

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM URBANA: PROJEÇÕES DE CURVAS IDF PARA AS REGIÕES HIDROGRÁFICAS DO CEARÁ, BRASIL

Antony Gabriel Ferreira Sales¹ ; Taylon Alves da Silva² ; Thaís Antero de Oliveira³; Carlos Eduardo Sousa Lima⁴ ; Francisco de Assis de Souza Filho⁵

Abstract: This study updated the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for twelve sub-basins in Ceará, using observed annual daily maximum precipitation data fitted to probability distributions such as Gumbel, Log-normal, GEV, among others, selected based on goodness-of-fit tests (Kolmogorov-Smirnov). Disaggregation was performed using the Isozone method and calibration of the IDF equation parameters (a, b, c, d) through Particle Swarm Optimization (PSO) in R. To incorporate climate change effects, statistical downscaling was applied to CMIP6 data, followed by bias correction using Equidistant Quantile Mapping (EQM), an effective method for correcting the mean, variability, and tails of the distribution. Scenarios were defined by combining the 25th, 50th, and 75th percentiles with SSP2-4.5 and SSP5-8.5, generating scenarios CEN1 through CEN12. The IDF curves for a 100-year return period indicated increased rainfall intensity, especially in higher quantiles (Q75), with regional variations between 10% and 25%. In Sobral (Acaraú basin), scenario CEN6 exceeded 150 mm in a single day, a value significantly higher than current extreme rainfall estimates, highlighting the substantial impact of climate change.

Resumo. Este estudo atualizou as curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para doze sub-bacias do Ceará, utilizando precipitações máximas diárias anuais observadas ajustadas às distribuições de Gumbel, Log-normal, GEV, entre outras, escolhidas com base em testes de aderência (Kolmogorov-Smirnov). A desagregação foi feita via método das Isozonas e calibração dos parâmetros (a, b, c, d) da equação IDF usando Otimização por Enxame de Partículas (PSO) no R. Para incorporar efeitos das mudanças climáticas, aplicou-se downscaling estatístico aos dados CMIP6, seguido de correção de viés por Mapeamento Quantílico Equidistante (EQM), um método eficaz na correção de média, variabilidade e caudas da distribuição. Foram selecionados cenários combinando os quantis 25, 50 e 75 com SSP2-4.5 e SSP5-8.5, gerando cenários CEN1 a CEN12. As curvas IDF para período de retorno de 100 anos mostraram aumento de intensidade, especialmente nos quantis superiores (Q75), com variações regionais entre 10 % e 25 %. Em Sobral (Acaraú), o cenário CEN6 superou 150 mm em 1 dia, valor bastante superior às chuvas extremas estimadas para o presente, evidenciando impacto relevante das mudanças.

Palavras-Chave: Drenagem urbana – Curva IDF - Mudanças climáticas

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: pos@deha.ufc.br

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: pos@deha.ufc.br

³) 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

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: eduardolima@alu.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: pos@deha.ufc.br

INTRODUÇÃO

As curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) constituem um meio essencial para o dimensionamento de obras hidráulicas e sistemas de drenagem urbana, pois permitem estimar a intensidade de precipitação associada a diferentes durações e tempos de retorno. Tradicionalmente, essas curvas são obtidas a partir de séries históricas de precipitação máxima diária, ajustadas a distribuições de probabilidade como a distribuição de Gumbel, amplamente utilizada para modelar eventos extremos devido à sua simplicidade e boa aderência a dados hidrológicos (Gumbel, 1958; Tucci, 1993).

Para regiões sem registros pluviográficos confiáveis, como é comum em áreas do semiárido brasileiro, típicas do estado do Ceará, é necessário aplicar métodos de desagregação para converter dados diários em escalas menores de tempo. Nesse contexto, destaca-se o método das Isozonas, proposto por Torrico Taborga (1974), que associa regiões homogêneas quanto ao padrão de distribuição temporal da chuva e fornece coeficientes empíricos para estimar precipitações de curta duração a partir de dados diários. Este método tem sido amplamente adotado no Brasil para a regionalização de curvas IDF.

