

Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí¹

Intensity-duration-frequency equations for rainfall in the state of Piauí, Brazil

Alcinei Ribeiro Campos^{2*}, Glenio Guimarães Santos³, João Batista Lopes Silva³, João Irene Filho⁴ e Domingos de Sousa Loura²

RESUMO - Neste trabalho objetivou-se ajustar e comparar os parâmetros (K , a , b e c) da equação de intensidade-duração-frequência para precipitações pluviais máximas de 133 estações pluviométricas localizadas no estado do Piauí, disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de Águas - ANA. Inicialmente, foi realizada a seleção das estações através de análise de consistência das séries de dados, a partir do qual foram selecionadas 105 estações pluviométricas. As chuvas máximas de um dia foram desagregadas em duração de 5; 10; 15; 20; 25; 30; 60; 360; 480; 600; 720 e 1.440 minutos e estimadas as chuvas máximas através de modelos probabilísticos para cada duração e período de retorno de 5; 10; 25; 50 e 100 anos. Em seguida, fez-se o ajuste dos parâmetros (K , a , b e c) através do emprego de regressão linear e não linear. O ajuste dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência para precipitações máximas realizado por regressão não linear apresentou R^2 (0,99) superior aos valores ajustados por regressão linear (0,98).

Palavras-chave: Hidrologia. Precipitação. Chuvas-Frequência da intensidade.

ABSTRACT - This work aimed to adjust and compare the parameters (K , a , b and c) of the intensity-duration-frequency equations of the maximum rainfall taken from 133 rainfall stations located in the state of Piauí in Brazil, which are available from the database of the National Water Agency - ANA. The stations were initially chosen by analysis of the consistency of the data series, and then from these, 105 rainfall stations were then selected. The maximum rains for one day were separated into durations of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 and 1440 minutes and the maximum rainfall estimated using probabilistic models for each duration and each return period of 5, 10, 25, 50 and 100 years. The parameters (K , a , b and c) were then adjusted by means of both linear and nonlinear regression. The adjustment of the parameters of the intensity-duration-frequency equation for maximum precipitation, carried out using nonlinear regression, had R^2 (0.99) higher than the values adjusted using linear regression (0.98).

Key words: Hydrology. Heavy rains. Return period.

*Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 23/08/2013; aprovado em 26/03/2014

Pesquisa realizada em parceria com o programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Piauí/PPGSN/UFPI
²Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas/PPGSN/UFPI, Campus Professora Cinobelina Elvas, BR 135, km três, Bom Jesus-PI, Brasil, 64.900-000, jalcinei@live.com, domingosloura@hotmail.com

³Departamento de Engenharias, Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, BR 135, km três, Bom Jesus-PI, Brasil, 64.900-000, gleniogm@gmail.com; silvajbl@yahoo.com.br

⁴Departamento de Medicina Veterinária, Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, BR 135, km três, Bom Jesus-PI, Brasil, 64.900-000, joaioirenefilho@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Chuvas intensas, também chamadas de chuvas extremas, são aquelas que apresentam grandes lâminas precipitadas em pequenos intervalos de tempo (ARAÚJO *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2003). Segundo Cecílio *et al.* (2009), por causar grandes escoamentos superficiais, as chuvas intensas são capazes de provocar prejuízos tanto em áreas urbanas quanto em áreas agrícolas, como inundação de terras cultivadas, erosão do solo, perdas de nutrientes e assoreamento de corpos da água, dentre outros. Dessa forma, a sua quantificação, bem como o conhecimento da forma como se distribui temporal e espacialmente são de extrema importância em estudos relacionados a dimensionamentos de projetos hidráulicos, como de irrigação, disponibilidade de água para abastecimento doméstico e industrial, obras de controle de inundação e erosão do solo (CECÍLIO *et al.*, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2008; SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

Nesse sentido, a quantificação dessas chuvas pode ser realizada por meio do emprego de equações de chuvas intensas, também denominadas de curvas intensidade-duração-frequência (IDF), que relacionam a duração, intensidade e frequência de ocorrência de um evento em determinado período de retorno (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008). O ajuste dos parâmetros das curvas IDF é realizado de modo empírico, a partir de dados pluviométricos para cada estação e local.

Já os parâmetros das curvas IDF podem ser ajustados por meio do emprego de regressão linear ou de regressão não linear (ARAGÃO *et al.*, 2013; MELLO; SILVA, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2005), com base em valores extraídos de séries de dados pluviométricos. Porém, o ajuste dos parâmetros da IDF apresenta algumas dificuldades, como exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de grande quantidade de dados de pluviogramas.

No Brasil, estudos pioneiros foram desenvolvidos por Pfafstetter (1957) e Denardin e Freitas (1982), em que foram ajustadas as equações IDF de 80 estações distribuídas por todo o país. Trabalhos mais recentes foram realizados por Oliveira *et al.* (2005), onde foram ajustadas as equações de IDF para Goiás e Distrito Federal, por Santos *et al.* (2009) para o Estado do Mato Grosso do Sul, e por Aragão *et al.* (2013) para o Estado de Sergipe.

No estado do Piauí, o trabalho pioneiro foi realizado por Denardin e Freitas (1982), em que foram ajustados os parâmetros da IDF apenas para a cidade de Teresina, sendo que apesar da extensão territorial e da variabilidade espacial das precipitações no Estado, este só dispõe dessa equação IDF. Assim, surge uma

lacuna quando se faz necessário o emprego dessas equações para estimar eventos extremos utilizados no dimensionamento de obras hidráulicas no Estado, principalmente, obras voltadas para drenagem, manejo e conservação do solo e água.

Tendo em vista a grande importância do conhecimento das equações que relacionam intensidade-duração-frequência das precipitações e da inexistência dessas equações para a maioria dos municípios do Estado do Piauí, este trabalho teve como objetivo ajustar e comparar os parâmetros (K , a , b e c) da equação de intensidade-duração-frequência, por meio de regressão linear e não linear para 133 estações pluviométricas localizadas no Estado do Piauí.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados dados pluviométricos coletados em 133 estações pluviométricas localizadas no estado da Piauí (Figura 1), disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), em seu sítio eletrônico.

Para cada estação foram ajustados os parâmetros K , a , b , e c da equação de intensidade, duração e frequência (Equação 1) por meio de regressão linear e não linear.

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

em que: I_m - intensidade máxima média de precipitação, mm h⁻¹; TR - período de retorno, anos; t - duração da precipitação, min.; K , a , b , e c - parâmetros ajustados com base nos dados pluviométricos da localidade.

