

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE CHUVAS
INTENSAS PARA A CIDADE DE MACEIÓ**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PEDRO RILDOMAR DOS SANTOS

Maceió - AL
2018

PEDRO RILDOMAR DOS SANTOS

**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE CHUVAS
INTENSAS PARA A CIDADE DE MACEIÓ**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador(a): Prof. Dr. Marllus Gustavo F. P. das Neves

Maceió - AL
2018

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário Responsável: Janis Christine Angelina Cavalcante – CRB:1664

S234a	<p>Santos, Pedro Rildomar dos. Análise de métodos para obtenção de chuvas intensas para a cidade de Maceió / Pedro Rildomar dos Santos. – 2018. 149 f. : graf., tabs.</p> <p>Orientador: Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2018.</p> <p>Bibliografia: f. 124-127. Apêndices: 128-139. Anexos: 140-148.</p> <p>1. Chuvas intensas – Maceió/AL. 2. Chuvas – Intensidade-duração-frequência. 3. Distribuição de Gumbel. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628.1.037</p>
-------	--



Folha de Aprovação

PEDRO RILDOMAR DOS SANTOS

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PARA A
CIDADE DE MACEIÓ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Em: ___/___/___



Prof. Dr. Marllus Gustavo Perreira Passos das Neves
(Orientador- PPGRHS/CTEC/UFAL)

Banca examinadora:



Prof.ª Dr.ª Cleuda Custódio Freire
(Examinadora interna-PPGRHS/CTEC/UFAL)



Prof. Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira
(Examinador externo-UNESP-IS)

AGRADECIMENTO

Primeiramente dou graças a Deus Pai, Filho e Espírito Santos por todas as bênçãos e oportunidades recebidas e que receberei, e por ter me ajudado e me dado forças em todos os momentos da minha vida, pois estou certo que sem Ele nada do que existe se fez.

Agradeço aos meus pais, Liu e Neno, pelo carinho e compaixão, pela dedicação e disposição, e pelos grandes exemplos de vida como pessoas, os quais serviram de base para a formação de alguma maneira para o meu caráter.

Agradeço ao meu orientador, professor Marllus Gustavo F. P. das Neves pela orientação, conhecimento transmitido e paciência, e também pelo apoio recebido durante a realização deste trabalho.

Um enorme agradecimento a todos os professores do Programa de Pós-graduação de Recursos Hídricos e Saneamento – PPGRHS, pelo comprometimento para um ensino de qualidade e pelos conhecimentos transmitidos.

A professora Rita Damé por disponibilizar sua tese de doutorado que serviu para desenvolvimento de uma etapa deste estudo, e por indicar sua aluna de doutorado para me ajudar.

A minha amiga Emanuele Baifus Manke, conhecida como Manu, pela orientação, paciência e dedicação em me ajudar no desenvolvimento de uma das etapas deste estudo.

Aos meus amigos do PPGRHS e também meus irmãos em Cristo Jesus, pela amizade e companheirismo.

A Prefeitura de Porto de Pedras/AL, especial ao prefeito Henrique Vilela, pela paciência e compreensão em alguns momentos de ausência.

Em especial, um agradecimento a toda a minha família que foi o meu suporte para essa realização.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

No dimensionamento de obras hidráulicas, são necessários o conhecimento e o uso de equações de chuvas intensas. Neste contexto, e sabendo que a cidade de Maceió possui curvas antigas, este estudo tem o objetivo de estabelecer uma relação intensidade-duração-frequência (IDF) para a cidade de Maceió através de métodos diferentes: método das relações, Bell, Chen, Righetto, modelo BLPRM e Isozonas. A metodologia foi dividida em dois caminhos: com dados horários da estação automática da Universidade Federal de Alagoas, e o outro com dados diários da estação pluviométrica desta mesma localidade. No primeiro caso, foi gerada uma curva IDF para durações superiores a 60 minutos, através do ajuste à distribuição de Gumbel. Chuvas intensas obtidas pelos métodos citados anteriormente foram comparadas às chuvas intensas geradas pela IDF com auxílio do teste t de Student, do Erro Relativo Médio, do Coeficiente de Determinação, da Razão dos Desvios e do Coeficiente de Massa Residual. Os melhores resultados foram obtidos com o método de Chen (1983). Este método então foi proposto para durações menores que 60 minutos. Unindo os dados acima e abaixo da duração de 60 minutos, obteve-se uma curva IDF para todas as durações. Esta Nova Equação foi comparada à equação de Pfafstetter e à equação de Denardin e Freitas. O resultado mostrou que, para durações menores que 30 minutos, as intensidades de precipitação da Nova Equação chegaram a ser 53% maiores que a primeira e 47% maiores que segunda. Isto é um indicador de que as equações antigas devem ter seus usos revistos, sobretudo para microdrenagem.

Palavras-chave: chuvas intensas, intensidade-duração-frequência, distribuição de Gumbel.

ABSTRACT

To design hydraulic structures, it is necessary to know and to use intense rainfall equations. In this context, and knowing that the city of Maceió has old curves, this study aims to establish an intensity-duration-frequency curve (IDF) for the city of Maceió through different methods: method of relations, Bell, Chen, Righetto, BLPRM model and isozonas. The methodology was divided in two ways: with hourly data of the automatic station of the Federal University of Alagoas, and the other with daily data of the rainfall station of this same locality. In the first case, an IDF curve was generated for durations over than 60 minutes, through the adjustment to the Gumbel distribution. Intensive rains obtained by the methods mentioned above were compared to the intense rains generated by the IDF using Student's t-test, Mean Relative Error, Determination Coefficient, Deviation Ratio and Mass Coefficient Residual. The best results were obtained with the method of Chen (1983). This method was then proposed for durations shorter than 60 minutes. Joining the data above and below the duration of 60 minutes, an IDF curve was obtained for all durations. This new equation was compared to Pfafstetter's equation and to the equation of Denardin and Freitas. The results showed that, for durations shorter than 30 minutes, the precipitation intensities of the new equation were 53% higher than the first and 47% higher than the second. This is an indicator that the old equations should have their uses reviewed, especially for microdrainage.

