

## DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO DA CIDADE DE ARAÇATUBA

Joyce Terassaka Dias, Erich Kellner

Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, joyceterassaka@gmail.com

### RESUMO

As equações de intensidade, duração e frequência de precipitação são extensivamente utilizadas em projetos hidráulicos, sendo essenciais para um dimensionamento adequado. No município de Araçatuba (SP), inexistente uma equação I-D-F definida, o que impede a utilização de equações existentes de cidades próximas pelos projetistas.

Neste trabalho, foi elaborada a equação I-D-F da cidade de Araçatuba a partir de 77 anos de dados brutos disponíveis pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE.

A série foi analisada estatisticamente, verificada quanto a dados discrepantes, assim como sua aderência à distribuição de Gumbel. Foi realizada comparação entre as intensidades de precipitação resultantes da equação obtida com valores de intensidade resultantes das equações I-D-F das cidades de Auriflora e São Paulo.

A variação das diferenças relativas ficou entre 0,50% até 141,25%. As diferenças foram mais elevadas à medida em que os períodos de retorno eram reduzidos, assim como as durações de precipitações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Equação I-D-F. Hidrologia. Sistemas de drenagem.

### INTRODUÇÃO

Os processos hidrológicos são essenciais para acompanhar e dar continuidades a processos dentro da engenharia em diferentes seguimentos, por isso, estudos de processos hidrológicos e hidrogeológicos em bacias hidrográficas são desenvolvidos detalhadamente por pesquisadores de diferentes instituições, onde se faz a utilização de bacias representativas e experimentais, ainda em quantidade pequena (REHISA, 2004).

Considerando estudos climáticos, a precipitação é uma das variáveis mais essenciais de uma região, isso se deve às consequências que o excesso de precipitação pode ocasionar, principalmente em chuvas intensas (SILVA et al., 2003; COSTA, SANTOS, OLIVEIRA, 2001).

Dado isso, há necessidade de um acompanhamento e estudo para se obter dados de vazão, isso porque é essencial para o dimensionamento de obras hidráulicas, como barragens, drenagens agrícolas, urbanas e de rodovias, além de desvio de cursos d'água e práticas mecânicas de controle de erosão hídrica, entre outros seguimentos da engenharia (DAMÉ, 2006).

A vazão de um projeto de engenharia quando não se tem dados históricos pode ser conhecido através do estudo de chuvas intensas da região. Esse estudo é atendido de forma pontual, utilizando equações do tipo intensidade-duração-frequência (equações de chuvas intensas), que são derivadas de pluviógrafos específicos da região a ser estudada (CECÍLIO, PRUSKI, 2003). Todavia, alguns pontos de dificuldade envolvendo a equação está na inexistência da equação na localidade onde se fará o projeto, além de um trabalho exaustivo de análise, interpretação e codificação de grandes quantidades de dados (CECÍLIO, PRUSKI, 2003; GARCIA et al., 2011).

A equação de chuva é obtida a partir de dados de precipitações pluviiais passados, como por exemplo, séries históricas anuais. Porém, com o passar dos anos existem indícios de que os dados pluviiais podem sofrer alterações por motivos diversos, tornando a equação de chuva distante da realidade e implicando em dimensionamentos imprecisos das obras hidráulicas públicas, conforme apontado por Zuffo (2004).

Segundo Svensson, Clarke e Jones (2007) a equação IDF necessita de registros de precipitação acumulados em períodos mais curtos do que um dia, quando a aplicação é para pequenas bacias e ou urbanas.

Assim, é fundamental a adequação da equação IDF de acordo com as estações meteorológicas providas de dados pluviométricos, ou seja, é necessário o ajuste da metodologia para que a determinação da equação seja realizada a partir dos dados pluviométricos, considerando a maior disponibilidade da estação e o maior tempo de observações (MELLO et al., 2001).

Considerando as chuvas intensas e a equação IDF, esse estudo tem por finalidade a determinação da equação do município de Araçatuba, São Paulo, visto que costumemente são utilizadas equações de cidades próximas o que pode não refletir a realidade do regime de chuvas, dada a diversidade das características de relevo, uso do solo, regime de chuvas, dentre outros fatores.

Para tanto, o estudo contará com um referencial teórico para abordar as séries históricas, a relação intensidade, duração e frequência; a precipitação média em uma bacia; o tempo de concentração; bem como a frequência e tempo de retorno. Além disso, para a composição prática do estudo, será feito a obtenção dos dados pluviométricos; preparação dos dados a serem analisados; análises estatísticas dos dados adquiridos; verificação de Outliers; verificação de aderência da série pluviométrica à curva de Gumbel; obtenção da equação IDF; além da determinação da constante "c"; "A" e "d", "a" e "b" e a comparação das equações adquiridas.

## OBJETIVOS

A determinação da equação de intensidade, duração e frequência da cidade de Araçatuba e comparação com equações da cidade de São Paulo e Auriflama.

## METODOLOGIA

A equação Intensidade-Duração-Frequência (I-D-F) é um instrumento que permite ao profissional estimar a intensidade de chuva a partir de uma duração (tempo de chuva) e frequência (tempo de retorno) pré-determinados, segundo Wilken (1978).

Segundo Wilken (1978), as relações entre intensidade, duração e frequência das chuvas intensas devem ser deduzidas a partir de observações das chuvas durante um longo período de tempo para que seja possível aceitar as frequências como probabilidades. Essas relações se traduzem em curvas de intensidade-duração para uma determinada frequência, todas com caráter regular.

As relações estabelecidas variam entre cada localidade, portanto devem ser feitas com base nos dados pluviométricos disponíveis para uma determinada região e devem ser revisadas periodicamente à medida que se acumulam novos dados pluviométricos.

De acordo com a teoria dos valores extremos, à medida que o número de observações cresce, os valores máximos anuais se aproximam de uma distribuição de frequência.

A fórmula de Chow associa o valor de precipitação ao período de retorno, como se observa pela equação 1.

$$P_T = \bar{P} + K \times \sigma_x \quad \text{equação (1)}$$

Sendo:

$P_T$ : o valor da variável precipitação, em mm, associada ao período de retorno T, em anos;

$\bar{P}$ : a precipitação média das amostras, em mm;

$K$ : o fator de frequência, proporcional ao número de dados e a período de retorno;

$\sigma_x$ : o desvio padrão das amostras.

A distribuição de Gumbel permite a obtenção de um valor teórico para K considerando tamanho infinito para a amostra, conforme apresentado na equação 2.

$$K = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \times \left\{ \varepsilon + \ln \left[ \ln \left( \frac{T_R}{T_R - 1} \right) \right] \right\} \quad \text{equação (2)}$$

Sendo:

$\varepsilon$ : a constante de Euler ( $\sim 0,5772$ );

$T_R$ : o período de retorno esperado, em anos.