Porém, essa situação de estacionariedade que fundamenta essas abordagens tradicionais vem sendo questionada diante do cenário de mudanças climáticas. O aquecimento global tem provocado alterações significativas nos padrões de precipitação, com tendência de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos (Orlowsky & Seneviratne, 2012; Brunner et al., 2021). Tais mudanças impactam diretamente os parâmetros estatísticos das distribuições de frequência e os coeficientes das curvas IDF, comprometendo a confiabilidade dos projetos hidráulicos baseados em séries históricas não ajustadas ao clima futuro.

Estudos recentes apontam que, sob cenários de altas emissões como o SSP 5-8.5, por exemplo, eventos de chuva associados a tempos de retorno de 1000 anos podem ter sua ocorrência tornada até 12 vezes mais provável (Carneiro et al., 2022), tornando eventos que antes eram raros e pouco prováveis em eventos mais comuns e de maior intensidade. Essa mudança pode comprometer a confiabilidade de estruturas hidráulicas já existentes, por exemplo na infraestrutura de drenagem urbana, já que uma chuva intensa pode superar a capacidade de escoamento desses sistemas resultando em enchentes, colapsos estruturais e prejuízos socioeconômicos.

Neste contexto, torna-se essencial estudos que mostrem como as IDF's podem ser alteradas pelas mudanças climáticas e como isso pode impactar na drenagem urbana das cidades. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo a análise das curvas IDF atuais e futuras através do uso de modelos e cenários do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), com foco no impacto na drenagem urbana de grandes cidades das 12 regiões hidrográficas do Estado do Ceará. Os resultados permitirão avaliar as alterações na intensidade de chuvas na região de estudo através dos modelos e o impacto dessas alterações nas infraestruturas de drenagem local.

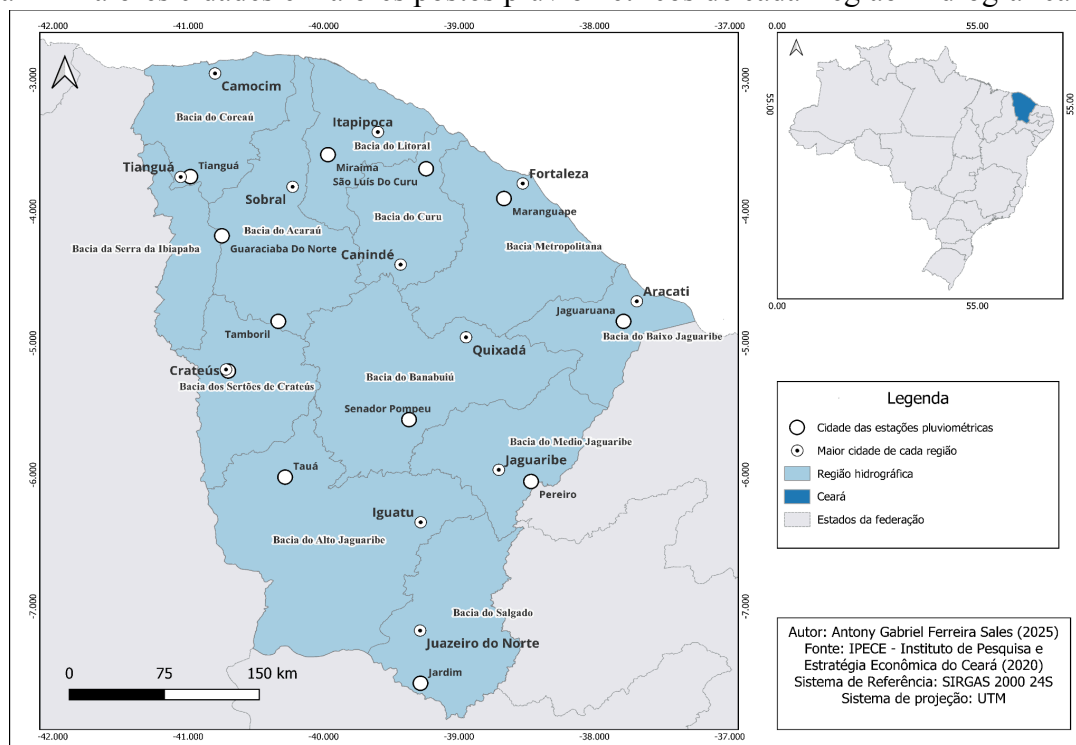
METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

O estado do Ceará está situado na região Nordeste do Brasil, entre as latitudes $-2^{\circ}45'S$ e $-7^{\circ}30'S$ e longitudes $-37^{\circ}00'W$ e $-41^{\circ}30'W$, ocupando uma área de aproximadamente 148.920 km². Sua população ultrapassa 9 milhões de habitantes, distribuída em 184 municípios, com significativa concentração urbana na Região Metropolitana de Fortaleza.

