

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CHUVAS INTENSAS NA BACIA DO RIO UNA, PERNAMBUCO, BRASIL

Ravi Emanuel de Melo ¹; Carolyne Wanessa Lins de Andrade Farias ²; Mariana Caroline Gomes de Lima ³; Thayná Alice Brito Almeida ⁴; Aline Maria Soares das Chagas ⁵; & Abelardo Antônio de Assunção Montenegro ⁶

Abstract: The study evaluated the probability of extreme rainfall events and calibrated the intensity-duration-frequency (IDF) equation for three locations in the Una River Basin, in the states of Pernambuco and Alagoas, Brazil. Daily rainfall data from 1995 to 2024 were analyzed for the municipalities of Capoeiras (PE), Palmares (PE), and Jacuípe (AL). The Gumbel distribution was satisfactorily fitted to the annual maximum rainfall series, allowing the estimation of daily maximum rainfall depths for different return periods. Rainfall disaggregation was performed for durations ranging from 24 hours to 5 minutes. The adjustment of the Pfafstetter IDF equation showed satisfactory performance, with coefficients of determination (R^2) above 0.99. The calibrated IDF equations demonstrated consistent adherence to the observed data, supporting their use as a technical tool for hydraulic planning and water resources management in the Una River Basin.

Resumo: O trabalho avaliou a probabilidade de ocorrência de chuvas intensas e ajustou a equação de intensidade-duração-frequência (curva IDF) para três localidades da Bacia Hidrográfica do Rio Una, nos estados de Pernambuco (PE) e Alagoas (AL). Foram utilizados dados pluviométricos diários do período de 1995 a 2024, coletados nos municípios de Capoeiras (PE), Palmares (PE) e Jacuípe (AL). A distribuição de Gumbel foi ajustada satisfatoriamente às séries de chuvas máximas anuais, permitindo a estimativa das alturas de precipitação máxima diária para diferentes tempos de retorno. A desagregação das chuvas foi realizada para durações variando de 24 horas a 5 minutos. O ajuste da equação IDF de Pfafstetter apresentou desempenho satisfatório, com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,99. As equações IDF calibradas demonstraram aderência consistente aos dados observados, podendo ser utilizadas como ferramenta técnica para o planejamento hidráulico e a gestão dos recursos hídricos na Bacia do Rio Una.

Palavras-Chave – Curva IDF, Distribuição de Gumbel, Planejamento hídrico.

INTRODUÇÃO

As chuvas intensas são eventos meteorológicos extremos que provocam impactos significativos na infraestrutura urbana, no meio rural e na dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas (BHs). A concentração desses eventos em curtos períodos de tempo agrava problemas como alagamentos, enxurradas, erosão do solo, perdas agrícolas e sobrecarga de sistemas de drenagem (Tucci, 2013). A compreensão da frequência e intensidade dessas precipitações é essencial para o planejamento de

obras hidráulicas, a conservação dos recursos naturais e a proteção da vida humana (Silva et al., 2023).

Na região Nordeste do Brasil (NEB), a bacia hidrográfica do Rio Una, abrange os estados de Pernambuco e Alagoas, destacando-se por sua economia baseada no comércio, agricultura com o cultivo de cana-de-açúcar e pecuária. Além disso, nas últimas décadas, nos anos de 2002, 2005 e 2010, eventos de cheias ocorreram, causando destruição de vários municípios, contribuindo para a vulnerabilidade hidrológica na bacia hidrográfica (BH), por consequência do aquecimento global que eleva a intensidade e quantitativo desses eventos extremos (Albuquerque e Galvêncio, 2010; Silva et al., 2017).

Estudar as chuvas intensas na bacia hidrográfica do Rio Una se constitui em uma ação estratégica para subsidiar medidas preventivas frente aos eventos de inundações ocorrentes. Neste contexto, a modelagem estatística por meio da distribuição de Gumbel (Gumbel, 1958) possibilita a estimativa de precipitações máximas associadas a diferentes períodos de retorno. A partir dessas estimativas, a desagregação de chuvas é aplicada para converter os valores diários em intensidades correspondentes a diferentes durações, esses coeficientes de desagregação foram tabelados e disponibilizados pelo Cetesb (1986), e se constituem etapa essencial para a calibração das curvas IDF (intensidade-duração-frequência), que fornecem suporte técnico ao dimensionamento de obras hidráulicas, como canais de macrodrenagem e contenção de cheias (Cetesb, 1986).

