

MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NA CIDADE DE JOÃO PESSOA-PB

Daris Correia Dos Santos¹

Erickson Melo Albuquerque²

Introdução

A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica. A maneira de caracterizar a variabilidade da precipitação pluvial é analisar a distribuição dessa variável. Para tanto, são necessários uma análise de distribuição e testes estatísticos para determinar qual função de distribuição de probabilidade é mais adequada para calcular a probabilidade de ocorrer determinado fenômeno, visto que, conforme Cargnelutti Filho et al. (2004), a simples visualização dos dados da amostra de uma variável em um histograma de frequência é insuficiente para inferir, entre as diversas funções de distribuição de probabilidade conhecidas, a que melhor se ajusta aos dados em estudo.

Conforme Villela e Matos (1975), dentre modelos probabilísticos ou distribuições de probabilidades, a Log-normal tem se ajustado bem a dados pluviométricos brasileiros. Além disso, possui maior facilidade operacional, quando comparada às demais distribuições. Sampaio et al. (1999) avaliaram o emprego dessa distribuição aplicada ao ajuste de dados pluviométricos, encontrando problemas de ajustes aos dados com períodos que apresentavam totais com valor zero.

A função Gama tem sido a mais comum no estudo da distribuição dos valores diferentes de zero de precipitação pluvial (SAAD, 1990; ASSIS, 1991; CASTRO, 1994; RIBEIRO e LUNARDI, 1997; WILKS, 1999 e CASTELLVÍ et al., 2004), porém é possível se utilizar outras funções de distribuição de probabilidade que podem apresentar melhor ajuste que a função gama, pois há variação na distribuição dos

valores de precipitação, conforme o período de tempo utilizado para a separação dos dados, segundo o conjunto de dados (médio, total, absoluto, máximo, mínimo) e de acordo com o regime pluviométrico do local em estudo. Barger e Thom (1949) sugeriram a distribuição Gama como modelo teórico para aproximar as probabilidades de precipitação para períodos mensais ou menores ou, até mesmo, para períodos maiores, em regiões onde é comum a ocorrência de baixos valores de precipitação.

A caracterização da variabilidade temporal das chuvas intensas é, ao longo de sua duração, imprescindível para quantificar adequadamente os efeitos ocasionados, de modo especial, ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas e rurais (CRUCIANI et al., 2002; BEIJO et al., 2003).

O estudo das chuvas máximas diárias torna-se relevante na aplicação em estudos hidrológicos e na engenharia, pois ao atingir determinado limite ela passa a assegurar a tomada de decisões por parte dos órgãos de defesa civil, possibilitando um melhor planejamento urbano. Segundo Monteiro (2009), ao ignorar o sistema climático, o desenho urbano acrescenta vulnerabilidade a uma equação (evento x vulnerabilidade). Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar as distribuições Gama, Normal, Log-Normal e Weibull na descrição da precipitação máxima diária mensal e anual na cidade de João Pessoa localizada no estado da Paraíba.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O Estado da Paraíba, por sua localização dentro da faixa equatorial, é submetido à incidência de alta radiação solar com um grande número de horas de insolação, tal condição determina um clima quente, temperatura média anual de 26°C, pouca variação interanual e uma distribuição espacial da temperatura altamente dependente do relevo (AESAs, 2013). Devido sua localização geográfica

os sistemas atmosféricos atuantes na cidade de João Pessoa são oriundos do oceano Atlântico e dão origem a um tipo climático particular nessa porção do Brasil, o Clima Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental que se caracteriza como clima úmido e quente, o qual se diferencia dos climas mais secos do interior da região (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Dados climatológicos

Para determinar a probabilidade de ocorrência de precipitação máxima diária, na cidade de João Pessoa foram utilizados dados de precipitação diária oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) para o período de 1980 a 2009. A estação climatológica está situada à latitude de 7,1°S, longitude de 34,86°W e altitude de 7,43m. Os dados foram trabalhados a fim de obter as precipitações máximas diárias mensais e anuais. Realizou-se um ajuste às distribuições Log-Normal, Normal, Weibull e Gama para representar a série de dados de precipitação máxima diária. Os cálculos, análises e os gráficos foram elaborados em planilha eletrônica do software Excel e SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

