



**EIXO TEMÁTICO:**

- ( ) Desastres, Riscos Ambientais e a Resiliência Urbana
- ( **X** ) Drenagem Urbana Sustentável
- ( ) Engenharia de Tráfego, Acessibilidade e Mobilidade Urbana
- ( ) Habitação e a Gestão Territórios Informais
- ( ) Infraestrutura, Espaços Públicos e Ambiência Urbana
- ( ) Intervenções e Requalificações da Cidade Contemporânea
- ( ) Patrimônio Histórico: Temporalidade e Intervenções
- ( ) Políticas Públicas, Justiça Social e o Direito a Cidade
- ( ) Saneamento Ambiental
- ( ) Tecnologia e Sustentabilidade na Construção Civil

**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)**

*Procedure for Construction of Rain Equation from the Maximum Daily Rainfall obtained from anual series: Rain Equation Update of the city of São Carlos (SP)*

*Procedimiento para la Construcción de la Ecuación de la Lluvia em vista de las máximas precipitaciones diárias obtenidas de serie anual: Actualización de la ecuación de la Lluvia de la ciudad de San Carlos (SP)*

**Lucas Narciso de Britto**

Engenheiro Civil, UFSCar, Brasil.  
lnbritto@gmail.com

**Erich Kellner**

Professor Doutor, UFSCar, Brasil.  
erich.kellner@ufscar.br



### RESUMO

As equações I-D-F também conhecidas como *equação de chuva* procuram relacionar as intensidades de precipitação com sua duração e frequência. Exatamente por essa correlação, as equações I-D-F são utilizadas por projetistas hidráulicos nos dimensionamentos de sistemas de micro e macrodrenagem, assim como em sistemas prediais de águas pluviais. No município de São Carlos (SP), nos dias atuais, ainda é empregada uma equação I-D-F proposta por Barbassa (1991) construída a partir de 27 anos de observação das máximas precipitações diárias. Neste trabalho foi expandida a série de precipitações, obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A série de 39 anos foi analisada estatisticamente, verificada a ocorrência de *outliers* e sua aderência ao modelo de Gumbel, explicitando a metodologia empregada e propondo atualização da equação I-D-F. Comparou-se as intensidades de precipitação obtidas da equação de chuva atualizada com aquela proposta por Barbassa (1991), e observou-se diferenças que variaram de 1% até 80% nos valores obtidos, sendo maiores as diferenças relativas quanto menores os períodos de retorno e os tempos de chuva considerados, indicando a necessidade de se manter as equações I-D-F atualizadas.

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

### ABSTRACT

The I-D-F equations also known as rain equation try to relate the rainfall intensities with its duration and frequency. Precisely because of this correlation, equations I-D-F are used by the hydraulic designers on dimensioning of micro and macro drainage systems, as well as in building rainwater systems. In São Carlos (SP), nowadays, is still employed an equation I-D-F proposed by Barbassa (1991) built on 27 years of observation of the maximum daily rainfall. This work expanded the range of precipitation, obtained from the National Institute of Meteorology - INMET. The 39 years of observation was statistically analyzed, verified the occurrence of outliers and their adherence to the Gumbel model, explaining the methodology and proposed update of the equation I-D-F. It was compared the rainfall intensities obtained from the rain equation updated with the one proposed by Barbassa (1991), and observed differences ranging from 1% to 80% in values, and the greater the differences in the shorter return periods and rain times considered, indicating the need to keep the I-D-F equations updated.

**KEYWORDS:** Hydrology. Equation I-D-F. Drainage systems.

### RESUMEN

Las ecuaciones I-D-F también conocidas como las ecuaciones de lluvia tratan de relacionar las intensidades de lluvia con su duración y frecuencia. Precisamente a causa de esta correlación, las ecuaciones I-D-F son utilizados por los diseñadores hidráulicos en el dimensionamiento de los sistemas de micro y macro drenaje, así como en la construcción de sistemas de construcción de agua de lluvia. En São Carlos (SP), hoy en día, todavía se emplea una ecuación I-D-F propuesta por Barbassa (1991) construida en 27 años de observación de la precipitación máxima diaria. En este trabajo se amplió el rango de precipitación, obtenida del Instituto Nacional de Meteorología - INMET. El número 39 años de observaciones fue analizada estadísticamente, se verifico la presencia de outliers y su adhesión al modelo Gumbel, explicando la metodología y propuesta de actualización de la ecuación I-D-F. Se comparó las intensidades de lluvia obtenidos a partir de la ecuación de lluvia actualizado con la propuesta por Barbassa (1991), y se observó diferencias que van desde 1% a 80% en los valores, y la mayor de las diferencias en los períodos de retorno más cortos y los tiempos de lluvia considerados, lo que indica la necesidad de mantener las actuales las ecuaciones I-D-F.