O clima predominante no Ceará é o semiárido quente, segundo a classificação de Köppen-Geiger (BSH), caracterizado por altas temperaturas médias anuais (geralmente superiores a 26°C), elevada evapotranspiração e baixa umidade relativa do ar. O estado apresenta uma sazonalidade pluviométrica marcante, com um período chuvoso concentrado entre fevereiro e maio, conhecido regionalmente como “inverno nordestino”, e uma longa estação seca que se estende pelo restante do ano (FUNCEME, 2023). (FUNCEME, 2023; ANA, 2020).

Figura 1 - Maiores cidades e maiores postos pluviométricos de cada Região Hidrográfica do Ceará



A rede hidrográfica do Ceará é composta, em grande parte, por cursos d'água intermitentes, que fluem apenas durante a estação chuvosa. Essa característica, somada à irregularidade pluviométrica, torna o estado especialmente vulnerável à escassez hídrica. Para gerir seus recursos hídricos de forma descentralizada e participativa, o Ceará é dividido em doze bacias hidrográficas, conforme delimitação oficial da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). São elas: Acaraú, Alto Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú, Curu, Metropolitana, Salgado, Serra da Ibiapaba, Sertões de Crateús, Litoral, Coreaú e Médio Jaguaribe. Essas regiões têm a presença de centros urbanos estratégicos com representatividade regional, pode-se destacar: o Alto Jaguaribe, com sede em Iguatu e abrigo do maior reservatório do estado (o Castanhão); a bacia Metropolitana, que inclui Fortaleza; a do Curu, com a cidade de Canindé; a do Litoral, com Itapipoca; a do Coreaú, com Camocim; e a do Acaraú, cuja principal cidade é Sobral. No oeste, sobressai-se a Serra da Ibiapaba, com Tianguá, que apesar de ter uma parte do município na região de Coreaú, ela pertence a região da Serra; no centro-sul, a bacia do Salgado, com Juazeiro do Norte. As demais bacias também apresentam relevância regional, como os Sertões de Crateús (Crateús), Banabuiú (Quixadá), Médio Jaguaribe (Jaguaribe) e Baixo Jaguaribe (Aracati).

Dados pluviométricos

Foram analisadas as séries históricas das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) localizadas em todo o estado do Ceará. 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. Apesar da grande quantidade de postos pluviométricos na região estudada, muitas estações apresentavam séries históricas com baixa abrangência temporal e/ou elevado número de inconsistências nos dados, o que exigiu a aplicação de critérios de seleção para identificar os postos mais confiáveis, a fim de garantir maior precisão à metodologia adotada.

Para representar adequadamente o regime pluviométrico das doze bacias hidrográficas do estado do Ceará, foi selecionado um posto pluviométrico em cada sub-bacia, com base no critério de maior número de anos com dados válidos. As observações utilizadas referem-se às precipitações pluviais diárias máximas, expressas em altura de lâmina d'água (mm), com séries históricas extensas e contínuas, cobrindo em média mais de 30 anos de dados. Esse intervalo atende à recomendação da 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).

Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados

Código	Latitude	Longitude	Região Hidrográfica	Município	Período de observação
640002	-6,02 (S)	-40,28 (W)	Alto Jaguaribe	Tauá	1912 - 2021
440007	-4,833 (S)	-40,333 (W)	Acaraú	Tamboril	1910- 2023
539037	-5,58 (S)	-39,37 (W)	Banabuiú	Senador Pompeu	1910- 2023
437006	-4,83 (S)	-37,78 (W)	Baixo Jaguaribe	Jaguaruana	1911-2023
340030	-3,73 (S)	-40,98 (W)	Coreaú	Tianguá	1911-2023
339028	-3,67 (S)	-39,24 (W)	Curu	São Luís do Curu	1911-2017
339023	-3,57 (S)	-39,97 (W)	Litoral	Miraíma	1921-2023
338016	-3,90 (S)	-38,67 (W)	Metropolitana	Maranguape	1910- 2023
638011	-6,05 (S)	-38,47 (W)	Médio Jaguaribe	Pereiro	1910-2023
739038	-7,58 (S)	-39,28(W)	Salgado	Jardim	1910-2023
440023	-4,18 (S)	-40,75(W)	Serra da Ibiapaba	Guaraciaba do Norte	1911-2023
540020	-5,211 (S)	-40,704 (W)	Sertões de Crateús	Crateús	1910-2023