Segundo Pinheiro (2013), a distribuição de valor extremo ou Gumbel é amplamente utilizada na modelagem de fenômenos da natureza, pois estes têm sido cada vez mais comuns e intensos. Ainda, segundo a pesquisadora, a qualidade do ajuste desta distribuição pode ser pobre em função da presença de outliers.

Com intuito de maximizar a qualidade do ajuste, Subramanya (2013) propôs modelo para o fator K; que leva em consideração o tamanho finito da amostra analisada, conforme representado pela equação 3.

$$K = \frac{-\left\{ \ln \left[ \ln \left( \frac{T_R}{T_R - 1} \right) \right] \right\} - y_n}{\sigma_n} \quad \text{equação (3)}$$

Onde  $y_n$  é a média reduzida e  $\sigma_n$  é o desvio padrão reduzido, ambos relativos ao tamanho da amostra.

A Tabela 1 apresenta os valores da média reduzida  $y_n$  e a Tabela 1 reúne os valores do desvio padrão reduzido  $\sigma_n$ , ambos relativos ao tamanho da amostra.

**Tabela 1: Valores da média reduzida  $y_n$  para o método de Gumbel em função do tamanho da amostra N**

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,4952	0,4996	0,5035	0,5070	0,5100	0,5128	0,5157	0,5181	0,5202	0,5220
20	0,5236	0,5252	0,5268	0,5283	0,5296	0,5309	0,5320	0,5332	0,5343	0,5353
30	0,5362	0,5371	0,5380	0,5388	0,5396	0,5402	0,5410	0,5418	0,5424	0,5430

40	0,5436	0,5442	0,5448	0,5453	0,5458	0,5463	0,5468	0,5473	0,5477	0,5481
50	0,5485	0,5489	0,5493	0,5497	0,5501	0,5504	0,5508	0,5511	0,5515	0,5518
60	0,5521	0,5524	0,5527	0,5530	0,5533	0,5535	0,5538	0,5540	0,5543	0,5545
70	0,5548	0,5550	0,5552	0,5555	0,5557	0,5559	0,5561	0,5563	0,5565	0,5567
80	0,5569	0,5570	0,5572	0,5574	0,5576	0,5578	0,5580	0,5581	0,5583	0,5585
90	0,5586	0,5587	0,5589	0,5591	0,5592	0,5593	0,5595	0,5596	0,5598	0,5599
100	0,5600	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Subramanya (2013)

**Tabela 2: Valores do desvio padrão reduzido  $\sigma_n$  para o método de Gumbel em função do tamanho da amostra N**

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,9496	0,9676	0,9833	0,9971	1,0095	1,0206	1,0316	1,0411	1,0493	1,0565
20	1,0628	1,0696	1,0754	1,0811	1,0864	1,0915	1,0961	1,1004	1,1047	1,1086
30	1,1124	1,1159	1,1193	1,1226	1,1255	1,1285	1,1313	1,1339	1,1363	1,1388
40	1,1413	1,1436	1,1458	1,1480	1,1499	1,1519	1,1538	1,1557	1,1574	1,1590
50	1,1607	1,1623	1,1638	1,1658	1,1667	1,1681	1,1696	1,1708	1,1721	1,1734
60	1,1747	1,1759	1,1770	1,1782	1,1793	1,1803	1,1814	1,1824	1,1834	1,1844
70	1,1854	1,1863	1,1873	1,1881	1,1890	1,1898	1,1906	1,1915	1,1923	1,1930
80	1,1938	1,1945	1,1953	1,1959	1,1967	1,1973	1,1980	1,1987	1,1994	1,2001
90	1,2007	1,2013	1,2020	1,2026	1,2032	1,2038	1,2044	1,2049	1,2055	1,2060
100	1,2065	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Subramanya (2013)

Após a verificação da ocorrência de outliers e da determinação da série pluviométrica a ser considerada, os dados foram dispostos em ordem decrescente e foram calculadas a probabilidade de ocorrência e o período de retorno ( $T_R$ ) equivalente de acordo com as Equações 4 e 5 respectivamente, sendo construído o gráfico da máxima precipitação em função do período de retorno.

$$p = \frac{m}{n+1} \quad \text{equação (4)}$$

Sendo:

p: a probabilidade acumulada de um evento ser igualado ou superado em magnitude.

m: o número de ordem.

n: o número de anos de registro considerado.

A equação 3.5 diz respeito ao tempo de retorno.

$$T_R = \frac{1}{p} \quad \text{equação (5)}$$

Sendo:

TR: o tempo de retorno, em anos.

A partir da média e desvio padrão da série pluviométrica considerada e dos valores  $y_n$  e  $\sigma_n$  obtidos das Tabelas 1 e 2, foram calculados os valores de K de Gumbel, para determinação dos períodos de retorno, conforme Equação 3.

Com os valores de K de Gumbel, obtiveram-se as precipitações máximas de Gumbel, conforme a Equação 1, sendo construído gráfico da máxima precipitação de Gumbel em função do período de retorno.

Foi construído o gráfico Precipitação Máxima Observada versus Precipitação Máxima de Gumbel, sendo então analisado o coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ).

Ao conjunto de dados válidos relativos às máximas precipitações diárias, foram aplicados os fatores de conversão de precipitações diárias para precipitações de 24h, 12h, 1h, 30min, 15min, 10min, 5min, conforme Tabela 4, proposta por Tomaz (2002).

**Tabela 3: Fatores de conversão da precipitação de um dia para diferentes tipos de precipitação.**

Relação entre alturas pluviométricas	5min/ 30min	10min/ 30min	15min/ 30min	20min/ 30min	25min/ 30min	30min/ 1h	1h/ 24h	6h/ 24h	8h/ 24h	10h/ 24h	12h/ 24h	24h/ 1dia
Fator de relação entre chuvas	0,340	0,532	0,693	0,817	0,918	0,768	0,573	0,780	0,821	0,855	0,883	1,140

Fonte: adaptado de Tomaz (2002)

Após a análise dos dados, foi estabelecida uma relação matemática entre as três variáveis que regem a equação: intensidade, duração e o tempo de retorno ou frequência.

O formato geral de uma equação I-D-F é apresentado na equação 6.

$$I = \frac{a \times T_R^b}{(t+c)^d} \quad \text{equação (6)}$$

Sendo:

a, b, c e d: constantes a serem determinadas pelo método dos mínimos quadrados;

$T_R$ : o período de retorno, em anos;

I: a intensidade de chuva, em mm/min.

De acordo com Wilken (1978), para o cálculo da constante c aplica-se o método de Fair-Geyer, que pressupõe a ocorrência de um evento a cada N/5 anos. Dessa maneira, o período de retorno foi fixado para a determinação da constante c, de acordo com a equação 7.

$$T_R = \frac{N}{5} \quad \text{equação (7)}$$

Sendo N o número de observações utilizado.