**PALABRAS CLAVE:** Hidrologia. Ecuación I-D-F. Sistemas de drenage.



### 1 – INTRODUÇÃO

A Hidrologia é a ciência responsável por tratar da água no planeta Terra, além da sua circulação e relação com o meio ambiente e as formas vivas. Apresentada como uma ciência interdisciplinar que tem evoluído significativamente em face aos problemas resultantes da ocupação das bacias e do aumento significativo na utilização de água, a Hidrologia passou de uma ciência preponderantemente descritiva e qualitativa para uma área do conhecimento que se utiliza de métodos matemáticos e estatísticos como forma de analisar as informações existentes.

O ser humano convive desde a sua origem com as condições naturais do planeta, sendo essencial para a sobrevivência deste o entendimento dos processos envolvidos no meio físico natural. Para o caso das precipitações, por exemplo, são utilizadas observações realizadas no passado para tentar entender a sazonalidade e a intensidade das suas ocorrências.

Ao ocupar determinada região das bacias hidrográficas, ocorre de forma simultânea o impacto sobre o meio ambiente e o impacto do meio ambiente sobre o homem, através das enchentes. Surge, então, a necessidade de um estudo aprofundado sobre a relação entre as precipitações e a ocupação da bacia pelo ser humano, dando origem a uma das principais áreas da Hidrologia Aplicada: a Drenagem Urbana (TUCCI, 2002).

Um sistema de Drenagem Urbana faz parte dos melhoramentos públicos efetuados na infraestrutura, pavimentação de ruas, guias e passeios, dentre outros. É ideal para a comunidade que a área urbana seja concebida de forma integrada, ou seja, todos os melhoramentos públicos sejam elaborados de forma conjunta. Caso o sistema de drenagem não seja considerado desde o início da formulação do planejamento, por exemplo, este pode revelar-se no futuro como um sistema de alto custo e ineficiente.

O sistema de drenagem urbana possui uma particularidade: o escoamento das águas pluviais sempre ocorrerá independente da existência ou não deste sistema. A qualidade do sistema projetado é que determinará os benefícios ou prejuízos à população (CETESB, 1978).

A forma de utilização dos dados de precipitações pluviais para finalidades hidrológicas é feita a partir do estabelecimento de uma relação analítica entre a intensidade, a duração e a frequência das precipitações. Essa relação, denominada *equação de chuva*, permite uma maior eficácia no projeto de sistemas de drenagem urbana (WILKEN, 1978).

A *equação de chuva* é obtida a partir de dados de precipitações pluviais passados, como por exemplo, séries históricas anuais. Porém, com o passar dos anos existem indícios de que os dados pluviais 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), em uma análise feita para a cidade de Campinas (SP).

A cidade de São Carlos (SP) tem sua equação de chuva proposta por Barbassa (1991), que contempla 27 anos de dados de precipitações e ainda é utilizada em projetos de drenagem urbana. Por conta disso, surge a necessidade de atualizar a equação I-D-F incorporando os últimos 25 anos de dados referentes às máximas precipitações diárias.



## 2 – OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo principal e os objetivos específicos.

### 2.1 – Objetivo principal

Este trabalho teve como objetivo apresentar o método para construção da equação de chuva a partir das máximas precipitações anuais observadas, aplicando-o para atualizar a equação de intensidade-duração-frequência da cidade de São Carlos (SP).

### 2.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- O levantamento dos dados pluviométricos de São Carlos (Estação Convencional INMET-Nº 83726);
- A análise gráfica e estatística dos dados pluviométricos;
- A comparação da equação obtida com a equação I-D-F com aquela utilizada para o município de São Carlos.

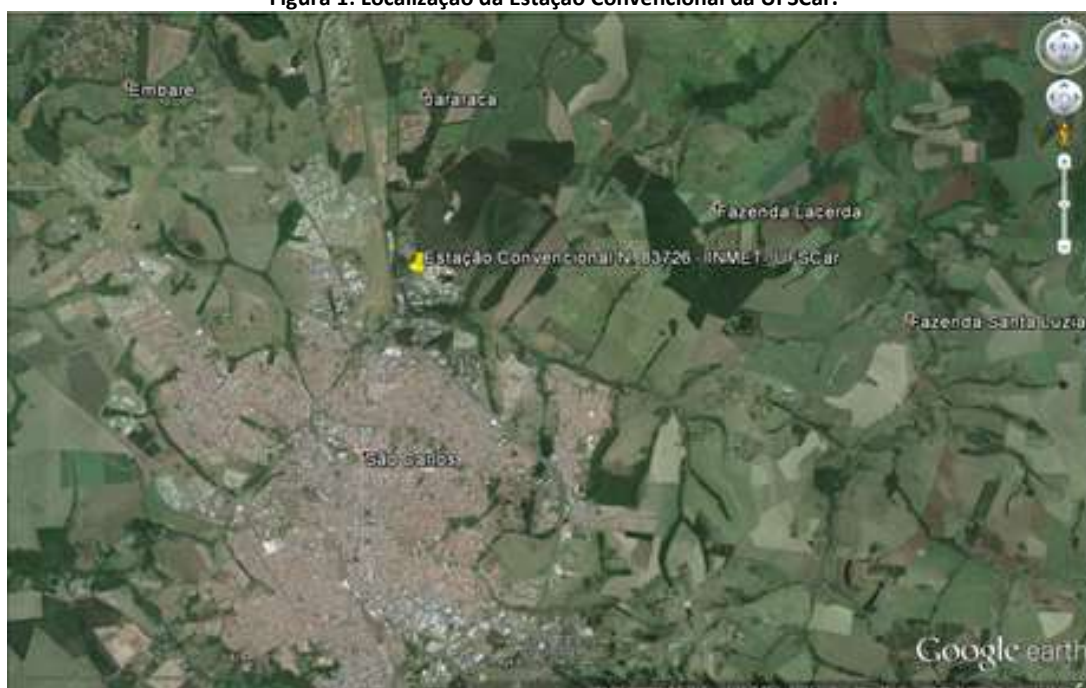
## 3 – METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada na obtenção da equação de chuva atualizada para a cidade de São Carlos, baseada em uma série de máximas precipitações anuais.