Ao considerar localidades distribuídas ao longo do curso do Rio Una, incluindo sua nascente, este estudo busca conectar a dinâmica hidrológica aos contextos agroclimáticos e fisiográficos da BH. O Rio Una nasce na serra da Boa Vista, no município de Capoeiras (PE), zona fisiográfica do Agreste, onde tem seu curso alto, enquanto os cursos médio e baixo encontram-se na zona da Mata, incluindo os municípios de Palmares e Jacuípe (Oliveira e Silva, 2016).

A partir disso, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento das chuvas intensas para três localidades diferentes na Bacia Hidrográfica do Rio Una, utilizando uma série histórica de precipitação (1995-2024), para estimar eventos críticos e ajustar equações IDF, contribuindo para o planejamento e mitigação de desastres associados à precipitação extrema.

MATERIAL E MÉTODOS

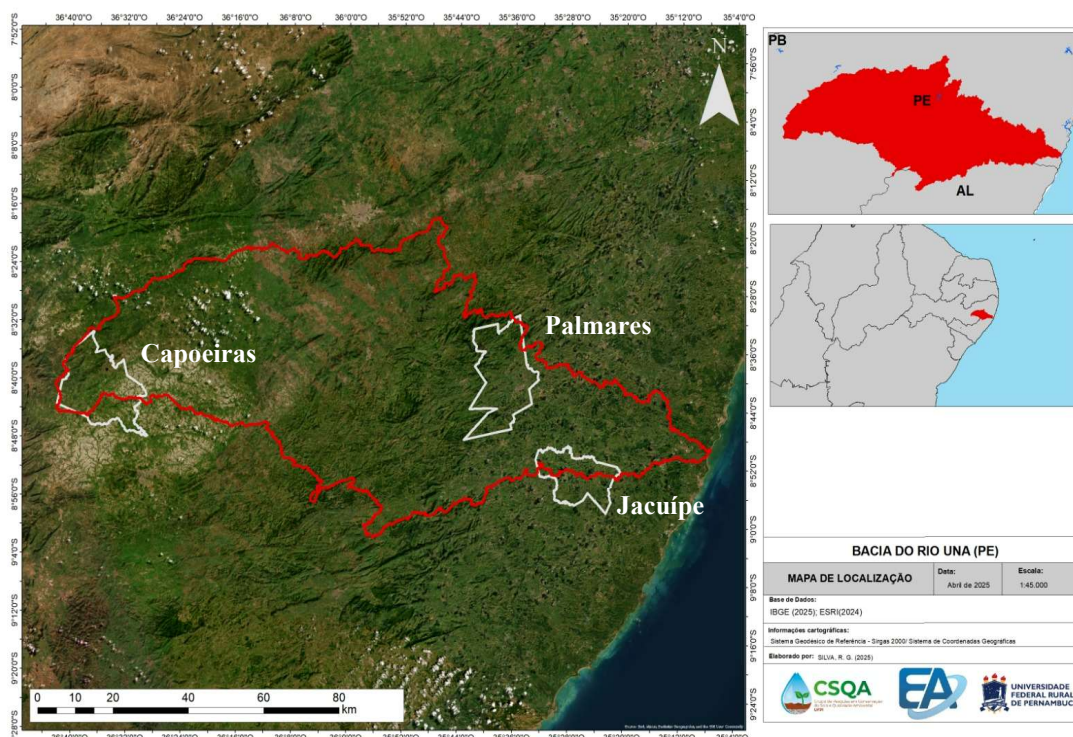
Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Una localiza-se em sua foz na porção sul do litoral pernambucano e na sua nascente no agreste meridional, possui uma área total de 6.740,31 km², dos quais 477,53 km²

estão no estado de Alagoas, sendo localizado entre 8°17'14" e 8°55'28" de latitude sul, e 35°07'48" e 36° 42'10" de longitude a oeste de Greenwich. Corresponde a Unidade de Planejamento Hídrico - UP 5 da divisão hidrográfica do Estado de Pernambuco (SECTMA, 2006).