Ajuste à distribuição

Para todo posto pluviométrico selecionado, extraiu-se, para cada ano da série histórica, o valor da precipitação diária máxima, constituindo assim a série de máximas anuais. A modelagem

estatística dessas chuvas extremas foi realizada com base em diferentes distribuições de probabilidade comumente empregadas em hidrologia: Gumbel, Logística, Lognormal, Gamma, Pearson Tipo III e Generalized Extreme Value (GEV). A escolha da distribuição mais adequada para cada série foi feita com base no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, visando identificar aquela que melhor representa o comportamento estatístico dos extremos observados (HAAN, 2002; RAO & HAMED, 2000).

A estimação dos parâmetros de cada distribuição foi realizada por meio do método da Máxima Verossimilhança (MV), implementado no software RStudio. O MV é um método amplamente utilizado em estatística inferencial que busca identificar os valores dos parâmetros que maximizam a função de verossimilhança — uma função que expressa a probabilidade de os dados observados ocorrerem, dados determinados parâmetros do modelo. (COX & HINKLEY, 1974; TUCCI, 1993; NAGHETTINI e PINTO, 2007). Cada distribuição possui uma função de probabilidade acumulada (CDF) e equações específicas para estimar seus parâmetros, e essas foram aplicadas de acordo com a natureza da distribuição selecionada em cada caso. Foram selecionados os modelos de quantis 25, 50, 75 para os cenários 245 e 585 a partir disso foram ajustados às equações IDF's para cada quantil para cada região hidrográfica. Assim, foram gerados os gráficos de intensidade duração para o TR de 100 anos para os cenários em comparação ao atual para as 12 regiões hidrográficas. Estudos como o de Silva et al. (2006) demonstram a aplicação eficaz do MV na análise de chuvas intensas em diferentes regiões do Brasil, com bons resultados na comparação entre modelos de probabilidade e validação com testes de aderência.

Método das isozonas

O método das isozonas foi elaborado pelo engenheiro José Jaime Torrico Taborga, que, ao analisar dados de diversas estações pluviográficas no Brasil, identificou um comportamento característico ao representar as precipitações de 1 hora e 24 horas no papel de probabilidades de Hershfield e Wilson. Nessas representações, verificou-se que as semirretas que relacionam a altura da precipitação com sua duração tendem a interceptar um ponto comum no eixo das abcissas quando prolongadas. As regiões que apresentavam esse padrão foram denominadas Isozonas (TORRICO, 1974). No Brasil, há um total de 8 isozonas, organizadas da letra A (zona de maior precipitação anual do Brasil) até a letra H (zonas de caatinga nordestina). As estações pluviométricas utilizadas neste artigo estão localizadas em isozonas variadas, que variam desde a isozona D até a isozona H.

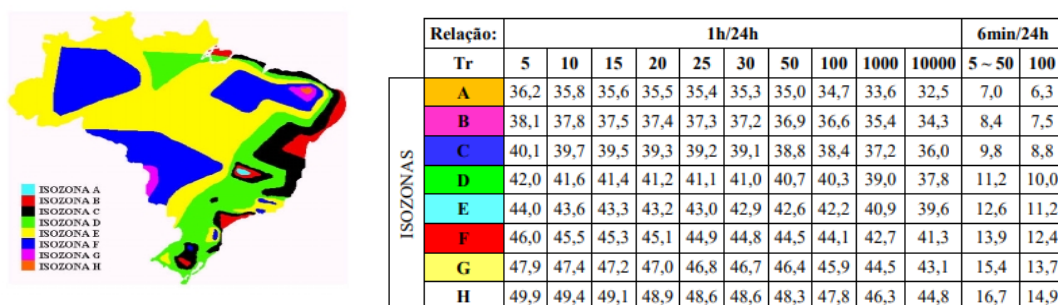
Tabela 2 - Isozona de cada posto

Código(s) do posto(s)	Município (s)	Isozona
640002 - 638011	Tauá - Pereiro	G
440007 - 540020	Tamboril - Crateús	F
539037	Senador Pompeu	H
437006- 340030- 739038- 440023	Jaguaruana - Tianguá - Jardim - Guaraciaba do Norte	E
339028- 339023-338016	São Luís do Curu - Miraima- Maranguape	D