### 3.1 – Obtenção dos dados pluviométricos

Foi utilizada como fonte de dados para a realização do trabalho, a Estação Convencional do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Nº 83726), situada no campus da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, em São Carlos (SP) e em operação desde 01/01/1961.

Figura 1: Localização da Estação Convencional da UFSCar.



Fonte: Google Earth, 2016.



Cavalcanti, Silva e Reis (2015) usaram os dados de precipitação da Estação Convencional do campus da Universidade Federal de São Carlos como base para análise de consistência de outras estações de medição, sendo ela considerada confiável para análise de consistência dos postos de monitoramento instalados mais recentemente na malha urbana da cidade.

Pela inexistência de Estações Pluviométricas na mesma região hidrológica e com período histórico tão longo quanto o da Estação Convencional localizada na UFSCar não foram aplicados métodos de análise de consistência de dados para a estação em questão, conforme sugerido por ANA (2012). Todavia, a confiabilidade dos dados da Estação Convencional utilizada como fonte deste trabalho não foi afetada pela falta de análises de consistência.

Os dados pluviométricos da Estação Convencional Nº83726 do INMET foram obtidos do endereço eletrônico [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br) abrangendo o período de 01/01/1961 a 31/12/2015.

### 3.2 – Preparação dos dados a serem analisados

Da análise da série histórica de precipitação registrada pela Estação Convencional nº83726 do INMET foram considerados os anos que apresentaram menos de 10 dias de falhas no ano, ou que não tiveram falhas no período chuvoso.

O conjunto de dados de precipitação referente a um determinado ano que não se enquadrou nesses critérios foi desconsiderado para a análise das máximas precipitações.

### 3.3 – Análise estatística dos dados pluviométricos

#### 3.3.1 – Verificação de ocorrência de *Outliers*

Os dados pluviométricos foram submetidos a análises estatísticas a fim de se obter médias e desvios-padrão anuais, bem como a distribuição de frequência.

A partir do conjunto de dados relativos às máximas precipitações foi avaliada a ocorrência de *outlier* conforme descrito por Pinheiro (2013).

- Os valores anuais de precipitação máxima foram colocados em ordem crescente;
- Identificou-se a mediana;
- Identificou-se o menor e o maior número da série;
- Identificou-se a mediana entre o menor número da série e a mediana geral ( $Q_1$ );
- Identificou-se a mediana entre o maior número da série e a mediana geral ( $Q_3$ );
- O cálculo do interquartil (IQR) ocorreu conforme a Equação (1):

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

- O limite de *outlier* ( $L_0$ ) foi obtido pela Equação (2):

$$L_0 = IQR \times 1,5 \quad (2)$$

Foram considerados *outliers* os números da série abaixo de ( $Q_1 - L_0$ ) ou acima de ( $Q_3 + L_0$ ).

Da série histórica, foram desconsiderados os anos cujas máximas precipitações estavam fora deste intervalo, a fim de se garantir um bom ajuste ao empregar a formatação de Gumbel, conforme proposto por Pinheiro (2013).

#### 3.3.2 – Verificação da aderência da Série Pluviométrica à curva de Gumbel

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, sendo construído o gráfico da máxima precipitação em função do período de retorno.



A partir da média ( $\bar{P}$ ) e desvio padrão ( $\sigma_x$ ) da série pluviométrica considerada foram calculados os valores de K de Gumbel corrigidos conforme Equação (3) proposta por Subramanya (2013), para determinação dos períodos de retorno.

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

Sendo  $y_n$  a média reduzida e  $\sigma_n$  é o desvio padrão reduzido, ambos relativos ao tamanho da amostra e obtidos das Tabelas 1 e 2, respectivamente.

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

Tamanho da amostra 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.

Tamanho da amostra 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)

Com os valores de K de Gumbel corrigido, obtiveram-se as precipitações máximas de Gumbel conforme Equação (4).

$$P_T = \bar{P} + K \times \sigma_x \tag{4}$$

Sendo  $P_T$  a precipitação calculada pelo Método de Gumbel (mm);  $\bar{P}$  a precipitação média do conjunto de precipitações obtidas após a análise dos *outliers* (mm); K a constante de



Gumbel corrigida (adimensional);  $\sigma_x$  o desvio padrão do conjunto de precipitações obtidas após a análise dos outliers (mm).