Neste trabalho estão sendo considerado 3 municípios, sendo 2 no estado de Pernambuco (PE) e 1 no estado de Alagoas (AL), sendo eles, Palmares (PE), Capoeiras (PE) e Jacuípe (AL). O critério de escolha para Capoeiras se deu por este município abrigar a nascente do Rio Una, representando o alto curso da bacia. Para Palmares justifica-se por sua localização no baixo curso da Bacia do Rio Una, região historicamente marcada por eventos recorrentes de enchentes severas. Para Jacuípe se deu por sua posição no médio curso da Bacia do Rio Una, funcionando como zona de transição entre os processos hidrológicos do alto curso e os impactos observados no baixo curso (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização dos municípios do estudo, Capoeiras (PE), Palmares (PE) e Jacuípe (AL).



Coleta e análise de dados de precipitação

Foram utilizados dados pluviométricos diários referentes ao período de 1995-2024. Para o município de Jacuípe (AL), os dados foram extraídos da estação ANA_835139 (Latitude: -8.8419; Longitude: -35.4475), disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas – SEMARH/AL, por meio do portal (<https://sirh.al.gov.br/>). Em Pernambuco,

os dados para o município de Capoeiras foram coletados no site da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC (<http://old.apac.pe.gov.br>), correspondentes à estação de número 287, localizada nas coordenadas -8,7342; -36,6267. Para Palmares, também foram utilizados dados da APAC, provenientes da estação número 25, situada nas coordenadas -8,678; -35,580. Todas as séries pluviométricas foram organizadas para análise das chuvas máximas diárias anuais, visando a caracterização de eventos extremos em cada município da Bacia do Rio Una.

As séries históricas foram organizadas em ordem decrescente com base nos valores das chuvas máximas diárias, sendo posteriormente calculadas a média aritmética e o desvio-padrão de cada série anual. A partir desses dados, aplicou-se o modelo probabilístico da distribuição de Gumbel, que possibilita estimar a precipitação máxima esperada para distintos tempos de retorno, neste estudo, considerados os períodos de 2, 5, 10, 20, 30, 50 e 100 anos. Após o tratamento estatístico inicial, a aplicação do modelo teve início com a definição da probabilidade de ocorrência de cada evento extremo anual, conforme estabelecido na equação 1:

$$P = 1 - e^{-e^{-Y}} \quad (1)$$

Onde, P = probabilidade de um valor extremo ser igualado ou superado; y = variável reduzida.

O valor de y na distribuição de Gumbel é obtida pela equação 2:

$$y = \alpha(X - \mu) \quad (2)$$

Onde, α e μ que são definidos pelas equações 3 e 4:

$$\alpha = \frac{Sn}{S} \quad (3)$$

$$\mu = \bar{X} - S \frac{Yn}{Sn} \quad (4)$$

Onde, \bar{X} = valor do evento de chuva extrema; Sn = desvio padrão da série de chuvas; S = desvio padrão reduzido, tabelado para 30 anos como: 1,1124; Yn = média da variável reduzida, tabelado para 30 anos como: 0,5362; \bar{X} = média dos valores da série de chuvas extremas.

Com o objetivo de verificar a aplicabilidade da distribuição de Gumbel aos dados de precipitação máxima, foi avaliada a qualidade dos ajustes por meio do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS), adotando-se um nível de significância de 5%. Esse teste, de natureza não paramétrica, baseia-se na comparação entre as distribuições de probabilidade empírica e teórica, sendo sua estatística determinada pela maior diferença absoluta entre as funções acumuladas correspondentes (Naghettini e Pinto, 2007).

Caso os dados apresentem aderência satisfatória ao modelo teórico, conforme os critérios do teste de KS, torna-se possível estimar as chuvas máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno, por meio da equação específica da distribuição de Gumbel pela equação 5 (Silva et al., 2020).

$$X = \frac{b2}{\alpha} + \mu \quad (5)$$

Onde, X = altura de chuva máxima (mm); sendo b2 (parâmetro de ajuste) dada pela equação 6:

$$b2 = -\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right) \quad (6)$$

Onde, Tr = Tempo de retorno em anos.