A definição do parâmetro “A” é obtida pela aplicação da equação 8.

$$A = a \times T_R^b \quad \text{equação (8)}$$

Substituindo a equação 7 em 6, tem-se a equação 9.

$$I = \frac{A}{(t+c)^d} \quad \text{equação (9)}$$

Em seguida foi plotado um gráfico bilogarítmico das durações de chuva em função das intensidades de chuva. Nesse gráfico, foram denominados os pontos (I1, t1) e (I2, t2) como sendo os pontos inicial e final da curva, respectivamente. Também foi determinado a partir desta curva o ponto (I3, t3), que possui relação de intensidade conforme a equação 10.

$$I_3 = \sqrt{I_1 \times I_2} \quad \text{equação (10)}$$

Substituindo-se o valor da intensidade da equação 9 na equação 10, obtém-se a equação 11.

$$\frac{A}{(t_3+c)^d} = \sqrt{\frac{A}{(t_1+c)^d} \times \frac{A}{(t_2+c)^d}} \quad \text{equação (11)}$$

Isolando a constante “c”, dá-se origem à equação 12.

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 \times t_2}{t_1 + t_2 - 2 \times t_3} \quad \text{equação (12)}$$

Para verificação do valor da constante “c”, foi plotado um novo gráfico, considerando intensidade em função da duração de chuva, porém com a duração deslocada de c, ou seja, (t+c, I). É esperado que os pontos resultantes se aproximem de uma reta.

No gráfico das intensidades em função das durações deslocadas (t+c, I), os pontos possuem a configuração de uma reta. Essa reta possui coeficiente linear igual a “log(A)” e coeficiente angular igual a “-d”. Essa conclusão é obtida ao se aplicar logaritmo dos dois lados da equação 4.6, originando a equação 13.

$$\log I = \log A - d \times \log(t + c) \quad \text{equação (13)}$$

A partir dessa equação, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para a determinação dos valores de “A” e “d”.

As constantes a e b foram determinadas de modo análogo ao item anterior. Foi aplicado logaritmo nos dois lados da equação 8, gerando a equação 14.

$$\log A = \log a + b \times \log(T_r) \quad \text{equação (14)}$$

Os valores de log A foram obtidos no item anterior e analogamente, os valores de a e b foram determinados através do método dos mínimos quadrados.

## RESULTADOS

Escolheu-se a estação pluviométrica C7-009, cujos dados foram obtidos do DAEE através do endereço eletrônico <http://www.hidrologia.daece.sp.gov.br/>. Ainda que houvesse estações pluviométricas nas proximidades e que pudessem aplicar dados para correção de falhas, optou-se por não o fazer a fim de se trabalhar com os dados reais obtidos na Estação Pluviométrica escolhida.

O conjunto bruto de dados da estação pluviométrica C7-009, possui 78 dados compreendidos entre o período de 01/06/1943 e 31/12/2020, ao se aplicar os critérios de eliminação resultou em um conjunto de 62 dados, referentes à máxima precipitação diária em um determinado ano.

Foram desconsiderados os dados cujos anos apresentou um total de falhas de registros maiores que 10 ou que apresentaram falhas de registro durante o período chuvoso.

**Tabela 4: Máximas precipitações diárias consideradas válidas**

Ano	Data da Máxima Ocorrência	Máxima Precipitação Diária (mm)	Ano	Data da Máxima Ocorrência	Máxima Precipitação Diária (mm)	Ano	Data da Máxima Ocorrência	Máxima Precipitação Diária (mm)
1944	18/02/1944	82,50	1965	06/03/1965	72,00	1986	05/03/1986	77,20
1945	20/03/1945	78,00	1966	20/12/1966	67,00	1987	07/11/1987	105,10
1946	12/03/1946	52,00	1967	18/01/1967	79,00	1988	24/02/1988	72,70
1947	18/09/1947	63,00	1968	28/11/1968	135,00	1989	05/01/1989	130,00
1948	15/01/1948	117,00	1969	12/11/1969	71,00	1990	21/03/1990	89,50
1949	20/02/1949	73,50	1970	16/02/1970	84,50	1991	04/01/1991	78,40
1950	24/01/1950	65,00	1971	28/03/1971	60,00	1992	04/02/1992	185,70
1951	25/01/1951	180,00	1972	07/02/1972	67,20	1993	29/03/1993	68,80
1953	30/01/1953	68,00	1973	12/04/1973	108,40	1994	31/01/1994	89,00
1954	08/05/1954	82,00	1974	15/03/1974	51,00	1995	04/01/1995	99,80
1955	15/04/1955	58,00	1975	26/11/1975	95,20	1996	02/03/1996	78,00
1956	26/05/1956	66,00	1976	20/03/1976	80,30	1997	06/06/1997	92,70
1957	19/11/1957	71,00	1977	02/12/1977	78,00	1998	16/10/1998	87,90
1958	25/01/1958	90,00	1978	18/10/1978	77,10	1999	08/01/1999	117,10
1959	19/01/1959	79,00	1979	05/04/1979	71,00	2000	04/02/2000	123,70
1960	21/03/1960	100,00	1980	12/02/1980	55,70	2001	02/10/2001	63,80
1961	23/02/1961	73,00	1981	08/11/1981	75,80	2002	09/02/2002	68,40
1962	11/12/1962	61,00	1983	13/01/1983	74,80	2004	10/01/2004	103,20
1963	18/01/1963	40,00	1984	21/01/1984	59,80	2005	22/10/2005	68,80
1964	04/11/1964	70,00	1985	23/02/1985	46,40	2006	09/02/2006	95,00
						2009	30/12/2009	99,00
						2010	16/11/2010	64,10

Para as 62 precipitações máximas que não foram eliminadas pelos critérios explicitados, foram aplicados os procedimentos para a avaliação da ocorrência de outlier, conforme proposto por Pinheiro (2013), no conjunto de dados não foi observada a ocorrência de outlier.

Para a determinação da série, as precipitações foram ordenadas em ordem decrescente e foi definida a probabilidade de ocorrência e o período de retorno ( $T_R$ ) de acordo com as equações 4 e 5, respectivamente. Em seguida, foram determinados os valores K de Gumbel equação 3, utilizando-se dos valores  $y_n=0,5527$  e  $\sigma_n=1,177$  obtidos das Tabelas 1 e 2, para uma série com 62 anos. Por fim foram determinadas as precipitações máximas de Gumbel (PT), conforme equação 1. A Tabela 5 apresenta os valores considerados para a construção do Modelo de Gumbel.