Para analisar a aderência dos dados observados ao modelo de Gumbel foi construído o gráfico Precipitação Máxima Observada pela Precipitação Máxima de Gumbel, sendo então analisado o coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ) e a inclinação da reta obtida, que deve ser o mais próximo possível de 45 graus.

### 3.4 – Construção das Intensidades de precipitação a partir das precipitações diárias

Para obtenção da equação I-D-F faz-se necessário transformar as alturas precipitadas em intensidade de precipitação. Para isso, empregou-se a Equação (3.4) que se refere ao Modelo de Gumbel ajustado às precipitações observadas, considerando os períodos de retorno ( $T_R$ ) de 5, 8, 10, 20, 50 e 100 anos.

A essas precipitações calculadas, com duração de um dia, foram aplicados os fatores para a conversão dessas precipitações em precipitações com duração de 24h, 12h, 1h, 30min, 15min, 10min e 5 min, propostos por Tomaz (2002) e apresentados na Tabela 3.

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

Relação entre alturas pluviométricas	5min /30min	10min /30min	15min /30min	30min/1h	1h/24h	12h/24h	24h/1dia
Fator de relação entre chuvas	0,34	0,51	0,67	0,74	0,51	0,88	1,14

Fonte: adaptado de Tomaz (2002).

Assim, por exemplo, para se converter a precipitação máxima diária para um período de retorno de 50 anos, basta calcular o valor obtido da Equação (4) pelo coeficiente 1,14 da Tabela 3, resultando assim na precipitação máxima para um período de retorno de 50 anos com duração de 24 horas (1440 minutos). Dividindo-se a altura de precipitação obtida pelo tempo, obtém-se a intensidade de precipitação, e assim sucessivamente para os demais tempos de precipitação estabelecidos.

### 3.5 – Obtenção da equação Intensidade-Duração-Frequência (I-D-F)

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 representado pela Equação (5).

$$I = \frac{a \times T_R^b}{(t + c)^d} \tag{5}$$

Sendo  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  constantes a serem determinadas pelo método dos mínimos quadrados;  $T_R$  o período de retorno (anos);  $I$  a intensidade de chuva (mm/min).

#### 3.5.1 – Determinação da constante “c”

De acordo com Wilken (1978), para o cálculo da constante  $c$  aplica-se o método de Fair-Greyer, 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 (6).



$$T_R = \frac{N}{5} \quad (6)$$

Sendo  $T_R$  o período de retorno (anos) fixado a partir do número  $N$  de observações utilizado. A definição do parâmetro “ $A$ ” é obtida pela aplicação da Equação (7).

$$A = a \times T_R^b \quad (7)$$

Substituindo a Equação (7) em (5), obteve-se a Equação (8).

$$I = \frac{A}{(t+c)^d} \quad (8)$$

Em seguida foi plotado um gráfico bilogarítmico das durações de chuva em função das intensidades de chuva. Nesse gráfico, foram denominados os pontos  $(I_1, t_1)$  e  $(I_2, t_2)$  como sendo os pontos inicial e final da curva, respectivamente. Também foi determinado a partir desta curva o ponto  $(I_3, t_3)$ , que possui relação de intensidade conforme a Equação (9).

$$I_3 = \sqrt{I_1 \times I_2} \quad (9)$$

Substituindo-se o valor da intensidade da Equação (3.8) na Equação (3.9), obteve-se a Equação (10).

$$\frac{A}{(t_3+c)^d} = \sqrt{\frac{A}{(t_1+c)^d} \times \frac{A}{(t_2+c)^d}} \quad (10)$$

Isolando a constante “ $c$ ”, dá-se origem à Equação (11).

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 \times t_2}{t_1 + t_2 - 2 \times t_3} \quad (11)$$

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.

### 3.5.2 – Determinação das constantes “ $A$ ” e “ $d$ ”

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 (8), originando a Equação (12).

$$\log I = \log A - d \times \log(t+c) \quad (12)$$

Ao utilizar-se o software Excel, o melhor ajuste aos pontos é um ajuste de potência. Portanto a correlação do ajuste com os coeficientes deve ser realizada a partir da Equação (8) reescrita, o que originou a Equação (13).

$$I = A * (t+c)^{-d} \quad (13)$$

### 3.5.3 – Determinação das constantes “ $a$ ” e “ $b$ ”

As constantes  $a$  e  $b$  foram determinadas de modo análogo ao item anterior. Foi aplicado logaritmo nos dois lados da equação (7), gerando a Equação (14).





$$\log A = \log a + b \times \log(T_R) \quad (14)$$

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. Novamente, para ajustes realizados com o software Excel, o melhor ajuste para os pontos é um ajuste de potência que deve ser comparado diretamente com a Equação (7).

