

DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS PARA MUNICÍPIOS DAS MESORREGIÕES DO ESTADO DE PERNAMBUCO ATRAVÉS DO MÉTODO DE BELL

*Artur Paiva Coutinho¹ & Larissa Virginia Ribas² & *Louise Lopes Lobo Leite³ & Antônio Celso Dantas Antonino⁴ & Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral⁵ & Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁶ & Tassia dos Anjos Tenório de Melo⁷*

Resumo – O conhecimento das precipitações intensas é de extrema importância devido a sua aplicação em projetos hidráulicos. A dificuldade na obtenção das equações de chuvas intensas através de registros pluviográficos em função da baixa densidade da rede de pluviógrafos tem levado engenheiros a utilizarem outras metodologias para determinação destas relações através de registros pluviométricos. Foram utilizadas séries históricas de 8 municípios de mesorregiões do estado de Pernambuco para determinar equações de chuvas intensas utilizando a metodologia de Bell (1969). A aderência dos dados à distribuição de Gumbel foi comprovada através do teste de Kolmogorov-Smirnov com nível de significância de 5%. As equações geradas apresentaram bons ajustes com R^2 variando de 99,22% a 99,43% para o método de Bell.

Palavras-Chave – Chuvas intensas, Método de Bell, Pernambuco.

INTENSE RAINFALL EQUATIONS DETERMINATION TO MUNICIPALITIES OF PERNAMBUCO STATE MESOREGIONS THROUGH THE BELL METHOD

Abstract – The knowledge of heavy rainfall patterns is extremely important due to its application in hydraulic engineering projects. The difficulty in obtaining rainfall equations through pluviographs because of the poor density of pluviographs network has led engineers to use other methods for determining these equations through pluviometric records. In this work it was used historical data from 8 municipalities of mesoregions of Pernambuco State to determine rainfall equations using Bell's method (1969). The data adherence to Gumbel distribution was confirmed by the Kolmogorov-Smirnov test with a significance level of 5%. The generated equations showed reasonable fits with R^2 ranging from 99.22% to 99.43% for the Bell's method.

Keywords – Intense rainfall, Bell Method, Pernambuco.

- 1) Doutorando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife - PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: arthur.coutinho@hotmail.com
- 2) Graduanda em Engenharia Civil, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife - PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: larissa.vribas@hotmail.com.
- 3) Mestranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife - PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: louiselobo@yahoo.com.br.
- 4) Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: acda@ufpe.br
- 5) Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: jcabral@ufpe.br
- 6) Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: suzanam@ufpe.br
- 7) Doutoranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, DEC/CTG/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife - PE, Brasil, Caixa Postal 7800, CEP: 50.741-530 e-mail: melo.tassia@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Para o dimensionamento de estruturas hidráulicas de macrodrenagem e microdrenagem, nas drenagens urbanas, de rodovias e agrícolas, necessitam-se de uma chuva de projeto, a qual está associada um período de retorno, T , e da duração da chuva crítica, d_c . A disponibilidade de relações de intensidade-duração-frequência facilita o uso de modelos de transformação chuva – vazão. No entanto, as relações (i , d_c , T) muitas vezes ainda não estão disponíveis, pois a escassez de dados pluviográficos dificulta a determinação dessas relações. Além disso, a metodologia para a determinação de relações IDF a partir de registros pluviográficos necessita de um exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de grande quantidade de pluviogramas (Cecílio & Pruski, 2003).

Soluções para locais que não possuem esse tipo de informação podem ser encontradas com o uso de regionalização ou métodos de correlação. Como geralmente a disponibilidade de dados pluviométricos é maior que de dados pluviográficos, a utilização de metodologias alternativas se utilizando da maior disponibilidade informações pluviométricas ganha importância. No caso do território brasileiro, o setor de geração de energia elétrica se utiliza de uma vasta rede pluviométrica utilizada para gestão e previsão dos volumes dos reservatórios das hidroelétricas, para esses casos, onde se dispõe de boas séries históricas de dados pluviométricos podem ser utilizadas metodologias de desagregação de chuvas como os métodos de Bell (1969) e o das relações de durações (Righetto, 1998).