Key words: intense rainfall, intensity-duration-frequency, distribution of Gumbel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Precipitações Máximas	19
2.2	Importância da atualização da curva IDF	19
2.3	Equações de Chuvas Intensas Existentes para Maceió	21
2.4	Determinação da relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF)	22
2.5	Metodologias de Obtenção de Chuvas Intensas	24
2.5.1	Estudo de Chuvas Intensas realizados por Bell (1969)	24
2.5.2	Estudo de Chuvas Intensas realizados por Chen (1983)	27
2.5.3	Método das Relações (CETESB, 1979)	28
2.5.4	Isozonas	30
2.5.5	Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (DAMÉ, 2001)	32
3	METODOLOGIA	37
3.1	Levantamento de dados	40
3.2	Séries com dados subsidiários	43
3.2.1	Seleção da precipitação para estabelecimento da série	43
3.2.2	Ajuste da distribuição de probabilidade	44
3.2.3	Teste de Aderência	46
3.2.4	Determinação da relação intensidade, duração e frequência	46
3.3	Séries com dados diários	49
3.3.1	Seleção da precipitação de postos pluviométricos	49
3.3.2	Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo método das Relações (CETESB, 1979)	50
3.3.3	Determinação da relação intensidade –duração- frequência (IDF) pelo Método das Isozonas	50
3.3.4	Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo método de Damé (2001)	51
3.4	Aplicação da metodologia de Bell (1969)	54
3.5	Aplicação da metodologia de Chen (1983)	55
3.6	Comparação entre as diferentes metodologias	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Séries com dados subsidiários	57
4.2	Séries com dados diários	68
4.2.1	Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo Método da Isozonas	70

4.2.2	Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo Método das Relações das Durações (CETESB, 1979)	72
4.2.3	Determinação da relação intensidade-duração-frequência Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (DAMÉ, 2001).....	73
4.3	Aplicação da metodologia de Bell (1969)	86
4.4	Relação intensidade-duração-frequência pelo método de Chen (1983)	88
4.5	Comparação entre as diferentes metodologias	89
4.6	Uma Nova Equação de Chuvas Intensas para Maceió.....	102
5	CONCLUSÃO	119
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE.....	128
	ANEXOS.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de α para Maceió.....	22
Tabela 2.2 - Valores de β para Maceió.....	22
Tabela 2.3 - Coeficientes de desagregação de dados pluviométricos (CETESB, 1979)	29
Tabela 2.4 - Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas.....	31
Tabela 3.1 - Quadro Geral de disponibilidade de dados para Maceió/AL	42
Tabela 3.2 - Valores estabelecidos como precipitações e intensidades mínimas consideradas como chuvas	44
Tabela 3.3 - Combinações estatísticas utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo BLPRM. O nível de agregação temporal em minutos está mencionado para cada estatística.....	53
Tabela 4.1 - Séries anuais de precipitação máxima em mm, para diferentes durações, observadas durante o período de 2003 a 2017	58
Tabela 4.2 - Séries anuais de precipitação máxima em mm, para diferentes durações, em ordem decrescente, considerando os valores mínimos adotados como chuvas intensas	59
Tabela 4.3 - Séries anuais de intensidade máxima de precipitação (mm/h) para diferentes durações, em ordem decrescente, considerando-se os mínimos adotados para chuvas intensas	60
Tabela 4.4 - Intensidade de precipitação máxima em mm/h calculada pelo Método de Gumbel e a intensidade de precipitação observada entre os anos de 2003 e 2017	60
Tabela 4.5 - Valor Absoluto do teste de aderência Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) para o ajuste da Distribuição de Gumbel, para cada duração especificada.....	61
Tabela 4.6 - Coeficientes de Determinação R^2 resultantes do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel.....	61
Tabela 4.7 - Tabela ANOVA para cada período de retorno.....	64
Tabela 4.8 - Tabela ANOVA para regressão linear que dá origem os parâmetros k e m	65
Tabela 4.9 - Parâmetros determinado para Nova Equação de Chuvas Intensas do posto da UFAL.....	66
Tabela 4.10 - Intensidade de precipitação máxima (mm/h) pela nova equação de chuvas intensas.....	67
Tabela 4.11 - Precipitação máxima diária anual de cada ano	68
Tabela 4.12 - Precipitação máxima diária anual (mm) em função do tempo de retorno	69
Tabela 4.13 - Valor Absoluto do teste de aderência Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) para o ajuste da Distribuição de Gumbel.	69
Tabela 4.14 - Valores de precipitação, em mm, calculado pelo método da Isozonas	71

Tabela 4.15 - Relação das intensidades máxima da precipitação, em mm/h, método das Isozonas	72
Tabela 4.16 - Precipitação máxima (mm) pelo método das relações de durações	72
Tabela 4.17 - Relação das intensidades máximas de precipitação, em mm/h, calculada pelo método das relações de durações.....	73
Tabela 4.18 - Estatísticas históricas das alturas de chuva (mm) do pluviômetro de báscula do Feitosa para todos os meses do ano desagregado em intervalos desde 15 minutos a 24 horas.	73
Tabela 4.19 - Valores históricos observados do pluviômetro de báscula (1) e obtidos pelas equações do modelo de Bartlett-Lewis Modificado (BLPRM) (2) para as cinco combinações (A, B, C, D e E) quando aplicado o programa SOLVER da planilha eletrônica do EXCEL para minimizar a função objetivo para os meses de janeiro a junho.	76
Tabela 4.20 - Valores históricos observados do pluviômetro de báscula (1) e obtidos pelas equações do modelo de Bartlett-Lewis Modificado (BLPRM) (2) para as cinco combinações (A, B, C, D e E) quando aplicado o programa SOLVER da planilha eletrônica do EXCEL para de julho a dezembro ..	77
Tabela 4.21 - Valores da função objetivo para os conjuntos A, B, C, D, E	79
Tabela 4.22 - Parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustados para os doze meses de ano determinado através dos cinco conjuntos de dados.....	80
Tabela 4.23 - Séries anuais de precipitação máxima em mm, para diferentes durações, obtidas dos dados diários desagregados através do HyetosMinute.....	82
Tabela 4.24 - Séries anuais de precipitação máxima (mm) para diferentes durações, obtidas dos dados diários desagregados através do HyetosMinute, em ordem decrescente, considerando-se os mínimos adotados para chuvas intensas	83
Tabela 4.25 - Séries anuais de intensidade máxima de precipitação (mm/h) para diferentes durações, obtidas dos dados diários desagregados através do HyetosMinute, em ordem decrescente, considerando-se os mínimos adotados para chuvas intensas	84
Tabela 4.26 - Intensidade de precipitação máxima em mm/h calculada pelo Método de Gumbel e a intensidade de precipitação gerada	85
Tabela 4.27 - Valor Absoluto do teste de aderência Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) para o ajuste da Distribuição de Gumbel, para cada duração especificada.....	85
Tabela 4.28 - Coeficientes de Determinação R^2 resultantes do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel dos dados gerado pelo modelo BLPRM.....	86
Tabela 4.29 - Precipitação em mm, calculada pelo método de Bell (1969).....	86
Tabela 4.30 - Relação intensidade, em mm/h calculada pelo método de Bell (1969).....	87
Tabela 4.31 - Intensidade de precipitação, em mm/h pelo método de Righetto (1998)	88
Tabela 4.32 - Relação de precipitação, em mm, calculada pelo método de Chen (1983)	89
Tabela 4.33 - Relação de intensidade máxima de precipitação pela metodologia de Chen (1983)	89

