Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

MODELANDO A CHUVA MÁXIMA DIÁRIA NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA-PB POR MEIO DA TEORIA DOS VALORES EXTREMOS

Modeling the maximum daily rainfall in the municipality of João Pessoa-PB, Brazil, using the Extreme Value Theory

Modelización de la iluvia máxima diaria en la municipio de João Pessoa-PB utilizando la Teoría de Valores Extremos

Larissa da Silva Souza
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
E-mail: larissa.souza040@academico.ufgd.edu.br

Elias Silva de Medeiros
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
E-mail: eliasestatistica@gmail.com

Alessandra Querino da Silva
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
E-mail: alessandrasilva@ufgd.edu.br

Luciano Antonio de Oliveira
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
E-mail: lucianoantonio@ufgd.edu.br

Resumo: As chuvas extremas têm causado inúmeros impactos em várias regiões brasileiras, principalmente no Nordeste. Este estudo teve como objetivo modelar a chuva máxima diária no município de João Pessoa-PB, Brasil. Os dados da série histórica de 1980 a 2019 foram analisados usando a teoria dos valores extremos (EVT), com ajustes da Gumbel e da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). Os resultados mostraram que a distribuição de Gumbel se ajustou melhor aos dados de janeiro a agosto e outubro, com parâmetros estimados pelo método de máxima verossimilhança. A distribuição GEV foi a mais adequada para setembro, novembro e dezembro, que normalmente apresentam níveis de chuvas mais baixos. Além disso, as estimativas do nível de retorno apontam para a ocorrência de fortes chuvas devido à sua intensidade em

um único dia para períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos. Esses resultados podem fornecer subsídios para o planejamento de políticas públicas à redução dos impactos das chuvas extremas.
Palavras-chave: Desastre Ambiental. Gumbel. Chuva. Inundação.

Abstract: Heavy rains have caused numerous disturbances in several Brazilian regions, particularly in the Northeast. This study aimed to model the maximum daily rainfall in the municipality of João Pessoa-PB, Brazil. The historical series data from 1980 to 2019 were analyzed using extreme value theory (EVT), with Gumbel and generalized extreme value (GEV) distribution fits. The results showed that the Gumbel distribution had the best fit to the data from January to August and October, with parameters estimated by the maximum likelihood method. The GEV distribution was the most suitable for September, November, and December, which typically have lower rainfall levels. Moreover, return level estimates point to the occurrence of heavy rain s due to rainfall intensity in a single day for return periods of 2, 5, and 10 years. These results can provide subsidies for planning public policies to reduce heavy rain impacts.
Keywords: Environmental disaster. Gumbel. Rainfall. Flooding.

Resumen: Las lluvias extremas han causado innumerables impactos en varias regiones brasileñas, principalmente en el Nordeste. Este estudio tuvo como objetivo modelar la lluvia máxima diaria en la ciudad de João Pessoa-PB, Brasil. Los datos de la serie temporal de 1980 a 2019 se analizaron utilizando la teoría del valor extremo (EVT), con ajustes de Gumbel y del valor extremo generalizado (GEV). Los resultados mostraron que la distribución de Gumbel se ajusta mejor a los datos de enero a agosto y octubre, con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud. La distribución de GEV fue la más adecuada para los meses de septiembre, noviembre y diciembre, que normalmente tienen menores niveles de iluvias. Además, las estimaciones del nivel de retorno apuntan a la ocurrencia de eventos extremos debido a la intensidad de las lluvias en un solo día para períodos de retorno de 2, 5 y 10 años. Estos resultados pueden proporcionar subsidios para la planificación de políticas públicas para reducir los impactos de las lluvias extremas.
Palabras clave: Desastre ambiental. Gumbel. lluvias. Inundación.

Submetido em: 16/06/2021
Aceito para publicação em: 21/02/2022
Publicado em: 07/03/2022

1. INTRODUÇÃO

Eventos extremos relacionados as variáveis climáticas, como chuva, temperatura e umidade, têm ocorrido com maior frequência nos últimos anos, causando inúmeros problemas para a sociedade, muitos dos quais são de natureza catastrófica, impactando negativamente na qualidade de vida das populações (ZANELLA; SALES; ABREU, 2009). Eventos climáticos extremos podem causar chuvas intensas, levando a problemas socioambientais, como redução da produtividade das lavouras, além da ocorrência de enchentes, inundações e enxurradas, que por sua vez causam diversos transtornos à população (ANDRADE; PINHEIRO; DOLIF NETO, 2015; OLIVEIRA; LIMA, 2019).

Os danos e os impactos causados por eventos climáticos extremos têm despertado a necessidade e a importância de mais pesquisas sobre o assunto. Com relação às chuvas, o planejamento socioambiental pode ser aprimorado com a inclusão de análises estatísticas detalhadas, evitando desastres por chuvas intensas, por meio de cálculos de probabilidade e estimativas das chuvas máximas diárias para diferentes períodos de retorno (COTTA; CORREA; ALBUQUERQUE, 2016; MEDEIROS; ALVES; SOUZA, 2019; WANDERLEY *et al.,* 2018).