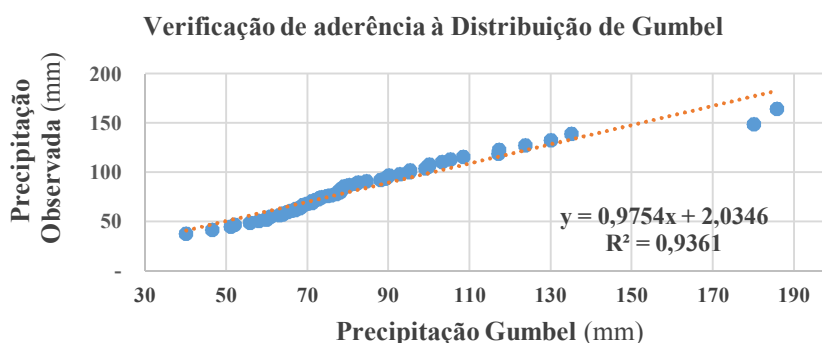
**Tabela 5: Parâmetros obtidos a partir do modelo de Gumbel**

Ordem	Máxima Precipitação Diária (mm)	Frequência de ocorrência (dec.)	Período de Retorno – TR (anos)	K	Precipitação calculada por Gumbel-PT (mm)
1	185,70	0,015873	63,000	3,043709	164,84
2	180,00	0,031746	31,500	2,447919	148,79
3	135,00	0,047619	21,000	2,096454	139,32
4	130,00	0,063492	15,750	1,844963	132,55
5	123,70	0,079365	12,600	1,648204	127,25
6	117,10	0,095238	10,500	1,486025	122,88
7	117,00	0,111111	9,000	1,347673	119,15
8	108,40	0,126984	7,875	1,22673	115,89
9	105,10	0,142857	7,000	1,119052	112,99
10	103,20	0,158730	6,300	1,021812	110,37
11	100,00	0,174603	5,727	0,932989	107,98
12	99,80	0,190476	5,250	0,85109	105,77
13	99,00	0,206349	4,846	0,774982	103,72
14	95,20	0,222222	4,500	0,703781	101,80
15	95,00	0,238095	4,200	0,636786	100,00
16	92,70	0,253968	3,938	0,57343	98,29
17	90,00	0,269841	3,706	0,513248	96,67
18	89,50	0,285714	3,500	0,455854	95,12
19	89,00	0,301587	3,316	0,400923	93,64
20	87,90	0,317460	3,150	0,348178	92,22
21	84,50	0,333333	3,000	0,297384	90,85
22	82,50	0,349206	2,864	0,248333	89,53
23	82,00	0,365079	2,739	0,200846	88,25
24	80,30	0,380952	2,625	0,154765	87,01
25	79,00	0,396825	2,520	0,10995	85,80
26	79,00	0,412698	2,423	0,066274	84,63
27	78,40	0,428571	2,333	0,023623	83,48
28	78,00	0,444444	2,250	-0,018104	82,35
29	78,00	0,460317	2,172	-0,059004	81,25
30	78,00	0,476190	2,100	-0,099163	80,17
31	77,20	0,492063	2,032	-0,138662	79,10
32	77,10	0,507937	1,969	-0,177577	78,06
33	75,80	0,523810	1,909	-0,215981	77,02
34	74,80	0,539683	1,853	-0,253942	76,00

35	73,50	0,555556	1,800	-0,291527	74,99
36	73,00	0,571429	1,750	-0,32888	73,98
37	72,70	0,587302	1,703	-0,365825	72,98
38	72,00	0,603175	1,658	-0,402665	71,99
39	71,00	0,619048	1,615	-0,439385	71,00
40	71,00	0,634921	1,575	-0,476051	70,01
41	71,00	0,650794	1,537	-0,512728	69,03
42	70,00	0,666667	1,500	-0,549488	68,04
43	68,80	0,682540	1,465	-0,586407	67,04
44	68,80	0,698413	1,432	-0,623563	66,04
45	68,40	0,714286	1,400	-0,661046	65,03
46	68,00	0,730159	1,370	-0,698953	64,01
47	67,20	0,746032	1,340	-0,737391	62,97
48	67,00	0,761905	1,313	-0,776486	61,92
49	66,00	0,777778	1,286	-0,81638	60,85
50	65,00	0,793651	1,260	-0,857244	59,75
51	64,10	0,809524	1,235	-0,899277	58,61
52	63,80	0,825397	1,212	-0,942729	57,44
53	63,00	0,841270	1,189	-0,987905	56,22
54	61,00	0,857143	1,167	-1,035199	54,95
55	60,00	0,873016	1,145	-1,085129	53,61
56	59,80	0,888889	1,125	-1,138398	52,17
57	58,00	0,904762	1,105	-1,196007	50,62
58	55,70	0,920635	1,086	-1,259456	48,91
59	52,00	0,936508	1,068	-1,331168	46,98
60	51,00	0,952381	1,050	-1,4155	44,70
61	46,40	0,968254	1,033	-1,521725	41,84
62	40,00	0,984127	1,016	-1,677275	37,65

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, foram construídos dois gráficos para avaliação do comportamento das precipitações e verificação da aderência da série ao modelo de Gumbel, conforme apresentados nas Figuras 1 e 2.

**Figura 1: Comparação entre as precipitações máximas diárias observadas e aquelas previstas pelo modelo de Gumbel**

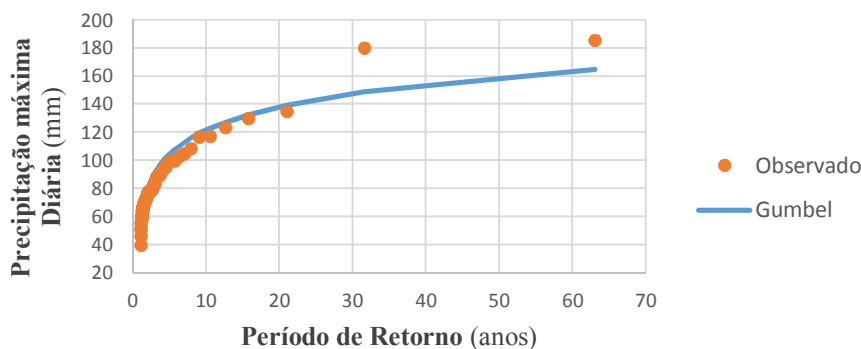


Na Figura 1, onde foram plotados os valores das precipitações máximas diárias observadas pelas precipitações máximas diárias previstas pelo modelo de Gumbel, verificou-se a aderência linear, resultando o gráfico em uma reta com inclinação próxima de 45°. A variável  $R^2$  encontrada foi de 0,9362 e o coeficiente angular da reta aproximada é igual a 0,9754. O ângulo cuja tangente se aproxima de 0,9754 é 44,287°. Como o valor de  $R^2$  foi próximo de um, determinando um bom

ajuste ao conjunto de pontos e a reta obtida tem inclinação próxima à inclinação esperada de 45°, admitiu-se que a Série Pluviométrica observada tem boa aderência à série teórica de Gumbel.