Para cada isozona, Taborga (1974) propôs coeficientes de desagregação que relacionam as alturas de precipitação máxima em diferentes durações com a precipitação de 24 horas, de forma a possibilitar a estimativa de chuvas intensas em escalas menores de tempo. As relações mais

comumente utilizadas são entre as chuvas de 1 hora e 24 horas, e 6 minutos e 24 horas, e variam também de acordo com o tempo de retorno (T_r) adotado. A Tabela 3 apresenta os valores das relações para essas isozonas:

Figura 2 - Isozonas do território brasileiro e coeficientes relativos entre as chuvas com duração de 1 e 24 h e de 6 min e 24h, para as zonas homólogas e diferentes períodos de retorno



Fonte: Torrico(1974)

Com os valores interpolados de altura de precipitação para diferentes durações, procedeu-se ao ajuste da equação IDF na forma:

$$i = \frac{A * T^b}{(t+c)^d} \quad (5)$$

Onde: i = intensidade de precipitação (mm/h); T = período de retorno (anos); t = duração da chuva (min); a , b , c e d = parâmetros estatísticos locais.

Embora a intensidade i não tenha sido diretamente calculada, a estrutura funcional da equação IDF foi ajustada com base nas alturas interpoladas, de modo a identificar os parâmetros a , b , c e d que melhor representassem a relação entre tempo de duração e a distribuição temporal da precipitação para cada sub-bacia.

Ajuste da IDF

Para a calibração dos parâmetros a, b, c e d da equação IDF, foi adotado o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), implementado no ambiente RStudio por meio da função `psoptim` do pacote `pso` (Bendtsen, 2012). No presente estudo, a função objetivo a ser minimizada foi o erro quadrático total entre as intensidades estimadas pela equação IDF e aquelas obtidas a partir das alturas de precipitação interpoladas divididas pelas durações correspondentes. Foram estabelecidos limites para os parâmetros com base na literatura e em testes exploratórios: $a \in [0, 2000]$, $b \in [0, 1]$, $c \in [0, 20]$, $d \in [0, 1]$. A convergência para a solução ótimo foi avaliada por meio do erro quadrático total. Com isso, o enxame (conjunto de partículas ou pássaros) vai convergindo para uma solução ótima — ou seja, para os valores de a, b, c e d que melhor ajustam a equação IDF aos dados interpolados de precipitação, minimizando E^2 . Como resultado final, foi obtida uma curva IDF regionalizada para a maior cidade de cada região hidrográfica, onde cada curva IDF associa o valor da intensidade de precipitação (I), para cada duração de chuva (D), para um período de retorno específico (lembrando que o período de retorno é o inverso da frequência $T=1/F$).

Correção de Viés

O ajuste das curvas de Intensidade- Duração- Frequência de cada cidade exige uma representação precisa da precipitação. Para garantir que as projeções do CMIP6 sejam consistentemente aplicáveis à realidade hidrológica do estado do Ceará e consigam uma geração confiável das curvas IDF, é necessária a aplicação de uma metodologia de correção de viés. Dentre

as opções disponíveis, o Mapeamento de Quantis Equidistantes (EQM), conforme proposto por Li et al. (2010), destaca-se como a escolha mais adequada.

Diferente de métodos simples, o EQM (Equal Quantile Matching) não assume que o clima é estacionário, o que é crucial em um cenário de mudanças climáticas aceleradas. Ele é capaz de incorporar informações da Função de Distribuição Cumulativa (CDF) da projeção futura do próprio modelo. Essa característica permite que o método ajuste não apenas as diferenças de média, mas também de variabilidade e forma da distribuição. A equação do EQM utilizada para o ajuste dos valores de precipitação é apresentada como:

$$\hat{x}_{m-p}^* = x_{m-p} + F_{o-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p})) - F_{m-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p})) \quad (1)$$

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.