Tabela 4.34 - Valores de intensidade máxima (mm/h) obtidos da curva IDF de dados observados da cidade de Maceió, e por métodos diversos	90
Tabela 4.35 - Variação e os desvios relativos entre a relação IDF calculada por dados observados e pelo método aplicado no estudo	92
Tabela 4.36 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h-1) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL, pelo Método das Relações (CETESB, 1979), BELL (1969), RIGHETTO (1998), CHEN (1983), Método das Isozonas e DAMÉ (2001), para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos.....	97
Tabela 4.37 - Valores de erro relativo médio quadrático (RMS) dos dados de intensidade máxima de precipitação obtidos pelos métodos utilizados, comparados aos dados observados.....	99
Tabela 4.38 - Comparativo pelo coeficiente de determinação R^2 , razão dos desvios – RD, e o coeficiente de massa residual – CMR.....	100
Tabela 4.39 - Comparativo pelo coeficiente de determinação R^2 , razão dos desvios – RD, e o coeficiente de massa residual – CMR considerando tempos de retorno e durações.....	101
Tabela 4.40 - Intensidade máxima de precipitação, em mm/h, obtida pela distribuição de Gumbel e pelo Método de Chen (1983).....	103
Tabela 4.41 - Parâmetros determinados para Nova Equação de Chuvas Intensas da cidade de Maceió	105
Tabela 4.42 - Intensidade de precipitação máxima em mm/h calculada pela Nova Equação de Chuvas Intensas	107
Tabela 4.43 - Variação entre as curvas IDF calculadas pela Nova Equação e as calculadas pela equação de Pfafstetter	109
Tabela 4.44 - Variação entre as curvas IDF calculadas pela Nova Equação e as calculadas pela equação de Denardin e Freitas.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Obtenção dos parâmetros da equação proposta por Chen (1983).....	28
Figura 2.2 - Mapa de Isozonas apresentado por Torrico (1974)	31
Figura 2.3 - Representação do modelo de pulsos retangulares de Bartlett-Lewis modificado	36
Figura 3.1 - Fluxograma representativo da metodologia adotada para elaboração da dissertação	37
Figura 3.2 - Caminho 1 - Séries com os dados subdiários	38
Figura 3.3 - Caminho 2 - Séries com dados diários	39
Figura 3.4 - Determinação das curvas IDF e comparação entre as metodologias utilizando os parâmetros estatísticos.....	40
Figura 4.1 - Curvas intensidade x duração x frequência a partir dos valores calculados pelo Método de Gumbel.....	63
Figura 4.2 - Retas de regressão resultantes do processo de anamorfose das curvas intensidade x duração x frequência	63
Figura 4.3 - Regressão linear que dar origem aos parâmetros K e m.....	66
Figura 4.4 - Comparação entre a nova equação e a de Darnardin e Freitas (1982) para duração acima de 60 minutos	67
Figura 4.5 - Ajuste da distribuição de Gumbel aos dados observados	70
Figura 4.6 - Ajuste das retas de probabilidades	71
Figura 4.7 - Parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustado aos dados do pluviômetro de balsa do Feitosa obtidos das combinações de estatísticas A, B, C, D, E para os 12 (doze) meses do ano.....	78
Figura 4.8 - Estatísticas de séries de precipitação históricas e a gerada pelo modelo BLPRM para as combinações escolhidas para cada mês na duração de 15 min	80
Figura 4.9 - Variação mensal dos parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustados para os doze meses de ano determinado através dos cinco conjuntos de dados.....	81
Figura 4.10 - Relação precipitação-duração-frequência determinada pelo método de Bell (1969).....	87
Figura 4.11 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Bell (1969)	94
Figura 4.12 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Righetto (1998)	94
Figura 4.13 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Chen (1983)	95

Figura 4.14 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Isozonas	95
Figura 4.15 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método das Relações (CETESB, 1979)	96
Figura 4.16 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o modelo BLPRM (DAMÉ, 2001)	96
Figura 4.17 - Curvas intensidade x duração x frequência a partir dos valores da Tabela 4.40	104
Figura 4.18 - Retas de regressão resultantes do processo de anamorfose das curvas intensidade x duração x frequência	105
Figura 4.19 - Regressão linear que dá origem aos parâmetros K e m	106
Figura 4.20 - Curvas intensidade-duração-frequência gerada pelo Nova Equação de Chuvas Intensas para Maceió	108
Figura 4.21 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 2 anos	111
Figura 4.22 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 5 anos	112
Figura 4.23 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 10 anos	113
Figura 4.24 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 15 anos	114
Figura 4.25 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 20 anos	115
Figura 4.26 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 25 anos	116
Figura 4.27 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes par região em estudo, para o períodos de retorno de 50 anos	117
Figura 4.28 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes par região em estudo, para o períodos de retorno de 100 anos	118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANA:	Agência Nacional de Águas
BLPRM:	“ <i>Bartlett-Lewis of Rectangular Pulse Modified Model</i> ”- Modelo Bartlett-Lewis de Pulso Retangular Modificado
CEMADEN:	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CETESB:	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMCC:	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
CMR:	Coefficiente de Massa Residual
CO2:	Dióxido de Carbono
DNOCS:	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
GCM:	“ <i>Global Circulation Model</i> ” – Modelo de Circulação Global
GEE:	Gases de Efeito Estufa
GEV:	“ <i>Generalized Extreme Value</i> ” – Generalizada de Valores Extremos
IDF:	Intensidade-Duração-Frequência
INMET:	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC:	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
PPGRHS:	Programa de Pós-Graduação de Recursos Hídricos e Saneamento
RCP:	Representative Concentration Pathways
RD:	Razão dos Desvios
RMS:	Relativo Médio Quadrático
SEMARH:	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SUDENE:	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UFAL:	Universidade Federal de Alagoas

1 INTRODUÇÃO

No ciclo hidrológico, a chuva constitui a principal variável de entrada de água no sistema, e seu entendimento é fundamental para o conhecimento da dinâmica hídrica do meio físico. Sua quantificação, bem como o conhecimento da forma como se distribui temporal e espacialmente são de suma importância para os estudos estratégicos associados ao planejamento do meio ambiente, em estudos relacionados à necessidade de irrigação, disponibilidade de água para o abastecimento e industrial, controle de inundações, geração de energia, entre outros.

