

Comparação de duas metodologias de obtenção da equação de chuvas intensas para a cidade de Caraguatatuba (SP)

Comparison of two methods for the determination of the intense rainfall equation for Caraguatatuba (SP)

• **Data de entrada:**
07/12/2015

• **Data de aprovação:**
29/08/2016

Daniela Martins* | Nadiane Smaha Kruk | Nelson Luiz Goi Magni | Paulo Ivo Braga de Queiroz

DOI:10.4322/dae.2016.033

Resumo

As equações de chuvas intensas, que relacionam intensidade, duração e frequência (IDF), são amplamente empregadas no dimensionamento das estruturas de drenagem. Os objetivos deste trabalho são fornecer duas equações de chuva para a localidade de Caraguatatuba (SP), obtidas por séries anuais baseadas em dados consistentes de uma série histórica de 31 anos, e traçar um comparativo entre elas. A região destaca-se pelo crescente desenvolvimento vindo de obras como o novo Porto de São Sebastião e a duplicação da Rodovia dos Tamoios, que vem sofrendo com constantes inundações. As equações de IDF foram ajustadas por séries anuais, admitindo-se que as precipitações intensas atendem à distribuição estatística de tipo I de Fisher-Tipett, conhecida também como distribuição de Gumbel. Obtiveram-se a expressão geral, aqui denominada tipo Chen, e a tipo $\ln\ln$, na qual ficou associado um período de retorno amostral a cada intensidade de precipitação observada. A equação do tipo Chen apresentou boa extrapolação para grandes períodos de retorno. Já a do tipo $\ln\ln$ teve resultados melhores para durações menores que 40 min e maiores que 800 min. Podem-se utilizar ambas as equações para eventos de projeto com pequenos períodos de retorno e, quando há necessidade de utilizar a equação para grande período de retorno, é mais interessante lançar mão da equação do tipo $\ln\ln$, que tende a maximizar a intensidade das chuvas.

Palavras-chave: Curva de IDF. Equação de chuvas intensas. Caraguatatuba.

Abstract

Intense rainfall equations, which relate intensity, duration and frequency (IDF), are widely used in the design of urban drainage. The purpose of this study is to provide two intense rainfall equations in the city of Caraguatatuba, obtained from annual series based on a consistent data set with a historical series of 31 years, and to draw a comparison between them. The study region is distinguished by increasing development coming from works such as the new port of São Sebastião and the doubling of Tamoios Highway, which has suffered from constant flooding. The IDF's equations were adjusted by annual series assuming that the intense rainfall adjusted in the type I statistical distribution of Fisher-Tipett, also known as the Gumbel distribution. It was obtained the general expression, here called "Chen type", and " $\ln\ln$ type", in which it was associ-

Daniela Martins – Doutoranda em Infraestrutura Aeroportuária no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, danielamartins1977@yahoo.com.br.

Nadiane Smaha Kruk – Professora adjunta do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, nadiane@ita.br.

Nelson Luiz Goi Magni – Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e engenheiro do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP), nelson.magni@daee.sp.gov.br.

Paulo Ivo Braga de Queiroz – Professor adjunto do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pi@ita.br.

ated a sampling return period to every observed intense precipitation. The “Chen type” equation showed good scaling for large return periods. The “lnln type” equation showed better results for smaller durations lower than 40 min and higher than 800 min. These two equations can be used in the design of drainage system with small return periods and, when there is need to use the equation for long period of return, it is more interesting to make use of the “lnln type” equation as it tends to maximize the intensity of rain.

Keywords: IDF curves. Rainfall intensity equation. Caraguatatuba.

1 INTRODUÇÃO

As equações de chuvas são amplamente empregadas no dimensionamento das estruturas de drenagem e representam, de forma simplificada, o estudo das máximas intensidades obtidas a partir de uma série histórica representativa e confiável.

De acordo com Zhu et al. (2012), as curvas de intensidade, duração e frequência (IDF) são uma ferramenta probabilística que já provou ser muito útil no planejamento e no projeto do manejo de recursos hídricos e na engenharia. Os autores ainda salientam que elas são capazes de fornecer uma avaliação das características dos extremos de precipitação.

Para sua determinação, são necessárias medições simultâneas da altura da precipitação da chuva, variando de acordo com o tempo, realizadas em um aparelho denominado pluviógrafo. Na década de 1970, no Brasil, segundo Villella e Matos (1975), o modelo de pluviógrafo mais utilizado era o de sifão, que gera gráficos traçados em papel e cuja leitura ainda é manual e demanda tempo para sua análise. Atualmente, muitas estações telemétricas dispõem de pluviógrafos do tipo caçamba.

Os gráficos de chuva registram suas alturas e tempos de duração. Os elementos registrados são manipulados estatisticamente, possibilitando deduzir dos resultados de tais estudos a regra, que, analiticamente, se traduz por expressão matemática, denominada equação de chuvas (WILKEN, 1978).

A obtenção das curvas de IDF é realizada a partir da leitura de pluviógrafos que tenham uma série histórica representativa. Existem vários méto-

dos para obter as equações de chuvas intensas. No Brasil, encontram-se bibliografias, como, por exemplo, Pfafstetter (1957), Wilken (1978), Martinez e Magni (1999) e, atualmente, Martinez e Magni (2014), com a inserção de novas equações para outras cidades do estado de São Paulo.

Martins et al. (2013), utilizando dados divulgados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP), obtiveram, para a cidade de Caraguatatuba, uma equação de chuvas intensas baseada em uma série histórica de 11 anos (1974 a 1984). Antes de sua publicação, a cidade não possuía uma equação de chuvas consolidada, utilizando-se aquela desenvolvida para a cidade de Ubatuba, publicada no trabalho de Martinez e Magni (1999, 2014).

A série de 11 anos é considerada “curta” para a geração das curvas de IDF. No trabalho de atualização das equações de chuvas de Martinez e Magni (2014), os autores mencionam que, para serem confiáveis, as equações elaboradas devem ser baseadas em séries históricas com extensões superiores a 20 anos de dados.

No trabalho de Setzer (1973), foi publicado um estudo de chuvas intensas no estado de São Paulo, no qual o autor utilizou, para a equação de Ubatuba, uma série de dados de 7,57 anos e citou a dificuldade de trabalhar com períodos demasiadamente curtos, menores de dez anos. O autor acrescenta que, nesse tipo de trabalho, só se devem levar em conta períodos de observação da mesma ordem de grandeza que a recorrência máxima estudada.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são fornecer duas equações de chuva para a localidade de Caraguatatuba (SP), obtidas por séries anuais, e traçar um comparativo entre elas. Neste trabalho, além dos 11 anos de dados utilizados por Martins et al. (2013), acrescentaram-se mais 20, de modo que a nova série é mais representativa, permitindo gerar uma curva de IDF mais confiável para projetos usuais de obras hidráulicas.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Área de estudo

A bacia do rio Juqueriquerê possui uma área de drenagem de 419,36 km² e é parte integrante das 34

sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Litoral Norte, Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 5 (UGRHI-5), sendo a maior em área territorial.

O posto pluviográfico E2-046, cujos dados foram extraídos para este estudo, fica localizado na bacia do rio Juqueriquerê, que abrange a cidade de Caraguatatuba e parte da cidade de São Sebastião, conforme ilustra a Figura 1, no litoral norte do estado de São Paulo, e que, ao longo dos anos, vem sofrendo com constantes inundações. A região destaca-se pelo crescente desenvolvimento vindo de obras, como o novo Porto de São Sebastião e a duplicação da Rodovia dos Tamoios.