Para a aplicação desta metodologia, foram utilizadas três séries temporais de precipitação diária: as séries históricas observadas do posto com maior dados válidos de cada região hidrográfica para o período de calibração; a série de precipitação dos modelos CMIP6 do cenário historical para a grade correspondente ao estado do Ceará, para o mesmo período de calibração; e as séries de precipitação dos mesmos modelos para o período de projeção futura.

As projeções climáticas dos modelos do CMIP6, tanto para o cenário historical, quanto para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, foram espacialmente interpolada por meio do método Inverse Distance Weighted com o parâmetro de potência que define a importância da distância no valor interpolado igual a 2.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram selecionados os modelos de quartis 25, 50 e 75 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a partir disso foram ajustados às equações IDF's para cada quartil e região hidrográfica, estabelecendo os seguintes cenários:

Tabela 3 - Cenários de Mudanças Climáticas

CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
Q. 25_SSP2-4.5	Q. 50_SSP2-4.5	Q. 75_SSP2-4.5	Q. 25_SSP5-8.5	Q. 50_SSP5-8.5	Q. 75_SSP5-8.5

Dessa forma, foram gerados os gráficos de precipitação e duração para o TR de 100 anos, a partir das IDF's ajustadas, para os cenários em estudo em comparação ao atual para as 12 regiões hidrográficas. As figuras a seguir mostram os gráficos gerados:

Figura 3 - Gráfico Precipitação (mm) x Duração (min) (A) 338016: Região Metropolitana; (B) 339023: Região do Litoral; (C) 339028: Região do Curu; (D) 340030: Coreaú; (E) 437006: Região do Baixo Jaguaribe; (F) 440007: Região do Acaraú.