### 3.6 – Comparação entre as equações I-D-F

Após a determinação da equação I-D-F com os dados de precipitação atualizados, comparou-se com aquela proposta por Barbassa (1991), representada pela Equação (15).

$$I = \frac{28,03 * T_R^{0,199}}{(t+16)^{0,936}} \quad (15)$$

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

Fixado os períodos de retorno de 1, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, calculou-se as intensidades de precipitação a partir das equações atualizada e aquela proposta por Barbassa em 1991, sendo calculadas as diferenças observadas relativas, conforme Equação (16).

$$D = \frac{I_A - I_{Barbassa}}{I_{Barbassa}} \times 100 \quad (16)$$

Sendo  $D$  a diferença relativa (%);  $I_A$  a intensidade de precipitação obtida pela Equação atualizada (mm/minuto);  $I_{Barbassa}$  a intensidade de precipitação obtida pela Equação (15) (mm/minuto).

## 4 – RESULTADOS

### 4.1 – Obtenção dos dados pluviométricos

Os dados referentes à Estação Convencional Nº83726 do INMET foram obtidos através do endereço eletrônico [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). Inicialmente, os dados estavam em formato de texto (.txt) sendo posteriormente convertidos para uma planilha eletrônica do software Excel. Os dados obtidos vão de 01/01/1961 até 31/12/2015, configurando 55 anos de dados disponíveis.

### 4.2 – Preparação dos dados pluviométricos

Os critérios para a eliminação de dados estabelecidos foram: a ocorrência de 10 ou mais dias de falhas de leitura em um mesmo ano e/ou a ocorrência de uma falha no período chuvoso. Trabalhou-se com o fato de o período chuvoso no município ter início no mês de setembro estendendo-se até o mês de março. Os dados levantados mostram que de um total de 54 precipitações máximas registradas, 45 ocorrem de setembro a março, enquanto nove ocorrem fora deste período. Portanto, 83% das precipitações máximas registradas encontram-se dentro do período chuvoso proposto, o que valida a hipótese da ocorrência de período chuvoso para a cidade de São Carlos (SP).

Analisando-se então as precipitações máximas ocorridas em cada ano, foram excluídos pelo número de falhas totais registradas os seguintes anos da série histórica: 1968, 1969, 1979, 1980, 1981, 1985, 1992 e 1999. Todos esses anos possuem 10 ou mais falhas de leitura durante o ano todo.

Validada a hipótese de ocorrência do período chuvoso, foram excluídos os anos que possuem ao menos uma falha entre setembro e março. São eles: 1961, 1970, 1971, 1973, 1974, 1998 e 2013. Após a verificação destes dois critérios, restaram 40 precipitações máximas para compor a série histórica.

### 4.3 – Análise estatística dos dados pluviométricos

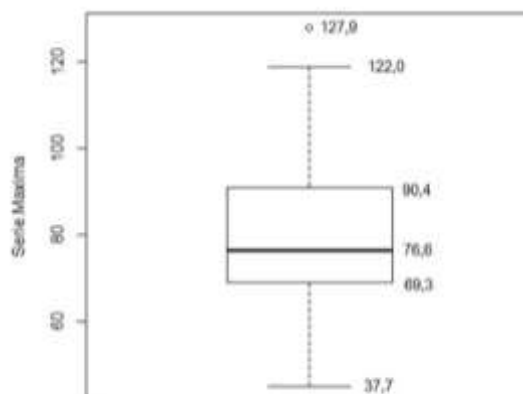
#### 4.3.1 – Verificação da ocorrência de outliers

Para as 40 precipitações máximas que não foram eliminadas pelos critérios do item anterior, foram aplicados os procedimentos para a avaliação da ocorrência de *outlier*<sup>1</sup>, conforme proposto por Pinheiro (2013) e descrito no item 3.3.1.

Observou-se que a mediana da série histórica é igual a 76,6mm, o primeiro quartil ( $Q_1$ ) é igual a 69,3mm e o terceiro quartil ( $Q_3$ ) é igual a 90,4mm.

A partir destes valores, foram determinados os limites superior e inferior da série, sendo eles 122,0mm e 37,7mm respectivamente, conforme apresentado no gráfico da Figura 2. Portanto, conclui-se que, entre os dados restantes, a precipitação de 127,9 mm, associada ao ano de 1965 é um *outlier*, sendo então desconsiderado para garantir-se um bom ajuste ao empregarem-se a formatação de Gumbel, resultando um conjunto amostral de 39 dados de precipitação considerados válidos.

Figura 2: *Boxplot* para a determinação de outliers.



#### 4.3.2 – Verificação da aderência da Série Pluviométrica à curva de Gumbel

Da construção do gráfico entre a Precipitação teórica de Gumbel, obtida da aplicação da Equação (4), pelas precipitações observadas, conforme apresentado na Figura 3, analisou-se a correlação existente a partir do coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ).

<sup>1</sup> Segundo Hawkins (1980), um *outlier* é um fato que desvia tanto de outros fatos a ponto de gerar suspeitas de que ele foi gerado por um mecanismo diferente. Em outras palavras, em uma série de números, um número que é muito maior ou muito menor que o restante dos números da série é chamado de *outlier*.