Inicialmente foi realizada uma análise de consistência das séries de dados de cada estação, sendo que para cada estação foram selecionados os anos que continham menor número de falhas nos dados, e descartadas as estações que apresentaram menos de 15 anos em sua série de dados, restando em 105 estações (Figura 1).

Após essa etapa, selecionou-se a precipitação máxima diária de cada ano das séries para cada estação analisada e, em seguida procedeu-se a desagregação das precipitações máximas de um dia para duração de 5; 10; 15; 20; 30; 60; 360; 480; 600; 720 e 1.440 min., empregando-se os coeficientes propostos por Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1986) (Tabela 1). Realizada a desagregação da precipitação fez-se a estimativa da precipitação máxima para cada período de retorno, e em seguida, o ajuste

dos parâmetros K , a , b e c da equação de intensidade duração e frequência por dois métodos: (i) ajuste por regressão linear; e (ii) ajuste por regressão não linear.

Figura 1 - Distribuição espacial das estações selecionadas para ajuste das equações de IDF para o estado do Piauí

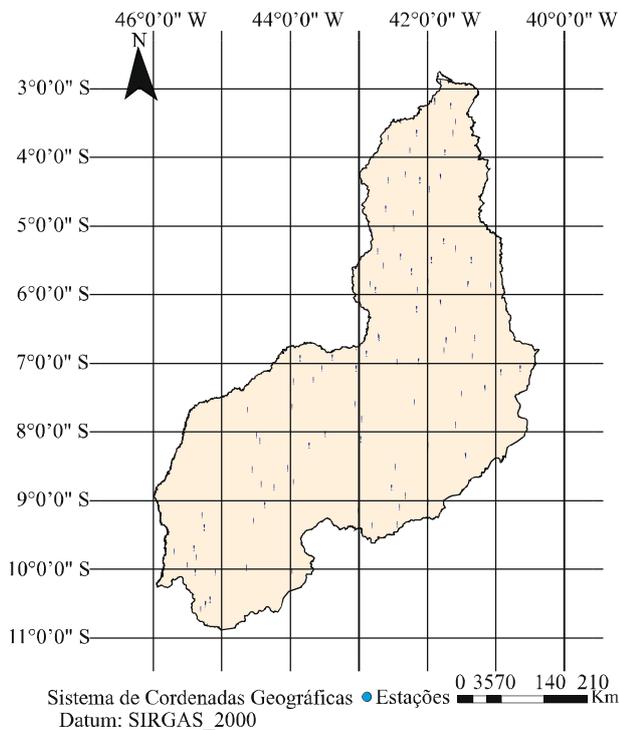


Tabela 1 - Coeficientes de desagregação para diferentes durações de chuva

Relação entre alturas pluviométricas	Fator de desagregação
1 dia/24 horas	1,14
12 horas/24 horas	0,85
10 horas/24 horas	0,82
8 horas/24 horas	0,78
6 horas/24 horas	0,72
1 hora/24 horas	0,42
30 min/1 hora	0,74
25 min/30 min	0,91
20 min/30 min	0,81
15 min/30 min	0,70
10 min/30 min	0,54
5 min/30 min	0,34

Fonte: CETESB (1986)

Ajuste por regressão linear

Depois de realizada a desagregação das chuvas em durações menores, foram estimados os eventos máximos para cada duração e períodos de retorno (TR) de 5; 10; 25; 50 e 100 anos, por meio do modelo probabilístico de Gumbel, conforme Equação 2.

$$h_{TR} = \alpha - \beta \text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \quad (2)$$

em que: h_{TR} - altura pluviométrica associada a um período de retorno (TR) mm; α e β - parâmetros da distribuição de Gumbel, obtidos pelo método dos momentos, Equações 3 e 4.

$$E(h) = \alpha + 0,577\beta \quad (3)$$

$$\text{VAR}(h) = 1,645\beta^2 \quad (4)$$

em que: $E(h)$ - valor esperado estimado pela média dos valores máximos anuais; $\text{VAR}(h)$ - variância dos valores máximos anuais, estimada a partir da série de dados.

Após obtidos os valores das máximas precipitações para cada duração e período de retorno, realizou-se o ajuste dos parâmetros (K , a , b e c) da equação IDF (equação 1) para cada estação, pelo método dos mínimos quadrados. Para realizar o ajuste dos parâmetros empíricos da IDF, a Equação 1 foi reescrita da seguinte forma:

$$\varphi = K \cdot \text{TR}^a \quad (5)$$

em que: K e a são parâmetros empíricos da equação IDF, e TR o período de retorno, em anos

$$i = \frac{\varphi}{(t + b)^c} \quad (6)$$

em que: i = intensidade estimada; t = tempo em minutos e b e c = parâmetros empíricos ajustados.

Em seguida, mediante a propriedade dos logaritmos a Equação 6 foi transformada na equação da reta, conforme Equação 7:

$$\log i = \log \varphi - c \cdot \log(t + b) \quad (7)$$

Na sequência, foram calculados os logaritmos de intensidade máxima para cada duração ($\log i$), em cada período de retorno. O valor de b foi obtido por iteração, utilizando-se a análise de regressão aplicada aos valores dos logaritmos da intensidade ($\log i$) para um dado período de retorno, com relação aos logaritmos das durações ($\log t$) (VILLELA; MATTOS, 1975).

A partir dos valores de $\log i$ e $\log(t + b)$ foram gerados gráficos de dispersão e, dessa forma, realizou-se

o ajuste dos coeficientes angular (c) e linear ($\log \phi$), para cada período de retorno. Os parâmetros K e a da equação IDF foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, conforme equação 8:

$$\log \phi = \log K + a \cdot \log TR \quad (8)$$

em que: $\log K$ e a - coeficientes linear e angular da reta, respectivamente.

Ajuste por regressão não linear

Para cada estação, foram obtidas as séries máximas de alturas médias de precipitação de um dia, para os seguintes períodos de retorno (TR): 5; 10; 25; 50 e 100 anos. As distribuições de probabilidade utilizadas foram: Gumbel; Log-Normal II; Log-Normal III; Pearson III; Log-Pearson III (TUCCI, 2001; NAGHETTINI; PINTO, 2007), sendo que para cada estação foram selecionadas as máximas precipitações, em que os dados da série apresentaram aderência ao modelo probabilístico pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, e menor erro padrão. Todas estas etapas foram realizadas com auxílio do software SisCAH (SOUSA *et al.*, 2009).

