 95%

Ajuste da série de precipitação

Para garantir que a série temporal de alta resolução (5 minutos) representasse adequadamente a variabilidade intra-diária local, utilizou-se como referência a precipitação média histórica acumulada em um intervalo de cinco minutos para o período de 1970 a 2000 para o mês de março (série 2). Contudo, para verificar o impacto do aumento de eventos extremos (P90), tornou-se necessário ajustar os valores da série para representar de forma adequada a distribuição de frequências verificadas na série 1. Com base nos valores observados e nas projeções futuras para cada percentil, definiu-se um fator de correção (f) específico conforme a Equação 1. Desta forma, a série 1 foi corrigida para se adequar para avaliar os cenários da década de 2000 e 2100.

$$f_i = \frac{P_{original,i}}{P_{futuro,i}} \quad (1)$$

Em que, i representa cada percentil analisado (P20, P40, P60, P80 e P90), $P_{\text{original},i}$ é o valor do i-ésimo percentil extraído da precipitação diária da série 1, e $P_{\text{futuro},i}$ é o valor do mesmo percentil projetado para condições futuras, obtido a partir da extrapolação da tendência linear detectada na série 2. A calibração de um fator distinto para cada percentil mostrou-se necessária, uma vez que a aplicação de um único fator a todos os eventos resultaria em alteração homogênea de toda a distribuição, o que não reproduziria fielmente os padrões de tendência identificados nos extremos e nos demais quartis.

RESULTADOS

Os resultados do teste de Mann-Kendall aplicado à série histórica de precipitação diária (série 1) evidenciaram tendência estatisticamente significativa ($p < 0,05$) para todos os percentis analisados, com destaque para os percentis 80 (P80) e 90 (P90), os quais estão frequentemente associados a eventos extremos. O estimador de inclinação de Sen revelou taxas de aumento de 0,21 mm/ano para o P80 e 0,34 mm/ano para o P90, confirmando uma tendência consistente de elevação das alturas pluviométricas diárias na região. Os menores percentis (P20, P40 e P60) também apresentaram tendências positivas, porém com magnitudes inferiores, variando entre 0,01 mm/ano e 0,09 mm/ano (Figura 1). Esses resultados indicam uma tendência de intensificação das chuvas diárias, com menor alteração nas médias, mas um aumento na magnitude de eventos extremos. O ajuste de percentis na série 2 resultou nas séries de precipitação diárias para dos cenários da década de 2000 e 2100 apresentadas na Figura 2.

Os impactos do aumento dos percentis de precipitação foram simulados com o SWMM. No cenário de 2000, a vazão máxima nos condutos atingiu 15 m³/s, com médias de 0,62 m³/s (C18), 0,75 m³/s (C98) e 1,85 m³/s (C102). No cenário de 2100, a vazão máxima elevou-se para 27 m³/s, com médias de 1,39 m³/s, 1,84 m³/s e 2,48 m³/s, respectivamente.

Quanto aos extravasamentos (Figura 3), em 2000 apenas os nós a jusante de C18 e C102 registraram transbordamentos, com vazões máximas de 15 m³/s e médias de 5,24 m³/s e 3,50 m³/s,

respectivamente; o nó de C98 não extravasou. Em 2100, todos os três nós apresentaram extravasamentos, com vazão máxima elevando-se para 19 m³/s e médias de 7,87 m³/s (C18), 4,50 m³/s (C98) e 6,24 m³/s (C102). Em geral, a projeção mostra um aumento da frequência e volume de extravasamentos.