Silva et al. (2012), utilizaram dados de 12 estações pluviográficas e 11 estações pluviométricas do Estado de Pernambuco, com séries históricas de 8 a 14 anos de observações (pluviógrafos) e séries de 10 a 34 anos de registros (pluviômetros). Neste trabalho as equações geradas por meio de registros pluviométricos apresentaram bons ajustes em comparação com as relações IDF obtidas com dados de pluviogramas, com R^2 variando de 97% a 99,9%.

Bell (1969) propôs uma metodologia que tem a vantagem de ser ajustada para regiões, ponderando o valor da chuva de projeto por uma precipitação intensa padrão cujo tempo de retorno é de 2 anos e tempo de duração 60 minutos. O tempo de duração 60 minutos é uma referência de duração para as chuvas segundo o autor.

Coutinho et al. (2010), empregaram o método de Bell para determinação de equações de chuvas intensas para cidades de diferentes mesorregiões do estado de Pernambuco, quais sejam: Recife, Vitória de Santo Antão, Caruaru, Pesqueira, Petrolina e Araripina. As equações geradas segundo os autores atendem aos limites preconizados pelo método de Bell, sendo válidas para precipitações com duração inferior a duas horas e tempos de retorno entre 2 e 100 anos (Tucci (2004), Back(2009)).

Silva et al.(2010) determinaram diferenças entre as intensidades de precipitação determinadas pela metodologia de Bell(1969) para um posto pluviométrico de 45 anos de dados da estação Caxangá/Recife e a equação obtida para a cidade do Recife através de dados pluviográficos pela Acqua-plan(1980). Os autores verificaram elevada correlação entre as intensidades obtidas pelos dois métodos para tempos de retornos de 2 a 100 anos e duração de 5 minutos até 24 horas com o método de Bell subestimando levemente das intensidades de precipitações obtidas quando comparadas com aequação da Acqua-plan(1980).

Apesar dos avanços, muitas cidades das mesorregiões (Metropolitana, Agreste, Mata, Sertão e São Francisco) do estado de Pernambuco ainda não possuem estudos referentes a chuvas intensas. Assim, o objetivo deste trabalho foi à determinação de relações i-d-f para municípios de diferentes mesorregiões climáticas (São Lourenço da Mata, Goiana, Parnamirim, Floresta, Arcoverde, Ipojuca e Afogados da Ingazeira) através do método de Bell.

METODOLOGIA

Utilizaram-se neste trabalho as séries históricas consistidas de precipitações disponíveis na página (web) da Agência Nacional das Águas (ANA, 2012), com séries que variam de 16 a 99 anos de observações diárias para 8 estações pluviométricas do estado de Pernambuco. As estações selecionadas representam quatro das cinco mesorregiões do estado de Pernambuco, sendo a mesorregião Metropolitana representada pelos municípios de São Lourenço da Mata e Ipojuca, a mesorregião Mata pelos municípios de Palmares e Goiana, o Sertão pelos municípios de Arcoverde, Parnamirim e Afogados da Ingazeira e a mesorregião do São Francisco representada pelo município de Floresta. Na Tabela 1 são apresentadas as características das estações pluviométricas selecionadas.

Tabela 1- Características das estações pluviométricas selecionadas para o Estado de Pernambuco.

Estação	Município	Resp.	Cód.	Lat.	Lon.	Alt(m)	Série (anos)
Engenho Sítio	São Lourenço	ANA	735050	7:58'05"	35:9'24"	91	44
Goiana	Goiana	INMET	735052	7:34'00"	35:00'0"	13	43
Açude Aboboras	Parnamirim	SUDENE	839001	8:04'00"	39:26'00'	427	32
Fazenda Jacaré	Floresta	SUDENE	837016	8:21'00"	36:51'00"	470	32
São Gonçalo	Arcoverde	DNOCS	837005	7:33'00"	40:34'00"	620	14
Usina Ipojuca	Ipojuca	IAA	835060	8:57'00"	40:44'00"	385	16
Palmares	Palmares	ANA	835141	7:58'05"	35:34'38"	110	22
Afogados da Ingazeira	Afogados da Ingazeira	ANA	737023	7:44'20"	37:38'54"	525	99

Foram selecionados para todas as localidades estudadas, para cada ano, os valores máximos das precipitações diárias, permitindo, assim, a preparação das séries anuais dos valores extremos. Com o objetivo de se obter as precipitações máximas possíveis de serem igualadas ou superadas a cada 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, a partir das séries anuais, foi empregado o método de Bell.