Em seguida, com os valores das séries máximas de alturas médias de precipitação de um dia, para as 105 estações para período de retorno de 5; 10; 25; 50 e 100 anos, fez-se a desagregação da precipitação de um dia em intervalos menores (Tabela 1). Depois de realizada a desagregação em tempos menores, foram ajustados, para cada estação, os parâmetros K , a , b , e c , por meio de regressão não linear, aplicando o método de interação de Gradação Reduzida Generalizada (GRG) Não Linear, através da rotina Solver da planilha eletrônica Excel®.

Avaliação do ajuste realizado

A avaliação do ajuste dos parâmetros da equação IDF, para ambas as metodologias (regressão linear e não linear) foi realizada pelo R^2 , obtida pelo quadrado da equação 9.

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

em que: X - valores observados; \bar{X} - valores médios observados; Y - valores estimados; \bar{Y} - valores médios estimados.

Nesse mesmo sentido, fez-se a avaliação do ajuste dos dados pela equação de regressão dos valores observados, em relação aos valores estimados, analisando neste caso o coeficiente angular da reta; todas estas etapas realizadas empregando-se planilha eletrônica Excel®.

Ainda, foram realizadas as estimativas das intensidades máximas para duração de 10; 30; 60; 720 e 1.440 minutos, e período de retorno de 5; 10; 25; 50 e 100 anos, para a

cidade de Teresina. Em seguida, realizou-se a comparação com os valores estimados das duas metodologias com parâmetros ajustados por Denardin e Freitas (1982).

Após ajustados os parâmetros da IDF, por meio do emprego dos dois métodos descritos, foi realizada a espacialização dos parâmetros K e a para toda área territorial do Estado. A espacialização foi efetivada com auxílio do software ArcGIS®, versão 10, desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), no qual foi utilizado o método de interpolação Kriging, do tipo ordinária (MELLO *et al.*, 2003). Finalmente, foi realizada a espacialização das intensidades estimadas para duração de 30; 60 e 720 minutos para o período de retorno de 10 anos, também se utilizando o método de interpolação Kriging, do tipo ordinária.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste dos parâmetros (K , a , b e c) da IDF, tanto por regressão linear quanto os realizados por regressão não linear apresentam coeficientes de determinação superiores a 0,98 (Tabela 2). No ajuste dos parâmetros da IDF por regressão linear, apenas cinco das 105 estações estudadas, apresentam r^2 inferior a 0,99. Já os parâmetros ajustados por meio de regressão não linear, todos apresentaram R^2 superior a 0,99. Aragão *et al.* (2013) também obtiveram r^2 acima de 0,99 para ajuste das IDF por regressão não linear, para o Estado de Sergipe, no entanto os autores alertam que esse índice pode ser tendencioso, podendo não ser adequado para avaliar o ajuste dos dados à equação de IDF.

No ajuste, por meio de regressão linear observa-se que há menor variação entre os parâmetros K e a . O maior valor apresentado pelo parâmetro K foi de 1.265,76 para a estação 00241000 (Luís Correia) e o menor valor foi 591,38 para a estação 00945003 (Monte Alegre do Piauí). O parâmetro a variou de 0,2225 observado na estação 00842002 (São Raimundo Nonato), para 0,0985 observado na estação 00442008 (José de Freitas). Já os parâmetros b e c se mantiveram fixos para todas as estações, isto devido a metodologia de ajuste que fixa estes parâmetros para ajuste dos demais. Essa menor variação nos parâmetros K e a , quando ajustados por regressão linear, provavelmente ocorrem em função da não variação nos parâmetros b e c da IDF.

Moruzzi e Oliveira (2009) sugeriram existir uma interação entre esses parâmetros (K , a , b e c), isto é, influência mútua entre as suas estimativas. O valor de um parâmetro é influenciado pelo valor do outro, entretanto, a combinação desses parâmetros geralmente resulta em bons modelos de previsão de IDF, fato observado nos parâmetros ajustados pelo método da regressão não linear.

Tabela 2 - Parâmetros (K , a , b e c) da equação de intensidade-duração-frequência ajustados por regressão linear e por regressão não linear para 105 estações localizadas no estado do Piauí