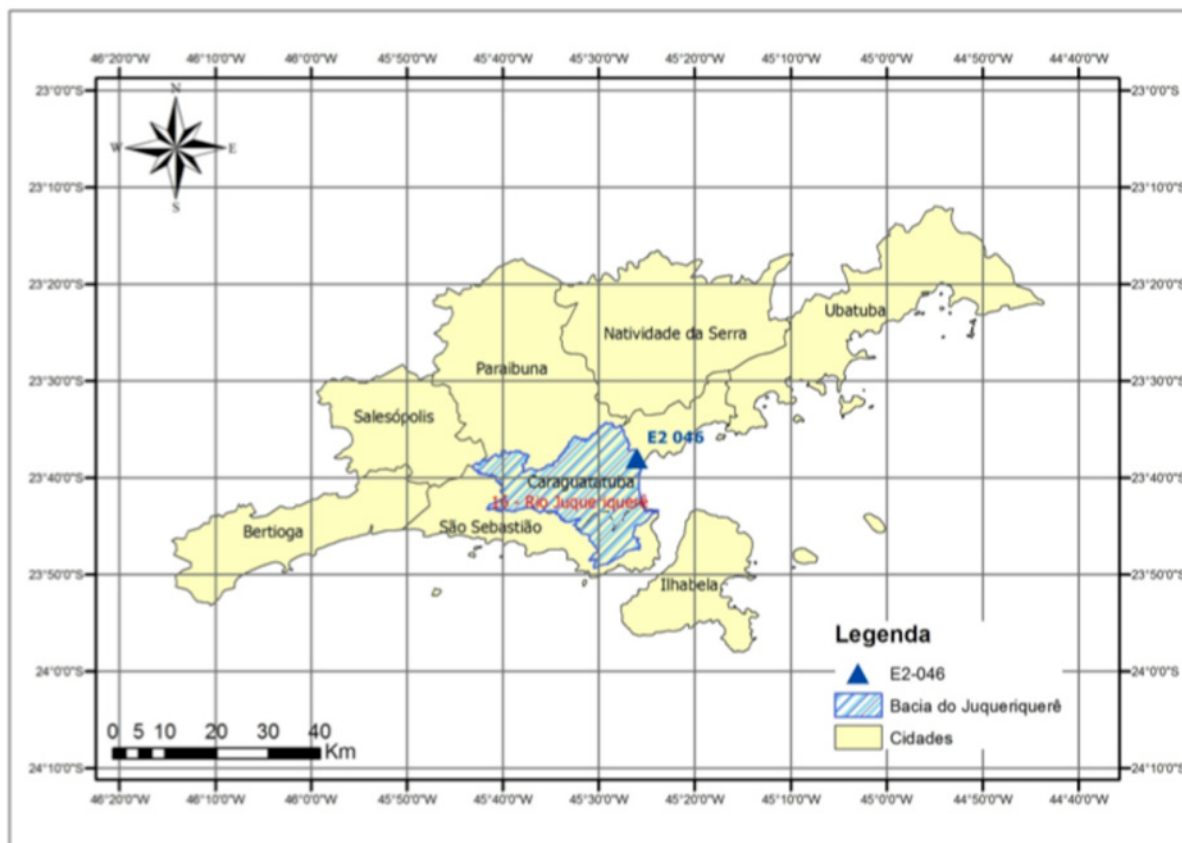


Figura 1 – Localização da bacia do rio Juqueriquerê e da estação E2-046 do DAEE/SP.

Levantamento dos dados de intensidade de chuva

O pluviógrafo mecânico de boia registra em uma fita de papel (Figura 2), simultaneamente, a quantidade e a duração da precipitação (WILKEN, 1978).

Esses pluviômetros possuem um registrador que gira a uma velocidade constante, em uma determinada escala de tempo, e os valores são registrados por uma pena num papel ligado a eles, definindo a duração da chuva e sua intensidade. Os registros são armazenados em rolos com 15 m de comprimento, cada rolo equivalendo a uma escala de tempo de um mês. Alguns rolos podem ser utilizados para mais de um mês, trocando a cor da pena, conforme ilustra a Figura 2.

Atualmente, existem pluviógrafos automáticos com *data loggers* embutidos que funcionam com pulsos elétricos. O interessante é que esses dados podem ser editados e analisados em tempo real por meio de um computador pessoal. Na época da

instalação do pluviógrafo utilizado neste trabalho, não existia esse tipo (a instalação foi realizada em 1974).

Quando do início deste trabalho, os valores lidos do pluviógrafo da estação E2-046, divulgados pelo DAEE/SP, estavam dentro dos anos de 1974 a 1984. O DAEE/SP possuía os dados de pluviógrafos de 1985 a 2001 em rolos ainda não processados, como ilustra a Figura 3. O órgão cedeu esse material, o que permitiu realizar a leitura manual desses anos, gerando uma leitura de 330 chuvas consideradas representativas para o processamento. Esses dados foram enviados à Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo (Prodesp) (www.prodesp.sp.gov.br), que trabalha em parceria com o DAEE/SP com a tecnologia da informação, e processados para gerar as intensidades máximas em 10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720, 1.080 e 1.440 min de todas as chuvas lidas manualmente.



Figura 2 – Trecho representativo da leitura de um pluviograma.
Fonte: DAEE/SP.



Figura 3 – Rolos de leitura de pluviógrafo da estação E2-046 cedidos para leitura pelo DAEE/SP.

De acordo com Martinez e Magni (2014), as curvas de IDF incorporam a expressão proposta por Ven-Te-Chow para as análises hidrológicas (1951), admitindo-se que as precipitações intensas atendam à distribuição estatística de tipo I de Fisher-Tipett, conhecida também como distribuição de Gumbel. Na equação desenvolvida pela metodologia de Martinez e Magni (1999), fica associado um período de retorno amostral a cada intensidade de precipitação observada. Feito isto, é calculada, para cada intensidade de precipitação, a variável reduzida y da distribuição de Gumbel, ou seja, conforme cita Wilken (1978), para obter o ajuste é necessário ligar, a cada grandeza de intensidade de chuva na amostra, um valor particular da probabilidade ou período de retorno, obtendo a Equação 1, em que são determinados os valores de A, B, C, D, E, F e G para a referida localidade.

$$t_{t,T} = A \times (t + B)^C + D \times (t + E)^F \times \left\{ G + H \times \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

Equações de chuvas intensas

Conforme Waltz (2000), a equação de chuvas intensas pode ser obtida segundo diferentes metodologias, desde que, para isso, se disponha de uma série de dados pluviográficos confiável.

De acordo com Goulart et al. (1992), não existe regra específica para afirmar que uma equação de IDF é suficientemente precisa na estimativa das intensidades máximas de chuva de uma localidade. Entretanto, Martinez e Magni (2014) citam que, na realidade, não existem ou são raras as medições de vazões nos cursos d'água, o que torna imprescindível, para o dimensionamento das obras hidráulicas, o conhecimento das precipitações intensas.

Consoante Waltz (2000), a escolha do tipo de série depende das relações entre o evento hidrológico e as características da infraestrutura a ser projetada, do tamanho da série disponível e do objetivo do estudo. Como apresentado por Chow (1964), as séries parciais fornecem resultados mais consistentes para

períodos de retorno inferiores a dez anos e ambas as séries, anual e parcial, contemplam, praticamente, os mesmos resultados para períodos de retorno iguais ou superiores a dez anos.