Após a estimativa das chuvas máximas diárias prováveis para cada tempo de retorno analisado (2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos), foi aplicada a metodologia de desagregação de chuvas, permitindo calcular os volumes correspondentes a diferentes durações, variando de 5 minutos até 24 horas. Essa desagregação foi realizada por meio da multiplicação dos valores de precipitação diária pelos coeficientes de desagregação apropriados a cada intervalo de tempo, conforme recomendado por Cetesb (1986).

Com base nos volumes desagregados, foram então calculadas as intensidades de precipitação, as quais serviram de base para o ajuste da equação de intensidade-duração-frequência (IDF), conforme o modelo proposto por Pfafstetter (1958) (Equação 7). Essa equação apresenta parâmetros empíricos denominados K, a, b e c, que são específicos para cada localidade e foram ajustados utilizando-se a ferramenta Solver do Microsoft Excel.

$$i = \frac{K * Tr^a}{(t+b)^c} \quad (7)$$

Onde, i = intensidade da chuva (mm/h); Tr = tempo de retorno em anos; t = duração da chuva (min); K, a, b, c = parâmetros empíricos da equação.

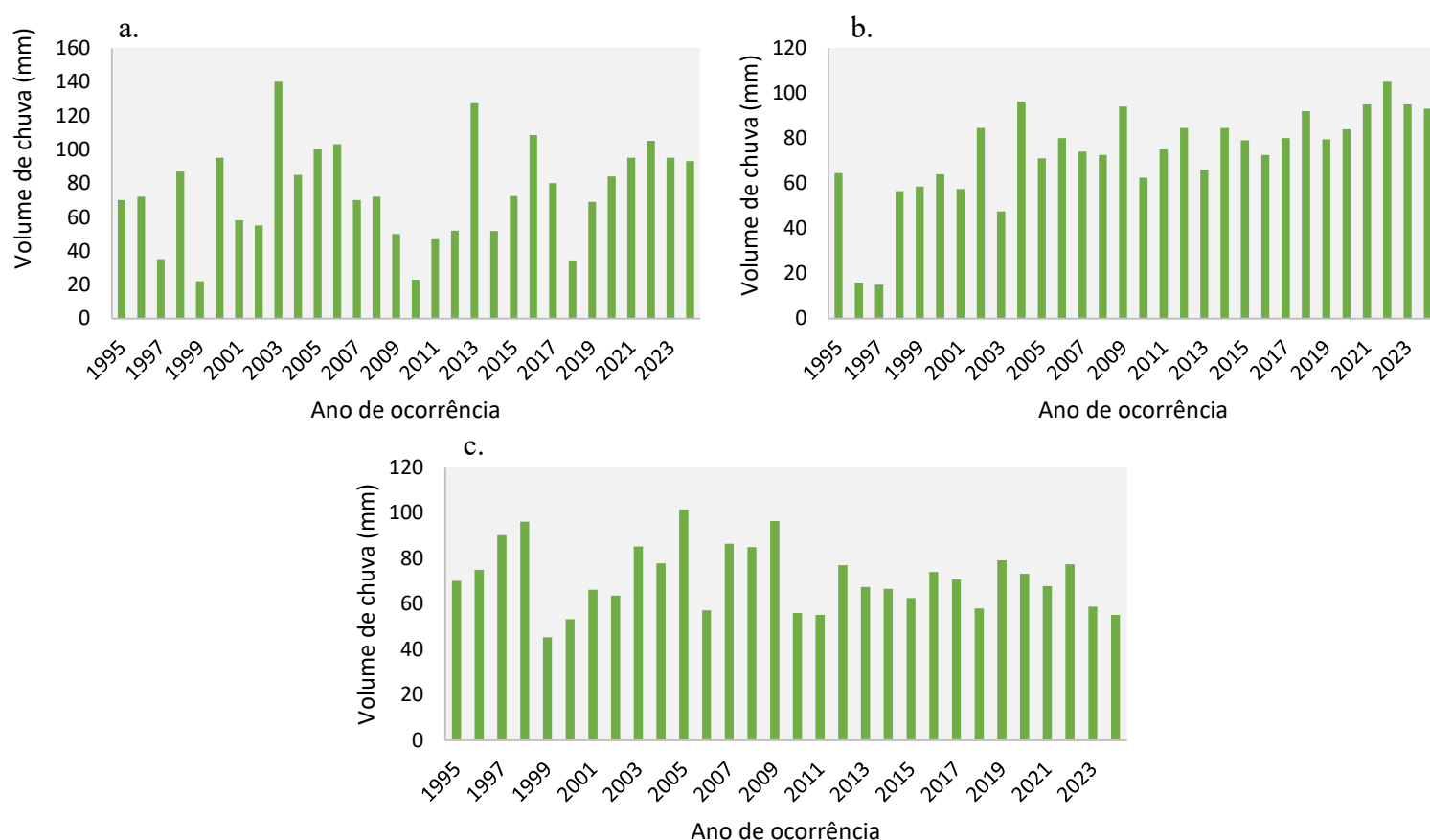
Para avaliar a eficiência e a acurácia dos ajustes e da equação de IDF, foram utilizados o coeficiente de determinação R², o coeficiente NSE (Nash e Sultcliffe, 1970) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das chuvas máximas anuais (Figura 2) revela distintos comportamentos hidrológicos ao longo da bacia. Em Capoeiras (PE), observou-se elevada variabilidade interanual, com picos em 2003 e 2013, e reduções acentuadas entre 2009 e 2012, refletindo os efeitos da seca extrema no NEB (Marengo et al., 2018). Em Jacuípe (AL), os dados indicam um padrão oscilante com eventos

