

## **XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**

### **APLICAÇÃO DE MODELO ALTERNATIVO DE EQUAÇÃO DE CHUVA INTENSA AOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS DE RECIFE-PE**

*Maria Eduarda Rodrigues da Silva<sup>1</sup> ; Emmanuel Henrique Piancó da Silva Martins<sup>2</sup> & Artur Paiva Coutinho<sup>3</sup>*

**RESUMO** – No presente trabalho foi realizado uma análise das máximas precipitações pluviométricas observadas em Recife - PE, para o período de 1994 a 2019. Através da obtenção das séries históricas de chuvas acumuladas diárias máximas anuais, e com o auxílio de equações estatísticas que possibilitaram a análise de eventos de chuvas com diferentes durações, realizou-se a desagregação das chuvas diárias em chuvas de menor duração. Com o auxílio da ferramenta Solver do Excel alcançou-se os parâmetros para a equação IDF do método tradicional. Em seguida, o método alternativo foi aplicado e com seus parâmetros fixados, resultados mais eficazes foram obtidos. Por fim, com os dois resultados em questão, demonstra-se a validade do método alternativo em relação ao método tradicional.

**ABSTRACT**– In the present work, an analysis of the maximum rainfall observed in Recife - PE was performed for the period from 1994 to 2019. By obtaining the historical series of accumulated daily rainfall annually, and with the aid of statistical equations that allowed the analysis of rainfall events with different durations, the daily rainfall was disaggregated into shorter rainfall. With the aid of the Excel Solver tool, the parameters for the IDF equation of the traditional method were reached. Then, the alternative method was applied and with its parameters fixed, more effective results were obtained. Finally, with the two results in question, the validity of the alternative method is demonstrated in relation to the traditional method..

**Palavras-Chave** – Chuvas intensas; Equação IDF; Desagregação da chuva.

<sup>1)</sup> Graduando em Engenharia Civil, NT/CAA/UFPE, Av. Campina Grande, s/n - Km 59 - Nova Caruaru, Caruaru - PE, CEP: 55014-900, (81) 99464-1704, eduarda.rodrigues@ufpe.br

<sup>2)</sup> Graduando em Engenharia Civil, NT/CAA/UFPE, Av. Campina Grande, s/n - Km 59 - Nova Caruaru, Caruaru - PE, CEP: 55014-900, (81) 99718-0730, emmanuel.pianco@ufpe.br

<sup>3)</sup> Professor Doutor em Engenharia Civil, NT/CAA/UFPE, Av. Campina Grande, s/n - Km 59 - Nova Caruaru, Caruaru - PE, CEP: 55014-900, (81) 99893-2393, arthur.coutinho@ufpe.br

## INTRODUÇÃO

O estudo das relações entre intensidade, duração e frequência de chuvas é de grande importância para o projeto de obras de controle de erosão e de estruturas hidráulicas para águas pluviais, como galerias, bueiros, extravasores de barragens, vãos de pontes, etc. (Vieira *et al.* 1998).

Além desses fatores, outro adendo importante quanto ao estudo das chuvas intensas são os grandes volumes de água significativos em pequenos intervalos de tempo. Devido aos grandes volumes precipitados, a ocorrência de tais eventos costuma gerar danos socioeconômicos, prejuízos ambientais, além de riscos a vida humana (Farias; Silva; Coelho, 2013; Qamar *et al.*, 2017).

A pesquisa das características de tais precipitações pode ser feita conhecendo-se os dados de duração, intensidade e frequência de ocorrência das mesmas. A relação entre estas variáveis é denominada, de maneira geral, de curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), podendo ser uma ferramenta utilizada para transformações chuva-vazão (Damé *et al.*, 2016; Mamoon *et al.*, 2014).