A Teoria de Valores Extremos (TVE) ocupa papel fundamental na modelagem estatística de chuvas extremas, que estão associadas a eventos raros de baixa probabilidade (FERREIRA; LISKA, 2019). A TVE tem sido amplamente utilizada em áreas da climatologia e hidrologia, com ajustes de distribuições Gumbel e Generalizada de Valores Extremos (GEV) para obter estimativas dos níveis de retorno das chuvas (DE PAOLA *et al.*, 2018; GONZÁLEZ-ÁLVAREZ *et al.*, 2019; OSEI *et al.*, 2021). De Paola *et al.* (2018) usaram a distribuição GEV para modelarem as chuvas extremas nas cidades africanas de Dar Es Salaam (Tanzânia) e Adis Abeba (Etiópia). González-Álvarez *et al.* (2019) realizaram um mapeamento da precipitação máxima diária em várias estações pluviométricas localizadas na região do Caribe colombiano, concluindo que as distribuições GEV e Gumbel forneceram melhores ajustes em 47,2% e 34,3% das estações pluviométricas, respectivamente. Osei *et al.* (2021) estimaram os níveis de retorno, ajustando a distribuição Gumbel para um período de 5 a 100 anos de precipitação máxima anual na Bacia do Rio Pra, Gana, África Ocidental.

No Brasil, diversos estudos têm modelado a precipitação máxima por meio da TVE. Cotta, Correa e Albuquerque (2016) modelaram os dados de precipitação máxima mensal no município de Vitória, Espírito Santo, por meio da TVE e constataram que a distribuição Gumbel

foi adequada para se ajustar aos dados em estudo. Santos *et al.* (2018) investigaram os extremos mensais das chuvas em Cacoal, Rondônia, e identificaram que a distribuição de Gumbel foi uma das mais indicadas para obter estimativas de níveis de retorno. Back e Cadorin (2020) estimaram a precipitação anual máxima no Estado do Amapá, Brasil, por meio da TVE e observaram que as distribuições GEV e Gumbel foram adequadas para obter estimativas anuais de precipitação máxima, com melhores resultados para a GEV.

A capital do Estado da Paraíba tem sido impactada negativamente por desastres naturais nas últimas décadas causados pelas fortes chuvas, levando a queda de árvores, deslizamentos de terra, inundações em áreas residenciais e agravamento de problemas sociais e sanitários dos habitantes que vivem em áreas de maior vulnerabilidade socioambiental (PEREIRA *et al.*, 2012). Ressalta-se que estudos como o nosso fornecem informações úteis a serem disponibilizadas aos gestores de políticas públicas. Nesse sentido, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013) mostrou 136 ocorrências de enchentes entre 1992 e 2014, resultando em desastres em todo o Estado da Paraíba, sendo João Pessoa o município mais afetado. Dada a importância das informações sobre os níveis de retorno de chuvas extremas, nosso estudo teve como objetivo modelar a precipitação máxima diária usando a TVE no município de João Pessoa, Estado da Paraíba, Brasil. Esperamos que nossos resultados possam auxiliar no planejamento de políticas públicas para minimizar os impactos causados pelas fortes chuvas na região.

2. METODOLOGIA

2.1. Material

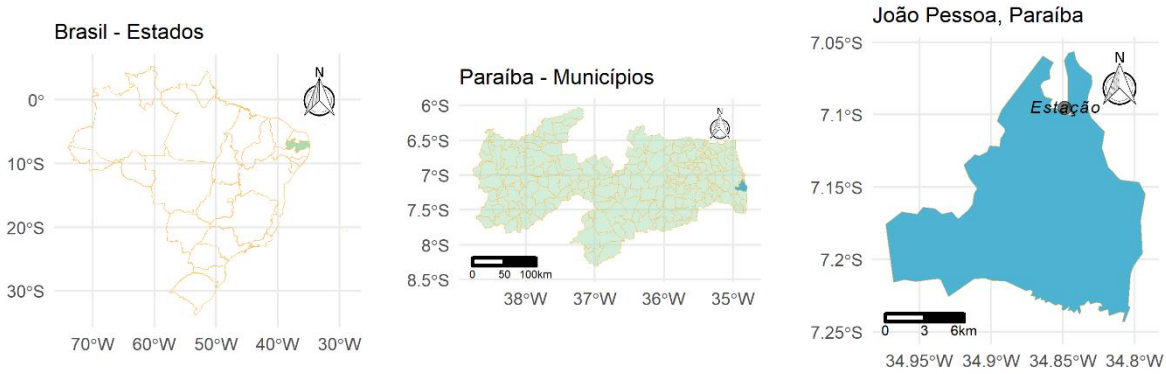
O Nordeste do Brasil possui uma grande área territorial, compreendendo nove unidades federativas. Essa região possui diferentes climas, incluindo tropical, semiárido e equatorial úmido (OLIVEIRA; LIMA, 2019). O clima tropical possui duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa, e está presente em toda a região litorânea, principalmente no litoral do Estado da Paraíba, tendo como capital o município litorâneo de João Pessoa. Os sistemas atmosféricos do município de João Pessoa atuam principalmente em áreas equatoriais de baixa latitude, geralmente promovendo estabilidade atmosférica no final do inverno e primavera, mas causando instabilidade no período sazonal de verão, outono e

início do inverno (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; ROCHA FILHO *et al.*, 2019). As chuvas intensas em João Pessoa podem ser explicadas pela influência dos fenômenos da Zona de Convergência Intertropical, Vórtices Ciclônicos do Ar Superior, Linhas de Instabilidade e Massa Polar Atlântica (PEREIRA *et al.*, 2012).