Código da estação	Município	Parâmetros ajustados por regressão linear					Parâmetros ajustados por regressão não linear				
		K	a	b	c	R ²	K	a	b	c	R ²
00241000	Luís Correia	1.265,76	0,186	10	0,742	0,990	1.612,00	0,223	14,39	0,791	0,998
00241002	Parnaíba	1.033,93	0,151	10	0,742	0,994	1.281,70	0,135	12,5	0,773	0,999
00341000	Parnaíba	763,77	0,195	10	0,742	0,991	798,54	0,214	10,9	0,757	0,999
00341001	Buriti dos Lopes	844,13	0,15	10	0,742	0,994	1.038,34	0,141	12,68	0,775	0,999
00341003	Cocal	838,98	0,157	10	0,742	0,994	972,81	0,139	10,98	0,758	0,999
00341004	Piracuruca	658,88	0,168	10	0,742	0,993	976,26	0,118	13,22	0,78	0,999
00341009	Piracuruca	872,84	0,16	10	0,742	0,993	920,95	0,178	11,29	0,761	0,999
00342002	Esperantina	917,17	0,152	10	0,742	0,994	1.157,88	0,139	12,89	0,777	0,999
00342003	Esperantina	862,92	0,134	10	0,742	0,995	1.063,01	0,125	12,92	0,777	0,999
00342004	Luzilândia	832,82	0,139	10	0,742	0,995	1.021,92	0,119	12,32	0,771	0,999
00342005	Matias Olímpio	939,00	0,115	10	0,742	0,996	1.083,21	0,089	11,11	0,759	0,999
00342006	Porto	1.024,64	0,151	10	0,742	0,994	1.010,13	0,181	12,46	0,773	0,999
00441002	Capitão de Campos	1.033,56	0,184	10	0,742	0,992	1.112,98	0,205	12,36	0,772	0,999
00441006	Piripiri	898,00	0,145	10	0,742	0,995	1.045,17	0,147	13,34	0,781	0,999
00442000	Barras	1.017,83	0,14	10	0,742	0,995	1.131,01	0,162	13,34	0,781	0,999
00442001	Batalha	995,84	0,123	10	0,742	0,994	1.130,24	0,143	13,6	0,784	0,999
00442004	Campo Maior	962,94	0,126	10	0,742	0,994	1.075,28	0,155	13,35	0,781	0,999
00442006	Miguel Alves	900,76	0,149	10	0,742	0,994	1.178,71	0,13	12,46	0,773	0,999
00442008	José de Freitas	1.022,56	0,099	10	0,742	0,995	1.126,62	0,118	13	0,778	0,999
00541001	São Miguel do Tapuio	731,03	0,186	10	0,742	0,992	927,57	0,227	14,98	0,797	0,999
00541002	Castelo do Piauí	912,57	0,139	10	0,742	0,995	1.064,08	0,135	12,62	0,774	0,999
00541003	Castelo do Piauí	851,19	0,158	10	0,742	0,994	744,36	0,224	11,61	0,764	0,996
00541005	São Miguel do Tapuio	776,32	0,147	10	0,742	0,994	968,80	0,116	12,32	0,771	0,999
00541008	Aroztes	920,46	0,152	10	0,742	0,994	1.084,05	0,172	13,12	0,779	0,999
00541009	São João da Serra	957,53	0,165	10	0,742	0,993	1.218,75	0,175	13	0,778	0,999
00541010	São Miguel do Tapuio	797,53	0,143	10	0,742	0,995	1.034,79	0,129	12,91	0,777	0,999
00542000	Altos	1.029,32	0,169	10	0,742	0,993	1.289,96	0,178	13,27	0,78	0,998
00542003	Benedictinos	1.034,75	0,155	10	0,742	0,994	1.319,95	0,156	13,71	0,785	0,999
00542004	Barro duro	1.000,05	0,151	10	0,742	0,994	1.128,55	0,135	11,07	0,759	0,999
00542005	Demerval Lobão	886,81	0,137	10	0,742	0,995	1.142,60	0,116	12,96	0,777	0,999
00542007	Monsenhor Gil	999,47	0,142	10	0,742	0,995	1.132,13	0,134	11,49	0,763	0,999
00542008	Prata do Piauí	868,13	0,156	10	0,742	0,994	961,05	0,125	10,9	0,757	0,999
00542009	São Félix do Piauí	1.028,19	0,168	10	0,742	0,993	1.226,05	0,175	12,95	0,777	0,999
00542010	São Pedro do Piauí	910,97	0,149	10	0,742	0,994	1.209,20	0,116	12,88	0,777	0,999
00542012	Teresina	1.055,61	0,15	10	0,742	0,994	1.079,84	0,202	12,76	0,776	0,999
00543009	Palmeirais	985,96	0,129	10	0,742	0,995	1.188,25	0,14	12,43	0,772	0,999
00641000	Aroztes	936,11	0,151	10	0,742	0,994	1.137,68	0,163	12,55	0,773	0,999
00641001	Bocaina	757,91	0,167	10	0,742	0,993	970,71	0,179	13,29	0,781	0,999
00641002	Pimenteiras	835,57	0,169	10	0,742	0,993	1.077,60	0,182	13,36	0,781	0,999
00641003	Inhuma	811,51	0,191	10	0,742	0,991	1.044,92	0,205	13,35	0,781	0,999
00641004	Ipiranga do Piauí	743,15	0,145	10	0,742	0,994	917,95	0,157	12,77	0,776	0,999
00641005	Valença do Piauí	800,06	0,157	10	0,742	0,994	1.014,14	0,171	13,1	0,779	0,999

Continuação Tabela 2

00642000	Oeiras	927,79	0,19	10	0,742	0,991	1.178,62	0,206	13,09	0,779	0,999
00642001	Amarante	952,82	0,149	10	0,742	0,994	1.182,64	0,16	12,85	0,776	0,999
00642003	Amarante	898,11	0,14	10	0,742	0,995	1.146,92	0,156	13,18	0,78	0,999
00642004	Floriano	848,00	0,16	10	0,742	0,994	1.086,26	0,176	13,22	0,78	0,999
00642005	Elesbão Veloso	1.018,94	0,21	10	0,742	0,990	1.446,08	0,226	14,67	0,794	0,998
00642007	Amarante	818,24	0,178	10	0,742	0,992	1.280,71	0,191	16,25	0,808	0,998
00642012	Oeiras	840,24	0,173	10	0,742	0,993	1.112,01	0,192	13,63	0,784	0,999
00643002	Jerumenha	761,45	0,175	10	0,742	0,992	1.000,44	0,191	13,6	0,784	0,999
00643006	Floriano	680,07	0,174	10	0,742	0,993	885,81	0,188	13,51	0,783	0,999
00643008	Guadalupe	692,92	0,209	10	0,742	0,990	979,42	0,225	14,62	0,793	0,998
00740001	São Julião	803,43	0,148	10	0,742	0,994	997,61	0,16	12,84	0,776	0,999
00740002	Fronteiras	759,05	0,161	10	0,742	0,993	963,14	0,173	13,15	0,779	0,999
00741001	Conceição do Canindé	902,87	0,163	10	0,742	0,993	1.151,45	0,176	13,21	0,78	0,999
00741003	Itainópolis	785,74	0,169	10	0,742	0,993	1.011,10	0,181	13,35	0,781	0,999
00741004	Jaicós	775,12	0,163	10	0,742	0,993	996,13	0,182	13,63	0,784	0,999
00742000	Flores do Piauí	927,86	0,191	10	0,742	0,991	1.246,18	0,204	13,97	0,787	0,999
00742001	Simplício Mendes	608,53	0,2	10	0,742	0,991	854,99	0,215	14,56	0,793	0,998
00742012	Francisco Ayres	758,61	0,132	10	0,742	0,995	933,12	0,15	12,63	0,774	0,999
00743000	Bertolínia	860,81	0,149	10	0,742	0,994	1.042,04	0,161	12,49	0,773	0,999
00743001	Itaueira	957,85	0,153	10	0,742	0,994	1.208,20	0,168	13,02	0,778	0,999
00743002	Itaueira	860,06	0,161	10	0,742	0,993	1.091,19	0,173	13,15	0,779	0,999
00743003	Jerumenha	914,18	0,145	10	0,742	0,994	1.133,45	0,159	12,8	0,776	0,999
00743004	Landri Sales	1.128,30	0,165	10	0,742	0,993	1.441,76	0,177	13,25	0,78	0,999
00743009	Jerumenha	894,23	0,106	10	0,742	0,997	1.046,56	0,129	12,22	0,77	0,999
00744001	Uruçuí	869,89	0,159	10	0,742	0,994	1.104,49	0,173	13,14	0,779	0,999
00841001	Conceição do Canindé	651,05	0,166	10	0,742	0,993	840,18	0,181	13,34	0,781	0,999
00841002	São João do Piauí	724,34	0,168	10	0,742	0,993	936,85	0,183	13,38	0,782	0,999
00842000	São João do Piauí	828,45	0,16	10	0,742	0,993	1.033,35	0,175	12,87	0,777	0,999
00842001	Canto do Buriti	889,92	0,169	10	0,742	0,993	1.123,33	0,183	13,06	0,778	0,999
00842002	São Raimundo Nonato	826,06	0,223	10	0,742	0,989	1.084,65	0,239	13,53	0,783	0,998
00842003	São Raimundo Nonato	781,22	0,172	10	0,742	0,993	1.026,96	0,189	13,56	0,783	0,999
00843001	Eliseu Martins	895,58	0,195	10	0,742	0,991	1.232,03	0,212	14,22	0,789	0,999
00843002	Eliseu Martins	790,59	0,172	10	0,742	0,993	1.023,28	0,185	13,43	0,782	0,999
00843004	Cristino Castro	682,30	0,157	10	0,742	0,994	944,65	0,174	14,32	0,79	0,999
00843007	Bertolínia	804,75	0,172	10	0,742	0,993	1.047,92	0,186	13,48	0,783	0,999
00844000	Uruçuí	867,12	0,178	10	0,742	0,992	1.141,09	0,193	13,64	0,784	0,999
00844001	Uruçuí	847,48	0,153	10	0,742	0,994	1.062,68	0,166	12,97	0,778	0,999
00844002	Bom Jesus	739,12	0,146	10	0,742	0,994	918,16	0,168	13,01	0,778	0,999
00844004	Bertolínia	784,02	0,168	10	0,742	0,993	1.014,76	0,183	13,39	0,782	0,999
00844005	Cristino Castro	657,47	0,195	10	0,742	0,991	901,31	0,211	14,19	0,789	0,999
00844006	Bertolínia	873,89	0,186	10	0,742	0,992	1.172,44	0,202	13,9	0,787	0,999
00844008	Cristino Castro	801,19	0,176	10	0,742	0,992	1.047,83	0,19	13,57	0,783	0,999
00941000	São Raimundo Nonato	818,74	0,159	10	0,742	0,994	1.038,91	0,173	13,13	0,779	0,999
00942000	Caracol	812,65	0,142	10	0,742	0,995	999,17	0,154	12,71	0,775	0,999
00942001	São Raimundo Nonato	886,73	0,17	10	0,742	0,993	1.157,49	0,187	13,48	0,783	0,999