Figura 3 Gráfico para comparação entre as precipitações observada e de Gumbel.



Da Figura 3, a variável  $R^2$  encontrada foi de 0,961 e o coeficiente angular da reta aproximada é igual a 1,0777. O ângulo cuja tangente se aproxima de 1,0777 é  $47,141699^\circ$ .

Como o valor de  $R^2$  foi próximo de 1, determinando um bom ajuste ao conjunto de pontos e a reta obtida tem inclinação próxima à inclinação esperada de  $45^\circ$ , conclui-se que a Série Pluviométrica observada tem boa aderência à série teórica de Gumbel.

#### 4.4 – Obtenção da equação Intensidade-Duração-Frequência (I-D-F)

Para a determinação da constante  $c$ , foi fixado o tempo de retorno conforme o número de observações utilizado, de acordo com a Equação (6). Como foram utilizadas 39 precipitações máximas observadas, o tempo de retorno ( $T_R$ ) foi fixado em oito anos. Para o tempo de retorno de oito anos foram determinadas as precipitações máximas diárias, através da equação de Gumbel, que foram em seguida transformadas em precipitações com durações de 24h, 12h, 1h, 30min, 15min, 10min e 5 min. Essas precipitações foram posteriormente transformadas em intensidades de precipitação.

##### 4.4.1 – Determinação da constante $c$

Considerando período de retorno ( $T_R$ ) de 8 anos conforme descrito anteriormente, construiu-se um gráfico bilogarítimo das durações das precipitações em função das intensidades precipitadas, conforme apresentado pela Figura 4.

Figura 4: Gráfico bilogarítimo da duração da chuva em função da intensidade



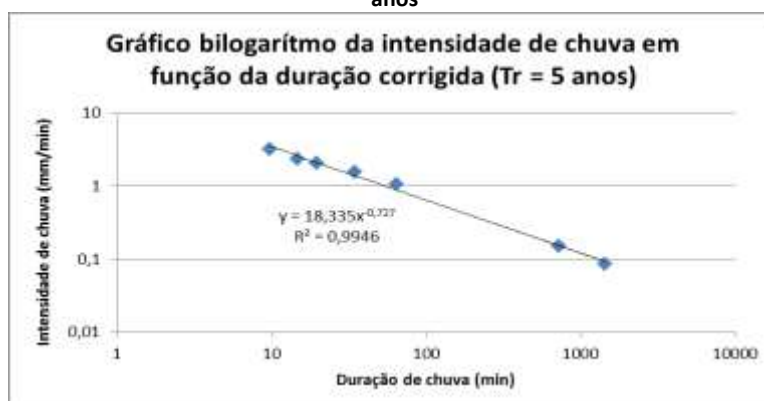
A partir da Figura 4, foram determinados os pontos  $(I_1, t_1)$  e  $(I_2, t_2)$  como sendo os pontos extremos apresentados no gráfico. A intensidade  $I_3$  foi obtida obedecendo à relação de intensidade descrita na Equação (9). Em seguida, foi determinada a duração  $t_3$  a partir da Figura 4.

Inserindo os parâmetros obtidos na Equação (11), foi calculada a constante  $c$  igual a 4,72298. Como a constante  $c$  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.

#### 4.4.2 – Determinação das constantes “A” e “d”

O processo descrito no item 4.4.1 para obtenção das intensidades de precipitação foi repetido, agora para os seguintes tempos de retorno: 5, 10, 20, 50 e 100 anos. A partir disso, foram plotados os gráficos das intensidades de chuva em função das durações deslocadas pela constante  $c$  ( $t+c, I$ ), conforme Figura 5.

Figura 5: Gráfico bilogarítimo da intensidade de chuva em função da duração para tempo de retorno ( $T_R$ ) igual a 5 anos



Nota-se que devido ao ajuste realizado aos pontos pelo software Excel, a equação obtida na Figura 5 fornece diretamente os valores do parâmetro “A” e da constante “d”, quando comparada com a Equação (13). Portanto, o valor da constante  $d$  é igual a 0,727, enquanto a constante  $A$  varia conforme o tempo de retorno. Para cada tempo de retorno foi criado um gráfico similar à Figura 5, que forneceu um novo valor para o parâmetro  $A$ . Os valores do parâmetro  $A$  foram reunidos na Tabela 4.