Conforme descrito em Tucci (2004), as curvas i-d-f podem ser expressas por equações genéricas que têm a seguinte forma:

$$i = \frac{a \cdot TR^b}{(t+c)^d} \quad (1)$$

Onde i = intensidade, expressa em mm/h; TR = o tempo de retorno, em anos; t = a duração da chuva, em minutos, e a, b, c e d são parâmetros a serem determinados para cada local.

Para a análise estatística foi utilizada a distribuição de Gumbel (máximos), a qual é tradicionalmente utilizada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, Naghettini (2007). A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel é dada por:

$$Fy(y) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (2)$$

Onde β representa o parâmetro de posição e α o parâmetro de escala.

A inversa da função acumulada de probabilidade da distribuição de Gumbel pode ser escrita da seguinte forma:

$$x(T) = \beta - \alpha \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (3)$$

Onde, β é parâmetro de posição, α é o parâmetro de escala já definidos acima, T é o tempo de retorno em anos. Estimando os parâmetros da distribuição pelo método dos momentos obtêm-se:

$$\beta = \bar{X} - 0,45s_x \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{s_x}{1,283} \quad (5)$$

Onde \bar{X} e s_x representam respectivamente a média e o desvio padrão amostrais.

Para avaliar a qualidade dos ajustes da distribuição estatística foi utilizado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS), com nível de significância de 5%. testes-te é um teste não paramétrico, cuja estatística de teste tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas.

A estatística do teste KS é dada por:

$$D_N = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_N(x) - F_X(x)| \quad (6)$$

e corresponde, portanto, a maior diferença entre as probabilidades empírica e teórica.

Segundo Righetto (1998), o método de Bell associa a altura pluviométrica de uma chuva intensa de duração d_c e período de retorno T, isto é, $h(d_c; T)$, com uma chuva intensa padrão de 60 min de duração e 2 anos de período de retorno, $h(60; 2)$. A seguinte relação empírica é utilizada:

$$h(d_c; T) \approx (a_0 \ln T + a_1) \cdot (a_2 \cdot d_c^b - a_3) \cdot h(60; 2) \quad (7)$$

Sendo, a_0 , a_1 , a_2 , a_3 e b parâmetros regionais. A utilização de dados de postos brasileiros levou à fixação de valores para esses parâmetros, de modo que $h(d_c; T)$ pode ser expresso por:

$$h(d_c; T) \approx (0,31 \ln T + 0,7) \cdot (0,38 \cdot d_c^{0,31} - 0,39) \cdot h(60; 2) \quad (8)$$

Como o método só se aplica se for possível estimar $h(60; 2)$, recomenda-se que seja utilizada a seguinte relação empírica:

$$h(60; 2) = K \cdot h_{dia}(2) \quad (9)$$

Sendo, K = 0,510 e $h_{dia}(2)$ a altura pluviométrica máxima diária anual correspondente ao período de retorno, T = 2 anos.

A fim de validar a qualidade dos ajustes estatísticos foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) (equação 10) e dois critérios estatísticos: o chamado Razão de Desvios (RD) e o coeficiente de massa residual (CMR) (equações 11 e 12), onde serão considerados M_i aos valores calculados pelos modelos e T_i aos valores observados das séries históricas. Para o valor do coeficiente de determinação R^2 , espera-se uma tendência ao valor 1. Tal coeficiente determina a proporção da variância nos valores experimentados que podem ser atribuídos aos observados. O coeficiente RD descreve a razão entre a dispersão dos valores observados e os calculados teoricamente, e deverá tender a 1, quando houver igualdade entre os valores observados e calculados. O valor esperado do CMR tende a zero, na ausência de desvios sistemáticos entre os valores observados e calculados, podendo indicar a superestimação (CMR > 0) ou a subestimação