Neste trabalho, com a mesma base de dados (de 31 anos), foram ajustados dois tipos de equação, ambos baseados em séries históricas anuais de intensidades máximas. Cabe salientar que, de acordo com Chow (1964), as séries parciais devem ser utilizadas quando os segundos valores no ano afetam o projeto, em se tratando de máximas intensidades.

Análise de frequência: série anual/expressão geral

A partir dos dados obtidos (Tabela 1), adotou-se a distribuição de valores extremos do tipo I, também conhecida como distribuição de Gumbel, Fisher-Tipett tipo I ou dupla exponencial. Essa distribuição é muito utilizada na análise de frequência de eventos hidrológicos, inclusive com inúmeras aplicações na determinação de curvas de IDF de precipitações intensas e estudos de vazões de enchentes (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Tabela 1 – Intensidades máximas anuais (mm/min) da estação E2-046, localizada em Caraguatatuba.

Ano	Intensidade (mm/min) para as durações (min) de:									
	10	20	30	60	120	180	360	720	1.080	1.440
1971	1,320	1,280	1,270	1,130	0,780	0,578	0,366	0,228	0,158	0,119
1972	2,560	2,420	2,010	1,460	0,780	0,530	0,267	0,133	0,089	0,067
1973	1,340	1,090	1,000	0,680	0,400	0,367	0,208	0,127	0,097	0,094
1974	1,640	1,030	0,830	0,470	0,430	0,375	0,280	0,169	0,130	0,098
1975	2,050	2,040	1,800	1,620	1,010	0,721	0,368	0,204	0,136	0,103
1976	1,920	1,790	1,690	1,580	1,280	1,021	0,572	0,325	0,223	0,184
1977	1,510	1,080	0,740	0,380	0,190	0,206	0,108	0,059	0,039	0,029
1978	0,910	0,860	0,720	0,570	0,460	0,456	0,341	0,184	0,130	0,107
1979	1,920	1,470	1,210	1,010	0,540	0,387	0,286	0,157	0,113	0,085
1980	1,340	1,290	1,050	0,600	0,410	0,351	0,177	0,098	0,065	0,057
1981	2,160	1,870	1,590	1,200	0,800	0,613	0,386	0,207	0,156	0,118
1982	1,000	0,940	0,810	0,550	0,390	0,312	0,196	0,132	0,091	0,069
1983	1,600	1,290	1,260	1,040	0,610	0,444	0,231	0,129	0,086	0,071
1984	1,250	1,070	1,040	0,770	0,400	0,266	0,186	0,118	0,079	0,059
1985	1,510	1,270	1,070	0,660	0,500	0,350	0,193	0,117	0,096	0,087
1986	1,310	1,140	1,030	0,770	0,440	0,326	0,165	0,101	0,076	0,062
1987	1,480	0,880	0,620	0,500	0,280	0,187	0,115	0,074	0,054	0,046
1988	1,650	1,140	0,970	0,700	0,460	0,324	0,180	0,092	0,061	0,055
1989	1,240	1,130	0,890	0,500	0,340	0,286	0,145	0,078	0,070	0,067
1990	1,830	1,720	1,620	1,280	0,750	0,524	0,304	0,172	0,122	0,092
1991	1,580	1,090	0,840	0,540	0,390	0,295	0,151	0,086	0,069	0,055
1992	1,290	1,100	0,920	0,700	0,580	0,441	0,283	0,160	0,109	0,082
1993	1,150	1,090	1,040	0,810	0,540	0,364	0,195	0,174	0,126	0,120
1994	1,330	1,020	0,970	0,760	0,590	0,441	0,249	0,157	0,106	0,084
1995	1,670	1,350	1,090	0,670	0,360	0,268	0,233	0,117	0,084	0,064
1996	1,360	1,210	1,170	0,890	0,560	0,401	0,221	0,136	0,114	0,098
1997	1,440	1,240	1,100	0,620	0,440	0,317	0,234	0,129	0,088	0,069
1998	1,590	1,440	1,290	0,780	0,450	0,322	0,181	0,102	0,076	0,066
1999	1,280	1,160	0,930	0,590	0,360	0,257	0,146	0,110	0,078	0,063
2000	1,370	0,950	0,830	0,670	0,420	0,305	0,192	0,120	0,102	0,081
2001	1,160	0,990	0,810	0,640	0,390	0,262	0,132	0,067	0,046	0,035

De acordo com Chow (1951), Gumbel desenvolveu uma metodologia para computar a frequência anual de cheias com base na teoria dos valores extremos, porém ela foi simplificada para uso prático e, atualmente, pode ser expressa pela Equação 2.

$$y_T = \bar{y} + K_T \times \sigma \quad (2)$$

Em que:

y = máximo valor diário de chuva no período de 365 dias.

y_T = máximo valor extremo anual para o período de retorno T (anos).

$\bar{y}$ = média de y .

σ = desvio padrão de y .

K_T = fator de frequência, função do período de retorno T (anos).

A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel é dada pela Equação 3 (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$F_Y(y) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right], \text{ para } -\infty < y < \infty < \beta < \infty, \alpha > 0 \quad (3)$$

Em que: α representa o parâmetro de escala; β , o parâmetro de posição; e y , a variável reduzida de Gumbel. A função densidade de probabilidade é dada pela Equação 4.

$$f_Y(y) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{y-\beta}{\alpha} - \exp\left(\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (4)$$

Supondo que $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ representa um conjunto de N variáveis aleatórias independentes, com distribuição comum F_X , particularizando para o máximo anual, N pode ser interpretado como o número de observações de X , em instantes de tempo equi-

distantes entre si, ao longo de um período fixo de um ano.

Tomando $Y = \max\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, o valor esperado, a variância e o coeficiente de assimetria de Y são, respectivamente (NAGHETTINI; PINTO, 2007):

$$E[Y] = \beta + 0,5772 \times \alpha \quad (5)$$

$$Var[Y] = \sigma_Y^2 = \frac{\pi^2 \times \alpha^2}{6} \quad (6)$$

$$\gamma = 1,1396 \quad (7)$$

Isso denota que a função de Gumbel possui assimetria, sendo positiva e constante, para valores específicos de α e β .

A função inversa da função acumulada de probabilidade de Gumbel é expressa pela Equação 8.

$$x(T) = \beta - \alpha \times \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (8)$$

Em que: T é o período de retorno.

Com a Equação 8, estimando os parâmetros da distribuição pelo método dos momentos, tem-se:

$$\beta = \bar{X} - 0,45 \times s_X \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{s_X}{1,283} \quad (10)$$

Em que: $\bar{X}$ e s_X denotam a média e o desvio padrão amostrais, respectivamente.

Substituindo as Equações 9 e 10 na Equação 8 e fazendo algumas simplificações, tem-se:

$$x(T) = \bar{X} + \left[-0,45 - \frac{1}{1,283} \times \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right] \times s_x \quad (11)$$

A Equação 12 é a equação geral para análise de frequência hidrológica (CHOW, 1964).

$$x(T) = \bar{X} + K_T \times \sigma_Y \quad (12)$$

Em que: K_T é o fator de forma ou fator de frequência e pode ser estimado pela Equação 13.

$$K_T = \frac{Y_T - \mu_Y}{\sigma_Y} \quad (13)$$

Em que:

K = fator de frequência, que indica o número de vezes em que o valor do desvio padrão supera a (ou é superado pela) média da série.