No dimensionamento de obras hidráulicas, tanto urbanas como rurais, é necessário o conhecimento da precipitação de modo que a estrutura planejada possa resistir adequadamente a um evento intenso. No caso de obras rurais, esse tipo de conhecimento é necessário para o planejamento de sistemas de terraceamento agrícola, drenagem em estradas e implantação de barragens para atenuação de cheias (BARRETO *et al*, 2014).

Para a caracterização e a utilização de dados de precipitação intensa é necessário conhecer a sua duração, sua intensidade e sua frequência de ocorrência ou período de retorno. Uma das formas de relacionar essas características da chuva é através da relação ou curva intensidade-duração-frequência (IDF).

A relação intensidade-duração-frequência (IDF) é de extrema importância para qualquer medida de mitigação de enchentes, projeto de engenharia de água e projetos de engenharia de recursos hídricos. Essa relação é usada para desenvolver desenho de tempestade para obtenção de pico de descarga e forma de hidrograma em qualquer projeto hidráulico (EWEA *et al*, 2017; FADHEL *et al*, 2017). As curvas IDF são bastantes utilizadas por engenheiros civis e hidráulicos para projetar e dimensionar de forma segura e econômica rede de águas pluviais de uma cidade ou estruturas de controle de inundações.

A determinação das curvas IDF requer dados históricos de boa qualidade e contínuo por longo período (EWEA *et al*, 2017). Esses registros históricos são representados em pluviogramas, que a partir da sua interpretação, constroem as séries representativas bem como a análise de frequências destas séries, e conseqüentemente, cálculo das intensidades máximas de precipitação para cada duração estabelecida, e a definição de uma equação que represente analiticamente a curva IDF.

No entanto, os dados pluviográficos nem sempre estão disponíveis; e em muitos casos restam apenas dados pluviométricos para as análises hidrológicas (BIELENKI JUNIOR *et al*, 2016). Diante dessa realidade, se faz necessário a aplicação de metodologias de estimativas de curvas IDF, com pouco ou nenhum dado pluviográfico.

Uma das alternativas possíveis é utilizar metodologia com utilização de série de dados de precipitação máxima diária anual do local onde será realizado o estudo hidrológico, que seja representativa, estacionária e tempo subdiários (DAMÉ, 2006). Obtendo-se dados de precipitação diária, associados aos períodos de retorno de interesse, pode-se utilizar metodologia de desagregação adequada. Assim, a relação entre as alturas de precipitação, em função da duração de desagregação e o período de retorno, originam curvas IDF a partir de registros pluviométricos (DAMÉ, 2008).

A técnica de desagregação, que é de uso corrente na prática da Engenharia, baseia-se nos coeficientes de desagregação (CETESB, 1979), como também no método das Isozonas (TORRICO, 1975). Entretanto trabalhos recentes estão utilizando o modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (DAMÉ, 2001). Para os métodos de obtenção de curvas IDF tem-se o método de Bell (1969), Chen (1983) e Righetto (1998).

É nesse contexto em que se insere esta pesquisa, de modo a contribuir para uma situação particular, que é aquela da carência de uma curva IDF atualizada para cidade de Maceió, e também contribuir para os estudos de desagregação de chuvas intensas. Zuffo (2004) afirma que as equações de chuvas intensas precisam ser revisadas a cada 10 anos, para evitar subdimensionamentos em sistemas hidráulicos, principalmente na macrodrenagem da rede urbana. Além do mais as mudanças climáticas alteram eventos extremos máximos, em consequência disto, nas curvas IDF (SCHARDONG *et al*, 2014; MIRHOSSEINI *et al*, 2013; FADHEL *et al*, 2017; RODRIGUEZ, *et al*, 2014; AL MAMOON *et al*, 2016; ARNBJERG-NIELSEN *et al*, 2012, ALAN *et al*, 2015). Maceió possui duas curvas, uma da década de 1950 e outra da década de 1980, tornando urgente a realização deste estudo.

1.1 Objetivo Geral

Estabelecer relação entre intensidade, duração e frequência de precipitação máxima para cidade de Maceió, a partir de diferentes métodos de obtenção de Chuvas Intensas.

1.2 Objetivos Específicos

- Levantar dados de chuvas disponíveis de Maceió;
- Estimar uma nova equação de chuvas intensas para Maceió com base em dados históricos com duração inferior a 24 horas;
- Determinar relação intensidade-duração-frequência através dos métodos de Bell (1969), Righetto (1998), Método das relações (CETESB, 1979), Isozonas e Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (DAMÉ, 2001), avaliando e propondo o melhor método que representa a cidade de Maceió;
- Comparar a nova equação de chuvas intensas com as determinadas por Pfafstetter (1957) e Denardin e Freitas (1982).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Precipitações Máximas

As precipitações máximas são aquelas em que grandes volumes de chuva ocorrem em curto intervalo de tempo. A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial críticas para uma área ou bacia hidrográfica, sendo que esta pode atuar sobre a erosão do solo (TUCCI, 2001). Também pode ser entendida como a precipitação máxima aquela que provoca vazões de pico suficientes pra atingir valores próximos ou ultrapassar a capacidade nos sistemas de drenagem (RIGHETTO, 1998).

Dentre os elementos climáticos que mais interferem na vida humana, a precipitação é a que tem mais causado preocupação, tanto pela sua falta como pelo seu excesso. Nos problemas de engenharia, relacionados com a hidrologia, em sua grande maioria, são consequências de chuva de grande intensidade ou volume e da ausência de chuvas em longo período de estiagem (SAMPAIO, 2011).

O conhecimento das características da chuva como a intensidade, o total precipitado e a duração, além da sua distribuição temporal e espacial, contribui para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, a otimização de atividades como a irrigação, a geração de energia, o abastecimento doméstico e industrial, além de possibilitar a prevenção e o controle de inundações e do processo erosivo do solo (TUCCI, 2001).

Desta maneira a importância da análise da precipitação máxima nas áreas urbanas se torna cada vez maior porque nelas o aumento da impermeabilização tem provocado a aceleração dos processos de formação das chuvas convectivas (ZUFFO, 2004), o que pode significar mais incremento de ocorrência de enchentes.

A estimativa de chuvas máximas intensas são importantes em projeto de sistemas de infraestruturas hidráulicas urbanas como também para projetos de alto risco, como barragem e estrutura de usinas nucleares (NATHAN *et al*, 2016; MORBIDELLI *et al*, 2017).

2.2 Importância da atualização da curva IDF

A curva IDF varia de local para local e a estimativa e o uso dela dependem da hipótese de estacionariedade das séries de chuva. Zuffo (2004) estudou a frequência de ocorrência de

chuvas de 100 mm na Região Metropolitana de Campinas e constatou que a equação da curva IDF utilizada para estimação de precipitação de projeto em dimensionamento de obras de estruturas hidráulicas estava subestimando a precipitação de projeto e, em consequência, o subdimensionando as estruturas hidráulicas. Segundo este autor o motivo foi o grande crescimento populacional da cidade de Campinas nos últimos anos, gerando aumento da área impermeabilizada, aumentando a temperatura local.