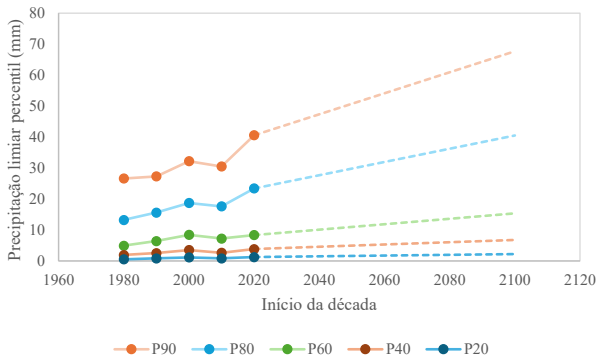


Figura 1. Percentis calculados para cada década (marcadores) e projeção futura (tracejado)

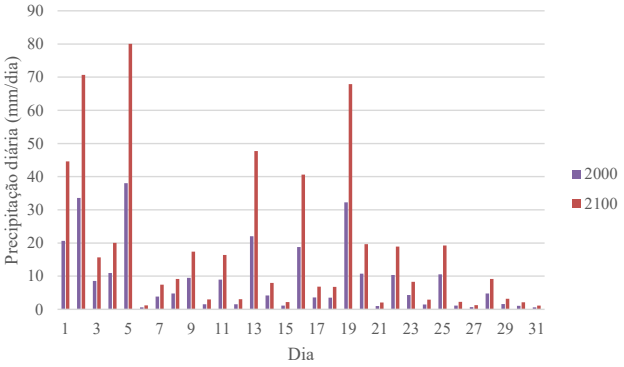


Figura 2. Séries de precipitação diária adotada para o cenário da década de 2000 e a projeção para década de 2100