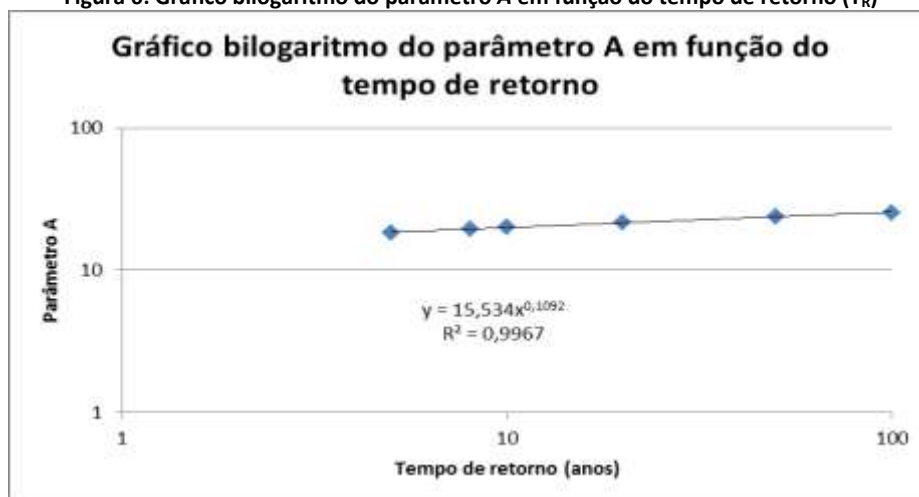
Tabela 4: Valores da constante A e seu respectivo tempo de retorno ( $T_R$ ).

$T_R$ (anos)	Parâmetro A
5	18,335
8	19,522
10	20,069
20	21,732
50	23,884
100	25,496

#### 4.4.3 – Determinação das constantes “a” e “b”

A partir dos dados apresentados na Tabela 4 foi construído um gráfico bilogaritmo, considerando o parâmetro A em função do tempo de retorno ( $T_R$ ), conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6: Gráfico bilogaritmo do parâmetro A em função do tempo de retorno ( $T_R$ )



Pela utilização do software Excel, a equação de ajuste dos pontos apresentados na Figura 6 foi comparada diretamente com a Equação (7), obtendo-se os valores das constantes  $a$  e  $b$ , respectivamente, 15,534 e 0,1092.

#### 4.4.4 – Determinação da Equação I-D-F

O formato geral de uma equação I-D-F é apresentado conforme a Equação (3). Substituindo-se as constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  pelos valores determinados conforme apresentado nas seções anteriores, obteve-se a equação I-D-F atualizada para a cidade de São Carlos (SP), conforme representado pela Equação (17).

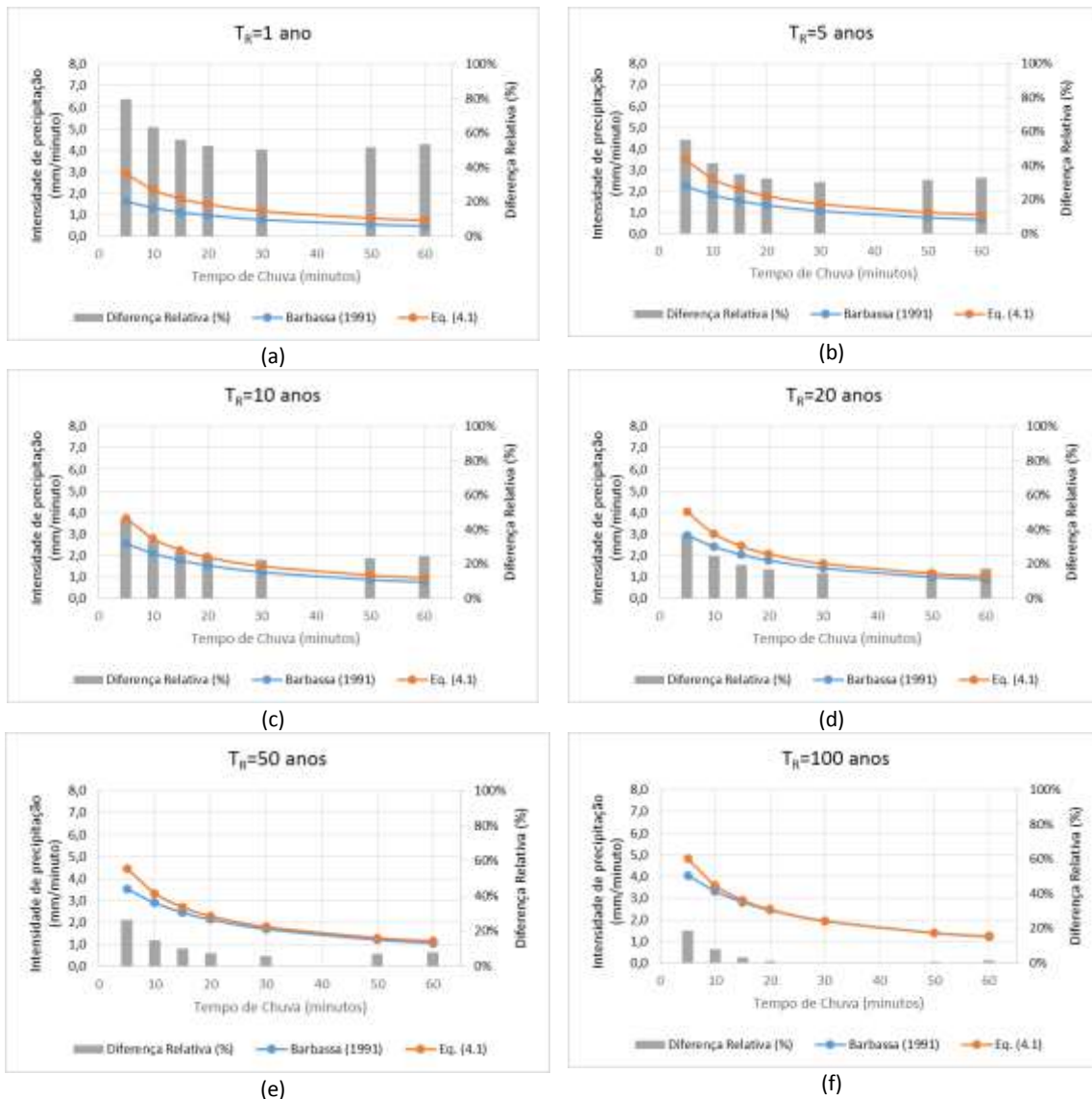
$$I = \frac{15,534 \times T_R^{0,1092}}{(t + 5)^{0,727}} \quad (17)$$