Continuação Tabela 2

00942002	São Raimundo Nonato	792,01	0,168	10	0,742	0,993	1.023,87	0,182	13,38	0,782	0,999
00942003	São Raimundo Nonato	767,19	0,138	10	0,742	0,995	1.019,51	0,15	13,8	0,786	0,999
00944000	Bom Jesus	724,58	0,165	10	0,742	0,993	945,02	0,189	13,89	0,786	0,999
00944001	Bom Jesus	812,93	0,142	10	0,742	0,995	1.004,38	0,156	12,75	0,775	0,999
00944002	Parnaaguá	783,85	0,166	10	0,742	0,993	1.011,41	0,181	13,34	0,781	0,999
00945001	Barreiras do Piauí	889,13	0,164	10	0,742	0,993	1.139,61	0,178	13,27	0,78	0,999
00945002	Gilbues	718,37	0,143	10	0,742	0,995	889,31	0,157	12,77	0,776	0,999
00945003	Monte Alegre do Piauí	591,38	0,192	10	0,742	0,991	808,26	0,208	14,15	0,789	0,999
00945005	Gilbués	874,20	0,136	10	0,742	0,995	1.071,49	0,154	12,71	0,775	0,999
00945007	Gilbués	685,49	0,154	10	0,742	0,994	870,12	0,188	13,52	0,783	0,999
00945008	Gilbués	931,32	0,164	10	0,742	0,993	1.057,55	0,179	11,51	0,763	0,999
01043000	Avelino Lopes	677,04	0,194	10	0,742	0,991	914,71	0,207	14,05	0,788	0,999
01044004	Curimatá	796,94	0,133	10	0,742	0,995	976,97	0,149	12,61	0,774	0,999
01045000	Corrente	762,12	0,15	10	0,742	0,994	960,07	0,167	12,98	0,778	0,999
01045001	Parnaaguá	888,30	0,142	10	0,742	0,995	1.008,32	0,205	12,73	0,775	0,999
01045002	Parnaaguá	862,43	0,154	10	0,742	0,994	1.081,99	0,167	12,99	0,778	0,999
01045003	Parnaaguá	596,20	0,222	10	0,742	0,989	866,40	0,238	15,06	0,797	0,998
01045004	Curimatá	854,86	0,139	10	0,742	0,995	1.073,19	0,161	12,86	0,777	0,999

Nos parâmetros ajustados por regressão não linear observa-se que há grande variação entre seus valores, o que pode ser explicado pela interação entre esses parâmetros, conforme relatado por Moruzzi e Oliveira (2009). O maior valor apresentado para o parâmetro K foi de 1.612,0 para a estação 00241000 (Luís Correia) e o menor valor (744,3634) para a estação 00541003 (Castelo do Piauí). O parâmetro a apresentou variação de 0,0888 para a estação 00342005 (Matias Olímpio) e 0,2392 para a estação 00842002 (São Raimundo Nonato). Já o parâmetro b variou de 16,246 para a estação 00642007 (Amarante) e 10,8959 para a estação 00341000 (Parnaíba).

Nesse mesmo sentido, o parâmetro c apresentou variação de 0,0512 entre o valor máximo e o mínimo. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Silva *et al.* (2003) e Silva *et al.* (2012), quando realizaram o ajuste dos parâmetros da equação de IDF empregando regressão não linear. No entanto, diverge dos resultados encontrados por Aragão *et al.* (2013), no qual os parâmetros b e c se mantiveram fixos quando ajustados por regressão não linear.

Essa grande variação nos parâmetros da equação IDF, dentro de uma mesma faixa territorial também foram observadas por Silva *et al.* (2002), Rodrigues *et al.* (2008), Santos *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2012). Dessa forma, variações podem ocorrer em função das características e da variabilidade dos eventos hidrológicos de cada Região. Portanto, os resultados apresentados evidenciam a importância de

se realizar o ajuste dos parâmetros da IDF para cada local específico.