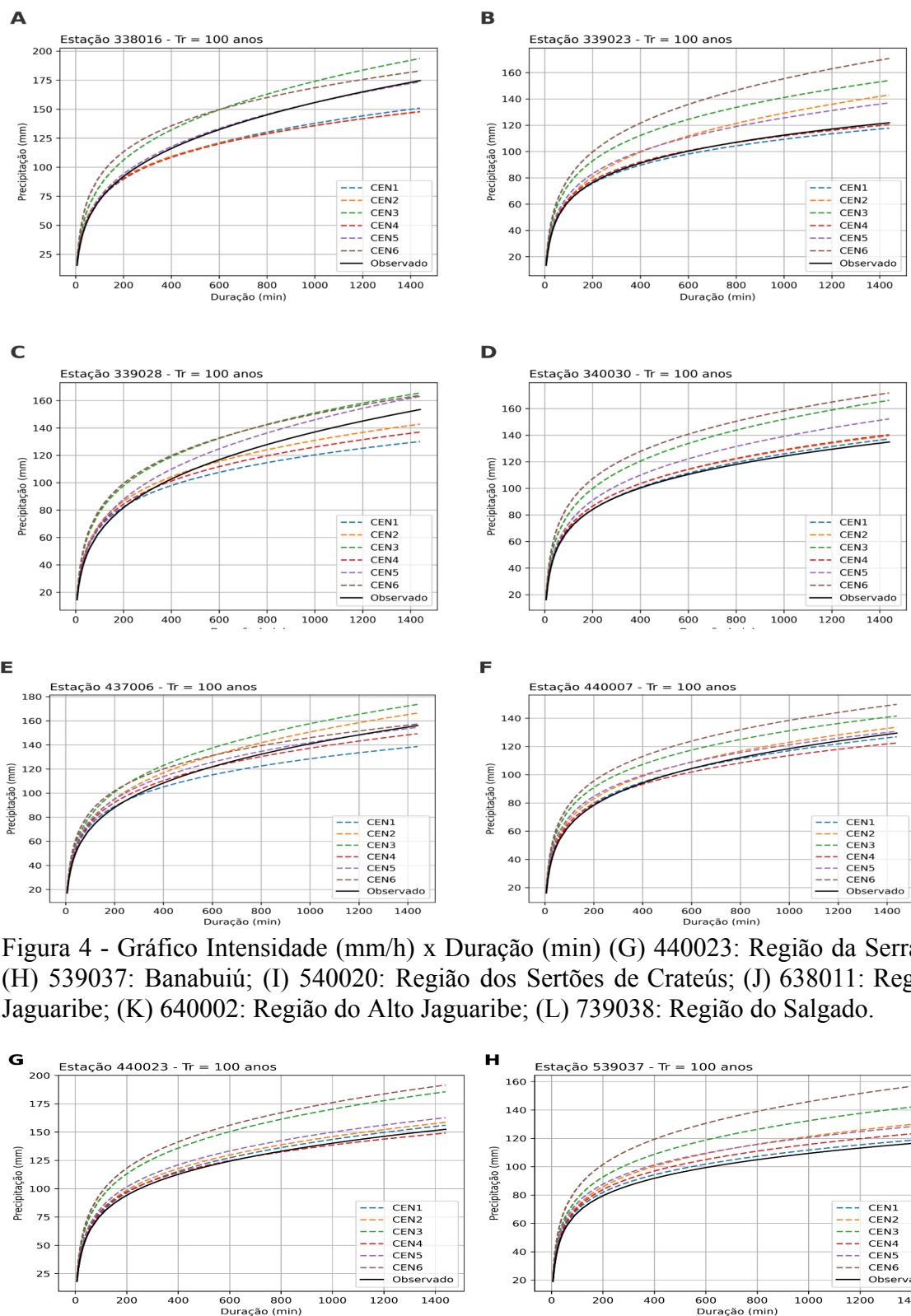
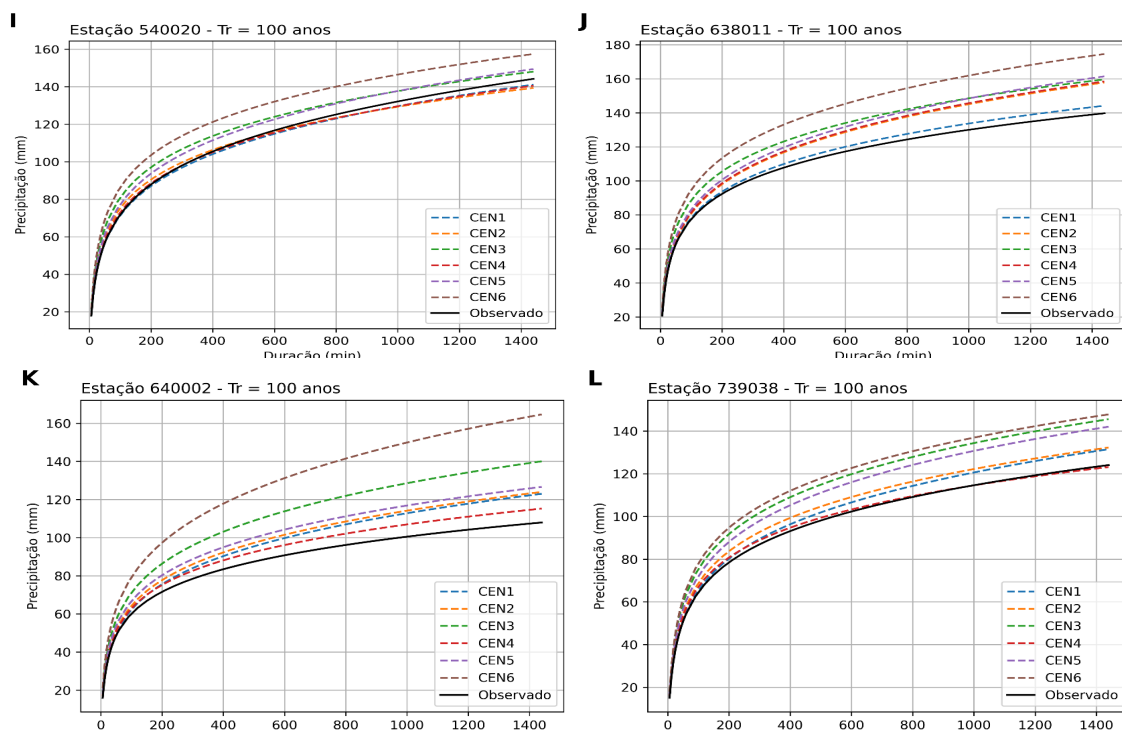


Figura 4 - Gráfico Intensidade (mm/h) x Duração (min) (G) 440023: Região da Serra da Ibiapaba; (H) 539037: Banabuiú; (I) 540020: Região dos Sertões de Crateús; (J) 638011: Região do Médio Jaguaribe; (K) 640002: Região do Alto Jaguaribe; (L) 739038: Região do Salgado.