Sendo  $I$  a intensidade de precipitação (mm/minuto);  $T_R$  o período de retorno (anos);  $t$  o tempo de duração da precipitação (minutos).

#### 4.4.5 – Comparação entre as Equações I-D-F

As intensidades de chuva obtidas a partir das Equações (15) e (17), foram comparadas, assim como as diferenças relativas foram obtidas a partir da Equação (16), estando os resultados apresentados nos gráficos da Figura 7.

Figura 7: Comparação entre os resultados da equações I-D-F avaliadas para períodos de retorno de: a) 1 ano; b) 5 anos; c) 10 anos; d) 20 anos; e) 50 anos; f) 100 anos



Ao analisar os gráficos da Figura 7 percebe-se que a Equação (17) resultada em valores de intensidade de precipitação superiores àqueles obtidos pela equação proposta por Barbassa (1991) e representada pela Equação (15), quanto menor forem os períodos de retorno considerados.

Enquanto período de retorno de 1 ano resulta em diferenças que variam de 50% a 80% conforme a diminuição do tempo de chuva, para períodos de retorno de 100 anos as diferenças entre as duas equações I-D-F analisadas variaram de 1% a 19%.

De maneira geral, essas diferenças podem ser explicadas pelo tamanho das amostras consideradas para a determinação das equações I-D-F. Enquanto Barbassa (1991) trabalhou com 20 precipitações máximas, a atualização proposta considerou 39 precipitações máximas válidas.



## 5 – CONCLUSÕES

- O levantamento dos dados pluviométricos da cidade de São Carlos (SP), obtidos da Estação Convencional INMET - Nº 83726 resultou em uma série com 55 anos de dados disponíveis. Deste conjunto, oito registros foram excluídos por apresentarem mais do que 10 falhas de leitura durante o ano e sete registros foram excluídos por apresentarem uma ou mais falhas no período chuvoso (setembro a março).
- A análise estatística dos dados pluviométricos revelou que a série histórica possui mediana igual a 76,6 mm. Identificados os outros quartis, determinou-se que o limite superior da série é igual a 120,0 mm, enquanto o limite inferior foi estabelecido em 37,7 mm. Com isto constatou-se que a série histórica possuía um *outlier*, que foi eliminado visando o bom ajuste à formatação de Gumbel, o que resultou em um conjunto amostral de 39 anos.
- Ao se comparar os valores de intensidades de precipitação calculados pela Equação (17) e os valores da equação I-D-F proposta por Barbassa (1991), observaram-se diferenças que variaram de 80% a 1%. Quanto menores o período de retorno e o tempo de chuva considerados, maiores foram as diferenças observadas entre as equações.
- As diferenças entre intensidades de precipitações encontradas ao efetuar-se a atualização da equação de chuva ressaltam a importância da constante atualização da equação conforme apontado por Zuffo (2004).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. Agencia Nacional de Águas. **Orientações para consistência de dados pluviométricos**. 2012. 21p.
- BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial da cidade de São Carlos – SP**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.
- CAVALCANTI, D. O.; SILVA, D. F.; REIS, L. F. R. **Análises preliminares de dados de monitoramento das bacias urbanas do município de São Carlos – SP**. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Brasília. 2015. 8p.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Manual de Drenagem Urbana**. 2ª Ed. São Paulo: Editora CETESB, 1978. 248p.
- HAWKINS, D. Identification of Outliers. Chapman and Hall, London, 1980.
- INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 13/03/15.
- 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.
- SUBRAMANYA, K. Engineering Hydrology. 4ª ed. New Delhi, McGraw Hill, 2013, 534p.
- TOMAZ, Plínio. **Cálculo hidrológico e hidráulico para obras municipais**. 1ª ed. São Paulo. Ed. Hermano Bugelli Ltda. 2002. 475p.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2002. 943p.
- WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978. 478p.
- ZUFFO, A. C. Equações de chuvas são eternas? In: XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. 2004, São Pedro, estado de São Paulo. 9p