Distribuição Log-Normal

Pode-se dizer que uma amostra obedece à distribuição Log-Normal quando o logaritmo dos seus valores obedece à distribuição Normal. Essa distribuição foi testada por Huf e Neili (1959, segundo Catalunha et al., 2002) em um trabalho de comparação entre vários métodos para analisar a frequência de precipitação. Essa distribuição tem sido largamente utilizada em hidrologia com a finalidade de modelar cheias anuais (CLARKE, 1993). A função densidade de probabilidade de três parâmetros é representada pela seguinte equação:

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(x-a)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

em que $f(x)$ é a função densidade de probabilidade da variável; e a base dos logaritmos neperianos; a o valor da variável aleatória; μ a média dos logaritmos da

variável ; σ o desvio-padrão dos logaritmos da variável x ; e α o limite inferior da amostra.

Distribuição Weibull

Uma variável aleatória X tem distribuição Weibull com parâmetros $\alpha > 0$ e $\beta > 0$ quando sua fdp é:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \right] \quad (2)$$

em que $x > 0$.

Se x_1, \dots, x_n é uma amostra aleatória de (2), as estimativas de máxima verossimilhança de α e β são:

$$\hat{\beta} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\alpha}} \right)^{1/\hat{\alpha}} \quad (3)$$

$$\hat{\alpha} = \left[\left(\sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\alpha}} \log x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\alpha}} \right)^{-1} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log x_i \right]^{-1} \quad (4)$$

Distribuição Normal

A distribuição de probabilidade contínua mais utilizada é a distribuição normal, também chamada de distribuição Gaussiana, que possui grande importância em análise matemática, pois técnicas estatísticas como análise de variância, de regressão e alguns testes de hipótese, assumem ou exigem a normalidade dos dados. No entanto, a heterogeneidade dos dados climatológicos podem não seguir a distribuição de Gauss (ESSENWANGER, 1986). A distribuição normal é uma distribuição de dois parâmetros e sua função densidade de probabilidade é dada pela seguinte expressão:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (5)$$

para $-\infty < x < +\infty$, em que μ é a média e σ o desvio-padrão da variável aleatória.

Distribuição Gama

De acordo com Clarke (1993) essa distribuição tem sido largamente utilizada em hidrologia com a finalidade de modelar cheias anuais. Segundo o mesmo autor, tanto a distribuição Gama quanto a Log-normal são similares na forma da assimetria, com uma longa cauda superior. Esta é a característica que permite as distribuições representarem as cheias anuais e outros extremos hidrológicos, onde a assimetria está invariavelmente presente. Se x for uma variável aleatória contínua, tal que ($0 < x < \infty$), com distribuição Gama de parâmetros $\alpha > 0$ e $\beta > 0$, então a sua função densidade de probabilidade é definida como (Araújo et al., 2001; Catalunha et al., 2002; Dourado Neto et al., 2005):

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \quad (6)$$

para $0 < x < \infty$.

A função Gama de probabilidade possui dois parâmetros, o de forma (α) e o de escala (β) (CATALUNHA et al., 2002).