(CMR<0) dos valores estimados pelas distribuições teóricas de probabilidade. Os valores ótimos de CMR e RD são 0 e 1, respectivamente (Willmott et al, 1985).

$$R^2 = \frac{[n \cdot (\sum Mi \cdot Ti) - \sum Mi \cdot \sum Ti]^2}{n \cdot [\sum Ti^2 - (\sum Ti)^2] [n \cdot \sum Mi^2 - (\sum Mi)^2]} \quad (10)$$

$$RD = \frac{\sum (Mi - M')^2}{\sum (Ti - M')^2} \quad (11)$$

$$CMR = \left(\frac{\sum Mi - \sum Ti}{\sum Mi} \right) \quad (12)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de Gumbel mostrou-se adequada para os municípios estudados no que se refere à estimativa da precipitação máxima avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov para um nível de significância de 5% de probabilidade. A Tabela 2 apresenta as distribuições de frequência da série das precipitações máximas anuais diárias observadas e estimadas pelo modelo de Gumbel, para os municípios de São Lourenço da Mata (SLM), Goiana (GO), Parnamirim (PAR), Floresta (FLO), Arcoverde (AVD), Ipojuca (IPJ) e Afogados da Ingazeira (AFI). Pode-se observar, nesta tabela, boa aderência entre a distribuição observada e a teórica, já que o Dn máximo observado é menor que os valores críticos da estatística Dn,α para o nível de significância de 5% significando que a distribuição de Gumbel é adequada para representar a série de precipitações máximas diárias.

Tabela 2. Parâmetros das Equações de Chuvas Intensas através do Método de Bell

Municípios	Parâmetros estatísticos para a distribuição de Gumbel					
	\bar{X}	s_x	α	β	D_n	$D_{n, 0,05}$
São Lourenço de Mata	89,75	77,42	60,34	54,91	0,242	0,246
Goiana	124,52	54,04	42,12	100,20	0,087	0,207
Parnamirim	69,68	26	20,26	57,98	0,119	0,234
Floresta	64,04	19,89	15,50	55,09	0,155	0,234
Arcoverde	56,98	23,63	46,32	18,42	0,142	0,349
Ipojuca	97,43	46,05	35,90	76,70	0,188	0,327
Palmares	78,13	44,36	34,58	58,17	0,171	0,281
Afogados da Ingazeira	64,67	21,61	18,64	54,95	0,099	0,137

As curvas i-d-f determinadas através do método de Bell (1969) são apresentadas para os municípios de Ipojuca (Figura 1), Arcoverde (Figura 2), Palmares (Figura 3) e Floresta (Figura 4). Também foram determinadas as curvas para os demais municípios, no entanto optou-se por demonstrar nesse artigo um gráfico para um município de cada mesorregião.