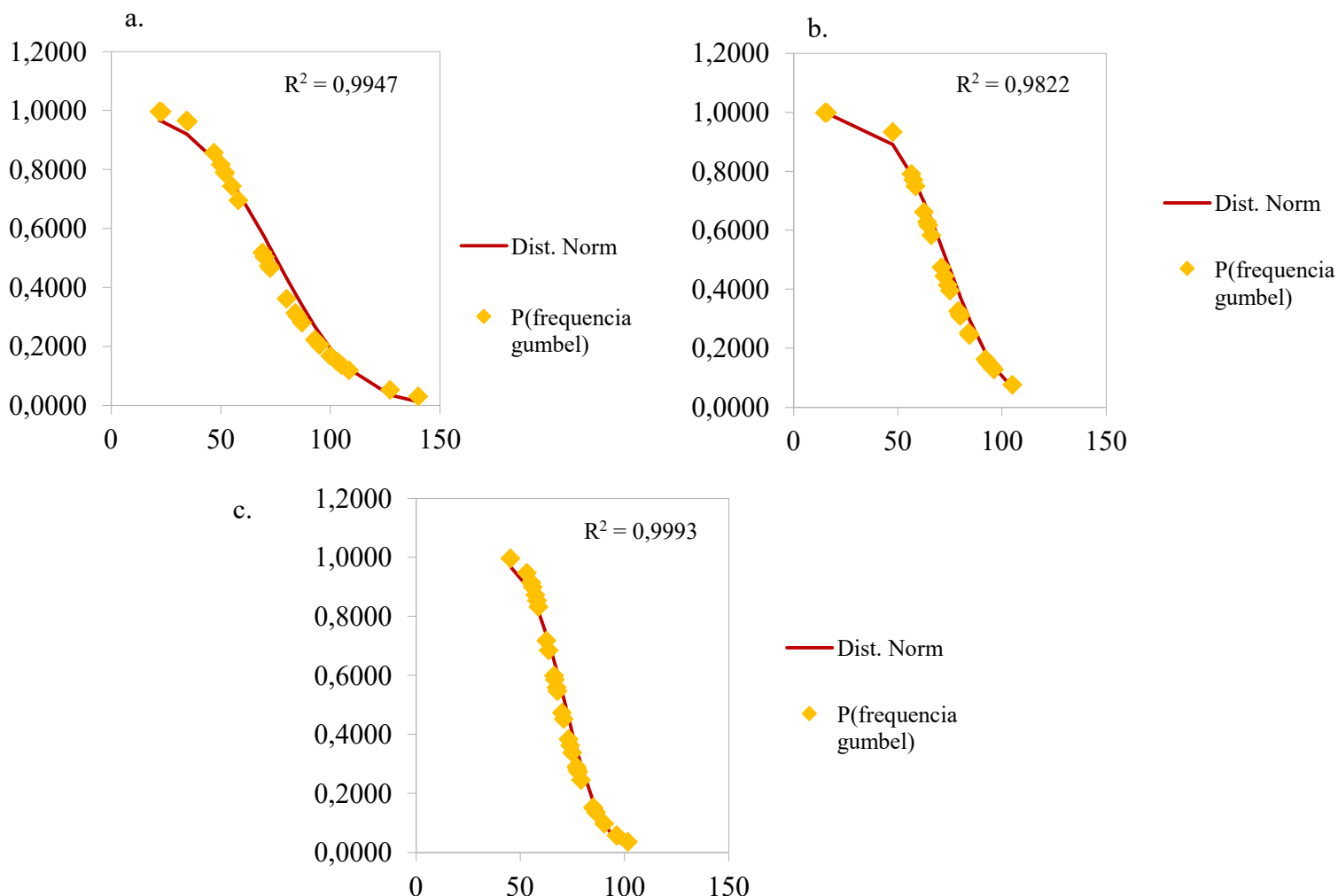
expressivos até 2006 e queda na frequência de máximas a partir de 2012, influenciado pela ocupação agropecuária e solos com baixa infiltração, aumentando o escoamento superficial e a suscetibilidade a inundações (Rocha Almeida et al., 2020). Em Palmares (PE), no baixo curso, os volumes máximos mostram uma tendência de aumento nos últimos anos, com destaque para os eventos extremos recentes, condizentes com o histórico de enchentes na região (Silva et al., 2019).