Testes de aderência

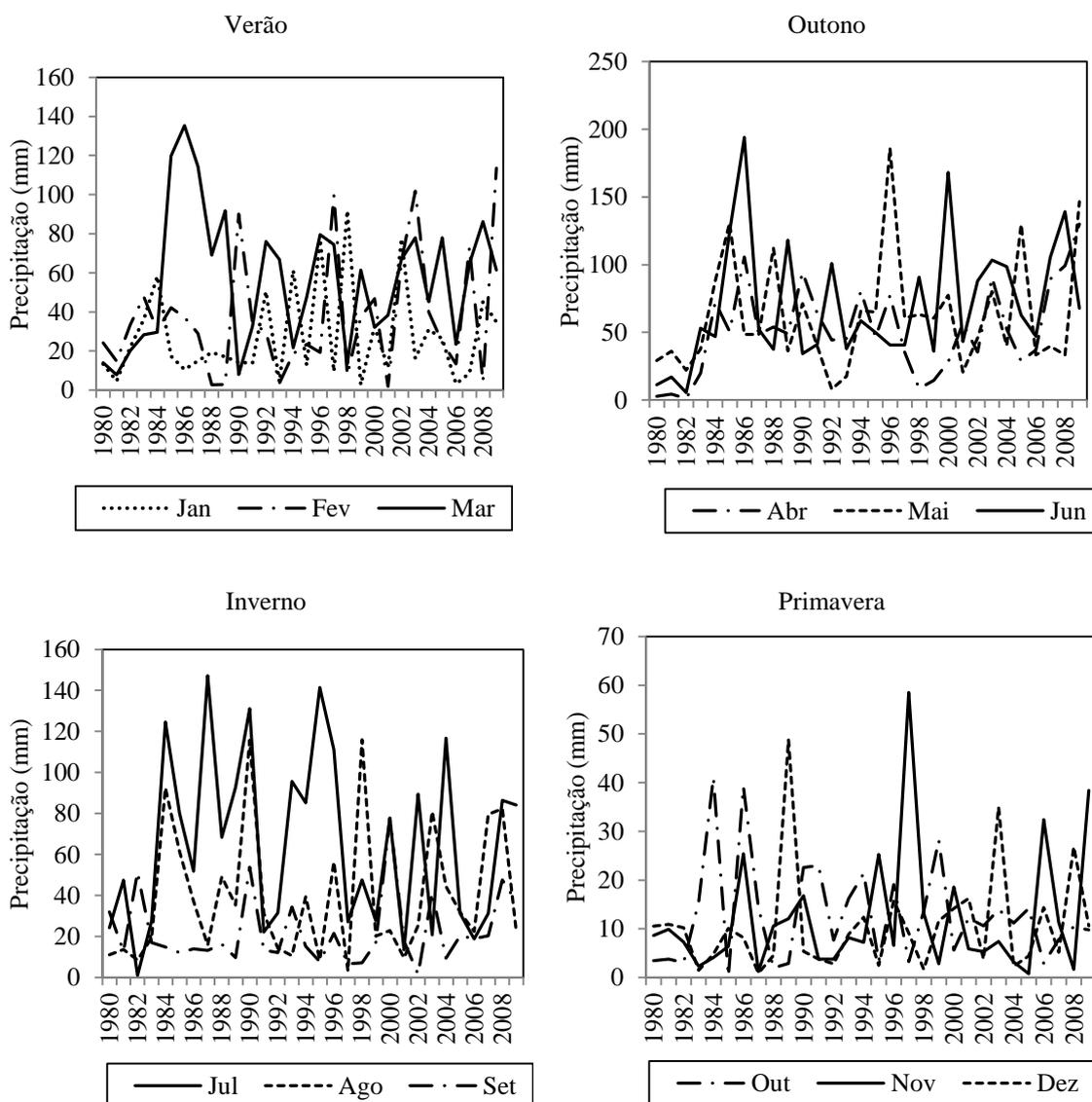
O teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov, além de não depender do número de classes do agrupamento dos dados, oferece mais vantagens computacionais. Esse teste fundamenta-se na discrepância entre as distribuições, $D_n = \sqrt{n} \sup_x |F_n(x) - F_0(x)|$, em que $F_n(x)$ denota a distribuição teórica e $F_0(x)$ a distribuição ajustada. Essa estatística é usada para testar a hipótese nula $H_0: F = F_0$ versus hipótese alternativa $H_1: F \neq F_0$ (KVAM; VIDA KOVIC, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de precipitação pluvial diária foram agrupados em períodos mensais, extraindo-se a máxima precipitação pluvial diária observada de cada mês.