A Figura 2 apresenta o gráfico entre as precipitações máximas diárias observadas e aquelas produzidas pelo modelo de Gumbel em função do período de retorno –  $T_R$ .

**Figura 2: Precipitações Máximas Diárias observadas e aquelas previstas pelo modelo de Gumbel em função do período de retorno ( $T_R$ )**



Tanto pela observação do gráfico da Figura 1 quanto pelo gráfico apresentado na Figura 2 percebe-se que há 2 pontos que não se ajustaram ao modelo de Gumbel. A partir da Figura 2 pode-se verificar que o modelo de previsão de Gumbel permite um ajuste adequado considerando períodos de retorno ( $T_R$ ) de até 20 anos, devido ao número de elementos constantes do conjunto de dados analisados. Para obtenção da equação I-D-F, surge a necessidade de se transformar as precipitações máximas em intensidades de chuva. Deseja-se também que a equação tenha uma boa abrangência de durações de chuva e de períodos de retorno. Portanto, considerando a boa aderência da Série Pluviométrica com a série de Gumbel, esta última foi utilizada para a determinação das precipitações máximas diárias referentes a períodos de retorno variando de 5 até 100 anos, incluindo os valores correspondentes para período de retorno próximo a  $N/5$ , ou seja, 12 anos.

As precipitações máximas e os valores da constante K compõem a Tabela 6.

**Tabela 6: Precipitações máximas diárias de Gumbel para diferentes períodos de retorno**

$T_R$ (anos)	K	$P_T$ (mm)
5	0,80479	104,52
10	1,44237	121,70
12	1,60494	126,08
20	2,05395	138,18
50	2,84557	159,50
100	3,43878	175,47

As precipitações obtidas na Tabela 6 são as máximas precipitações diárias. Foram aplicados a esses valores os fatores de conversão resumidos na Tabela 3 para a conversão dessas precipitações diárias em precipitações de 24h, 12h, 1h, 30min, 15min, 10min e 5 min. As novas precipitações obtidas são mostradas na Tabela 7.

**Tabela 7: Precipitações máximas diárias convertidas para diferentes durações de chuva**

$T_R$ (anos)	5 anos	10 anos	12 anos	20 anos	50 anos	100 anos
<b>Tempo</b>						
<b>1 dia</b>	104,52	121,70	126,08	138,18	159,50	175,65
<b>24 h</b>	119,16	138,74	143,73	157,52	181,83	200,05
<b>12 h</b>	105,21	122,51	126,91	139,09	160,56	176,65
<b>1 h</b>	68,28	79,50	82,36	90,26	104,19	114,63
<b>30 min</b>	50,52	58,83	60,95	66,79	77,10	84,83
<b>15 min</b>	35,01	40,77	42,24	46,29	53,43	58,78
<b>10 min</b>	26,88	31,30	32,42	35,53	41,02	45,13
<b>5 min</b>	17,18	20,00	20,72	22,71	26,21	28,84



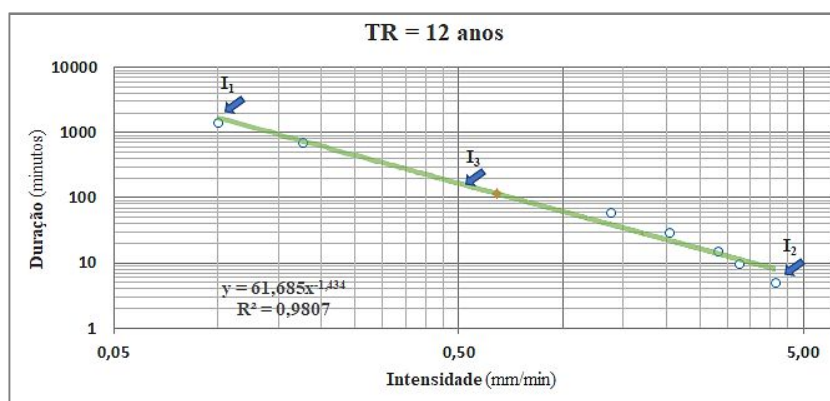
Para a determinação da constante  $c$  da equação geral IDF, foi fixado o tempo de retorno conforme o número de observações utilizado, de acordo com a equação 7. Como foram utilizadas 62 precipitações máximas observadas, o tempo de retorno foi fixado em 12 anos. Da Tabela 7, têm-se as precipitações para várias durações de chuva calculadas para um tempo de retorno de 12 anos. Na Tabela 8, essas precipitações foram transformadas em intensidades de chuva.

**Tabela 8: Intensidades de chuva para um período de retorno de 12 anos**

Tempo de retorno: 12 anos		
$P_T$ (mm)	$t$ (min)	$I$ (mm/min)
143,73	1440	0,100
126,91	720	0,176
82,36	60	1,373
60,94	30	2,031
42,23	15	2,816
32,42	10	3,242
20,72	5	4,144

A Figura 4 foi obtida a partir dos dados da Tabela 8.

**Figura 3: Gráfico bi-logaritmo da intensidade em função do tempo de chuva**



Foram determinados os pontos ( $I_1$ ,  $t_1$ ) e ( $I_2$ ,  $t_2$ ) como sendo os extremos da Figura 3. A intensidade  $I_3$  foi obtida obedecendo à relação de intensidade descrita na Equação 10. Em seguida, foi determinada a duração  $t_3$  a partir da Figura 3. Os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 9.

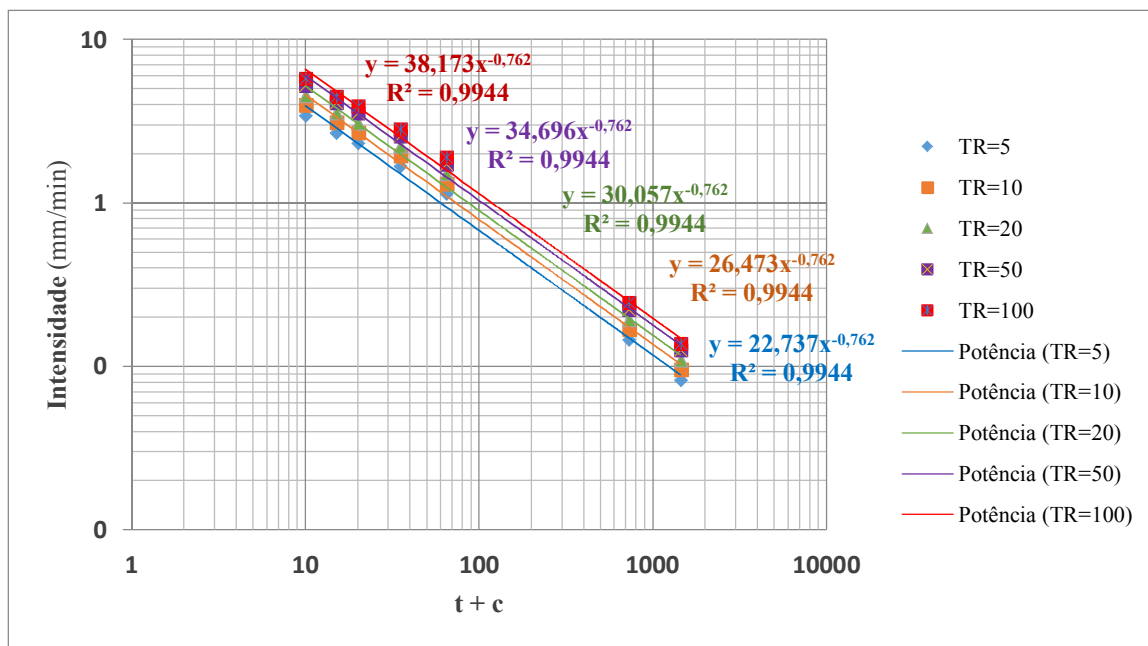
**Tabela 9: Parâmetros para a determinação da constante  $c$**