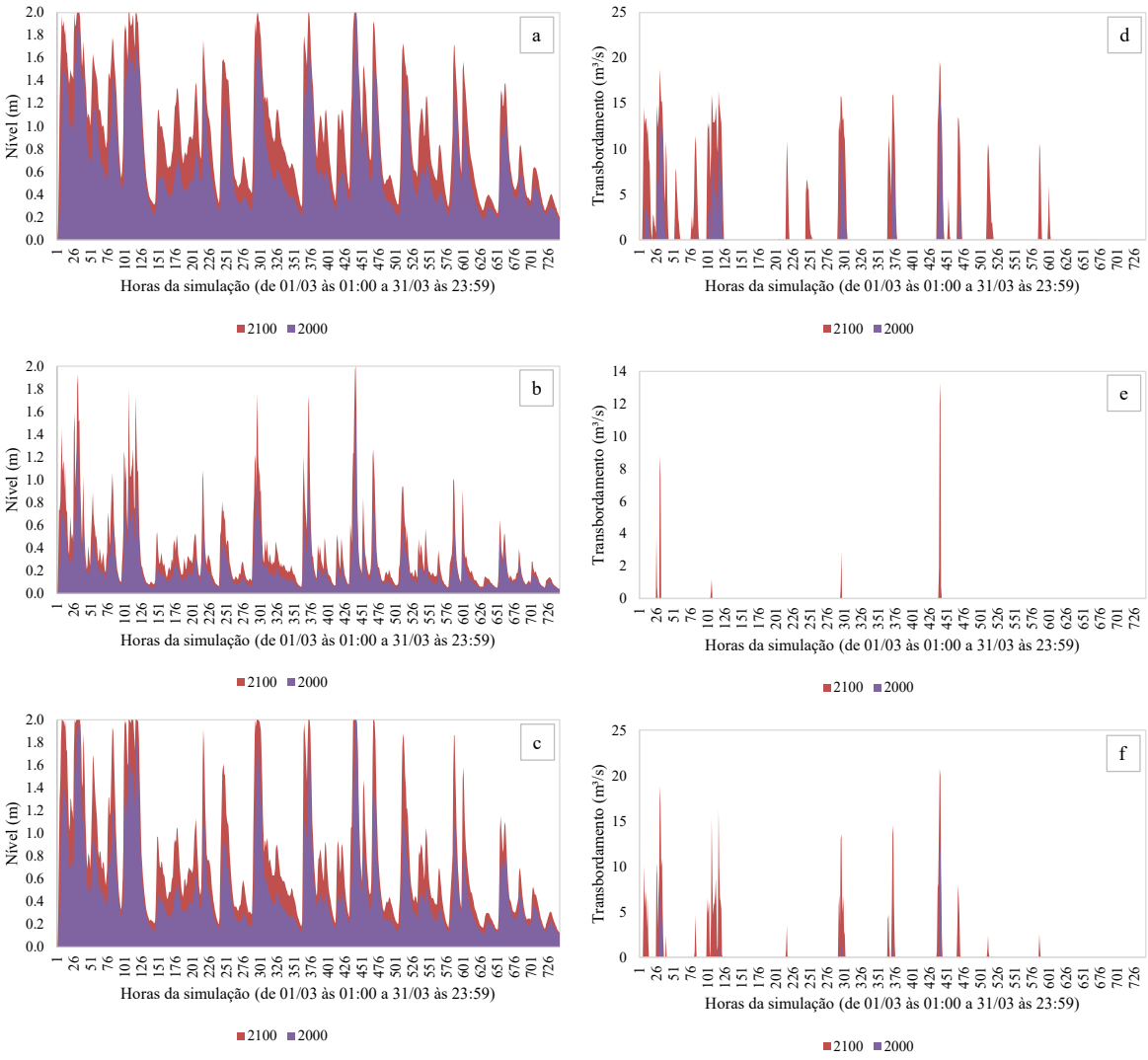


Figura 3.. Nível da água nos condutos (a) C18, (b) C98 e (c) C102 e vazão de transbordamento nos nós a jusante dos. condutos (d) C18, (e) C98 e (f) C102 durante o período de estudo

Essa fragilidade decorre da não estacionariedade das séries climáticas, que invalida a premissa tradicional de que o passado estatístico representa adequadamente o futuro hidrológico. Nesse contexto, os resultados reforçam a necessidade de incorporação alternativas que busquem aumentar a capacidade de detenção e infiltração e reduzir a vazão de pico na bacia. Uma alternativa é a implementação Soluções Baseadas na Natureza (SBNs) como estratégia complementar à infraestrutura cinza. A integração de SBNs ao sistema de drenagem existente representa, portanto, uma medida adaptativa essencial para restaurar a resiliência hidrológica da bacia frente às mudanças climáticas em curso.

CONCLUSÕES

A análise estatística revelou tendência crescente e significativa dos percentis de precipitação (1980–2025), com destaque para o P90 (0,34 mm/ano). A modelagem SWMM para a bacia do Cocó mostrou que, no cenário de 2100, a vazão máxima nos condutos aumenta de 15 m³/s para 27 m³/s, em relação ao cenário de 2000. Além disso, ocorre um aumento geral no nível e volume de extravasamentos. Conclui-se que o aumento das precipitações extremas compromete a capacidade do sistema de drenagem existente, sendo necessárias medidas adaptativas para mitigar os riscos de inundação na bacia do rio Cocó.

REFERÊNCIAS

BALLARIN, André S.; ANACHE, Jamil AA; WENDLAND, Edson. Trends and abrupt changes in extreme rainfall events and their influence on design quantiles: a case study in São Paulo, Brazil. Theoretical and Applied Climatology, v. 149, n. 3, p. 1753-1767, 2022.

DANTAS, Leydson Galvíncio et al. Projections of extreme weather events according to climate change scenarios and populations at-risk in Brazil. Climatic Change, v. 178, n. 8, p. 152, 2025.

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. IPCC, Geneva, Suíça.

MACIEL, D.A. et al. (2024). Sentinel-1 data reveals unprecedented reduction of open water extent due to 2023-2024 drought in the central Amazon basin. Environmental Research Letters, v. 19, n. 12, p. 124034–124034, Nov. 2024.

SOUZA, Amaury et al. Analyzing maximum temperature trends and extremes in Brazil: A study of climate variability and anthropogenic influences from 1960 to 2020. Aerosol Science and Engineering, p. 1-14, 2025.

ZANANDREA, F. et al. (2023). Desastres e Água – Eventos históricos no Brasil. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1ª Edição, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor. Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto "Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas" (processo 405958/2023-4).