Tendo em vista a carência de equações de chuvas intensas para estado de Pernambuco e a importância do estudo das relações de intensidade, duração e frequência, busca-se nesse trabalho determinar relações IDF através do método tradicional e comparar com um método alternativo proposto. Neste cenário, impôs-se a elaboração de um estudo para separar e analisar os dados de chuvas referentes a um período de 26 anos (1994 a 2019), coletados e registrados no posto da APAC localizado no Recife, bairro da Várzea, a fim de obter equações de intensidade-duração-frequência (IDF) que permita prever eventos intensos com diferentes períodos de retorno e comparar essas equações através de dois métodos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo localiza-se no município de Recife, capital do estado de Pernambuco, inserido na região Nordeste do Brasil. Recife é banhada a leste pelo Atlântico Sul e possui uma vasta rede de drenagem constituída por 5 principais rios e 99 canais, numa área de 218,50km<sup>2</sup>. Para fins do estudo aqui proposto, foram utilizados dados da estação pluviométrica 2611606 (código IBGE), com coordenada geográfica 08° 02' 23.38" S - 34° 57'27.83" W, localizada no bairro da Várzea (Figura 1).

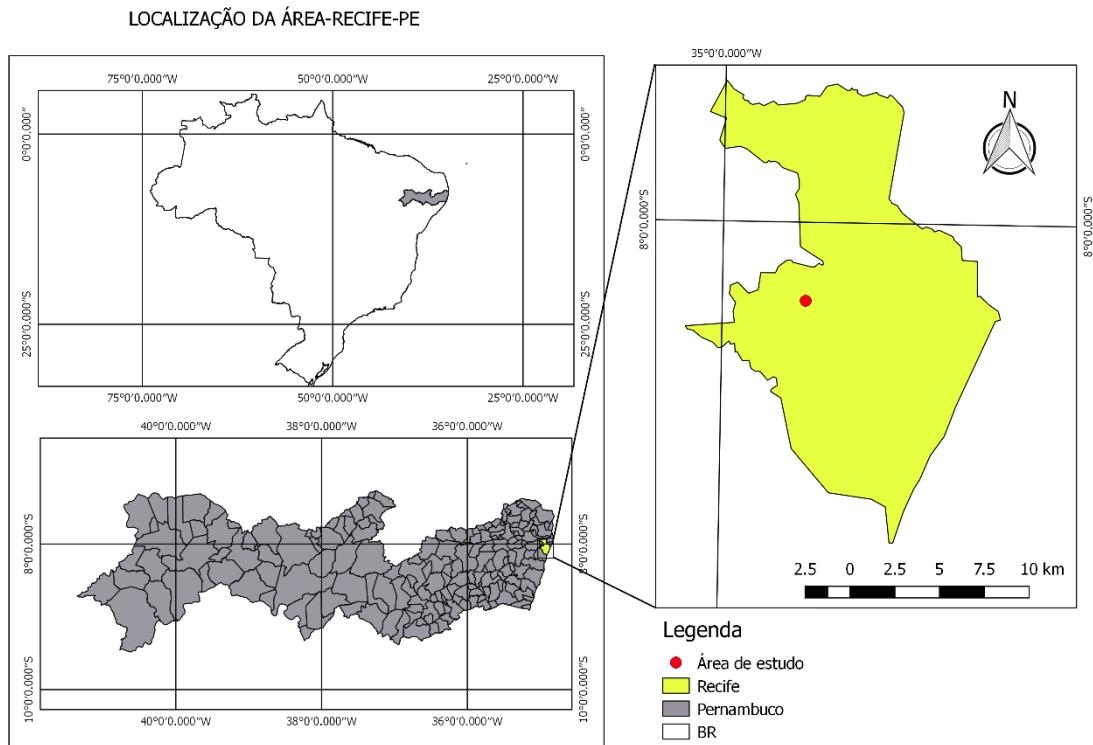


Figura 1. Localização da estação pluviométrica no município de Recife no estado de Pernambuco