Este estudo foi realizado utilizando dados diários de precipitação pluviométrica do município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil (Figura 1). O conjunto de dados refere-se ao período de janeiro de 1980 a dezembro de 2019, totalizando 14.611 observações diárias.

Os dados foram obtidos de uma estação meteorológica convencional localizada em João Pessoa (7°05'43,0" S, 34°50'55,0" W e altitude de 9,67 metros; Figura 1), pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET – http://portal.inmet.gov.br/). Para construir a série de dados, foi extraída a precipitação máxima diária para cada mês como máxima mensal. Ao todo, foram obtidas 480 observações, 40 para cada série mensal.

Figura 1 – Localização geográfica da estação meteorológica convencional no município de João Pessoa, Paraíba.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.2. Métodos

As medidas descritivas mínima, máxima, média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) foram utilizadas para análise exploratória. As análises gráficas foram realizadas usando Box-plot.

O teste de Wald-Wolfowitz foi utilizado para detectar a estacionariedade em cada série de precipitação máxima mensal. A estatística de teste é não paramétrica e é utilizada para verificar se uma série temporal possui tendência nas observações, considerando a hipótese

nula (H_0) de que a série é estacionária contra a hipótese alternativa (H_1) de não estacionaridade (WALD; WOLFOWITZ, 1940). O teste consiste em contar a quantidade de valores acima e abaixo da mediana em uma série de dados. Esse número de oscilações é chamado de "run". A distribuição amostral do número total de "runs" pode ser aproximada por uma distribuição normal, com a média e a variância dadas pelas respectivas equações:

(1) $E(u) = 2n_1n_2/(n_1+n_2)$ e $Var(u) = 2n_1n_2[2n_1n_2-(n_1+n_2)]/[(n_1+n_2)^2(n_1+n_2-1)]$.

Na Eq. (1) o termo u é o número de "runs", n_1 é o número de observações maior ou igual à mediana e n_2 é o número de observações menor que a mediana. Assim, usando uma aproximação assintótica, a estatística de teste é dada da seguinte forma:

(2) $Z = [u - E(u)]/dp(u)$.

Na Eq. (2) a variável aleatória Z segue uma distribuição normal padrão e os componentes $E(u)$ e $dp(u)$ representam os valores esperados e o desvio padrão da variável u, respectivamente.

O teste Ljung-Box (L–B) foi utilizado para verificar a independência entre as observações ao longo de cada série. Portanto, o teste L–B avalia a hipótese de independência de uma série temporal (LJUNG; BOX, 1978). Este teste é essencial, uma vez que o método de estimação adotado (máxima verossimilhança) assume que as observações são independentes.

A distribuição de valores extremos generalizados (GEV) é composta por uma família de distribuições, a saber, Gumbel (tipo I), Fréchet (tipo II) e Weibull (tipo III), que são usadas em distribuições de valores extremos e aplicadas em diferentes áreas da ciência (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A distribuição GEV possui três parâmetros: ξ (forma), σ (escala) e μ (posição), dentre os quais, ξ determina qual distribuição melhor se ajusta aos dados. Uma distribuição Gumbel é dada quando ξ é estatisticamente igual a zero na distribuição GEV. A distribuição de Fréchet, por sua vez, é dada quando $\xi > 0$, enquanto a distribuição Weibull é dada quando $\xi < 0$.

A distribuição GEV foi ajustada e comparada com a distribuição Gumbel. A função de probabilidade acumulada da distribuição GEV (Equação 3) é dada por:

(3) $F(x)= exp\{-[1 + \xi ((x - \mu)/\sigma)]^{-1/\xi}\}$.

Os parâmetros de posição e escala podem ser encontrados na distribuição Gumbel (Equação 4), e sua função de distribuição acumulada é dada da seguinte forma:

(4) $F(x) = exp\{-exp[-((x - \mu)/\sigma)]\}$.

Após verificar a estacionariedade e independência das observações na série, o próximo passo consistiu em ajustar as distribuições de probabilidade, obtendo estimativas dos parâmetros pelo método da máxima verossimilhança. Os estimadores dos parâmetros apresentados nas Equações (3) e (4) são obtidos por meio de funções que dependem dos dados observados, porém, essas funções requerem o uso de métodos numéricos para determinação da solução. As estimativas de máxima verossimilhança desses parâmetros podem ser consultadas nos trabalhos de Boudrissa *et al.* (2017) e Vivekanandan (2017). Em seguida, utilizou-se o teste de razão de verossimilhança para comparar as distribuições GEV e Gumbel, da seguinte forma:

(5) $TLR = -2[l(\theta_G) - l(\theta_{GEV})]$.