	$I$ (mm/min)	$t$ (min)
1	4,14	5
2	0,100	1440
3	0,643	116,16

Inserindo os parâmetros da Tabela 9 na Equação 12, foi calculada a constante  $c$  igual a 5,19. Como a constante  $c$  dentro da equação I-D-F é somada à duração de chuva e as durações de chuva costumam ser números inteiros, ela foi arredondada para 5.

De modo análogo à Tabela 8, foram transformadas em intensidades todas as precipitações de todos os tempos de retorno contidos na Tabela 7. A partir disso, foram plotados os gráficos das intensidades de chuva em função das durações deslocadas pela constante  $c$ , ou seja, ( $t+c$ ,  $I$ ).

**Figura 4:** Gráficos bilogartítmicos da intensidade de chuva em função de (t+c), para os períodos de retorno (TR) de 5, 10, 12, 20,50 e 100 anos



Ao se avaliar os gráficos apresentados na Figura 4, percebe-se que, para todos os períodos de retorno analisados, a potência obtida nos ajustes de  $1/(t+c)$  foi de 0,762, o valor está caracterizado como a constante d da equação IDF.

Da mesma maneira, ao se observar os gráficos apresentados na Figura 4, percebe-se que para cada período de retorno analisado, resultou um parâmetro A, multiplicativo de  $1/(t+c)$ . Tais valores estão apresentados na Tabela 10.

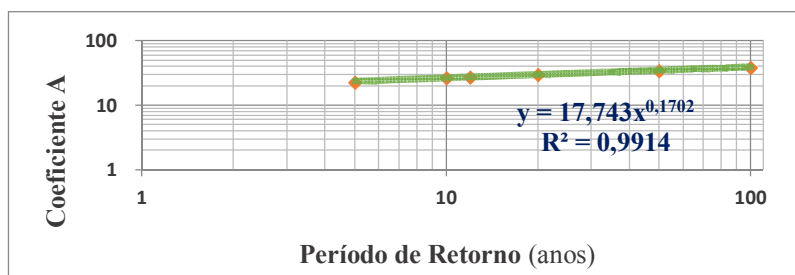
**Tabela 10:** Valores das constantes A para vários períodos de retorno (TR)

TR (anos)	Parâmetro A
5	22,737
10	26,473
12	27,426
20	30,057
50	34,696
100	38,173

Nota-se que devido ao ajuste realizado aos pontos (t+c, I) pelo software Excel, cada gráfico fornece diretamente os valores das constantes A e d. Para a determinação das constantes a e b, foram utilizados os valores obtidos no item anterior para o parâmetro A e o respectivo tempo de retorno, conforme apresentado na Tabela 10.

A partir desses valores foi elaborado gráfico bilogartítmico, considerando o parâmetro A em função do tempo de retorno, conforme mostrado na Figura 10.

**Figura 15:** Gráfico bilogartítmico do parâmetro A em função do período de retorno (TR)



Por analogia à equação geral IDF, representada pela Equação 14, tem-se que os parâmetros  $a = 17,743$  e  $b = 0,1702$ .

Substituindo-se as constantes da equação 6 pelos valores determinados, tem origem a relação I-D-F para a cidade de Araçatuba (SP), conforme equação 15.

$$I = \frac{17,743 \times T_R^{0,17}}{(t+5)^{0,762}} \quad \text{equação (15)}$$

Sendo I a intensidade (mm/min);  $T_R$  o período de retorno (anos), t o tempo de chuva (min).

Após a determinação da equação I-D-F com os dados de precipitação da cidade de Araçatuba, comparou-se com aquelas definidas pelo DAEE (2016) para as cidades de Auriflana, equação 16 e São Paulo, equação 17.

$$i, t, T = 20,72 (t + 20)^{-0,8052} + 13,71 (t + 20)^{-0,89147} [-0,4804 - 0,8896 \ln \ln(T/T - 1)] \quad \text{equação (16)}$$

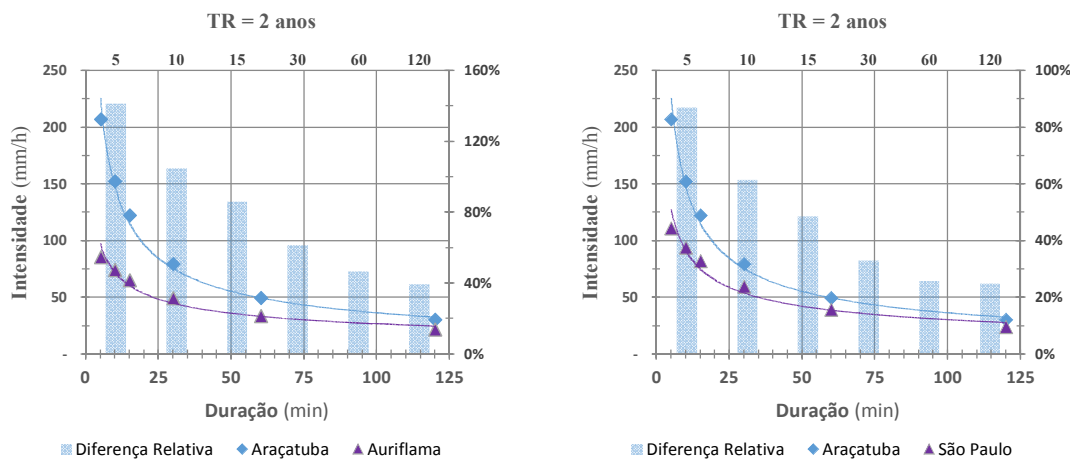
$$i, t, T = 32,77 (t + 20)^{-0,8780} + 16,10 (t + 30)^{-0,9306} [-0,4692 - 0,8474 \ln \ln(T/T - 1)] \quad \text{equação (17)}$$

Calcularam-se as intensidades de precipitação a partir das equações 15, 16 e 17 para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20 e 25 anos e posteriormente definidas as diferenças relativas, conforme equações 18 e 19.