## Dados Pluviométricos

Os dados pluviométricos utilizados correspondem a uma série histórica de 26 anos (1994 a 2019), sem falhas, obtida do posto pluviométrico de código 2611606 e adquirida junto ao acervo da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2020). Neste estudo foi elaborada a série de precipitações diárias máximas anuais, selecionando-se as alturas pluviométricas máximas de um dia de duração em cada ano da série

## Ajuste a distribuição estatística

A partir da série de dados com os valores máximos de precipitação diária anual, foi realizado o ajuste aplicando a equação de distribuição probabilística de Gumbel, cuja a finalidade foi identificar as probabilidades de ocorrência de precipitação máximas para determinados tempos de retorno. Além de utilizada por diversos autores (Penner *et al.*, 2016; Damé *et al.*, 2016; Abreu, 2018) na determinação dos parâmetros da equação de intensidade, duração e frequência (IDF) a distribuição

de Gumbel apresenta vantagens em relação as demais, pois o ajuste é feito apenas utilizando a média e o desvio padrão dos valores de precipitação máxima diária anual (Pereira *et al.* 2017).

A distribuição de Gumbel para valores extremos é expressa por:

$$P(X \geq x) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

Sendo  $P(X \geq x)$  a probabilidade de um valor extremo qualquer “X” da série ser maior ou igual a “x”, ou seja,  $P(X \geq x) = 1 - F(x)$ , e “y” é a variável reduzida ou variável Gumbel, expressa na equação (2), sendo  $\sigma_n$  o desvio padrão da variável reduzida,  $\sigma_x$  o desvio padrão da variável “X”,  $\bar{x}$  corresponde a média aritmética da variável “X” e  $\bar{y}_n$  a média aritmética da variável reduzida. Reorganizando os termos da equação (2) obtém-se a equação (3).

$$y = \left( X - \bar{x} + \sigma_x \times \frac{\bar{y}_n}{\sigma_n} \right) \times \frac{\sigma_n}{\sigma_x} \quad (2)$$

$$X = \bar{x} + \left( \frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right) \times \sigma_x \quad (3)$$

Vem Te Chow (1964), mostrou que a maioria das funções de frequência aplicáveis na análise hidrológica podem ser resolvidas pela equação:

$$x_T = \bar{x} + k_T \times s \quad (4)$$

Sendo  $x_T$  corresponde à altura precipitada para o período de retorno utilizado (mm),  $\bar{x}$  a altura média da série histórica das precipitações (mm) e  $k_T$  fator de frequência, função do período de retorno e da distribuição probabilística utilizada e  $s$  o desvio padrão da série histórica das precipitações (mm). Comparando as equações (3) e (4) obtém-se o fator de frequência, a variável reduzida é determinada pela equação (5). Onde T é o período de retorno (anos). Os valores de  $\bar{y}_n$  e  $\sigma_n$  são tabelados de acordo o número de observações, n.

$$y = -\ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (5)$$

O procedimento descrito acima foi utilizado para determinar as alturas precipitadas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 e 100 anos.

## Teste de aderência

O teste de Gumbel necessita de uma pós-verificação, através de um teste de aderência que tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas (Naghettini; Pinto, 2007). Dessa forma foi realizado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 1%.

## Desagregação da chuva e determinação dos parâmetros da equação IDF

As séries históricas analisadas foram construídas a partir de registros de precipitação máxima com duração de 1 dia (mm) e estes foram desagregados para obter a altura precipitada para chuvas de curta duração. Nesse caso, foram utilizados os coeficientes de desagregação propostos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB, 1986), presentes na Tabela 1, para obter as precipitações máximas para chuvas com durações de 5, 10, 15, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1.440 minutos.

Tabela 1. Coeficientes de desagregação da precipitação. CETESB (1986).