Na Equação (5), $l(\theta_G)$ e $l(\theta_{GEV})$ representam os logaritmos da máxima verossimilhança das funções Gumbel e GEV, respectivamente (MEDEIROS; ALVES; SOUZA, 2019). Este teste verifica se ξ é estatisticamente igual a zero, adotando a hipótese nula (H_0): ξ = 0. A distribuição de Gumbel é escolhida quando ξ é estatisticamente igual a zero. O valor p deste teste é obtido pela distribuição Qui-Quadrado com um grau de liberdade.

O teste de Kolmogorov-Smirnov (K–S) foi adotado como teste de aderência, após selecionar a distribuição de probabilidade para verificar se a distribuição escolhida é adequada aos dados. O K–S é um teste não paramétrico, e sua estatística é constituída pela diferença entre os valores observados F(x) e teóricos G(x) da distribuição, sendo obtida da seguinte forma:

(6) $D = supremo[F(X) - G(X)]$.

Na Equação (6), o valor D é então comparado com o valor tabulado e aproximado de 1,63/√n, quando adotado um nível de 1% de significância. Portanto, a distribuição é adequada para os dados se o D for menor que o valor tabulado. Adicionalmente, em todos os testes de hipóteses desta pesquisa, adotou-se o nível de significância de 1%.

Por fim, após selecionar a função de distribuição de probabilidade, o último passo foi obter os níveis de retorno para a distribuição em questão, utilizando das estimativas dos parâmetros. Segundo Naghettini e Pinto (2007), o tempo de retorno (RT) é o intervalo de tempo médio (em anos) que separa a ocorrência de um evento de dimensão conhecida de outro de dimensão igual ou superior. A equação que representa RT é dada da seguinte forma:

(7) $RT = 1/[1 - F(x)]$

Na Equação (7), *RT* representa o tempo de retorno e *F(x)* é a função de distribuição acumulada GEV ou Gumbel. Após ajustar as distribuições GEV e Gumbel, as estimativas do nível de retorno são obtidas conforme as Equações (8) e (9), respectivamente:

(8) $GEV: x_p^* = \mu^* - (\sigma^*/\xi^*)\{1 - [-ln(1-p)]^{-\xi^*}\}, \xi \neq 0$

(9) $Gumbel: x_p^* = \mu^* - \sigma^*\{ln[-\ln(1-p)]\}, \xi = 0$

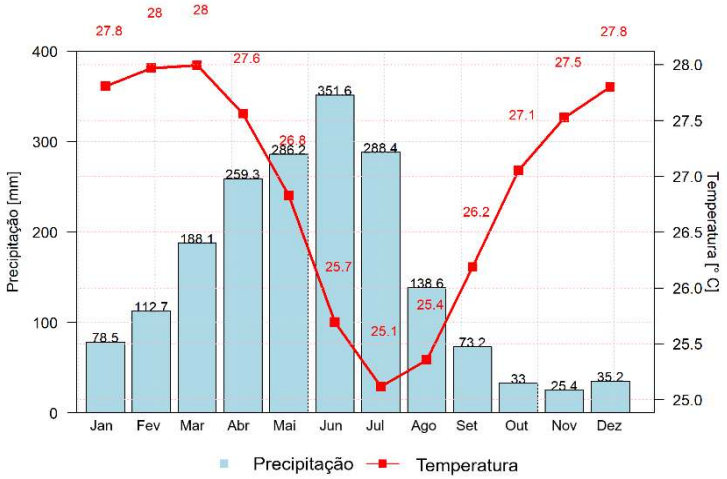
Nas Equações (8) e (9), x_p^* é usado para estimar os níveis de retorno associados ao RT em 1/p anos. As estimativas dos estimadores μ^*, σ^* e ξ^* foram obtidas pelo método da máxima verossimilhança. Além disso, foram determinados intervalos assintóticos com nível de confiança de 99% para os níveis de retorno, considerando períodos de 2, 5 e 10 anos. Para exemplificar o uso da Equação (9), suponha que as estimativas de μ^* e σ^* fossem iguais a 40 e 20, respectivamente. Para um tempo de retorno de 5 anos (RT = 5), temos que o valor de p seria de 0,20 = 1/RT = 1/5. A estimativa do nível de retorno seria dada por: $\mu^* - \sigma^*\{ln[-ln(1-p)]\} = 40 - 20\{ln[-ln(1-0{,}20)]\} = 70$. Assim, em um intervalo de 5 anos, espera-se que ocorra uma precipitação máxima diária igual ou superior a 70 mm.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software R* (R CORE TEAM, 2018), com apoio das bibliotecas *ggplot2* (WICKHAM, 2009), *randtests* (CAEIRO; MATEUS, 2014), *extRemes* (GILLELAND; KATZ, 2016) e *evd* (STEPHENSON, 2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2, encontra-se o climograma da média mensal da precipitação e da temperatura no município de João Pessoa, com base no período de 1980 a 2019. Pode-se observar uma relação inversamente proporcional entre essas variáveis, meses com altas temperaturas apresentam baixa pluviosidade. Essa relação pode ser observada em destaque nos meses de junho e julho, que apresentam as temperaturas mais baixas e as maiores médias pluviométricas dessa região.