Y = variável reduzida.

μ_Y = média de Y .

σ_Y = desvio padrão de Y .

No caso das distribuições de Gumbel, K_T pode ser expresso pela Equação 14.

$$K_T = \frac{-\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] - \mu_Y}{\sigma_Y} \quad (14)$$

Com uma amostra de dez anos de dados registrados e $K_{10} = 1,8483$ e para uma amostra com cem anos de dados e mesmo período de retorno, o valor de K_{10} corresponde a 3,1533.

Análise de frequência: equação usando a estrutura do tipo Chen

A primeira equação de IDF proposta tem sua expressão geral como ilustra a Equação 15, sendo feito o ajuste das incógnitas (**a**, **b**, **c** e **d**) de acordo com as informações de IDF obtidas do pluviógrafo. Conforme Wilken (1978), nessa expressão, é admitida a constância de **a** em relação à frequência.

$$i_{t,T} = \frac{a \times T^b}{(t + c)^d} \quad (15)$$

Em que:

$i_{t,T}$ = intensidade máxima média de precipitação, correspondente à duração.

a, **b**, **c** e **d** = parâmetros locais obtidos por regressão não linear, com base nas informações extraídas de pluviogramas.

Essa expressão é uma fórmula empírica que resume a experiência de vários estudos.

Como Chen (1983) desenvolveu uma fórmula de IDF generalizada para qualquer local nos Estados Unidos, neste artigo a chamaremos equação do tipo Chen.

Análise de frequência: equação incorporando a estrutura matemática de Gumbel (tipo lnln)

Nesta outra expressão usada para a definição da equação de chuvas intensas, foi adotada a mesma formulação matemática empregada por Magni (1984) e Martinez e Magni (1999, 2014), quando da elaboração de equações para 30 localidades do estado de São Paulo. Os autores usaram somente séries históricas anuais de intensidades de chuvas.

As equações que relacionam IDF das precipitações para cada localidade incorporam a expressão proposta por Ven Te Chow para as análises hidrológicas, admitindo-se que as precipitações intensas atendem à distribuição estatística de tipo I de

Fisher-Tipett, conhecida também como distribuição de Gumbel. Assim, nesse tipo de função, as características matemáticas da distribuição adotada são preservadas na estrutura da equação a ser definida.

Foi admitida a hipótese de que a média e o desvio padrão das intensidades médias das chuvas variam com a duração, por meio das Equações 16 e 17.

$$M_{(i)t} = A \times (t + B)^C \quad (16)$$

$$\sigma_{(i)t} = D \times (t + E)^F \quad (17)$$

Em que: **A, B, C, D, E, F, G e H** são parâmetros a ser determinados para cada localidade.

Substituindo as Equações 14, 15 e 16 na Equação 12, obtém-se a Equação 1, utilizada para a definição da equação de chuvas intensas.

4 RESULTADOS

Os dados de 1971 a 1984 (14 anos de registros de pluviógrafos) estão disponíveis no *site* do SigRH. Os dados de 1985 a 2001 (17 anos de registros de pluviógrafos) possuíam registro, mas não tinham sido lidos. Os rolos de pluviógrafo foram gentilmente cedidos pelo DAEE/SP e lidos. Em seguida, foi realizado o tratamento dos dados, conforme citado na introdução deste trabalho.

Conforme ilustra a Tabela 2, foram registradas 215 chuvas entre os anos de 1971 a 1984 e lidas 330 chuvas entre os anos de 1985 a 2001, gerando um total de 545 chuvas. Dessa forma, foram gerados 31 anos contínuos obtidos da mesma estação (E2-046). Comparando com o trabalho de Goulart et al. (1992), as chuvas mapeadas totalizaram 509 chuvas lidas (Tabela 2), criando uma base de dados bastante representativa, uma vez que o autor encontrou a

melhor relação analítica entre IDF com a classificação de 168 chuvas intensas durante 25 anos. Já no trabalho de Silva et al. (2012), o processo de análise baseou-se numa série histórica de 30 anos e 611 hietogramas de precipitação.

Foi feita uma análise conjunta dos dados pluviográficos e pluviométricos, verificando se todas as chuvas relevantes foram realizadas. Após a leitura manual dos dados, estes foram passados para a Prodesp para digitalizar no formato solicitado e elaborar os mínimos móveis, gerando as intensidades de chuvas para cada duração (10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720 e 1.440 min), conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 2 – Classificação das chuvas lidas no período de 1985 a 2001 pelo pluviógrafo E2-046.

Ano	Quantidade de Chuvas Lidas	Ano	Quantidade de Chuvas Lidas	Ano	Quantidade de Chuvas Lidas
1971	01	1982	19	1993	13
1972	02	1983	30	1994	18
1973	02	1984	15	1995	22
1974	14	1985	22	1996	18
1975	23	1986	30	1997	15
1976	30	1987	22	1998	28
1977	06	1988	27	1999	14
1978	16	1989	18	2000	11
1979	16	1990	21	2001	13
1980	27	1991	16	Total	
1981	14	1992	22	31anos	545

Pela análise de frequência da série anual, foi ajustada a equação do tipo Chen (Equação 18). A curva de IDF obtida para a série é ilustrada pela Figura 4. O ajuste dos parâmetros da Equação 15 (a, b, c e d) para gerar a Equação 18 foi feito inicialmente pela metodologia descrita por Wilken (1978) e depois pela ferramenta *Solver* do *software* Excel®,

apresentando menor erro quadrático e tendo um melhor ajuste dos dados.

$$i = \frac{117.3376 \times T^{0.1683}}{(t + 86.4139)^{0.9918}} \quad (18)$$

Em que:

i = intensidade da chuva, correspondente à duração t e período de retorno T , em mm/min.

t = duração da chuva em minutos.

T = período de retorno em anos.

Para otimizar o ajuste dos parâmetros (a, b, c e d) da Equação 15, utilizou-se a Equação 19.

$$\text{Minimizar } \varepsilon = \frac{1}{n_T n_t} \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_t} (i_{IDF,i,j} - i_{calc,i,j})^2 \quad (19)$$

Em que:

$n_t = 10$ = número de durações para cada intensidade de chuva (durações apresentadas na Tabela 1).

$n_T = 8$ = períodos de retorno das intensidades ajustadas (de dois a cem anos).

$i_{IDF,i,j}$ = intensidades obtidas pela curva de IDF teórica otimizada (neste caso, do tipo I).

$i_{calc,i,j}$ = intensidades calculadas pelo tipo Chen.