Na espacialização do parâmetro K , observa-se que os maiores valores ajustados, tanto por regressão linear (Figura 2A) quanto por regressão não linear (Figura 2B) estão distribuídos de forma mais concentrados na região Norte e Centro-Norte piauiense. Isso ocorre em função dessas localidades apresentarem as maiores intensidades de precipitação pluviométrica.

Já o parâmetro a tem seus maiores valores observados nas regiões Sudoeste e Sudeste do Estado (Figura 3). Nesse sentido, o parâmetro a ajustado por regressão linear (Figura 3A) e por regressão não linear (Figura 3B) apresentou comportamento contrário ao parâmetro K , sendo que o parâmetro a apresenta seus menores valores nas regiões Norte e Centro-Norte piauiense. A distribuição espacial dos parâmetros K e a evidenciam sua forte ligação com os valores de intensidade de precipitação que ocorrem em uma determinada região, sendo que as regiões que apresentaram os maiores valores de intensidade foram também aquelas onde se observou maiores valores para o parâmetro K e valores menores para o parâmetro a .

De acordo com os valores de intensidade máxima estimados com as IDF ajustadas por regressão linear (Tabela 3), pode se observar que as estações

que apresentaram os maiores e menores valores de intensidades máximas estimadas para todas as durações foram: a estação 00241000 localizada no município de Luís Correia, e a estação 00945003 localizada no município de Monte Alegre do Piauí, respectivamente.

Esse comportamento pode ser explicado pela distribuição espacial das chuvas no Estado, onde os maiores valores de pluviosidade ocorrem na região Norte e os menores na região Central, região Semiárida e no Sul do Estado (GUEDES *et al.*, 2010).

Figura 2 - Espacialização do parâmetro **K** ajustado por regressão linear (A) e regressão não linear (B) respectivamente

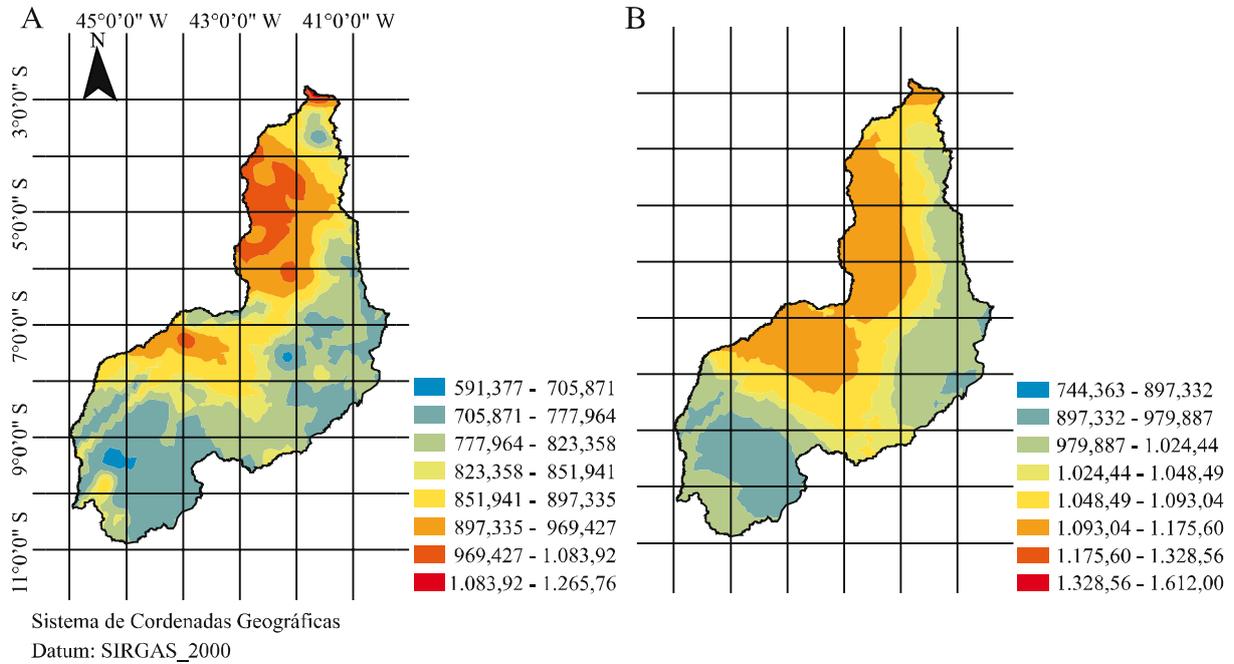


Figura 3 - Espacialização do parâmetro **a** ajustado por regressão linear (A) e regressão não linear (B) respectivamente