Figura 2 – Climograma representando a precipitação média mensal (barras azuis claras, eixo Y esquerdo) e temperatura (linha vermelha, eixo Y direito) com base nos dados do período de 40 anos (1980 - 2019) obtidos no município de João Pessoa, estado da Paraíba, Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para melhor entendimento do comportamento da precipitação máxima em João Pessoa, faz-se necessária uma análise exploratória por meio de medidas descritivas (Tabela 1) e do gráfico Box-plot (Figura 3). A Tabela 1 mostra alta variação da precipitação máxima diária ao longo do ano, chegando a 194,00 mm em junho e 39,2 mm em novembro. As amplitudes dentro de cada mês também foram expressivas, variando de 15,6 a 194 mm em junho e 3,2 a 159,2 mm em setembro. No entanto, meses menos chuvosos, como novembro e dezembro, apresentaram, em geral, maior variabilidade, com valores de CV de 103,5% e 120,7%, respectivamente, ou seja, os maiores valores entre todos os meses. Por outro lado, o menor valor de CV foi observado em julho (55,6%). As maiores médias máximas foram registradas de março a julho, com valores acima de 50 mm em um único dia.

Tabela 1 – Resumo estatístico da precipitação máxima diária de 1980 a 2019 no município de João Pessoa, PB, Brasil.

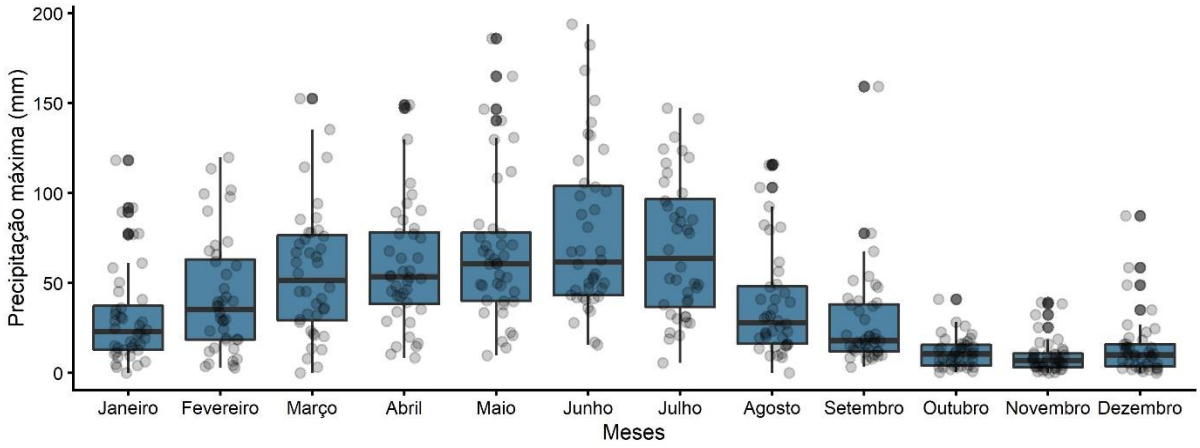
Meses	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV (%)
Janeiro	0,0	118,2	31,2	23,1	27,5	88,1
Fevereiro	2,9	119,8	42,5	35,4	32,8	76,9
Março	0,0	152,6	55,7	51,5	35,9	64,4
Abril	8,5	149,0	59,9	53,5	34,8	58,0
Maio	9,6	186,0	68,7	60,8	41,8	60,7
Junho	15,6	194,0	78,0	61,6	46,0	59,1
Julho	5,6	147,2	69,5	63,7	38,7	55,6
Agosto	0,0	116,0	38,5	28,1	30,6	79,3
Setembro	3,2	159,2	28,0	17,9	27,7	98,5
Outubro	0,3	41,0	11,4	10,5	8,5	73,7
Novembro	0,0	39,2	9,3	6,9	9,7	103,5
Dezembro	0,0	87,4	14,3	9,9	17,3	120,7

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Pereira *et al.* (2016) também analisaram uma série histórica de chuvas em João Pessoa (1981 a 2016) e observaram resultados semelhantes aos nossos. Esses autores também relataram chuvas intensas de abril a julho (acima de 100 mm em alguns casos), sendo a maioria registrada em junho (13 ocorrências) e julho (8 ocorrências).

A Figura 3 mostra que a região em estudo possui dois períodos distintos quanto à distribuição máxima diária de chuvas, com valores medianos abaixo de 50 mm de agosto a fevereiro e valores medianos máximos acima de 50 mm de março a julho. A causa desses eventos entre março e maio é a possível influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se intensifica em março, bem como do Vórtice Ciclônico de Ar Superior (UACV) e linhas de instabilidade (IL), que atuam com frequência entre março e maio. As fortes chuvas nos meses de junho e julho são influenciadas pelas ondas de leste (EW) e pela massa polar atlântica (APM), pois todos esses sistemas causam chuvas e podem ocorrer isoladamente ou em associação (PEREIRA *et al.*, 2012; ROCHA FILHO *et al.*, 2019).