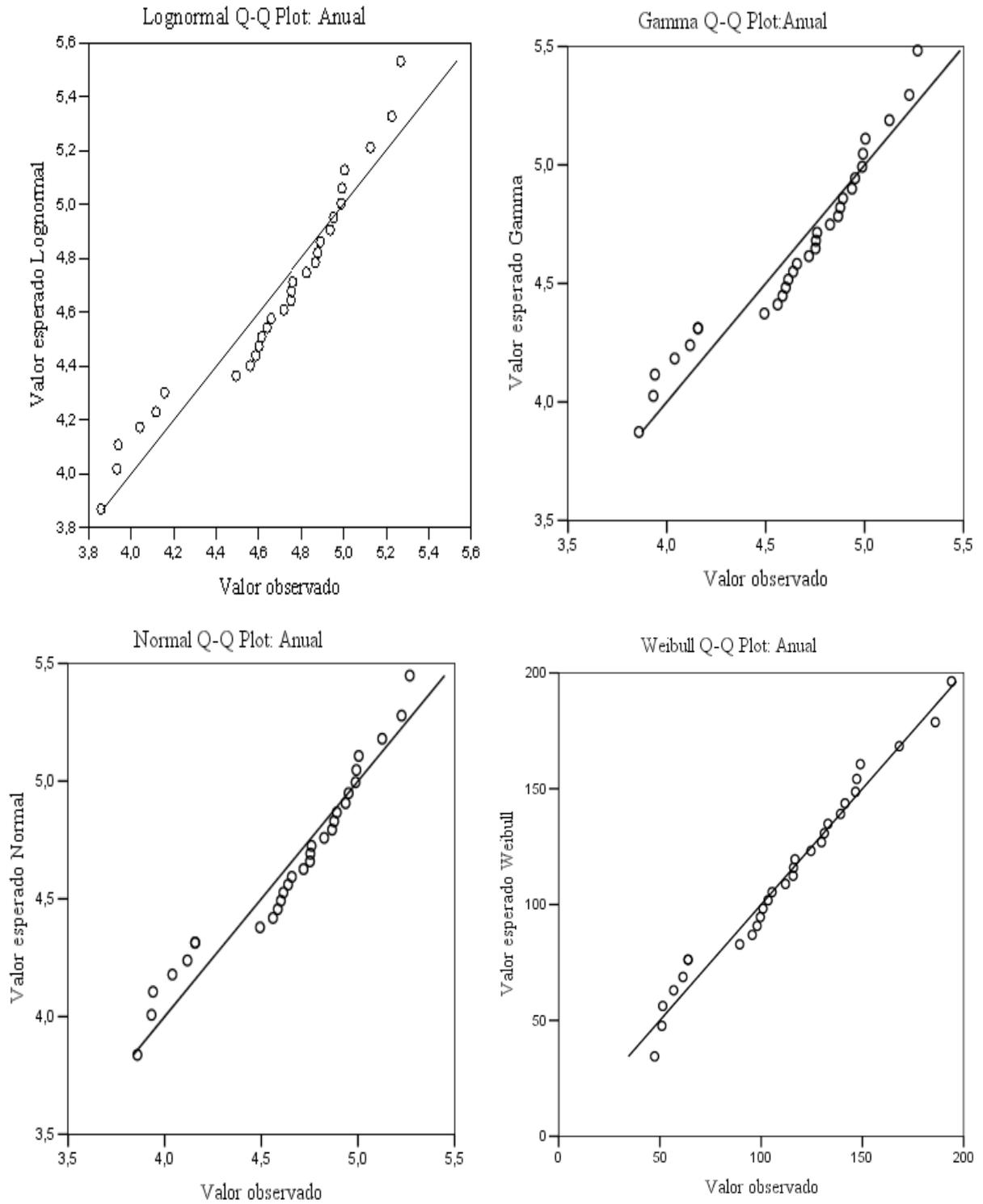
A Figura 1 representa uma comparação gráfica temporal dos valores máximos de precipitações máximas mensais relativas aos anos estudados, considerando-se os meses de cada estação do ano. Pode-se observar também, uma nítida variação quantitativa de chuvas no decorrer do ano, cujos meses mais chuvosos são, sistematicamente, maio e junho, com máximas atingindo até 194 mm. Há uma estação menos chuvosa na primavera, com precipitações máximas mensais ao redor de 40 mm, neste caso, outubro, novembro e dezembro são os meses que apresentam precipitação inferior.

Figura 1. Precipitação máxima diária mensal, período de 1980 a 2009, João Pessoa-PB.