Entretanto, estudos recentes apontam que essas mudanças não estão somente relacionadas ao crescimento urbano, mas também às mudanças climáticas (RAMOS, 2010). Segundo Prodanovic e Simonovic (2007) a concentração de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa (GEE), que são os maiores causadores da mudança na atmosfera terrestre, aumentaram devido ao aumento das atividades industriais. Deste modo o aumento nas concentrações de GEE está causando variações em larga escala nos processos atmosféricos, o que pode levar mudanças nas características da chuva e temperatura. Então ocorrendo mudanças nas características da precipitação, conseqüentemente, mudará as curvas IDF podendo levar a uma revisão das normas para a concepção de infraestruturas de engenharia civil. Isso também pode levar à reconstrução e / ou atualização de infraestruturas de engenharia civil existentes.

Zope *et al* (2016) em busca de explicar um evento de chuva intensa que ocorreu no dia 26 de julho de 2005 na cidade de Mumbai, capital do estado de Maharashtra, na Índia, com intensidade de 190,3mm/h e chuva total diária de 944,2 mm que provocou graves perdas de vidas e econômicas, analisaram a equação de chuvas intensas para região com base em duas estações pluviométricas e constataram que, para um período de retorno de 100 anos, a intensidade máxima da chuva foi 117,65 mm/h quando calculado pela equação existente. Assim os autores perceberam que a equação de chuvas intensas para região não computava o valor evento extremo do dia 26 de julho de 2005. Deste modo eles propuseram uma nova relação intensidade-duração-frequência para a cidade de Mumbai tendo como varável de entrada a chuva de 24 horas.

Schardong *et al* (2014) estudaram dados de chuvas de uma estação pluviométrica/pluviográfica do estado de São Paulo para atualização de curvas IDF considerando o efeito de mudanças climáticas. Os dados horários utilizados foram no período de 1933 a 2013 e dos dados com intervalos inferiores a 1 hora foram no período de 1931 a 1998. Nesse estudo os autores comparam as curvas IDF calculadas através de dados históricos observados com três cenários futuros (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5) do modelo de circulação

global (GCM), e constataram que para o período de retorno menores houve uma expectativa de aumento de 4,5% em relação à IDF de dados históricos. Para período de retorno maiores (100 anos), o acréscimo foi de 30%. Assim percebe-se uma tendência de aumento das precipitações extremas.

De Paola *et al* (2014), para avaliar a forma como as curvas IDF são modificadas em um clima futuro, realizaram análise de dados históricos observados e simulações climáticas futuras em três cidades africanas: Addis Abeba (Etiópia), Dar Es Salaam (Tanzânia) e Douala (Camarões). Como os registros de chuvas disponíveis eram diários, foram adotados dois modelos diários de desagregação de chuvas que desagregaram a precipitação em 6 durações (10 min, 30 min, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h). Para as simulações climáticas, os autores utilizaram as fornecidas pelo Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) seguindo o protocolo 20C3M do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Em comparação das curvas IDF geradas pelos dados observados com as simuladas por mudanças climáticas, os autores perceberam um aumento de frequência de valores extremos para as três cidades. Quanto à intensidade, as cidades Dar Es Salaam e Douala, houve uma diminuição em termos de intensidade. Para Addis Abeba a curva IDF foi praticamente semelhante aos dados observados. Assim as projeções do modelo climático sugerem que a intensidade da precipitação futura pode ser sujeita à diminuição ou aumento dependendo do local considerado, mas com um aumento em termos de frequência.

2.3 Equações de Chuvas Intensas Existentes para Maceió

A cidade de Maceió possui duas curvas IDF. A primeira foi estimada por Otto Pfafstetter (PFAFSTETTER, 1957) e a segunda por Dernadin e Freitas (1982). Os resultados de Pfafstetter servem até hoje para o estudo hidrológico das enchentes dos cursos d'água pelo método racional. Trabalhando com pluviograma, determinou curvas IDF para 98 postos pluviográficos para diferentes localidades do país.

Para a cidade de Maceió, Pfafstetter analisou um posto com as coordenadas 9°40' de latitude e 35°42' de longitude. Os períodos de observação nesse posto, em anos, foram de 27 e 25 em um pluviógrafo e um pluviômetro, respectivamente, obtendo a Equação 2.1.

$$P = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}}} [0,5t + 29 \log(1 + 10t)] \quad (2.1)$$

em que P é precipitação total máxima em mm; a , b e c são parâmetros do local estudado; α é um parâmetro que depende da duração; β é um parâmetro que depende da duração e do local; γ é 0,25 (Adotado para todos os postos); T é o tempo de retorno; t é a duração em

Os valores de α e β , para Maceió, estão representados na Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Valores de α para Maceió

Valores de α	
5 min	0,108
15 min	0,122
30 min	0,138
1h	0,156
2h	0,166
4h	0,174
8h	0,176
14h	0,174
24h	0,17

Tabela 2.2 - Valores de β para Maceió

Maceió/AL	β			
	5 min	15 min	30 min	1h - 6 dias
	0	0,04	0,08	0,2

Dernardin e Freitas (1982) determinaram com base em 80 estações pluviográficas equações de curvas intensidade, duração e frequências para várias localidades. Para cidade de Maceió, propuseram a Equação 2.2.

$$i = \frac{274,9.T^{0,28}}{(t+6)^{0,56}} \quad (2.2)$$

onde i é a intensidade em mm/h; T é o tempo de retorno em anos e t a duração em minutos

2.4 Determinação da relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

As curvas IDF são obtidas dos registros através da análise estatística. Podem-se usar séries parciais ou série de máximas anuais dependendo do tamanho da série e do objetivo do estudo. A diferença básica é que a primeira compreende somente os eventos de chuvas superiores a uma determinada precipitação de referência, enquanto a segunda compreende um

único valor para cada ano, o valor máximo anual. Segundo Bertoni e Tucci (1993) a metodologia de séries parciais é utilizada quando o número de anos de dados é pequeno (menos de 12 anos) e os tempos de retorno menores que 5 anos.

Wang (1991) mostrou que os modelos de séries parciais também são eficientes para grandes tempos de retornos. O autor comparou o modelo de séries parciais ajustados a distribuição generalizada de Pareto e taxa de chegada de Poisson com o modelo de séries anuais ajustado a distribuição generalizada de valores extremos (GEV) para análise de frequência de inundação, e concluiu que quando, em média, a quantidade de eventos incluídos nas séries parciais é igual ao número de anos do período de amostra, os modelos são semelhantes em eficiência para alta estimativa de quantis. Deste modo Wang (1991) sugere que não a razão teórica para usar o modelo de séries anuais em vez do método de séries parciais.