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

A partir dos dados obtidos pela desagregação foi determinada a relação de intensidade- duração e frequência que tradicionalmente é dada pela equação:

$$i = \frac{KT^m}{(t + b_0^n)} \quad (6)$$

Onde  $i$  é a intensidade média máxima de chuva (mm/h), K, m, b e n são os coeficientes da equação a ser ajustada. T é o período de retorno (anos) e t é a duração da chuva (minutos). Para o ajuste da equação, foi utilizada a minimização da soma dos quadrados dos desvios (Back, 2020). Os resultados encontrados pelo método tradicional foram comparados com os obtidos pelo método alternativo cuja a desagregação é dada por:

$$h = \left( \frac{t}{a + bt^c} \right) \times P_{1\ dia} \quad (7)$$

Onde  $h$  é a altura precipitada (mm),  $t$  é a duração da chuva (min),  $P_{1\ dia}$  é a precipitação máxima com duração de 1 dia (mm) e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são coeficientes a serem ajustados com os coeficientes de desagregação. Dessa forma a equação IDF é expressa por:

$$i = \left( \frac{60}{a + bt^c} \right) \times P_{1\ dia} \quad (8)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A distribuição de Gumbel como modelo probabilístico de extremos foi utilizada em uma série histórica de precipitações diárias máximas anuais contendo 26 anos, conforme anteriormente exposto. Para o teste de Kolmogorov-Smirnov, o valor de  $D$  observado foi de 0,109, obtido através dos dados de precipitação máxima “n” (número de observações) e o teste do KS. Portanto, para um tamanho de amostra igual a 26 ( $n = 26$ ), obteve-se o valor de  $DN,\alpha$  de 0,311 (Naghettini; Pinto, 2007), considerando um nível de significância de 0,01. Assim, ao comparar os dois resultados, nota-se que  $D < DN,\alpha$ , portanto a distribuição de Gumbel pode ser utilizada para representar o comportamento dos valores de precipitação máxima analisados.

Como  $n = 26$ , têm-se os valores do desvio padrão e da média aritmética da variável reduzida:  $\bar{y}_{26} = 0,5320$  e  $\sigma_{26} = 1,0961$ . A altura média da série histórica das precipitações diárias máximas anuais foi de  $\bar{x} = 116,59$  mm com desvio padrão de  $s = 29,64$  mm. Dessa forma, utilizando-se da equação (4), foram calculadas as alturas precipitadas para chuvas com duração de um dia de acordo com o tempo de retorno. Os resultados encontrados constam na Tabela 2.

Tabela 2. Alturas de chuva precipitada em um dia obtidas pelo método de Gumbel

Período de retorno (anos)	Variável reduzida y	Fator de frequência K	Alturas precipitadas (mm)
2	0,367	-0,151	112,11
5	1,500	0,883	142,77
10	2,250	1,568	163,06
15	2,674	1,954	174,51
20	2,970	2,224	182,53
25	3,199	2,433	188,70
50	3,902	3,074	207,73
75	4,311	3,447	218,78
100	4,600	3,711	226,61

Aplicando os coeficientes de desagregação da chuva (Tabela 1), obtém-se as intensidades médias máximas de chuva para diferentes durações e períodos de retorno, tais resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Intensidade (mm/h) obtida pela desagregação da chuva com os coeficientes da Cetesb

Duração t(min)	Intensidade (mm/h)								
	Período de retorno (anos)								
	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 15	Tr = 20	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100
5	162,07	206,38	235,72	252,27	263,86	272,79	300,29	316,27	327,59
10	128,70	163,89	187,19	200,33	209,54	216,63	238,47	251,16	260,14
15	111,22	141,63	161,77	173,13	181,08	187,21	206,08	217,05	224,81
20	96,53	122,92	140,39	150,25	157,15	162,47	178,85	188,37	195,11
25	86,75	110,47	126,18	135,04	141,24	146,02	160,74	169,30	175,36
30	79,45	101,17	115,55	123,66	129,34	133,72	147,20	155,04	160,58
60	53,68	68,36	78,07	83,56	87,39	90,35	99,46	104,75	108,50
360	15,34	19,53	22,31	23,87	24,97	25,81	28,42	29,93	31,00
480	12,46	15,87	18,12	19,40	20,29	20,97	23,09	24,32	25,19
600	10,48	13,35	15,24	16,31	17,06	17,64	19,42	20,45	21,18
720	9,05	11,53	13,17	14,09	14,74	15,24	16,77	17,67	18,30
1440	5,33	6,78	7,75	8,29	8,67	8,96	9,87	10,39	10,76