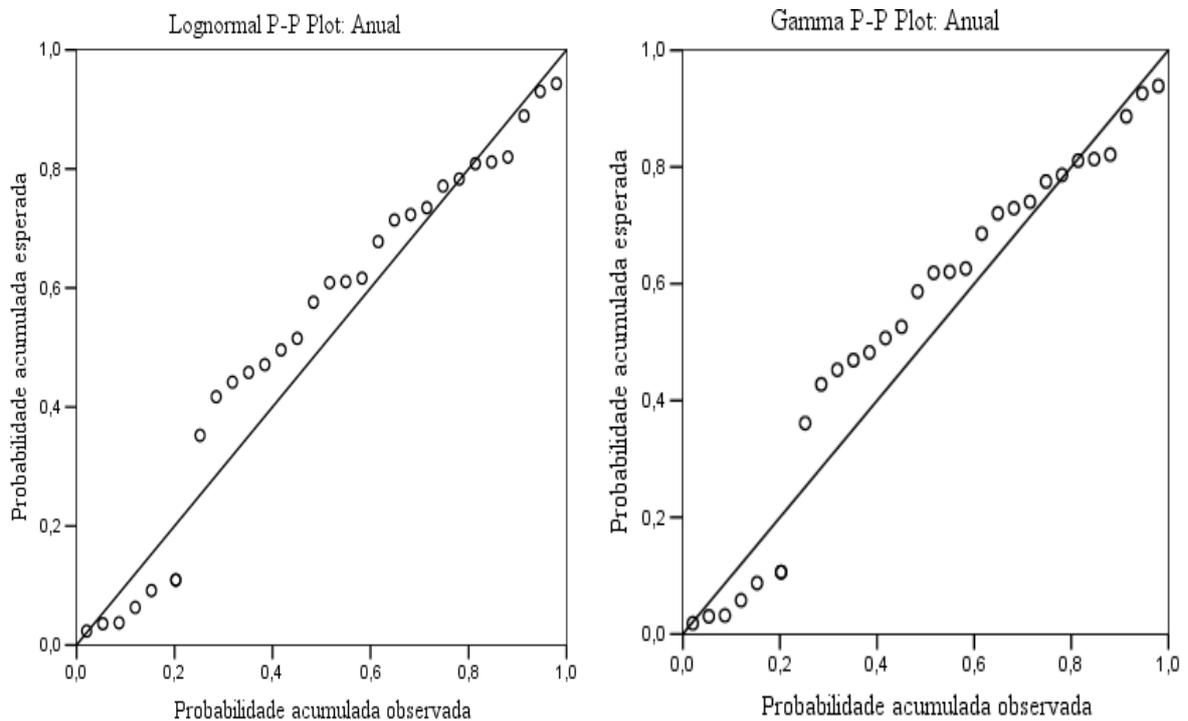
Um dos métodos gráficos mais utilizados na verificação do ajustamento de uma dada distribuição aos dados observados é o Q-Q plot. O procedimento empregado consiste na comparação gráfica dos quantis teóricos com os quantis dos dados amostrais, mostrando a linearidade entre os dados ajustados e os empíricos, de forma que quanto mais próximos os pontos da linha de referência maior é a certeza de que os dados ajustados se comportam em relação à determinada distribuição (HARTMANN et al., 2011). Um estudo referente as precipitações máximas anuais em Presidente Prudente usando a distribuição Gumbel, Hartmann et al. (2011) mostra que a maioria dos pontos do Q-Q plot estão sensivelmente ao longo de uma reta, havendo apenas uma relação não-linear bastante acentuada entre os quantis teóricos e empíricos das distribuições, o que implica que o ajustamento das distribuições à série de precipitação máxima anual é recomendável. Resultado similar (Figura 2) mostra que para a cidade de João Pessoa usando as distribuições Lognormal, Gama, Normal e Weibull a comparação gráfica dos Q-Q plot apresentam um bom ajuste.