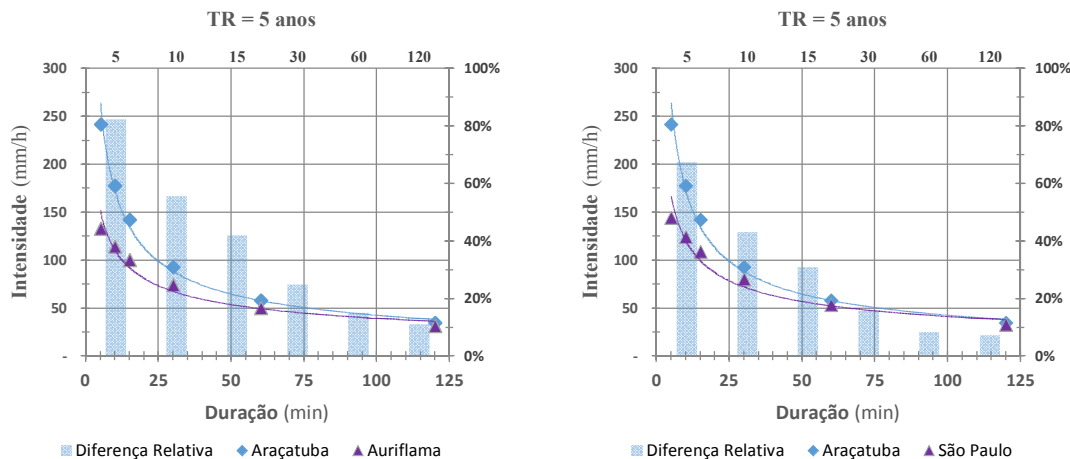
$$D = \frac{I_{\text{Araçatuba}} - I_{\text{São Paulo}}}{I_{\text{São Paulo}}} \times 100 \quad \text{equação (18)}$$

$$D = \frac{I_{\text{Araçatuba}} - I_{\text{Auriflana}}}{I_{\text{Auriflana}}} \times 100 \quad \text{equação (19)}$$

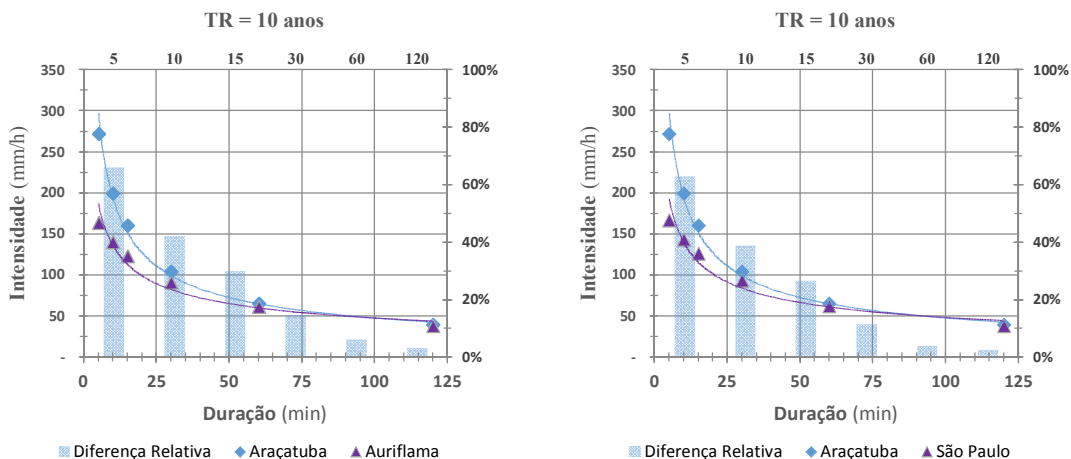
**Comparação entre os resultados da equações I-D-F de Araçatuba com os resultados das equações de Auriflana e São Paulo para os períodos de retorno de: a) 2 anos; b) 5 anos; c) 10 anos; d) 15 anos; e) 20 anos; f) 25 anos.**



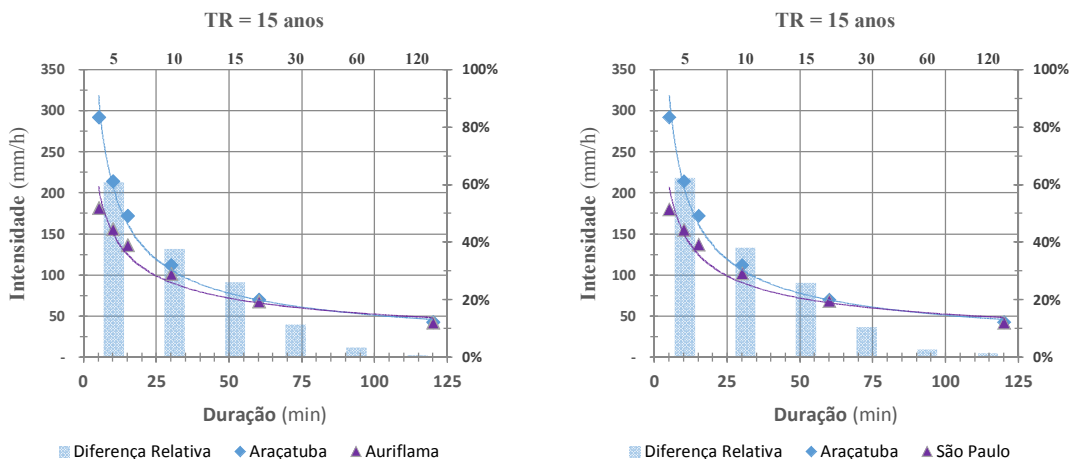
**Figura 16 – Valores de intensidade para o período de retorno de 2 anos**



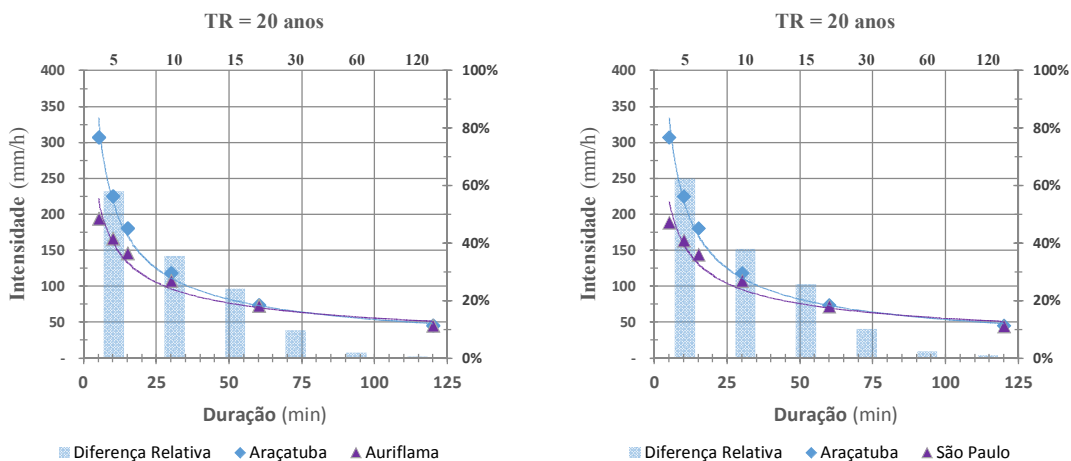
**Figura 17 – Valores de intensidade para o período de retorno de 5 anos**