Se o estudo tiver à disposição pluviogramas, as etapas para determinar a relação IDF a partir de dados pluviográficos são as seguintes:

- a) Seleção das precipitações para o estabelecimento da série: para cada duração são selecionadas as precipitações máximas anuais. Em geral as durações mais usuais são de 5, 10, 15, 30, 45, 60 minutos e 1, 2, 3, 6, 12 e 24 horas;
- b) Seleção e ajuste da distribuição de probabilidade: uma vez que se obteve uma série de precipitações máximas anuais para cada duração, pode-se ajustar os valores a uma distribuição de probabilidade teórica. As distribuições do tipo normal, log-normal, Gumbel, Weibull e log Pearson tipo III são as que melhores se ajustam ao processo hidrológico (GONÇALVES, 2011). Segundo Naghettini e Pinto (2007) as distribuições Gumbel, Fréchet e a distribuição de Generalizada de Valores Extremos (GEV) são as mais utilizadas para valores máximos extremos em hidrologia;
- c) Teste de Aderência: o teste de aderência avalia o ajuste da distribuição de probabilidade. Os testes de aderências mais utilizados são: papel de probabilidade, Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado (χ^2);
- d) Determinação da equação da relação intensidade-duração-frequência.

Em várias regiões do Brasil, principalmente na região Nordeste, os dados pluviográficos ainda são escassos, entretanto frequentemente há necessidade de determinar as relações entre intensidade, duração e frequência para localidade onde não dispõe de estação pluviográfica. Para tanto, pode ser empregado equação IDF obtida com dados de uma localidade mais

próxima, caso esteja situado em região de climatologia homogênea, ou utilizando os métodos de desagregação de chuvas diárias medidas por pluviômetros.

Algumas metodologias de desagregação de chuva diária que viabilizam a utilização de dados de pluviômetro para estabelecimento da curva IDF empregam coeficientes para transformar a precipitação diária em chuvas de menor duração. Dentre elas destacam-se o método da relação de durações (CETESB, 1980), o método da isozonas idealizado por Torrico (1974), o trabalho de Robaina e Peiter (1992), Bell (1996), Damé (2001). As principais metodologias de desagregação de chuvas diárias para estabelecimento de curvas IDF são descritas a seguir.

2.5 Metodologias de Obtenção de Chuvas Intensas

2.5.1 Estudo de Chuvas Intensas realizados por Bell (1969)

A principal intenção do trabalho desenvolvido por Bell (1969) foi mostrar que comportamento das chuvas de alta intensidade e curta duração (até 2 horas) têm mais ou menos os mesmos mecanismos de uma tempestade, geralmente causadas pelas chuvas convectivas, e apresentam características e ocorrências semelhantes em muitas partes do mundo, podendo ser generalizadas. Para confirmar isto, Bell (1969) analisou em uma primeira etapa as relações entre altura-duração, para diferentes durações e mesmo período de retorno, que se constituem de relações empíricas recomendadas pelo *U.S. Weather Bureau*. Foram obtidas relações de precipitação de 5, 10, 15, 30 minutos e 2 horas com referência na precipitação de 1 hora.

Segundo Bell (1969), verificou-se pouca variabilidade nas relações entre precipitações para todo os Estados Unidos, independente qual período de retorno fosse usado. Quando os resultados destas mesmas relações obtidos para os Estados Unidos foram comparadas com os obtidos nos países como Austrália e ex-União Soviética, verificou-se que estas apresentavam valores muito semelhantes.

Em seguida o autor analisou relações altura-frequência de chuvas de diferentes períodos de retorno e mesma duração. Comparando as relações de chuva com tempo de retorno 1, 2, 5, 25, 50 e 100 anos, com referência na chuva de 10 anos, e também comparando as relações de chuva de 25 e 100 anos em relação à chuva de 2 anos, para vários lugares, como Estados Unidos, Austrália, África do Sul, Havaí, Alasca e Porto Rico. Foram constatadas tendências semelhantes para todos estes lugares, concluindo-se que tenham valores semelhantes para estes locais.

Baseado nestes resultados, Bell (1969) combinou as relações altura-duração com as altura-frequência, para obtenção de uma relação generalizado altura-duração-frequência. Para determinar a equação que representasse o comportamento de forma generalizada, o autor primeiramente desenvolveu uma equação que expressasse a relação altura-frequência em função do tempo de retorno. Bell (1969) determinou a Equação 2.3.

$$R_t^T / R_t^{10} = 0,21 \ln T + 0,52 \quad \text{válida para } 2 \leq T \leq 100 \text{ anos} \quad (2.3)$$

em que, R_t^T / R_t^{10} é a razão da precipitação de período de retorno T anos e duração t min com a precipitação de tempo de retorno de 10 anos e duração t min, e $\ln T$ é o logaritmo natural do período de retorno em anos.

Em seguida, Bell (1969) propôs a Equação 2.4 para expressar as relações altura-duração em função da duração.

$$R_t^T / R_1^T = 0,54t^{0,25} - 0,50 \quad \text{válida para } 5 \leq t \leq 120 \text{ min} \quad (2.4)$$

em que P_t^T / P_T^{60} é a relação entre precipitação com período de retorno T anos e duração t min e precipitação para tempo de retorno T em anos e duração de 1 hora.

As Equações 2.3 e 2.4 foram combinadas, obtendo-se a Equação 2.5 relacionando altura-duração-frequência.

$$P_t^T = (0,21 \ln T + 0,56) \cdot (0,54t^{0,25} - 0,50) \cdot P_{60}^{10} \quad (2.5)$$

em que, t é a duração da chuva, em minutos, T é o tempo de retorno, em anos, e P_{60}^{10} é precipitação observada com período de retorno de 10 anos e duração de 60 min, onde $5 \leq t \leq 120$ minutos e $2 \leq T \leq 100$ anos.

A Equação 2.5 foi considerada válida para todo o mundo, para chuvas intensas com duração até 2 horas. Mauriño (2004) comparou as relações das Equações 2.2 e 2.4 com as curvas IDF de diversas cidades Argentinas e atestou que as relações de Bell (1969) podem ser aplicadas para diversas regiões da Argentina.

Bell (1969) propôs também uma equação conhecendo a precipitação de tempo de retorno de 2 anos e duração de 60 minutos, conforme mostra a Equação 2.6.

$$P_i^T = (0,35 \ln T + 0,76) \cdot (0,54 t^{0,25} - 0,50) P_{60}^2 \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 foi desenvolvida de maneira semelhante à Equação 2.5 com o uso do denominador P_{60}^2 em vez de P_{60}^{10} .