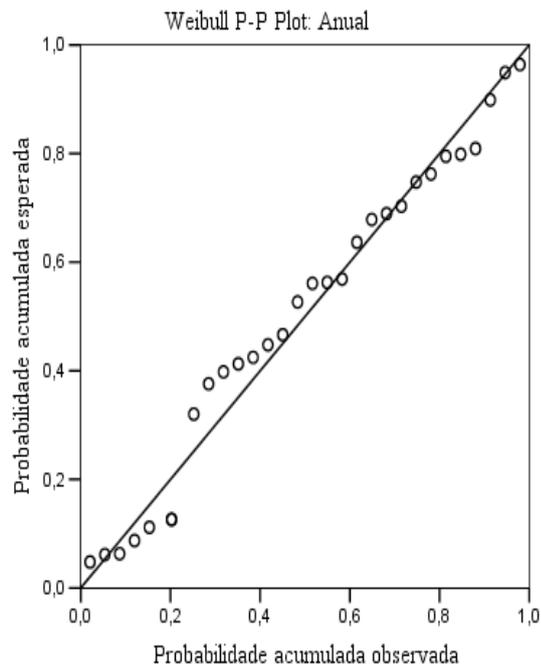
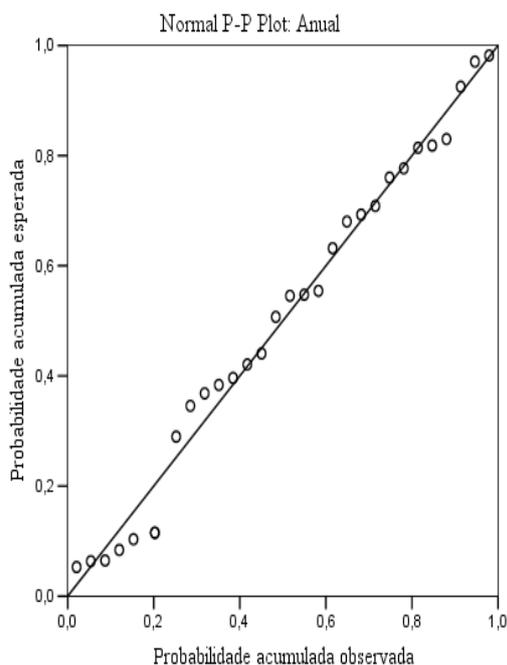
Figura 2. Quantil-Quantil Plot para a distribuição Lognormal, Gamma, Normal e Weibull ajustados.



Outra forma de avaliar graficamente o ajuste da distribuição é a utilização dos gráficos de probabilidades (P-P plot). Neste caso, o ajuste dos dados pode ser comparado em termos da probabilidade acumulada, comparando a função de distribuição acumulada (FDA) empírica e a função de distribuição acumulada ajustada (HARTMANN et al., 2011). Através da Figura 3, observam-se os pontos alinhados em uma reta indicando um bom ajuste do modelo, entretanto, os gráficos não permitem distinguir qual distribuição apresenta o melhor ajuste.

Figura 3. Distribuição acumulada empírica e teórica ajustadas.





Ao observar as Figuras 2 e 3, pode-se notar que as curvas de ajustes das quatro distribuições de probabilidade apresentaram ajustes visualmente análogos, não sendo permitido averiguar a que melhor se ajustou aos dados observados. A aderência das distribuições foi comprovada segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 0,05 de significância. Os p-valores que apresentaram valores superiores a 0,05 indicam que as distribuições descrevem satisfatoriamente os dados observados de precipitação, (Tabela 1).

Tabela 1. Aderências das funções de distribuição de probabilidade de chuva mensal e anual na cidade de João Pessoa- PB, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) com nível de 5%.

Distribuição	Gama	Normal	Log-Normal	Weibull
Meses	K-S	K-S	K-S	K-S
Janeiro	0,1	0,2	0,05*	0,15
Fevereiro	0,06	0,16	0,11	0,36
Março	0,16	0,08	0,18	0,76
Abril	0,12	0,07	0,17	0,85
Mai	0,07	0,11	0,06	0,38
Junho	0,07	0,16	0,1	0,28
Julho	0,14	0,12	0,13	0,25
Agosto	0,06	0,16	0,05*	0,36
Setembro	0,1	0,19	0,06	0,04*
Outubro	0,07	0,11	0,12	0,63
Novembro	0,08	0,19	0,05*	0,09
Dezembro	0,07	0,17	0,11	0,19
Anual	0,08	0,09	0,1	0,80

*Significativo a 5%: os dados amostrais não se ajustaram a distribuição avaliada.

Os valores de chuva mensal da região em estudo apresentaram dois períodos distintos, sendo o primeiro correspondente aos meses chuvosos (março a agosto) e o segundo correspondente aos meses secos (setembro a fevereiro). Períodos esses coincidentes com as características sazonais da cidade estudada.