A minimização foi feita por meio de gradação reduzida não linearizada, desenvolvida por Carpentier e Abadie (1966) e implementada no Solver do Excel®. Definiu-se a precisão de conver-

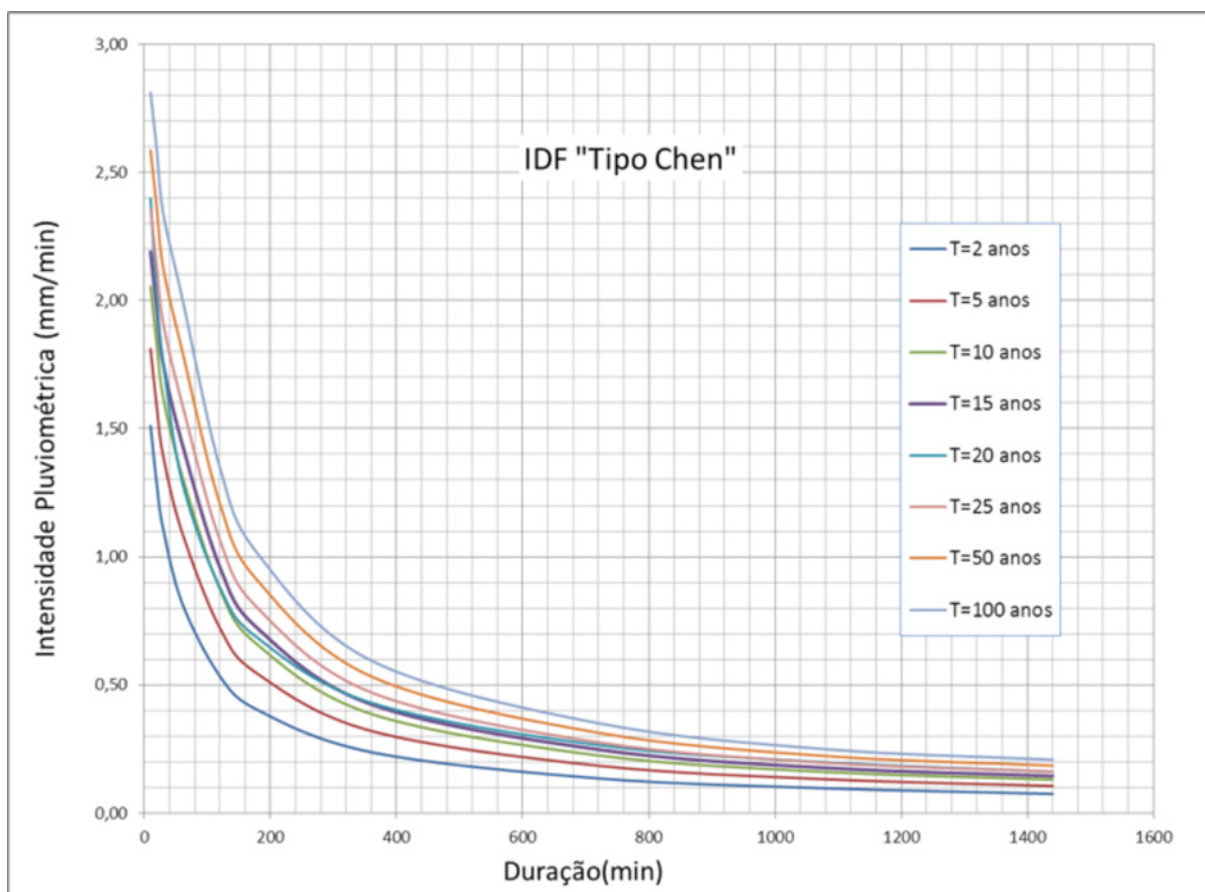


Figura 4 – Curva de IDF para a cidade de Caraguatatuba usando a expressão do tipo Chen.

gência do método como sendo , obtendo-se um erro de 0,24383.

Na convergência, o *Solver* para quando a alteração relativa no valor da célula de destino é menor que o número exibido na caixa de convergência das cinco últimas iterações. A convergência é aplicada apenas aos problemas não lineares e deve ser indicada por um número fracionário entre zero e um. Uma convergência menor é indicada quando o número inserido tem mais casas decimais – por exemplo, 0,0001 tem uma alteração relativa me-

nor que 0,01. Quanto menor for o valor da convergência, mais tempo será necessário para o *Solver* encontrar uma solução.

O algoritmo usado em cada iteração para determinar a direção da pesquisa foi o método quasi-Newton, que geralmente exige mais memória e bem menos iterações.

Pela análise de frequência da série anual, foi ajustada a equação do tipo *lnln* (Equação 20). A curva de IDF obtida para a série é ilustrada pela Figura 5.

$$i_{t,T} = 32,9439 \times (t + 30)^{-0,83579} + 4,424 \times (t + 30)^{-0,64431} \left\{ -0,47491 - 0,8889 \times \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (20)$$

Em que:

$i_{t,T}$ = intensidade da chuva, correspondente à duração t e período de retorno T , em mm/min.

t = duração da chuva em minutos.

T = período de retorno em anos.

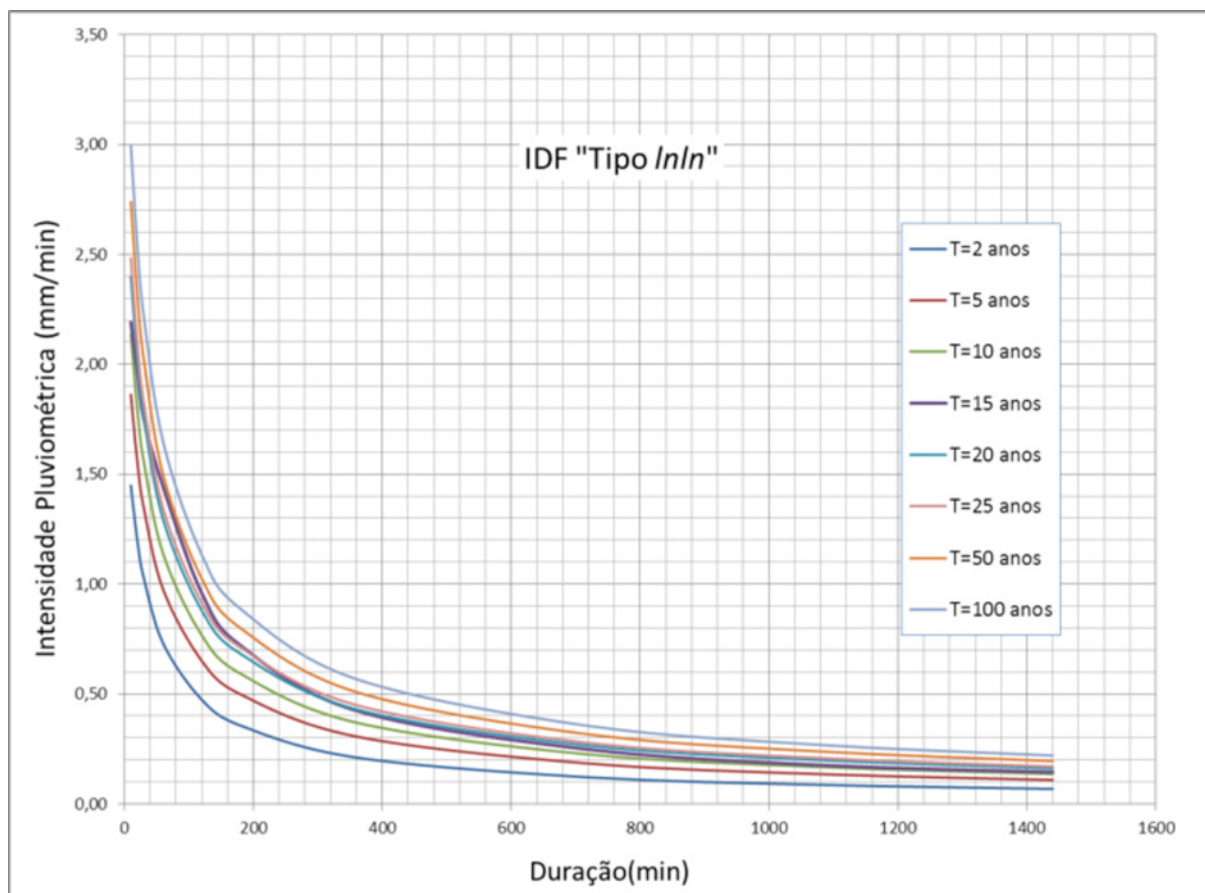


Figura 5 – Curva de IDF para a cidade de Caraguatatuba usando a expressão do tipo *lnln*.