Back (2013) ajustou a equação de Bell (1969), tendo como base a precipitação máxima de 1 hora e tempo de retorno de 10 anos. Assim, por meio de modificação na Equação 2.5, determinou a Equação 2.7, que é possível obter altura máxima de chuva com qualquer duração e tempo de retorno máximo de 100 anos.

$$P_{Tr}^t = (a \ln T + b) \cdot (c \cdot t^d - e) P_1^{10} \quad (2.7)$$

em que: a, b, c, d, e - coeficientes empíricos; P_t^T - precipitação estimada com período de retorno T anos e duração de t em min; P_1^{10} - precipitação observada com período de retorno de 10 anos e duração de 1 hora (60 min.).

Righetto (1998) apresentou uma equação similar à Equação 2.7 em análise de vários postos pluviográficos instalados em diferentes regiões do Brasil, e propôs a Equação 2.8, porém a precipitação P_1^{10} foi substituída pela precipitação de 2 anos de período de retorno e duração de 60 minutos, sendo que esta precipitação pode ser obtida por poucos anos de dados pluviográficos ou por meio de dados pluviométricos através da Equação 2.9 (OLIVEIRA *et al*, 2008).

$$P_t^T = (0,31 \ln T + 0,70) \cdot (0,38 t^{0,31} - 0,39) P_{60}^2 \quad (2.8)$$

$$P_{60}^2 = K P_{dia}^2 \quad (2.9)$$

em que K é a relação regional entre a precipitação pluvial de 60 minutos e um dia de duração para um período de retorno de dois anos.

Righetto (1998) sugere que o valor de P_{60}^2 pode ser obtido a partir da precipitação máxima diária associada ao período de retorno de 2 anos, conforme a Equação 2.10:

$$P_{60}^2 = 0,51 P_{dia}^2 \quad (2.10)$$

Oliveira (2011) desenvolveu uma rotina computacional para ajustar os parâmetros da equação empírica de Bell para vários municípios do Estado de Goiás. Back (2011) ajustou os coeficientes da equação proposta por Bell com base na chuva máxima com duração de 1 hora e período de retorno de 10 anos para o Estado de Santa Catarina.

O modelo de Bell (1969) foi utilizado para avaliação de chuvas intensas em vários países como Argentina (MAURINO, 2004); Estados Unidos (SINGH; ZHANG, 2007); Arábia Saudita (SUBYANI *et al*, 2015), que utilizou o método para desagregar a precipitação diária em séries horárias para gerar IDF na cidade de Al-Madinah; Taiwan (YU *et al.*, 2004).

2.5.2 Estudo de Chuvas Intensas realizados por Chen (1983)

Baseado na metodologia de Bell (1969), Chen (1983) desenvolveu uma fórmula generalizada de intensidade-duração-frequência que utiliza três alturas de precipitação, P_1^{10} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 10 anos), P_{24}^{10} (chuva com duração de 24 horas e tempo de retorno de 10 anos) e P_1^{100} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 100 anos) e não apenas P_1^{10} considerada por Bell (1969).

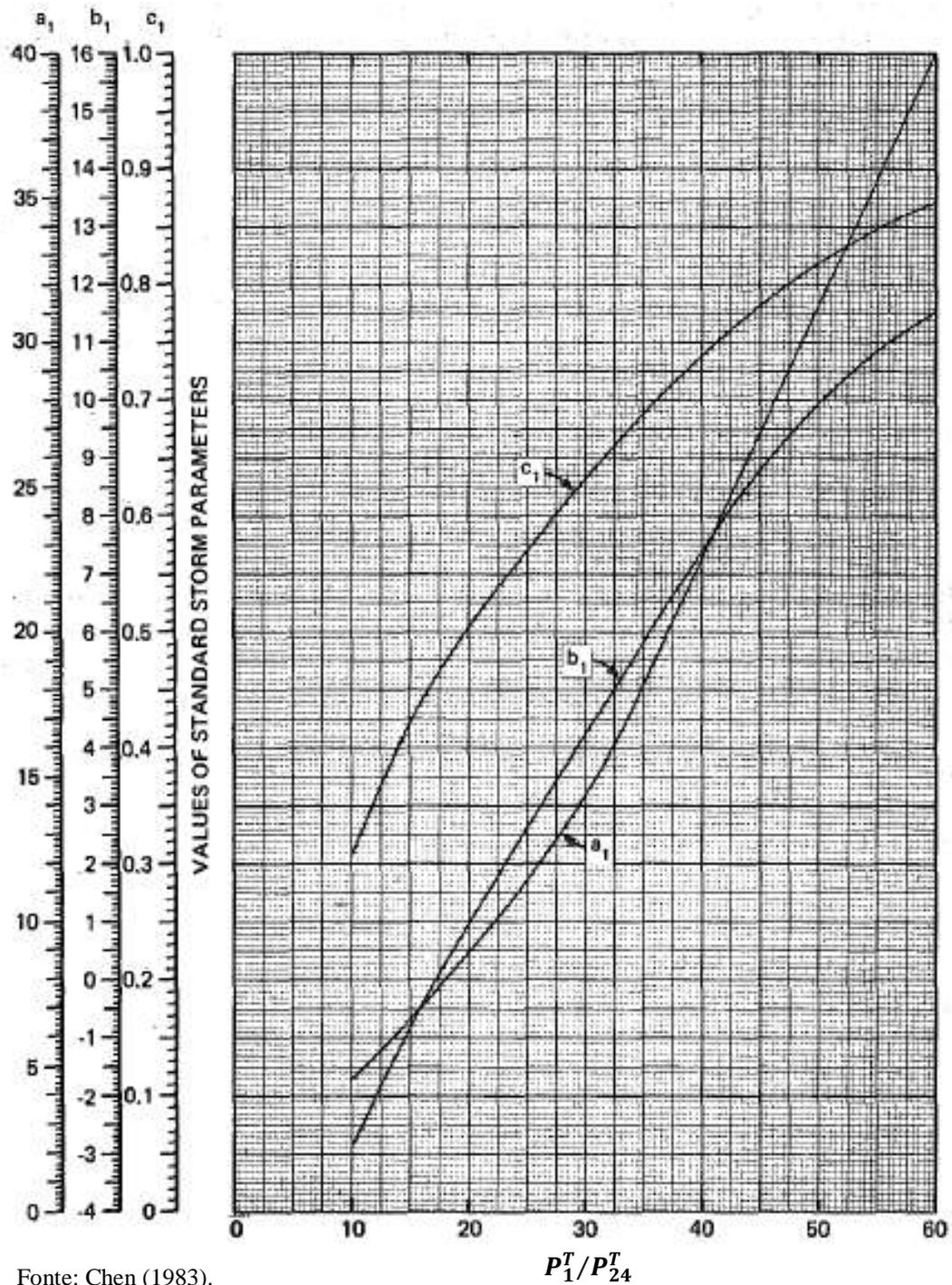
Com a utilização destas três alturas, Chen (1983) passou a considerar as variações da chuva devido às mudanças de localidade geográfica (padrão geográfico de chuva), as quais, segundo Chen (1983), Bell (1969) não considerou. A Equação 2.11, proposta por Chen (1983), demonstrou que as precipitações estimada pela Equação 2.5, com durações de superiores a 2 horas, apresenta grandes variações aos dados observados, ratificando a não-adequabilidade da equação de Bell (1969) para durações superiores a 2 horas.