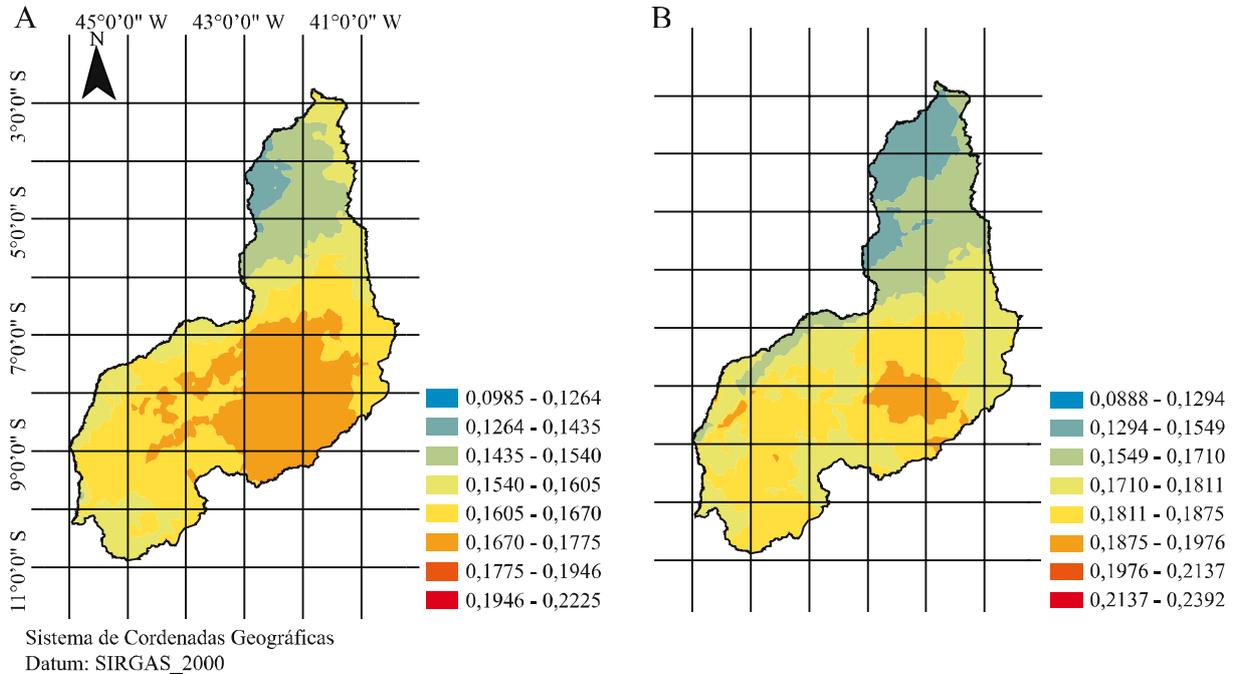


Tabela 3 - Intensidades máximas estimadas com parâmetros ajustados por regressão linear e por regressão não linear para duração de 10, 30, 60, 720 e 1440 minutos e período de retorno de 10 anos

Código da estação	Município	Precipitação estimada com parâmetros ajustados por regressão linear					Precipitação estimada com parâmetros ajustados por regressão não linear				
		10 min	30 min	60 min	720 min	1440 min	10 min	30 min	60 min	720 min	1440 min
00241000	Luís Correia	210,39	125,80	83,06	14,59	8,77	215,33	134,09	89,13	14,57	8,48
00342006	Porto	157,09	93,93	62,01	10,89	6,55	138,54	84,70	56,05	9,38	5,53
00642005	Elesbão Veloso	178,86	106,95	70,61	12,40	7,45	191,19	119,34	79,38	12,93	7,52
00945003	Monte Alegre do Piauí	99,64	59,58	39,34	6,91	4,15	105,68	65,67	43,62	7,15	4,17

Quando se utilizou os parâmetros ajustados por regressão linear para estimar a intensidade máxima na duração de 10 min., a estação 00241000 (Luís Correia) apresentou valor de 210,39 mm h⁻¹ e a estação 00945003 (Monte Alegre do Piauí) apresentou valor de 99,64 mm h⁻¹. Já quando se utilizou os parâmetros ajustados por regressão não linear para estimar a intensidade máxima na duração de 10 min., a estação 00241000 (Luís Correia) apresentou valor de 215,33 mm h⁻¹ e a estação 00945003 (Monte Alegre do Piauí) apresentou valor de 105,68 mm h⁻¹. Entretanto, quando se observa a variação entre os valores estimados com duração de 10 min. para uma mesma estação utilizando os parâmetros ajustados, tanto por regressão linear quanto por regressão não linear, nota-se que os valores apresentaram pequena variação, sendo que para a estação 00241000 (Luís Correia), a variação foi de apenas 4,94 mm h⁻¹, e para a estação 00945003 (Monte Alegre do Piauí) foi de 6,04 mm h⁻¹. Essa diferença pode ser justificada pela diferença existente entre as metodologias.

Ao se observar os valores de intensidade máxima estimados com os parâmetros ajustados por regressão linear e por regressão não linear, verifica-se que a estação 00342006 (Porto) apresentou maiores variações para duração de 10; 720 e 1.440 min., apresentando variação de 18,55; 1,55 e 1,02 mm h⁻¹, respectivamente. Já para a duração de 30 e 60 min., a estação 00642005 (Elesbão Veloso) apresentou as maiores diferenças, com valores da ordem de 12,39 e 8,77 mm h⁻¹, na sequência apresentada.

Por outro lado, a espacialização das intensidades máximas estimadas para período de retorno de 10 anos e duração de 10; 60 e 720 min., com os parâmetros

da IDF ajustados por regressão linear (Figuras 4A, 4B e 4C) e regressão não linear (Figuras 4D, 4E e 4F) apresentam comportamento similar de distribuição espacial no Estado.

No entanto, as intensidades estimadas com os parâmetros ajustados por regressão linear apresentaram maiores áreas com maiores e menores valores de precipitação que a regressão não linear, principalmente ao Norte, onde ocorrem as maiores precipitações, e ao Sul, onde ocorrem as menores precipitações. Pode se observar ainda que as maiores intensidades de precipitação ocorrem principalmente, na região Norte e Centro-Norte piauiense, e os menores valores nas regiões Sudoeste e Sudeste do Estado. Esses resultados confirmam a distribuição dos parâmetros *K* e *a* no Estado, sendo que nas regiões que apresentam maiores valores de *K* e menores valores de *a*, tendem a apresentar maiores valores na intensidade precipitada.

De acordo com a Figura 5, pode-se observar que existe uma semelhança entre os valores de intensidade estimados utilizando-se os parâmetros ajustados neste trabalho e os valores estimados com os parâmetros ajustados por Denardin e Freitas (1982). Essa semelhança é comprovada por meio da correlação entre os valores de intensidade de chuva, com R² superior a 0,98. A comparação entre os valores estimados com os parâmetros ajustados por meio de regressão linear (IRL), com os valores estimados com os parâmetros ajustados por Denardin e Freitas (1982) propiciaram R² de 0,98. Já a comparação entre os valores estimados com os parâmetros ajustados, por intermédio de regressão não linear (IRNL), com os valores de intensidades estimadas com os parâmetros ajustados por Denardin e Freitas (1982) (IDFe) exibiram R² superior a 0,99.

Figura 4 - Espacialização das intensidades máximas estimadas para período de retorno de 10 anos com os parâmetros da IDF ajustados por regressão linear e duração de 10 min (A), 60 min (B) e 720 min (C) e valores estimados com parâmetros ajustados por regressão não linear com duração de 10 min (D), 60 min (E) 720 min (F)