5 DISCUSSÃO

Uma análise muito importante é verificar a sobreposição das curvas de IDF com mesmo período de retorno. Na Figura 6, nota-se que a curva gerada pela expressão geral assumiu valores um pouco superiores em relação aos pontos gerados por Gumbel, para o período de retorno de cinco anos. A equação proposta pelo método *lnln* apresentou valores coincidentes para pequenas e grandes du-

rações; para durações entre 40 e 800 min, os valores de intensidade tiveram tendência a minimizar em relação aos valores teóricos do tipo I. Já para um período de retorno maior (= 100 anos) (Figura 7), a expressão ajustada pelo tipo Chen indicou dados bem aderidos aos valores teóricos do tipo I considerando a curva de IDF derivada da equação obtida pelo método *lnln*.

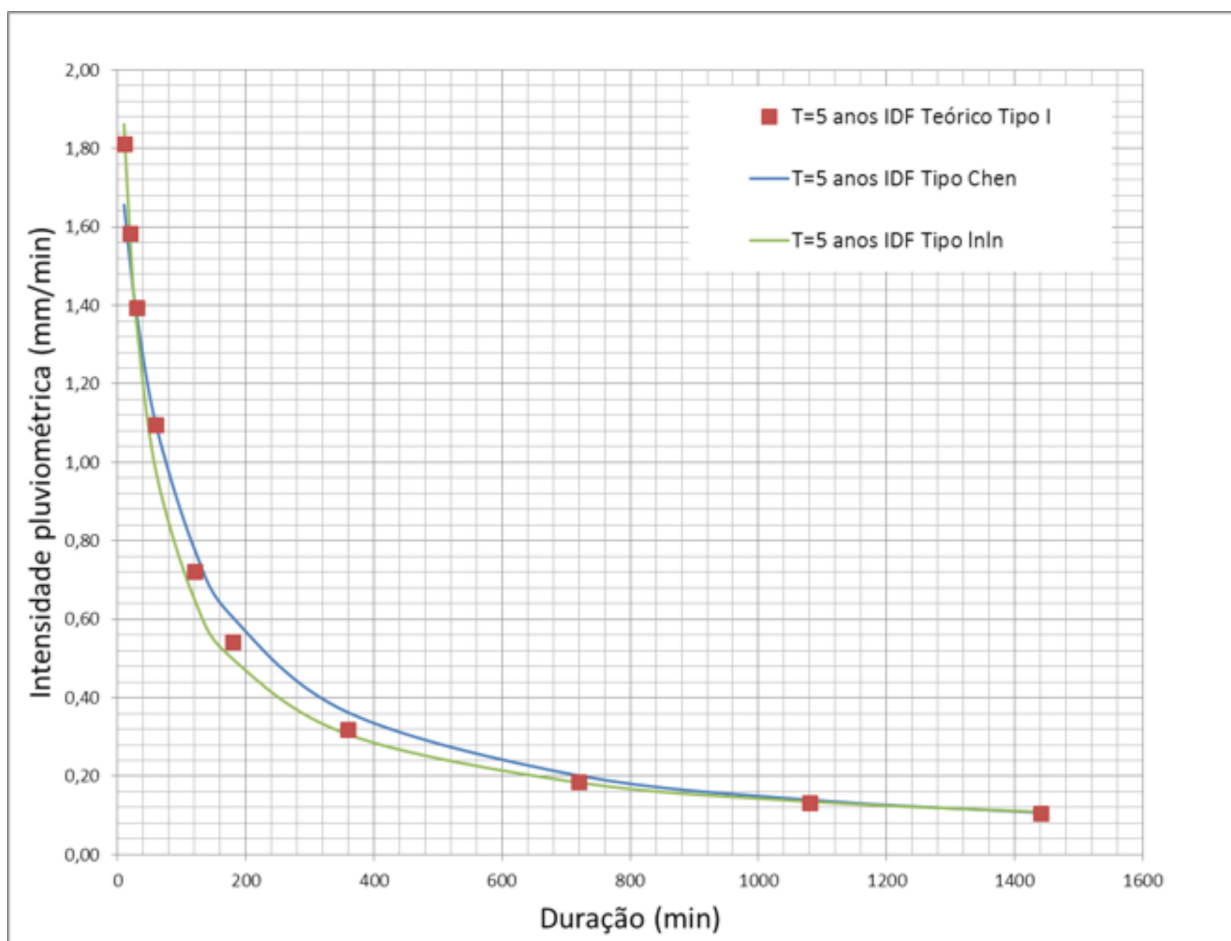


Figura 6 – Ajustes das curvas de IDF para a cidade de Caraguatatuba usando séries anuais (T = 5 anos).