Figura 2. Distribuição de chuvas nos municípios estudados nos últimos 30 anos (1995-2024). a. Capoeiras (PE). b. Palmares (PE). c. Jacuípe (AL).



A Figura 3 apresenta a distribuição de frequência das chuvas máximas anuais ajustada pelo modelo de Gumbel para os municípios de Capoeiras (a), Palmares (b) e Jacuípe (c). O ajuste foi satisfatório nas três localidades, com coeficientes de determinação R^2 de 0,9947 para Capoeiras, 0,9822 para Palmares e 0,9993 para Jacuípe, indicando boa aderência entre os valores observados e teóricos. O teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou a adequação do modelo à série histórica, permitindo sua aplicação na estimativa de chuvas extremas em diferentes tempos de retorno. Portanto, as distribuições foram consideradas adequadas para o ajuste da precipitação máxima diária anual.

Figura 3. Distribuição da frequência teórica e de Gumbel para as chuvas máximas na estação de a. Capoeiras (PE). b. Palmares (PE). c. Jacuípe (AL).

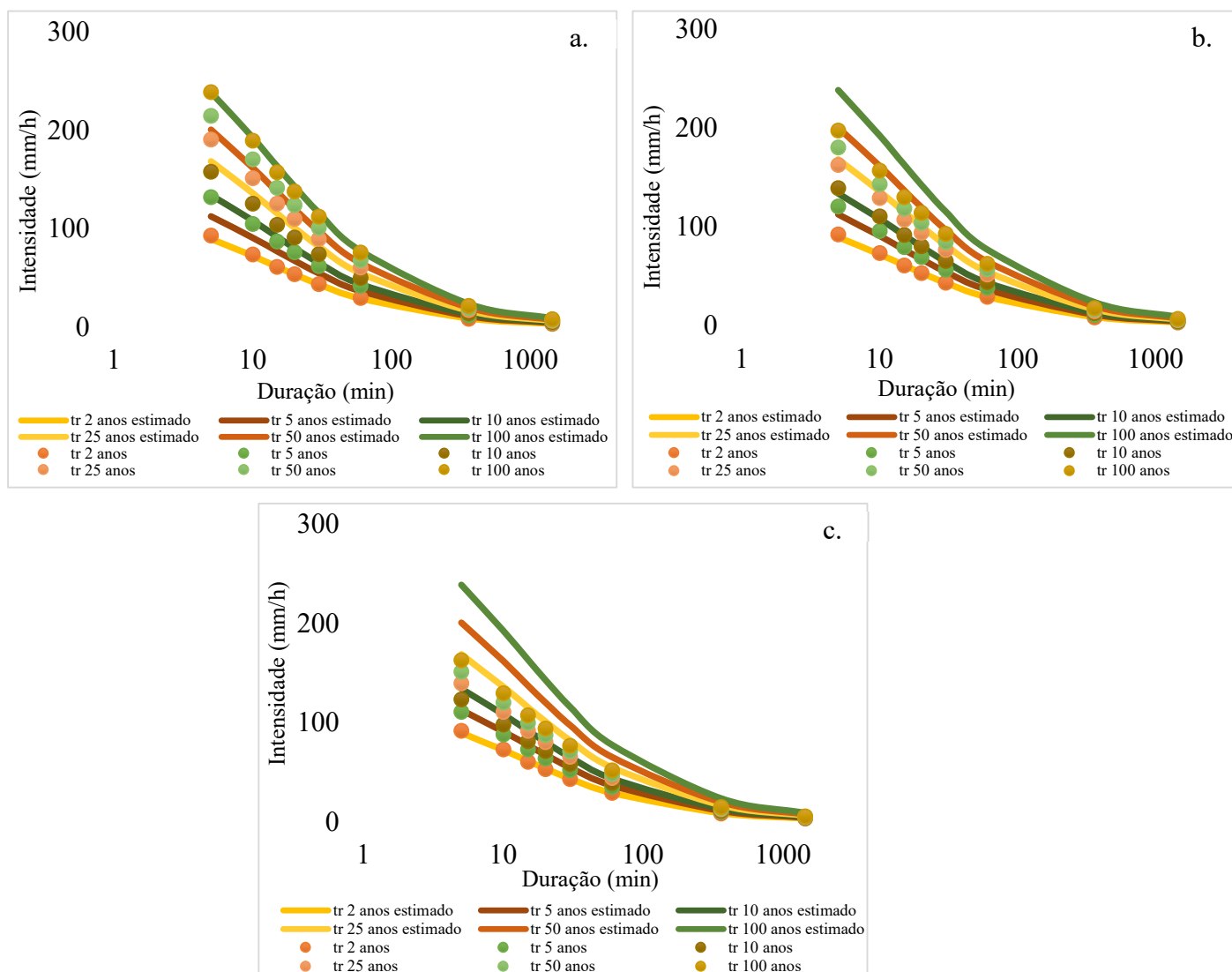


O desempenho da equação foi satisfatório em todas as localidades, com R^2 igual a 0,99 para todos os tempos de retorno (Tr). O NSE apresentou 0,85 para Tr de 2 anos e 0,99 para os demais em todos os municípios. Os valores de RMSE, por sua vez, variaram entre as cidades: em Capoeiras, os erros oscilaram entre 0,12 e 0,62; em Palmares, entre 0,10 e 0,44; e em Jacuípe, apresentaram maior variação, de 0,13 até 0,81, refletindo a influência das características locais, como variabilidade climática, uso do solo e padrão de distribuição das chuvas. Esses resultados confirmam a adequação do modelo de Gumbel associado à equação IDF para estimativas de precipitações extremas nos diferentes contextos da Bacia do Rio Una. O RMSE é uma métrica que responde de forma acentuada à ocorrência de valores extremos, pois dá maior peso aos erros mais altos (Gonzaga, 2024).