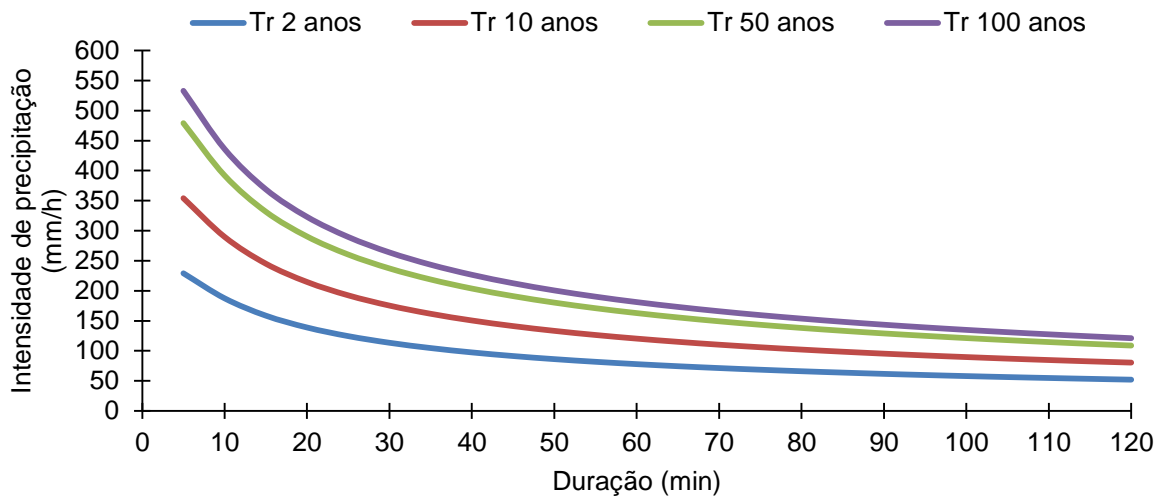


Figura 1. Curvas i-d-f – Método de Bell – Ipojuca/PE

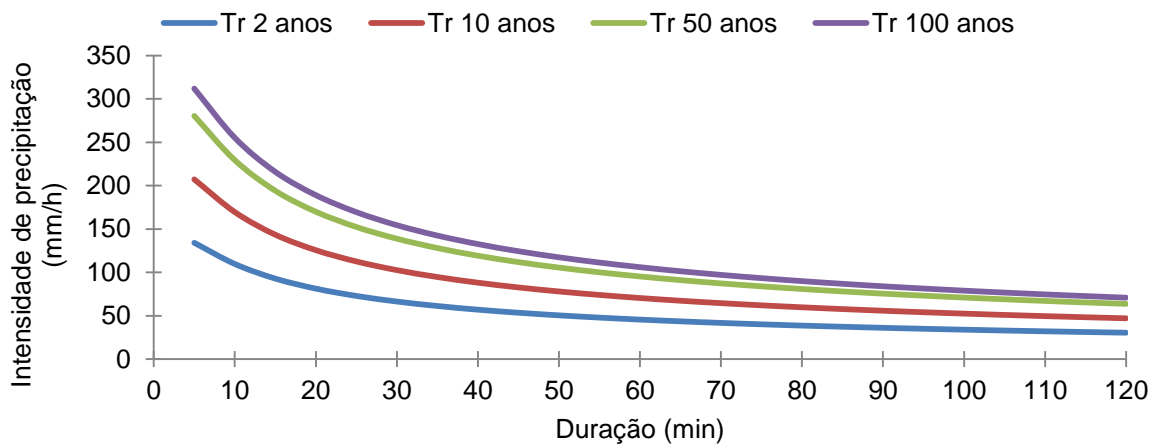


Figura 2. Curvas i-d-f – Método de Bell – Arcoverde/PE

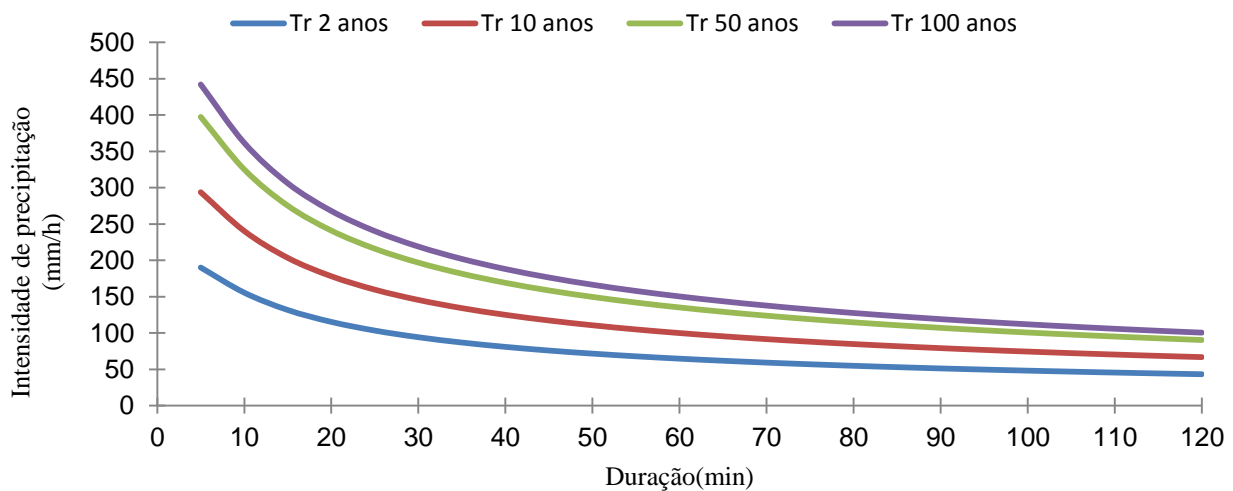


Figura 3. Curvas i-d-f – Método de Bell – Palmares/PE

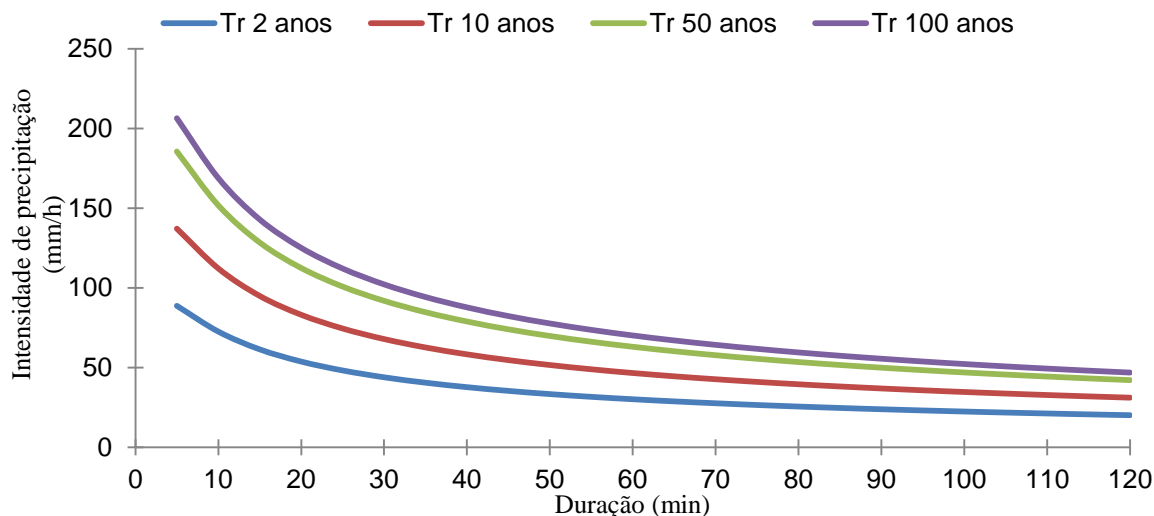


Figura 4. Curvas i-d-f – Método de Bell – Floresta/PE

A Tabela 3 demonstra os valores encontrados dos coeficientes a, b, c e d da equação (1), após ajuste utilizando a metodologia proposta pela CETESB (1980), para cada município.

Tabela 3. Parâmetros das Equações de Chuvas Intensas através do Método de Bell

Coef.	SLM	GO	PAR	FLO	AVD	IPJ	PAL	AFI
a	304,281	491,151	265,97	280,37	414,3	707,86	587,07	526,32
b	0,2129	0,19867	0,1895	0,2002	0,21291	0,21287	0,21289	0,21286
c	2,83073	2,8231	2,6201	2,8311	2,8309	2,8303	2,8305	2,8306
d	0,55803	0,55725	0,5517	0,5563	0,5581	0,55805	0,5581	0,55803

Para a validação dos parâmetros apresentados na Tabela 3, foram calculados os coeficientes de determinação (R^2), os coeficientes de massa residual (CMR) e as razões de desvios (RD), conforme demonstrado pela Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos determinados para cada município.