Figura 3 – Boxplot para a precipitação máxima diária no município de João Pessoa, estado da Paraíba, Brasil, de 1980 a 2019.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A Tabela 2 mostra os resultados dos testes de estacionariedade, independência e razão de verossimilhança e, as estimativas do parâmetro de forma da GEV. Em todos os meses, a hipótese de estacionariedade não foi rejeitada ($p > 0,01$). Da mesma forma, a hipótese nula de que a série teve observações independentes não foi rejeitada, pois em todos os meses apresentavam valor de p acima do nível de significância de 1%. Portanto, os parâmetros das distribuições GEV e Gumbel podem ser estimadas via método da máxima verossimilhança. Entre janeiro e agosto, e em outubro, a hipótese de que o parâmetro de forma é estatisticamente igual a zero não foi rejeitada e, portanto, a distribuição de Gumbel foi adequada para esses meses. No entanto, a distribuição de Gumbel não foi selecionada para setembro, novembro e dezembro, sendo o GEV considerada a melhor opção.

Tabela 2 – Valores P dos testes de Wald-Wolfowitz (pWW), Ljung-Box (pLB) e razão de verossimilhança (pLRT), e as estimativas dos parâmetros de forma da distribuição GEV seguidos pelos limites inferior (LL) e superior (UL) em um intervalo de 99% de confiança para a precipitação máxima diária no município de João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Meses	pWW	pLB	Parâmetro de forma (GEV)			LRT	pLRT
			LL	Estimativa	UL		
Janeiro	0,5271	0,5536	−0,0736	0,3350	0,7436	5,9816	0,0146
Fevereiro	0,5217	0,2747	−0,2920	0,2061	0,7043	1,3252	0,2498
Março	0,5217	0,0762	−0,3901	−0,0380	0,3140	0,0715	0,7891
Abril	0,7487	0,5708	−0,3516	−0,0156	0,3204	0,0134	0,9076
Maio	0,0249	0,1850	−0,2476	0,0884	0,4244	0,5033	0,4780
Junho	0,5217	0,6410	−0,2114	0,1789	0,5693	1,4668	0,2259
Julho	0,5217	0,7392	−0,6419	−0,1309	0,3801	0,3884	0,5333
Agosto	0,5217	0,7951	−0,0714	0,2844	0,6403	4,7972	0,0285
Setembro	0,3365	0,4937	0,0764	0,4542	0,8320	14,69	0,0001**
Outubro	0,7487	0,3161	−0,2882	0,1147	0,5175	0,6559	0,4180
Novembro	0,3365	0,1509	−0,0101	0,4466	0,9034	10,453	0,0012**
Dezembro	1,0000	0,5473	0,0549	0,5679	1,0810	16,454	0,0000**

o símbolo "**" indica a rejeição da hipótese nula de cada teste ao nível de 1% de significância.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Em conformidade com os nossos resultados, o estudo de Hartmann *et al.* (2011) observou que a distribuição de Gumbel teve um bom ajuste para a precipitação máxima mensal em Presidente Prudente, estado de São Paulo, Brasil. Eles também relataram que as estimativas de chuva obtidas pelo método de máxima verossimilhança eram consistentes e podiam reproduzir com precisão o regime de chuvas na região.

Utilizou-se do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para verificar a adequação das distribuições (Gumbel ou GEV) ajustadas aos dados em cada mês. A Tabela 3 mostra a distribuição mais adequada, seguida das estimativas dos parâmetros. De acordo com o teste K–S, o valor da estatística D foi inferior a 0,26. Portanto, os modelos propostos para os meses foram adequados para a amostra de dados pluviométricos a um nível de significância de 1%.

Tabela 3 – Estimativas dos parâmetros das distribuições Gumbel e GEV e resultado do teste K–S para adequação da distribuição ajustada à série de dados de precipitação máxima.

Meses	Distribuição	Parâmetros			Estatística	Valor p
		μ*	σ*	ξ*		
Janeiro	Gumbel	19,7788	17,4617	–	0,1091	0,7272
Fevereiro	Gumbel	27,8940	23,9910	–	0,0873	0,9207
Março	Gumbel	39,1592	28,7474	–	0,1054	0,7653
Abril	Gumbel	44,0397	27,3430	–	0,0708	0,9880
Maio	Gumbel	50,4742	30,3263	–	0,0964	0,8510
Junho	Gumbel	57,5727	33,1442	–	0,1356	0,4164
Julho	Gumbel	51,1746	31,9447	–	0,1225	0,5442
Agosto	Gumbel	25,5401	20,0143	–	0,1250	0,5592
Setembro	GEV	15,2322	10,2531	0,4542	0,0993	0,8247
Outubro	Gumbel	7,7763	6,1407	–	0,1080	0,7383
Novembro	GEV	4,3715	4,2089	0,4466	0,0834	0,9432
Dezembro	GEV	5,8646	5,9198	0,5680	0,1035	0,7844

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Nossos resultados estão de acordo com os de Santos *et al.* (2014), que também utilizaram o teste K–S para verificar a adequação da distribuição a amostra ao nível de 1% de probabilidade. Esses autores analisaram a precipitação máxima diária anual no município de Mossoró, estado do Ceará, Brasil, no período de 1964 a 2011, e relataram um bom ajuste para o modelo probabilístico de Gumbel.