As curvas IDF para os municípios de Capoeiras (a), Palmares (b) e Jacuípe (c) encontram-se representadas na Figura 4, considerando tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Os dados

estimados e observados apresentaram boa correspondência ao longo de todas as durações (de 5 a 1440 minutos), com tendência típica de redução da intensidade à medida que a duração da chuva aumenta.

Figura 4. Curvas intensidade-duração-frequência (IDF) ajustadas para os municípios de a. Capoeiras (PE). b. Palmares (PE). c. Jacuípe (AL).



De modo geral, observou-se que Jacuípe apresentou os maiores valores de intensidade para os menores tempos de duração e altos tempos de retorno, enquanto Capoeiras e Palmares mostraram padrões mais suavizados. Esse comportamento reflete as diferenças fisiográficas e climáticas entre os trechos alto, médio e baixo da Bacia do Rio Una, além das características locais de uso do solo e escoamento superficial. Correlacionando intensidades e durações das precipitações verifica-se que quanto mais intensa a precipitação, menor será a duração da chuva (Matos, 2021). De acordo com Botelho (2017), a intensidade de uma precipitação é a quantidade de chuva que cai em uma área

específica durante um determinado período. Desta forma, os resultados das curvas IDF ajustadas não apenas comprovam a qualidade estatística dos modelos, como também demonstram potencial de aplicação direta no planejamento hidráulico e na gestão de riscos hidrometeorológicos na Bacia do Rio Una.