Em posse desses dados foi realizado o ajuste da equação IDF, dada pela expressão (6), onde a soma dos quadrados do desvio foi 1531,61 (mm/h)<sup>2</sup>, com o erro padrão da estimativa (EPE) de 7,68 mm/h. Dessa forma foram determinados os parâmetros obtendo assim a equação IDF apresentada a seguir:

$$i = \frac{1108,346T^{0,163}}{(t + 9,7870,724)} \quad (9)$$

O modelo alternativo propõe que a estimativa da altura e intensidade da chuva para diferentes durações seja dada pelas equações 13 e 14, respectivamente. Onde “t” é a duração da chuva (0 < t ≤ 1440 minutos).

$$h = \left( \frac{t}{27,9327 + 3,8346t^{0,7924c}} \right) \times P_{1\ dia} \quad (10)$$

$$i = \left( \frac{60}{27,9327 + 3,8346t^{0,7924c}} \right) \times P_{1\ dia} \quad (11)$$

Os termos da equação representam a relação entre a duração da chuva com “t” minutos e a precipitação máxima de um dia ( $P_t / P_{1\ dia}$ ). Essa relação é obtida a partir dos coeficientes de desagregação da precipitação de 98 locais diferentes do Brasil (Tabela 1) e, portanto, tem validade nacional. O modelo ajustado representa bem as relações da Tabela 1 obtendo  $R^2 = 0,9999$ . O uso da equação (11) forneceu uma soma dos quadrados do desvio de 85,32 ( $\text{mm/h}^2$ ) com o erro padrão da estimativa de 1,81 mm/h. Observa-se que método alternativo reduz significativamente os desvios entre a intensidade de chuva obtida pela desagregação (A partir dos coeficientes da CETESB) e a intensidade de chuva estimada pela equação tradicional, se mostrando assim como um método viável produzindo resultados satisfatórios.

## CONCLUSÃO

Utilizou-se dois métodos para determinação da equação IDF com objetivo de comparar os resultados finais da soma dos quadrados dos desvios e o erro padrão da estimativa das respectivas metodologias em relação aos resultados obtidos com a desagregação com os coeficientes da CETESB (Tabela 1). A princípio, o método tradicional, através da distribuição de Gumbel, para o município de Recife – PE, alcançou os seguintes parâmetros da equação de chuvas intensas:  $K = 1108,34$ ,  $m = 0,1625$ ,  $b_0 = 9,7868$  e  $n = 0,7242$ , obtendo-se assim um somatório do quadrado dos desvios de 1531,60 com o erro padrão da estimativa de 7,68. Para o método alternativo, os parâmetros são ajustados para todo o Brasil, modificando apenas a precipitação máxima de um dia, resultando num somatório do quadrado dos desvios de 85,31 com o erro padrão da estimativa de 1,81, demonstrando assim a eficácia do método alternativo em relação ao método tradicional. Por fim, nota-se que toda a metodologia aplicada neste trabalho para determinação das relações de intensidade, duração e frequência das chuvas intensas atingiu resultados satisfatórios, podendo ser aplicada na determinação das relações IDF para outras regiões, além de ratificar a efetividade do método alternativo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo Nº 465764/20142, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), processo Nº 88887.136369/2017-00 e da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), processo: APQ-0498-3.07/17, por

meio do projeto “Observatório Nacional da Dinâmica da Água e de Carbono no Bioma Caatinga (ONDACBC)”