**Figura 18 – Valores de intensidade para o período de retorno de 10 anos**



**Figura 19 – Valores de intensidade para o período de retorno de 15 anos**



**Figura 20 – Valores de intensidade para o período de retorno de 20 anos**

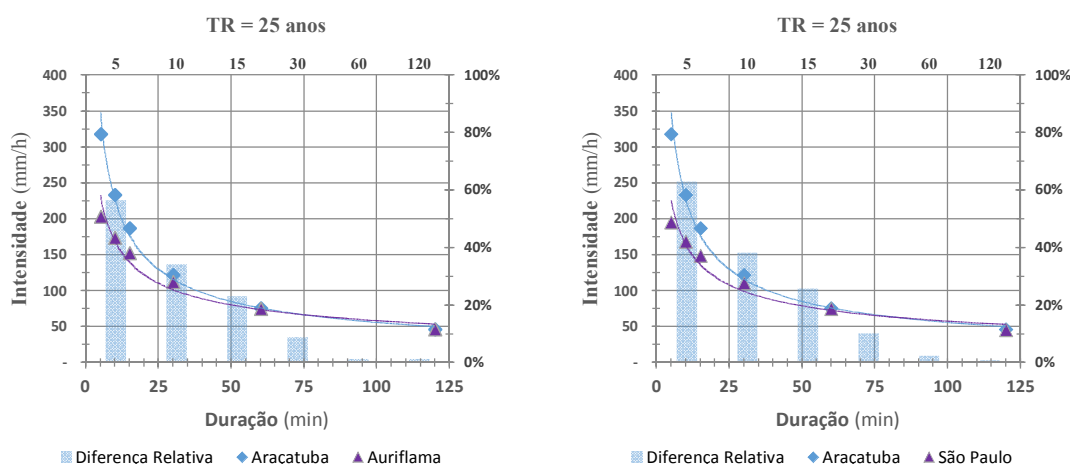


Figura 21 – Valores de intensidade para o período de retorno de 25 anos

Equação obtida para a cidade de Araçatuba resultou em valores de intensidade de precipitação superiores aos obtidos pelas equações da cidade de Auriflama e São Paulo, sendo que as diferenças relativas obtidas pelas equações 18 e 19, tendem a reduzir quanto maior for o período de retorno, assim como a duração de precipitação.

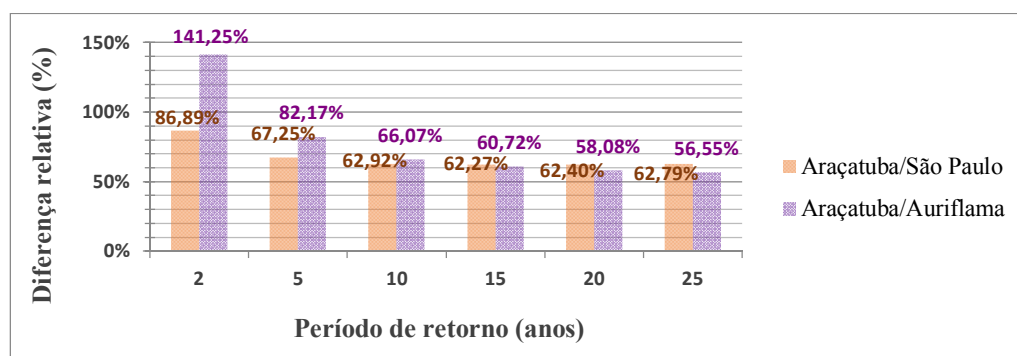


Figura 22 - Comparação das maiores diferenças relativas encontradas entre Araçatuba/São Paulo e Araçatuba/Auriflama

## CONCLUSÃO

Os dados pluviométricos da cidade de Araçatuba (SP), obtidos da Estação C7-009 disponibilizadas pelo DAEE, resultou em uma série válida com 62 anos de dados disponíveis.

Do total de 78 anos de dados foram desconsiderados 16 anos. Os anos de 2020, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015, 2014, 2013, 2012 e 2008 foram retirados por possuírem quantidade de falhas de leitura superiores a 10 dias. Da mesma forma, os anos de 2011, 2007, 2003 e 1982 por haver falha durante o período chuvoso (novembro à março) e os anos de 1952 e 1943 por estarem incompletos.

A série histórica considerada possui mediana igual a 77,15 mm, com limite superior da série definido em 240,70 mm e limite inferior estabelecido em - 50,70 mm. As alturas de precipitações dos anos válidos variaram entre 40,00 mm no ano de 1963 e 185,70 mm no ano de 1992, logo, não se verificou nenhuma outlier.

A ocorrência de diferenças mais elevadas foi encontrada quando em comparação com a cidade de Auriflama, evidenciando que mesmo que se utilize uma equação de chuva de uma cidade próxima, os resultados podem não refletir a realidade do regime de chuvas local.

Constatou-se que quanto menores os períodos de retorno e a duração das precipitações consideradas, mais elevadas serão as diferenças observadas, mesma tendência observada em estudo por Brito e Kellner (2016)

## Referências bibliográficas

1. Brito, L. N. de; Kellner, E. **Procedimento para construção da Equação de Chuva a partir das máximas precipitações diárias obtidas de séries anuais: Atualização da Equação de Chuva da cidade de São Carlos (SP)**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v.4, n.26, 2016.
2. Departamento de água e energia elétrica do estado de São Paulo (DAEE). **Histórico Pluviométrico para o município de Araçatuba**. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>>

3. Wilken, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978. 478p.
4. Tomaz, P. **Cálculo hidrológico e hidráulico para obras municipais**. 1ª ed. São Paulo. Ed. Hermano Bugelli Ltda. 2002. 475p.
5. Subramanya, K. **Engeneering Hydrology**. 4ª ed. New Delhi, McGraw Hill, 2013, 534p.
6. Tucci, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2002. 943p.
7. Pinheiro, E. C. **Contribuições e influência e modelagem de valores extremos**. Tese (doutorado). Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo. 2013. 171p.