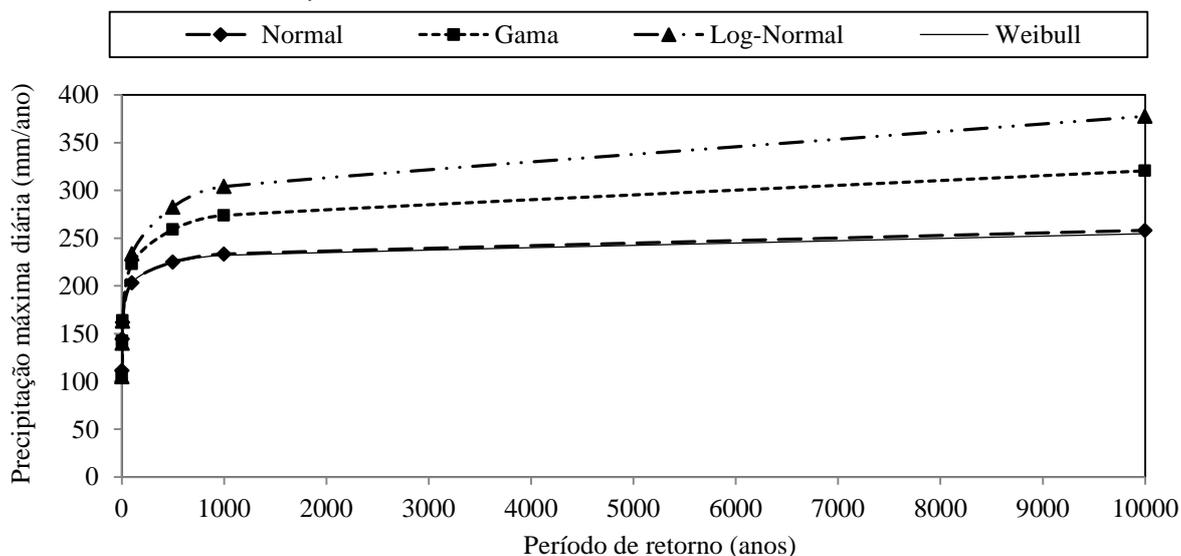
No período chuvoso os melhores ajustes dos dados foram para as distribuições Gama e Normal e Weibull. O mês de janeiro, agosto e novembro não se ajustou a distribuição Log-Normal. No período seco, predominou a distribuição Normal e Gama. O mês de setembro não apresentou ajuste satisfatório a distribuição Weibull. A chuva total anual teve ajuste satisfatório para as distribuições Gama, Normal, Log-Normal e Weibull.

O município de João Pessoa apresentou os maiores valores de precipitação diária anual para os períodos de retorno de 100, 500, 1000 e 10000 anos na distribuição Log-Normal (Tabela 2) Portanto recomenda-se o uso da distribuição Log-Normal para estimar valores de chuva máxima anual para a cidade, por ser um procedimento de fácil aplicação e também pelo bom desempenho nos testes (Figura 5).

Tabela 2. Estimativa da precipitação máxima diária (mm/ano) para diferentes períodos de retorno (anos) obtido através das distribuições de probabilidades teóricas, para a cidade de João Pessoa-PB.

Período de retorno	Probabilidade	Normal	Gama	Log-Normal	Weibull
2	0,5	111,29	106,66	104,88	110,29
5	0,8	144,54	142,47	140,16	144,84
10	0,9	161,92	163,97	163,09	162,63
100	0,99	203,20	223,11	233,75	203,52
500	0,998	225,00	259,11	282,69	224,24
1000	0,999	233,38	273,85	304,12	232,04
10000	0,9999	258,22	320,54	377,67	254,67

Figura 5. Ajuste das distribuições Normal, Gama, Log-Normal e Weibull para a cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, período de 1980 a 2009.



Conclusões

Os resultados mostram que houve um bom ajuste da distribuição Normal e Gama para os dados da precipitação máxima mensal e anual para a cidade de João Pessoa. O conhecimento da distribuição da precipitação pluvial máxima mensal, e conseqüentemente as estimativas das precipitações diárias máximas esperadas possibilitam projetar o aproveitamento dos recursos hídricos, pois eventos extremos de precipitações estão diretamente relacionados com os custos e a segurança das obras de aproveitamento hídrico.

No período chuvoso os melhores ajustes dos dados foram para as distribuições Gama, Normal e Weibull. O mês de janeiro, agosto e novembro não se ajustou a distribuição Log-Normal. No período seco, predominou a distribuição Normal e Gama. O mês de setembro não apresentou ajuste satisfatório a distribuição Weibull.