Estatísticas	Municípios							
	SLM	GO	PAR	FLO	AVD	IPJ	PAL	AFI
R^2	0,994285	0,99229	0,99375	0,99438	0,99428	0,99428	0,99428	0,99424
CMR	0,002509	-0,0113	-0,0061	-0,0077	0,002338	0,00245	0,002305	0,00252
RD	1,83030	1,04166	1,02513	1,04528	1,082964	1,83019	1,082928	1,08305

De acordo com a Tabela 4, os valores do R^2 foram todos superiores a 0,992. Os coeficientes de massa residual (CMR) indicaram que os valores, acima de zero para São Lourenço da Mata, Arcoverde, Ipojuca, Palmares e Afogados da Ingazeira estão levemente subestimados, enquanto que, para os municípios de Goiana, Parnamirim e Floresta observa-se que houve leve superestimava. Os valores encontrados para a razão dos desvios em ambos os métodos foram muito próximos da unidade para todos os municípios exceto para São Lourenço da Mata e Ipojuca.

CONCLUSÕES

Para todas as localidades estudadas a distribuição de Gumbel mostrou-se adequada para representar as estimativas dos valores das precipitações máximas no nível de significância de 5%, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

As equações de chuvas intensas determinadas neste trabalho apresentaram bons ajustes, com coeficientes de determinação (R^2) para o método de Bell todos superiores a 0,992 e, Tais equações representam uma grande contribuição para as mesorregiões do estado de Pernambuco, sendo uma boa alternativa para atender aos projetos de engenharia hidráulica com período de retorno de até 100 anos e durações de 5 minutos 24 horas. Os coeficientes obtidos (R^2 , CMR e RD) para validação dos ajustes realizados foram bastante satisfatórios, sendo a maioria deles muito próximos dos respectivos valores ótimos (1, 0 e 1), de modo que apenas as cidades de São Lourenço da Mata e Ipojuca apresentaram o coeficiente de razão dos desvios distante de seu valor ótimo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência do Estado de Pernambuco- FACEPE e a CAPES pela concessão de Bolsa de Doutorado do primeiro autor, ao projeto MAPLU 2 pelo financiamento de pesquisas relacionadas a gestão de água urbanas e ao CNPq por bolsas PQ ao quarto, quinto e sexto autores.

REFERÊNCIAS

- ANA. (2012). Agência Nacional das Águas. Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. <http://hidroweb.ana.gov.br>. 10 Junho 2012.
- BACK, A. J.(2009).; ”*Relações entre precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Urussanga,SC*”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.2, p.170–175, 2009.
- BELL, F. C. (1969). Generalized rainfall-duration-frequency relationships. Journal of the Hydraulics Division –ASCE, v.95, p311-327, 95: 311-327
- CECILIO, R. A.; PRUSKI, F. F. (2003). Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.7, n.3, p.501-504.
- CETESB(1980). Drenagem Urbana: Manual de Projeto. São Paulo. 466 p.
- COUTINHO, A. P; SILVA, F.B; SILVA, R.O; ANTONINO, A.C. D; MONTENEGRO, S.M.G.L. (2010). Determinação de Equações de Chuvas Intensas para Municípios das Mesorregiões do Estado de Pernambuco Com Dados Pluviométricos. In Anais do X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, 2010, 14 p.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 552 p.
- RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. EESC / USP, São Carlos- SP, 840 p.
- SILVA, B. M.; COUTINHO, A.P.; SILVA, F.B.; CABRAL, J.J.S.P.;MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; (2010). Comparação entre a equação de Chuva Intensa do Município de Recife e as Metodologias de Bell e das Relações entre Durações *Anais do X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Fortaleza, 2010.
- SILVA, B. M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, F.B. FILHO,P.F.A (2012). Chuvas intensas em localidades do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. , Porto Alegre, v17,n3,p.135-147,jul/set 2012
- TUCCI, C. E. M. (2004). *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 943 p.
- WILLMOTT, C. J., ACKLESON, S.G., DAVIS, R. E., FEDEMA, J. J., CLINK, K. M., LEGATS, D. R., O’CONNELL, J. ROWE, C. M. (1985). *Statistics for the evaluation and comparison of models*. *J. Geophys. Res.*, 90:8995-9005.