## REFERÊNCIAS

- ARBOIT, N. K. S., MANCUSO, M. A., & FIOREZE, M. (2019). “*Ajuste de Equação IDF por Desagregação de Chuvas Diárias para o Município de Iraí, RS*”. Anuário do Instituto de Geociências, 40(3), 248-253.
- BACK, Á. J. (2020). “*Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation*”. *RBRH*, 25.
- BIELENKI JR, C., BRABASSA, A. P., DE MIRANDA, R. B., & MAUAD, F. F. (2016). “*Developing rainfall intensity–duration–frequency relationship with parametric adjustment model*”. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19.
- CARDOSO, C. O., ULLMANN, M. N., & BERTOL, I. (1998). “*Intense rainfall analysis from daily rainfall disaggregation of Lages and Campos Novos (Santa Catarina, Brazil)*”. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(1), 131-140.
- CHOW, V.T. (1964). “*Handbook of Applied Hydrology*”. New York, Mc Graw-Hill, Section 8:8-23 à 8-26,
- CTESB. (1986). “*Drenagem urbana: Manual de projeto*”. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, SP. 494p.
- DAMÉ, R.C.F.; TEIXEIRA-GANDRA, C.F.A.; GUEDES, H.A.S.; SILVA, G.M.; SILVEIRA, S.C.R. (2016). “*Intensity-duration-frequency relationships: stochastic modeling and disaggregation of daily rainfall in the Lagoa Mirim watershed, rio grande do sul, brazil*”. *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 3, p. 492-502.
- GONÇALVES, L. S. (2011). “*Relações Intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite*”. Master's dissertation, Universida Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre-RS.
- GUMBEL, E. J. (1958) “*Statistics of Extremes*”. New York: Columbia University Press, 375p.,

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de. (2007) “*Hidrologia Estatística*”. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 552 p.

MAMOON, A. A.; JOERGENSEN, N. E.; RAHMAN, A. QASEM, H. (2014) “*Derivation of new design rainfall in Qatar using L-moment based index frequency approach.*” International Journal of Sustainable Built Environment, v.3, n.1, p.111-118, 2014

PENNER, G. C.; LIMA, M. P. (2016) “*Comparação entre métodos de determinação da equação de chuvas intensas para a cidade de Ribeirão Preto*”. Geociências - Unesp, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 542-559.

PEREIRA, D. C.; DUARTE, L. R.; SARMENTO, A. P. (2017) “*Intensity-duration-frequency curves determination of Ipameri*” – Goiás. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Ipameri - Goiás, v. 13, n. 2, p. 233-246.

QAMAR, M. U.; AZMAT, M.; SHAHID, M. A.; GANORA, D.; AHMAD, S.; CHEEMA, M. J. M.; FAIZ, M. A.; SARWAR, A.; SHAFEEQUE, M.; KHAN, M.I. (2017) “*Rainfall Extremes: a Novel Modeling Approach for Regionalization*”, Water Resources Management, v.31, n.6, p.1975-1994, 2017.

SILVA, S. R.; ARAÚJO, G. R. de S. (2013); “*Algoritmo para determinação da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Geografia Física*”, v.6, n.5, p. 1371-1383, 2013.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de. (2018). “*Use intensity-duration-frequency equation of rainfall for Coreaú river basin (Ceará, Brasil)*”. Revista Eletrônica do Prodema, Fortaleza-Ce, v. 12, n. 1, p. 96-109, set. 2018.

TEODORO, P. E., NEIVOCK, M. P., MARQUES, J. R. F., FLORES, A. M. F., & BRAGA, C. (2014). “*Influência de diferentes coeficientes de desagregação na determinação de equações IDF para Aquidauana/MS*”. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 9(2).

TUCCI, C. E. M. (2013). “*Hidrologia: ciência e aplicação*” (4. ed., 943 p.). Porto Alegre: UFRGS.

VIEIRA, D.B.; LOMBARDI NETO, F.; SANTOS, R.P. (1998); Relação entre Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas em Mococa, SP. Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira, Campinas, v.33, n. 8, 1998.