Em todos os gráficos notou-se que a maioria dos cenários possuem maiores precipitações do que atualmente nas regiões em estudo, mostrando que as mudanças climáticas impactam diretamente na intensidade de chuvas. Além disso, o quartil 75 dos 2 cenários apresentaram maior volume de chuva em todas as regiões, sendo algo já previsto por ser o quartil superior nos dois cenários.

Com base em estudos de Rodrigues (2019) foi calculado chuvas de 140,339 mm para 1 dia em Sobral para TR de 100 anos, de maneira análoga, os resultados do cenário CEN6 para a região do Acaraú (Figura 3) projetam chuvas superiores a 150 mm, mostrando como as mudanças climáticas afetam a chuva diária. Uma região que apresentou altas precipitações foi Fortaleza, com cenário com maior volume de chuva sendo o CEN3, essa tendência de aumento da chuva pelo impacto de mudanças climáticas também foi visto em Saboia (2015), em que a precipitação em modelos de mudanças climáticas apresentou valores bem elevados em comparação uma série histórica para TR de 100 anos. Os resultados apresentados corroboram com a ideia de que o impacto das mudanças climáticas nos padrões de ocorrência de chuvas extremas elevam o risco de problemas de drenagem, visto que os volumes precipitados podem superar, de maneira expressiva, os valores da chuva de projeto considerados no seu dimensionamento. Nesse contexto, é essencial que as cidades, em especial os grandes centros urbanos, pensem em estratégias de adaptação para esse futuro climático projetado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nessa pesquisa demonstram de forma clara que os cenários climáticos analisados indicam um aumento significativo nas precipitações intensas, quando comparados com a situação atual das regiões hidrográficas estudadas. A elevação dos valores nos quartis superiores nos dois cenários nas regiões analisadas é consistente com a expectativa estatística, além de evidenciar uma tendência de intensificação nos episódios de precipitação.

Os resultados deste trabalho corroboram com a literatura existente ao demonstrar que o impacto das mudanças climáticas sobre a intensidade das chuvas tende a aumentar significativamente os riscos de falhas nos sistemas de drenagem urbana. Dessa forma, torna-se indispensável a revisão periódica das curvas IDF utilizadas nos projetos de engenharia, bem como a adoção de abordagens adaptativas e sustentáveis que considerem as projeções climáticas futuras, especialmente em contextos urbanos como na drenagem urbana, evitando desastres como enchentes e diminuindo problemas dentro do saneamento básico.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2020). *Plano Nacional de Recursos Hídricos: Diagnóstico e Prognóstico*. Brasília: ANA. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará. (2022). *Relatório Anual de Monitoramento Hidrológico*. Fortaleza: COGERH. Disponível em: <https://www.cogerh.ce.gov.br>
- COX, D. R.; HINKLEY, D. V. *Theoretical Statistics*. Chapman and Hall, 1974.
- EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. (2023). *Climatologia e Recursos Hídricos do Ceará*. Fortaleza: FUNCEME. Disponível em: <https://www.funceme.br>.
- GUMBEL, E. J. *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press, 1958.
- HAAN, C. T. *Statistical Methods in Hydrology*. 2. ed. Ames: Iowa State Press, 2002.
- IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.
- LI, H.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 115, D10, 2010. DOI: 10.1029/2009JD012882.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, 2007.
- RAO, A. R.; HAMED, K. H. *Flood Frequency Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- RODRIGUES, G. P. W. et al. IX-041–Elaboração de uma Equação de chuvas intensas para a cidade de Sobral/CE por meio do método analítico, 2019.
- SABÓIA, M. A. M. et al. *Análise do Impacto das Mudanças Climáticas nas Chuvas Intensas da Cidade de Fortaleza, Ceará*, 2015.
- SALVADORI, G. et al. *Extremes in Nature: An Approach Using Copulas*. Dordrecht: Springer, 2007.
- SILVA, D. F., & SIMONOVIC, S. P. (2020). Development of non-stationary rainfall intensity-duration-frequency curves for future climate conditions. *Water Resources Research Report*, No. 106. London: Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering.
- SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; PINTO, L. C. B.; MATOS, A. T. Avaliação de modelos estatísticos para a descrição da variabilidade espacial e temporal de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 352–359, 2006. DOI: 10.1590/S1415-43662006000200027.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993. Cap. 18.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993.