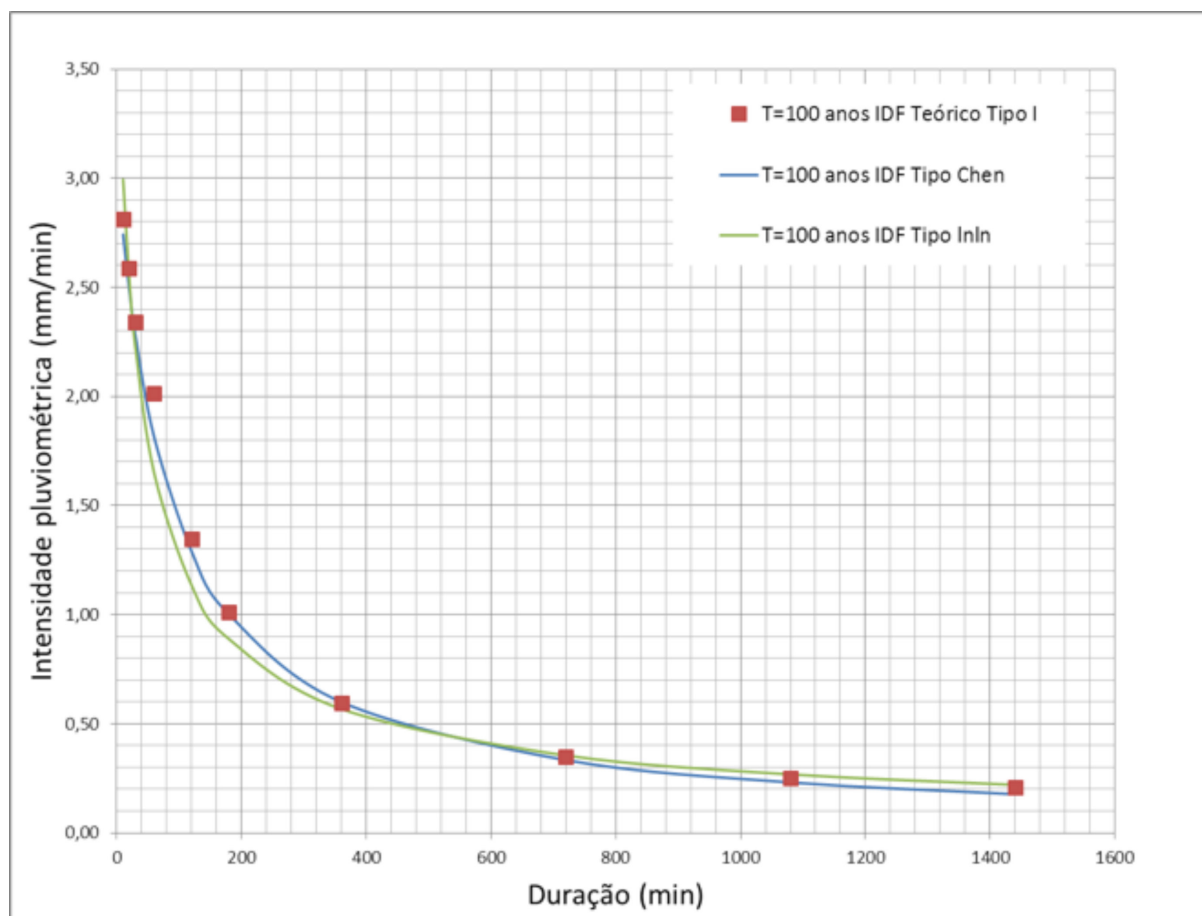


Figura 7 – Ajustes das curvas de IDF para a cidade de Caraguatatuba usando séries anuais ($T = 100$ anos).

Analizou-se também o comportamento das intensidades das chuvas para diversos períodos de retorno em relação às intensidades para o período de retorno de dois anos, para as diversas durações, como pode ser visto na Figura 8.

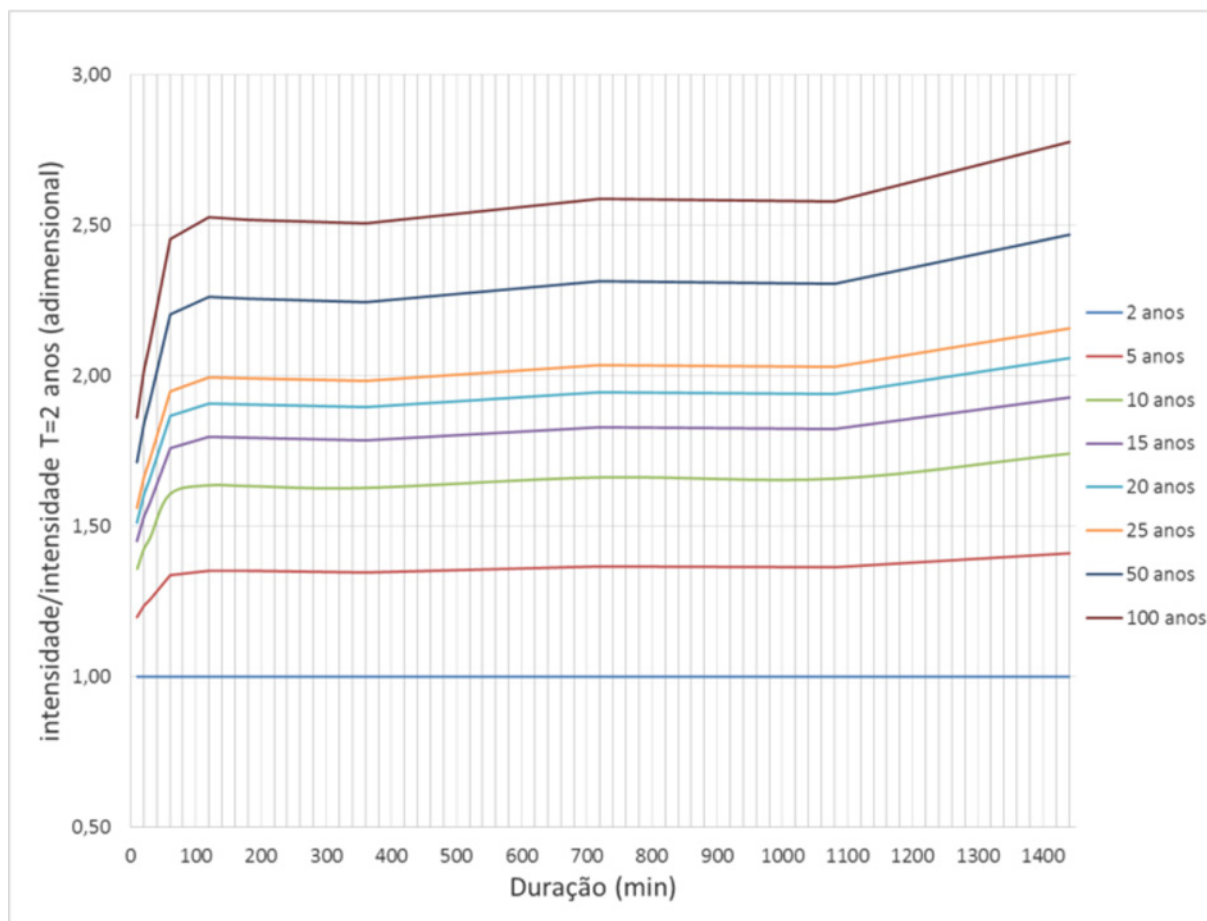


Figura 8 – Relação entre as intensidades das chuvas com vários períodos de retorno e sua relação com as intensidades de chuva no T = 2.

Observa-se, pela Figura 8, que existe um comportamento bastante distinto entre as chuvas com durações menores do que 60 min e as com durações maiores do que estas. Isso poderia ser explicado pelos diferentes fatores que levaram à formação das chuvas observadas. Chuvas com menores durações têm o efeito de convecção mais frequente, enquanto chuvas com durações maiores podem ter efeitos combinados de orografia ou de frentes.

Dadas essas observações, para alcançar resultados de ajustes ainda melhores, foram obtidas outras duas equações, de acordo com os métodos já apresentados, para dois intervalos distintos de duração. Para durações de chuvas entre 10 e 60

min. foi encontrada a Equação 21 e, para durações entre 60 e 1.440 min, a Equação 22.

$$i = \frac{116.457 \times T^{0.161}}{(t + 90.506)^{0.978}} \quad (21)$$

$$i = \frac{48.068 \times T^{0.212}}{(t + 49.415)^{0.885}} \quad (22)$$

As duas equações oriundas da análise dos tipos de chuva apresentaram um erro mínimo quadrático menor que a Equação 18, que revelou uma soma-tória – Equação 19 – de 0,2438. As Equações 21 e 22 indicaram, respectivamente, os valores de 0,1621 e 0,0420.