CONCLUSÕES

O modelo de Gumbel apresentou bom desempenho na estimativa de chuvas máximas para diferentes tempos de retorno, validado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo adequado para representar eventos extremos na bacia do Rio Una.

As equações IDF ajustadas para Capoeiras, Palmares e Jacuípe mostraram bom ajuste, podendo ser aplicadas no planejamento hídrico e no dimensionamento de obras de controle de cheias.

Observou-se a relação inversa entre intensidade e duração da chuva, confirmando que eventos mais intensos tendem a durar menos. O uso combinado da Gumbel e das IDF's reforça seu potencial na mitigação de riscos hidrológicos.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PGEA), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado, ao Laboratório de Água e Solo (LAS) da UFRPE, a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, R.T.D.B., & Galvêncio, J. D. (2010). “*Cenários de Mudanças Climáticas na Bacia Hidrográfica do Rio Una-Pernambuco*”. Revista Brasileira de Geografia Física, 3(2), 48-54.
- Almeida, A.L.G.R.; Dlumour, M.B.; Almeida, N.K.N.C.; Pereira, J.V.A.; Barros, A.M.de. (2020). “*Análise do coeficiente de escoamento nas mesorregiões do Agreste e do Leste Alagoano*”. In: XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, Maceió. Anais [...]. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRHidro.
- Botelho, M.H.C. “*Águas de chuva: Engenharia das águas pluviais nas cidades*.” São Paulo: Blucher, 2017.
- CETESB. (1986). “*Drenagem urbana: manual de projeto*”. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 1. ed. São Paulo: DAEE/CETESB, 466p.

- Gonzaga, V.N.B. “*Metodologias na Derivação das Relações de Intensidade-Duração-Frequência De Chuvas Intensas*”. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024.
- Gumbel, E.J. (1958). “*Statistics of extremes*”. New York: Columbia University, 375 p.
- Hidrográficas de Pernambuco*”. Recife – PE, P18, p46, 68 e p. 82.
- Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Alvala, R.C.S.; Cunha, A.P.; Brito, S.; Moraes, O.L.L. (2018). “*Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region*.” Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 90, supl. 1, p. 1973–1985.
- MATOS, J.M.M. “*Análise da degradação ambiental na bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco*.” Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- Naghetini, M.; Pinto, E.J.A. “*Hidrologia estatística*.” Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- Nash, J.; Sutcliffe, J. (1970). “*River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles*”. J. Hydrol., 10, 282–290.
- Oliveira, R.; & Silva, S. (2016). “*Estudos de Eventos Extremos de Chuva na Bacia Hidrográfica do Rio Una*”. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, 2(1).
- Pfaffstetter, O. (1958). “*Chuvas intensas no Brasil*.” 2.ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 426 p.
- SECTMA. (2006). Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco. “*Bacias*
- Silva, G.R.; Oliveira, D.V.C.; Oliveira Júnior, A.I.; & Carvalho, I.J. (2023). “*Análise das precipitações pluviométricas do município de Serra Talhada-PE e determinação da equação de chuvas intensas por meio de distribuição probabilística*”. Revista De Geografia, 40(1), 306–333.
- Silva, J.R.I.; Farias, C.W.L.A.; Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A.A. “*Análise de chuvas intensas para diferentes localidades na bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco*.” In Anais: XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2020, Caruaru: ABRH, 2020.
- Silva, L.L.; Listo, F.L.R. (2019). “*Inundações severas no município de Palmares-PE: uma análise comparativa preliminar dos eventos de 2010 e 2017*”. Revista GeoUECE (Online), v. 08, n. 14.
- Silva, R.O.B.; Montenegro, S.M.G.L.; & Souza, W.M. (2017). “*Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas BHs do estado de Pernambuco*”. Eng. Sanit. Ambient., 22(3), 579-589.
- Tucci, C.E.M. (2013). “*Hidrologia: ciência e aplicação*”. Porto Alegre: UFRGS. ABRH. 943p.