A Tabela 4 mostra as estimativas do nível de retorno mensal e os respectivos intervalos de confiança para 2, 5 e 10 anos de retorno. Os maiores níveis de retorno da precipitação máxima diária foram registrados em junho, com uma estimativa de precipitação máxima diária de 69,72 mm em um intervalo de dois anos, variando de 57,64 a 81,80 mm com um nível de confiança de 99%.

Tabela 4 – Estimativas do nível de retorno (x_p*) seguidas dos limites inferior (LL) e superior (UL) com intervalos de confiança de 99% para a precipitação máxima diária (mm) no município de João Pessoa, estado da Paraíba, Brasil.

Meses	2 anos			5 anos			10 anos		
	LL	x_p*	UL	LL	x_p*	UL	LL	x_p*	UL
Janeiro	19,85	26,18	32,50	35,91	45,97	56,03	45,98	59,07	72,16
Fevereiro	27,93	36,68	45,44	50,12	63,87	77,63	64,08	81,88	99,67
Março	39,19	49,69	60,19	66,10	82,27	98,45	83,07	103,85	124,62
Abril	44,09	54,06	64,03	69,69	85,05	100,04	85,85	105,57	125,28
Maio	50,56	61,58	72,61	78,83	95,96	113,09	96,63	118,71	140,80
Junho	57,64	69,72	81,80	88,29	107,28	126,28	107,56	132,15	156,75
Julho	51,18	62,88	74,58	80,97	99,08	117,19	99,77	123,06	146,34
Agosto	25,61	32,87	40,13	44,01	55,56	67,10	55,56	70,57	85,59
Setembro	14,69	19,32	23,94	25,73	37,27	48,80	32,60	55,39	78,17
Outubro	7,78	10,02	12,26	13,50	16,98	20,47	17,10	21,59	26,09
Novembro	4,07	6,04	8,01	8,67	13,36	18,05	11,21	20,69	30,17
Dezembro	5,35	8,27	11,20	11,92	19,87	27,82	15,11	32,85	50,60

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa apresentou a modelagem da precipitação máxima diária pela EVT para o município de João Pessoa, estado da Paraíba, Brasil, de 1980 a 2019. Os resultados mostram que a distribuição Gumbel teve o melhor ajuste para os meses de janeiro a agosto e outubro, com parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança. A distribuição do GEV mostrou-se mais adequada para meses com menores índices pluviométricos. As estimativas de nível de retorno sugerem desastres naturais causados por chuvas fortes em um único dia para períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos. Esses resultados podem fornecer subsídios para o planejamento de políticas públicas para redução dos impactos causados pelas fortes chuvas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal da Grande Dourados pelo apoio financeiro por meio do Programa de Apoio à Pesquisa (PAP) – PROPP, Edital nº 02/2021, e pela concessão de bolsa de Iniciação Científica ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Kelen Martins; PINHEIRO, Henri Rossi; DOLIF NETO, Giovanni. Evento extremo de chuva no Rio de Janeiro: análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 175-180, 2015. DOI:

https://dx.doi.org/10.5902/2179460X16236.

BACK, Álvaro José; CADORIN, Sabrina Baesso. Chuvas máximas diárias e equações intensidade-duração-frequência para o Estado do Amapá, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 313-325, 2020. DOI: https://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.69844.

BOUDRISSA, Naima; CHERAITIA, Hassen; HALIMI, Lotfi. Modelling maximum daily yearly rainfall in northern Algeria using generalized extreme value distributions from 1936 to 2009. **Meteorological Applications**, v. 24, n. 1, p. 114-119, 2017. DOI: https://dx.doi.org/10.1002/met.1610.

CAEIRO, Frederico; MATEUS, Ayana. **randtests: Testing randomness in R**. 2014. Disponível em: https://cran.r-project.org/package=randtests.

CEPED. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991-2012. **Centro Universitário sobre Estudos e Pesquisa sobre Desastres**, Florianópolis, v. Paraíba, n. 2, p. 105, 2013. Disponível em: https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/.

COTTA, Higor Henrique Aranda; CORREA, Wesley de Souza Campos; ALBUQUERQUE, Taciana Toledo de Almeida. Gumbel distribution application for values of extreme precipitation in municipality of Vitória-ES. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, p. 203-217, 2016. DOI: https://dx.doi.org/10.5380/abclima.v19i0.39440.

DE PAOLA, Francesco; Giugni, Maurizio; Pugliese, Francesco; Annis, Antonio; Nardi, Fernando. GEV parameter estimation and stationary vs. non-stationary analysis of extreme rainfall in African test cities. **Hydrology**, v. 5, n. 2, p. 1-23, 2018. DOI: https://dx.doi.org/10.3390/hydrology5020028.

FERREIRA, Roger Vinicius de Castro; LISKA, Gilberto Rodrigues. Análise probabilística da temperatura máxima em Uruguaiana, RS. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 3, p. 3390-3401, 2019. DOI: https://dx.doi.org/10.7127/rbai.v13n301007.