A chuva total anual teve ajuste satisfatório para as distribuições Gama, Normal, Log-Normal e Weibull. A distribuição Log-Normal apresentou os maiores

valores de precipitação diária anual para os períodos de retorno de 100, 500, 1000 e 10000 anos. Para futuros cálculos de períodos de retorno utilizados no dimensionamento de obras hidráulicas no ajuste da precipitação máxima anual recomenda-se o uso da distribuição Log-Normal.

Referências

AESA- Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Caracterização fisiográfica e hidroclimática do estado da Paraíba**. Relatório Técnico. João Pessoa, 2013.

ASSIS, F. N. DE. **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba- SP e Pelotas- RS**. Piracicaba: ESALQ, 1991. 134p. Tese Doutorado.

ARAÚJO, W.F.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. DE; MEDEIROS R.D. DE; SAMPAIO, R.A. Precipitação pluviométrica mensal provável em Boa Vista, Estado de Roraima, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Ambiental**, Campina Grande, v 5, n. 3, p. 563-567, 2001.

BARGER, G. L.; THOM, H. C. S. Evaluation of drought hazard. **Agronomy Journal**, Madison, v.41, n.11, p.519-526, 1949.

BEIJO, L. A.; MUNIZ, J. A.; VOLPE, C. A.; PEREIRA, G. T. Estudo da precipitação máxima em Jaboticabal, SP, pela distribuição de Gumbel utilizando dois métodos de estimação dos parâmetros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.1, p.141-147, 2003.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENUER, I. R.; TRINDADE, J. K. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Brasileira de Agrometeorologia**, Brasília, v.39, n.12, p.1157-1166, 2004.

CASTELLVÍ, F.; MORMENEO, I.; PEREZ, P. J. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.289, n.1-4, p.286-302, 2004.

CASTRO, R. **Distribuição probabilística da frequência de precipitação na região de Botucatu, SP**. Botucatu: UNESP, 1994. 101p. Dissertação Mestrado.

CATALUNHA, M. J.; SOARES, C. P. B.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.

CLARKE, R.T. Hidrologia Estatística: Hidrologia Ciência e Aplicação. Porto Alegre. Editora UFRGS. Livro da Coleção ABRH. Cap. 17, 1993.

CRUCIANI, D. E.; MACHADO, R. E.; SENTELHAS, P. C. Modelos da distribuição temporal de chuvas intensas em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.76-82, 2002.

DOURADO NETO, D.; ASSIS, J.P.; MANFRON, P.A.; SPAROVEK, G.; MARTIM, T.N. Ajuste de modelos de distribuição de probabilidades a séries históricas de precipitação pluvial diária em Piracicaba- SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.2, p. 153-162, 2002.

ESSENWANGER, O.M. **Elements of Statistical Analyses**. Elsevier, p. 424, 1986.

HARTMANN, M.; MOALA, F. A. MENDONÇA, M. A.. Estudo das Precipitações Anuais Máximas em Presidente Prudente. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 24, p. 561-568, 2011.

KVAM, P. H.; VIDA KOVIC, B. **Nonparametric statistics with applications to science and engineering**. New York: Wiley, 2007.

MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.206p.

MONTEIRO, A. As Cidades e a Precipitação uma Relação Demasiado Briguenta. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol.1, nº 5. p.7-25, 2009.

RIBEIRO, A. M.; LUNARDI, D. M. C. **A precipitação mensal provável para Londrina – PR, através da função gama**. Energia na Agricultura, Botucatu, v.12, n.4, p.37-44, 1997.

SAAD, J. C. C. **Estudo das distribuições de frequência da evapotranspiração de referência e da precipitação pluvial para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1990. 124p. Dissertação Mestrado.

SAMPAIO, S. C.; CORRÊA, M. M.; SOUZA, M. R.; GUIMARÃES, J. C.; SILVA, A. M. Precipitação provável para o Município de Lavras, MG, utilizando a distribuição Log-Normal. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 382-389, 1999.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw- Hill do Brasil. 1975, 245 p.

WILKS, D. S. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.93, n.3, p.153-169, 1999.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) pela disponibilização dos dados de precipitação.

Sobre os autores:

¹ Daris Correia dos Santos – Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4146365083776372>
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental Mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina grande- UFCG.
Contato: dariscorreia@gmail.com

² Erickson Melo de Albuquerque – Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5467509964012082>
Graduação em Tecnologia em Geoprocessamento pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB.
Contato: erickson.melo@gmail.com