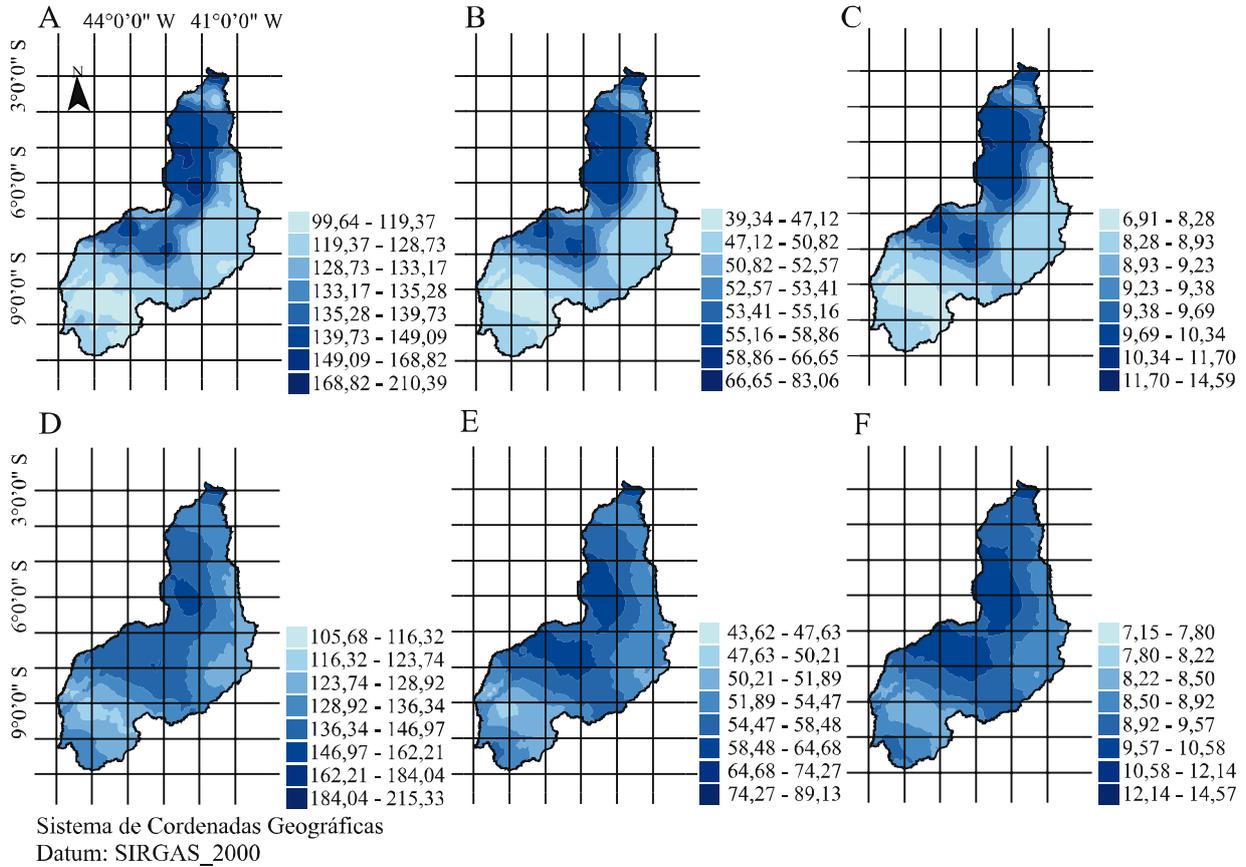
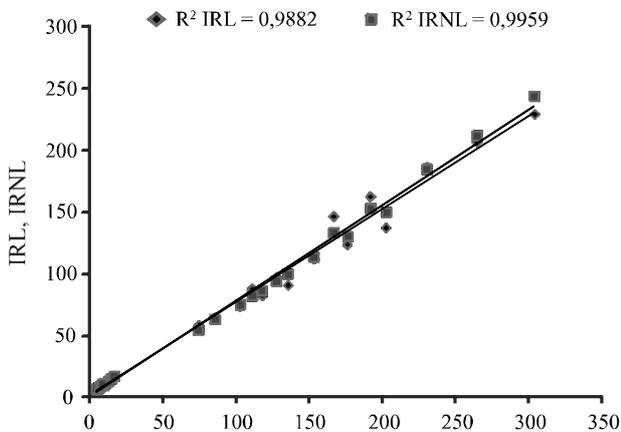


Figura 5 - Comparação entres valores estimados com parâmetros ajustados por regressão linear (IRL) e por regressão não linear (IRNL) em relação aos valores estimados com parâmetros ajustados por Denardin e Freitas (1982) (IDFe) para a cidade de Teresina



CONCLUSÕES

1. O ajuste dos parâmetros das equações de intensidade-duração-frequência realizado, tanto por regressão linear quanto por regressão não linear foram bons, com r^2 superior a 0,98;
2. O método de regressão não linear apresentou melhor desempenho quando comparado com o método de regressão linear;
3. A espacialização do parâmetro K mostrou que os maiores valores ocorrem nas regiões Norte e Centro-Norte piauiense, enquanto para o parâmetro a observa-se comportamento contrário;
4. A comparação das intensidades estimadas com os parâmetros ajustados neste trabalho, com os valores estimados com os parâmetros disponíveis para o município de Teresina apresentam R^2 superior a 0,98, evidenciando o bom ajuste da equação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb** - Sistemas de Informações Hidrológicas. 2012. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 28 de março 2013.
- ARAGÃO, R. *et al.* Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 243-252, 2013.
- ARAÚJO, L. E. *et al.* Análise estatística de chuvas intensas da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.
- CECÍLIO, R. A. *et al.* Avaliação de interpoladores para os parâmetros das equações de chuvas intensa no Espírito Santo. **Ambi-Água**, v. 4, n. 3, p. 82-92, 2009.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo: DAEE/CETESB, 1986. 466 p.
- DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A; TERRA, V. S. S. Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para pelotas - RS. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 245-255, 2008.
- DENARDIN, J.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 10, p. 1409-1416, 1982.
- GUEDES, R. V. S. *et al.* C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no estado do Piauí e agrupamento pelo método de ward. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 208-233, 2010.
- MELLO, C. R. *et al.* Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.
- MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de Gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. **Irriga**, v. 10, n. 4, p. 318-334, 2005.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. **Teoria e Prática da Engenharia Civil**, v. 9, n. 13, p. 59-68, 2009.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.
- OLIVEIRA, L. F. C. *et al.* Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 1, p. 13-18, 2005.
- PFRAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 1957. 246 p.
- RODRIGUES, J. O. *et al.* Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 4, p. 511-519, 2008.
- SANTOS, G. G. *et al.* Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 899-905, 2009. Suplemento.
- SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.
- SILVA, B. M. *et al.* Chuvas Intensas em localidades do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 135-147, 2012.
- SILVA, D. D. *et al.* Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial para o Estado de Tocantins. **Engenharia na Agricultura**, v. 11, n. 4, p. 1-8, 2003.
- SILVA, D. D. *et al.* Chuvas intensas no Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 362-367, 2002.
- SOUSA, H. T. *et al.* **SisCAH** - Sistema Computacional para Análise Hidrológica. Versão 1.0. GPRH, 2009.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 943 p.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1975. 245 p.