GILLELAND, Eric; KATZ, Richard W. extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. **Journal of Statistical Software**, v. 72, n. 8, 2016. DOI: https://dx.doi.org/10.18637/jss.v072.i08.

GONZÁLEZ-ÁLVAREZ, Álvaro *et al.* Isohyetal maps of daily maximum rainfall for different return periods for the Colombian Caribbean Region. **Water**, v. 11, n. 2, p. 1-28, 2019. DOI: https://dx.doi.org/10.3390/w11020358.

HARTMANN, Marcelo; MOALA, Fernando A.; MENDONÇA, Marco Aurélio. Estudo das precipitações máximas anuais em Presidente Prudente. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 561-568, 2011. DOI: https://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862011000400006.

LJUNG, Greta M.; BOX, George E. P. On a measure of lack of fit in time series models. **Biometrika**, v. 65, p. 297–303, 1978. DOI: https://dx.doi.org/10.2307/2335207.

MEDEIROS, Elias Silva de; ALVES, Marcos Antônio; SOUZA, Sidnei Azevedo de. Estimação de nível de retorno da precipitação máxima diária na cidade de Jataí-GO. **Ciência e Natura**, v. 41, p. e36, 2019. DOI: https://dx.doi.org/10.5902/2179460X35639.

MENDONÇA, Francisco de Assis; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007. ISBN: 978-85-86238-54-3.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OLIVEIRA, Danilo Henrique Morais Castro; LIMA, Kellen Carla. What is the return period of

intense rainfall events in the capital cities of the northeast region of Brazil?. **Atmospheric Science Letters**, v. 20, n. 10, p. e934, 2019. DOI: https://dx.doi.org/10.1002/asl.934.

OSEI, Marian Amoakowaah *et al.* Estimation of the return periods of maxima rainfall and floods at the Pra River Catchment, Ghana, West Africa using the Gumbel extreme value theory. **Heliyon**, v. 7, n. 5, p. e06980, 2021. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06980.

PEREIRA, Michaell Douglas Barbosa; MONTEIRO, Diego Cezar da Silva; SILVA, Natieli Tenório Da; MOURA, Marcelo de Oliveira. Avaliação quantitativa das precipitações diárias intensas na cidade de João Pessoa, Paraíba. **REVISTA GEONORTE**, v. 1, n. 5, p. 921-929, 2012.

PEREIRA, Michaell Douglas Barbosa; SILVA, Natieli Tenórioda; MOURA, Marcelo de Oliveira. Extreme rainfall events in the city of João Pessoa: analysis of the events of 16 and 17 April 2016. **REGNE**, v. 2, p. 576-584, 2016.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R: A Language and Environment for Statistical Computing.** 2018. ISSN: 3-900051-07-0. Disponível em: https://www.r-project.org/.

ROCHA JÚNIOR, Rodrigo Lins *et al.* Analysis of the Space–Temporal Trends of Wet Conditions in the Different Rainy Seasons of Brazilian Northeast by Quantile Regression and Bootstrap Test. **Geosciences**, v. 9, n. 11, p. 457, 2019. DOI: https://dx.doi.org/10.3390/geosciences9110457.

SANTOS, Roziane Sobreira dos; VIEIRA, Pablo Dias; EVANGELISTA, Dilson Henrique Ramos; OLIVEIRA, Leydimere Janny Cota; NONATO, Deivisom. Caracterização de extremos mensais de precipitação em Cacoal (RO). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 267-280, 2018. DOI: https://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55285.

SANTOS, Wesley de Oliveira; MESQUITA, Francisco de Batista; BATISTA, Ben Dêivide de Oliveira Batista; ALVES, Rafael Oliveira; ALVES, Anailson de Souza. Precipitações máximas para o município de Mossoró de 1964 a 2011 pela distribuição de Gumbel. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 207-213, 2014. DOI: https://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n2p207.

STEPHENSON, Alec G. evd: Extreme Value Distributions. **R News**, v. 2, n. 2, p. 31–32, 2002. Disponível em: https://cran.r-project.org/doc/Rnews/.

VIVEKANANDAN, N. Assessment of extreme rainfall using Gumbel distribution for estimation of peak flood discharge for ungauged catchments. **International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)**, v. 1, p. 1-5, 2017.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. On a Test Whether Two Samples are from the Same Population. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 11, n. 2, p. 147-162, 1940. DOI: https://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177731909.

WANDERLEY, Lucas Suassuna de Albuquerque; NÓBREGA, Ranyére Silva; MOREIRA, Ayobami Badiru; DOS ANJOS, Rafael Silva; ALMEIDA, Caio Américo Pereira de. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149-164, 2018. DOI: https://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.56034.

WICKHAM, Hadley. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York, NY: Springer New York, 2009. DOI: https://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-98141-3.

ZANELLA, Maria Elisa; SALES, Marta Celina Linhares; ABREU, Nair Julia Andrade. Análise das precipitações diárias intensas e impactos gerados em Fortaleza, CE. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 13, n. 25, p. 53-68, 2009. DOI: https://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2009.74112.