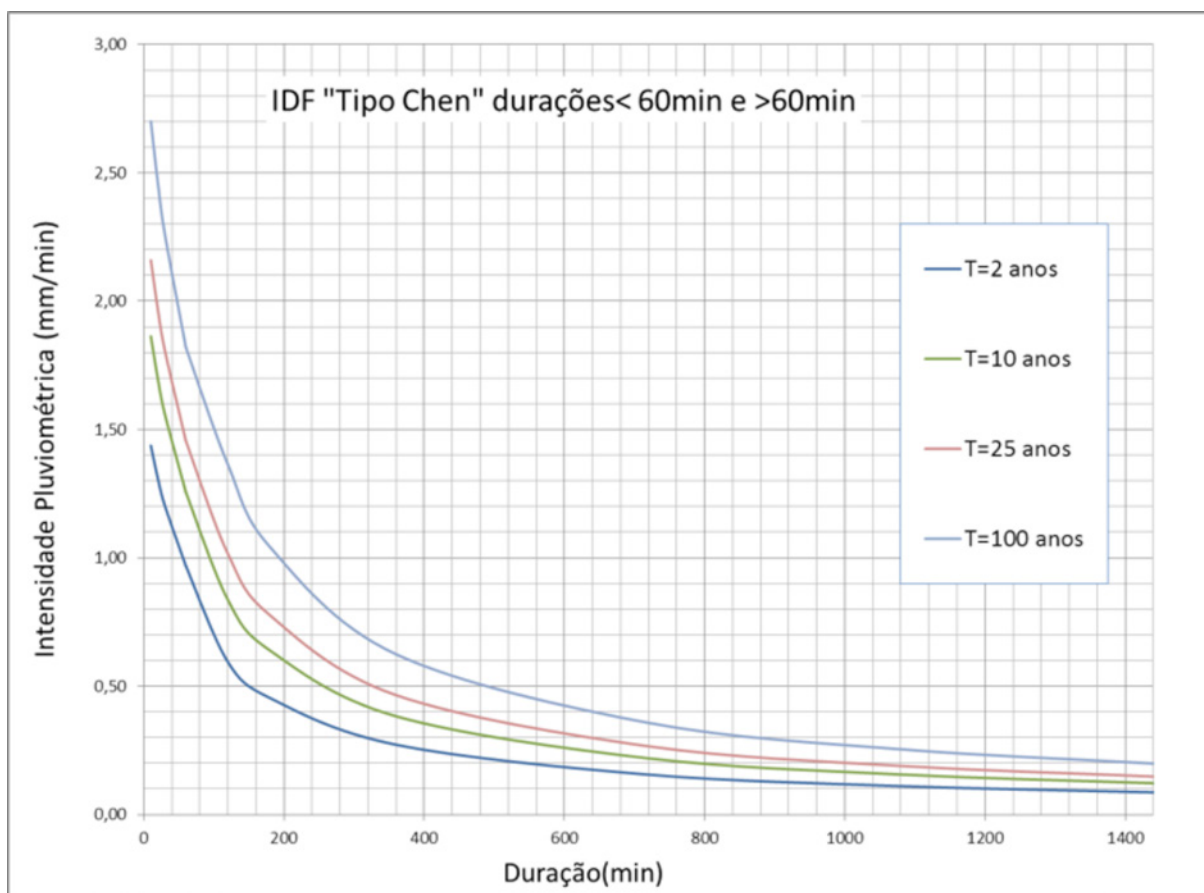


Figura 9 – Relação entre as intensidades das chuvas com vários períodos de retorno e sua relação com as intensidades de chuva no $T = 2$.

6 CONCLUSÕES

Após exaustivo trabalho de leitura do material cedido e posterior processamento, foi possível gerar curvas de IDF para a cidade de Caraguatatuba (SP), que atualmente não dispõe de estudo específico e utiliza a equação de chuvas intensas de Martinez e Magni (2014).

Neste estudo, foram propostas duas metodologias: expressão do tipo Chen e do tipo $\ln \ln$, resultando em duas equações distintas.

As novas equações de chuvas intensas são baseadas numa série de dados consistentes, com uma série histórica de 31 anos. Foi feita a comparação entre elas e seus comportamentos nos diversos períodos de retornos e as curvas apresentaram

comportamentos diferentes. A equação do tipo Chen indicou boa extrapolação para grandes períodos de retorno. Já a equação do tipo $\ln \ln$ apresentou resultados melhores para durações menores que 40 min e maiores que 800 min.

Podem-se utilizar ambas as equações para eventos de projeto com pequenos períodos de retorno e, quando há necessidade de utilizar a equação para grande período de retorno, é mais interessante empregar a equação do tipo $\ln \ln$, pois tende a maximizar as intensidades de chuva.

Após a análise do comportamento das chuvas para pequenas e grandes durações, foram geradas duas equações (21 e 22), com um erro quadrático menor do que com todas as durações. Houve

uma melhora significativa para todas as durações, recomendando-se, ao adotar o método Chen, utilizar as equações variando pelas durações, pois, nesse caso, a intensidade de chuva varia com a duração. Para o método *lnln*, não houve ganho utilizando a ferramenta *Solver*, pois o ajuste já é feito dentro da própria metodologia, ou seja, utilizando diretamente a Equação 20.

As equações são uma ferramenta muito importante para projetos de estruturas hidráulicas, tanto na micro quanto na macrodrenagem, mas devem ser constantemente atualizadas com dados recentes e estudos minuciosos com dados confiáveis e séries mais extensas.

7 REFERÊNCIAS

- CARPENTIER, J.; ABADIE, J. Généralisation de la Méthode du Gradient Réduit de Wolfe au cas des Contraintes Non Lineaires. IV International Conference on Operational Research. Anais... In: *PROCEEDINGS OF ... OPERATIONS RESEARCH SOCIETY OF AMERICA*. New York: D. B. Herts and J. Melese, 1966.
- CHEN, C. L. Rainfall Intensity - duration - frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering* - ASCE, Vol. 109, n. 12, p. 1603-21, 1983.
- CHOW, V. T. A general formula for hydrologic frequency analysis. *Transactions American Geophysical Union*, v.32, 231-237, 1951.
- CHOW, V. T. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1964.
- GOULART, J.P.; MAESTRINI, A.P.; NEBEL, A. L. Relação intensidade-duração-frequência de chuvas em Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1992, Vol7(1),543-552
- KITE, G. W. Frequency and Risk Analysis in Hydrology: *Water Resources Publications*, Littleton, Colorado, 257 p., 1977.
- MAGNI, N. L. G. Estudo Pontual de Chuvas Intensas - Proposição e Análise de Uma Metodologia de Estudo das Relações Intensidade Duração Frequência Definidas para Um Ponto. 1984. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)* - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.
- MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. *Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE; EPUSP, 1999.
- MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. *Precipitações intensas no Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE; CTH, 2014.
- MARTINS, D.; KRUK, N. S.; TSCHOKE, G. V.: Determinação da equação de chuvas intensas para a cidade de Caraguatatuba - SP. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. *Hidrologia Estatística*. Belo horizonte: CRPM, 2007. 561p.
- PFAFSTETTER, O. *Chuvas intensas no Brasil: Relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos*. Rio de Janeiro: DNOCS, 1957. 419p.
- SETZER, J. *Chuvas de Intensidade máxima no estado de São Paulo*. Revista DAE. N. 401, 1973.
- SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JUNIOR, F.F.R.; CAMPOS, J.N.B. *Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC*. Revista DAE, Ed. 192, n. 1491,2012
- VILLELA, S. M., MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1975 245 p.
- WALTZ, R. C. Um estudo climatográfico de chuvas máximas e obtenção da primeira Equação de Chuvas Intensas para São José dos Campos-SP, tendo como perspectiva o Planejamento Urbano do município. *Dissertação (Mestrado em Planejamento urbano e regional)* - Universidade do Vale do Paraíba/SP, 2000.
- WILKEN, P. S. *Engenharia de Drenagem Superficial*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 1978.
- ZHU, J., STONE, M.C., FORSEE, W. 2012. Analysis of Potential Impacts of Climate Change on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Relationships for Six Regions in the United States. *Journal of Water and Climate Change*, 3(3):185-196