$$P_t^T = \frac{a_1 P_1^{10} \log \left\{ 10^{(2-x)} \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^{-(x-1)} \right\}}{(t+b_1)^{c_1}} \cdot \left(\frac{t}{60} \right) \quad (2.11)$$

Para: $T > 1$ ano e $5 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ horas}$

onde, P_t^T é a altura de chuva para período de retorno T em anos e duração t em minutos ; a_1 , b_1 e c_1 são parâmetros de chuva obtidos por Chen (1983) disponíveis na Figura 2.1; T é o período de retorno em anos; t é a duração da chuva em minutos e x é o resultado da divisão entre P_1^{100}/P_1^{10} .

Figura 2.1 - Obtenção dos parâmetros da equação proposta por Chen (1983)



Fonte: Chen (1983).

2.5.3 Método das Relações (CETESB, 1979)

A técnica de desagregação bastante utilizada na prática de engenharia é o método das relações (CETESB, 1979). O método baseia-se em duas características observadas curvas intensidade-duração-frequência correspondentes a pontos localizados em diversas partes do mundo (BERTONI e TUCCI, 2002):

- a) Existe a tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações manterem-se paralelas entre si;
- b) Para diferentes locais, há uma enorme similaridade nas relações entre precipitações médias máximas de diferentes durações.

Então, o método consiste em encontrar as relações entre precipitações de durações diferentes a partir de uma delas como base, isto é, a precipitação máxima diária. As relações são obtidas pela equação:

$$r_{t1/t2} = \frac{\text{precipitação de duração } t1}{\text{precipitação de duração } t2} \quad (2.12)$$

Os valores médios dessas relações, também chamados de coeficientes de desagregação de chuvas de 24 horas, são mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Coeficientes de desagregação de dados pluviométricos (CETESB, 1979)

Relação de Duração	24h* / 1dia **	12h / 24h	10h / 24h	8h / 24h	6h / 24h	1h / 24h
Coeficiente de Desagregação	1,14	0,85	0,82	0,78	0,72	0,42
Relação de Duração	30min / 1h	25min / 1h	20min / 1h	15min / 1h	10min / 1h	5min / 1h
Coeficiente de Desagregação	0,74	0,91	0,81	0,70	0,54	0,34

* maior valor de precipitação correspondente ao período consecutivo de 24 horas.

** valor compreendido entre os horários de precipitação pluviométrica.

Recentemente diversos trabalhos têm utilizados o método das relações proposto pela CETESB (1979) para desagregação de chuvas diárias (BIELENKI JUNIOR *et al*, 2016; SAMPAIO, 2011; DAMÉ *et al*, 2010; SILVA *et al*, 2012; CAMPOS *et al*, 2014; NETO *et al*, 2016; BARRETO *et al*, 2014). Bielenki Junior *et al* (2016) estabeleceram curvas IDF para quatro estações pluviométricas localizadas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça (Brotas, SP) utilizando a técnica de desagregação de chuvas diárias pelo o método das relações. Os autores chegaram em um resultado satisfatório e concluíram que o método das relações é um método de fácil emprego, e bastante importante que permite utilizar-se de dados de pluviômetros, na falta de dados pluviográficos, para a determinação de relações IDF.

Campos *et al* (2014) determinaram os parâmetros da equação da curva IDF para 133 estações pluviométricas para o estado do Piauí utilizando o método das relações. Os autores compararam as intensidades estimadas com método das relações, com os valores disponíveis para o município de Teresina através do coeficiente de determinação (R^2), que representa a relação linear entre os valores determinados pelo método das relações e os disponíveis para Teresina. Os resultados apresentaram R^2 superior a 0,98, evidenciando o bom ajuste da equação.

Silva *et al* (2012) devido à escassez de informações de equações de chuvas intensas para o estado de Pernambuco, a partir de 12 (doze) estações pluviográficas e 11 (onze) estações pluviométricas, determinaram curvas IDF tanto para dados pluviográficos como também para os dados pluviométricos. As curvas IDF geradas pelos dados pluviométricos foram determinadas utilizando a metodologia de desagregação da chuva diária pelo método das relações. Os autores compararam as curvas IDF geradas pelos dados pluviográficos com as dos dados pluviométricos, e obtiveram coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,970 e 0,999, o que mostrou que para o estado de Pernambuco na ausência de dados pluviográficos, pode-se utilizar dados pluviométricos desagregados pelo método das relações.

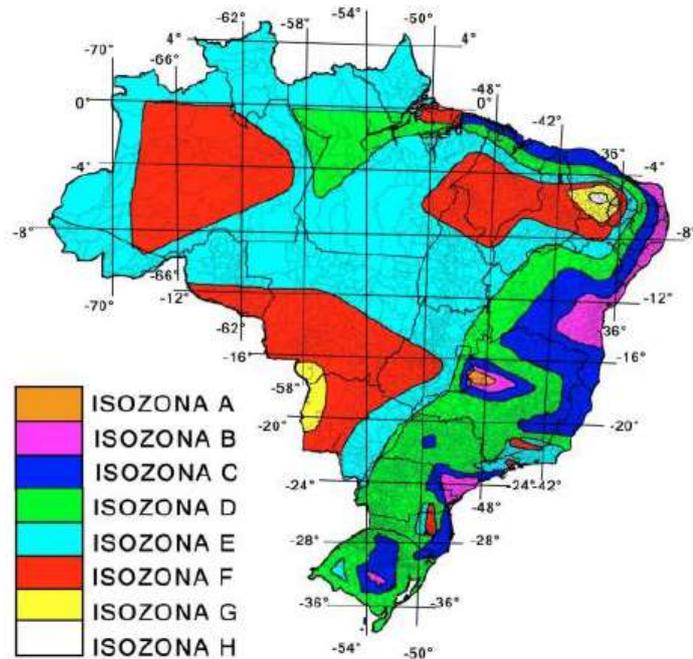
2.5.4 Isozonas

O método baseia-se na observação feita pelo Torrico (1974), que utiliza dados de chuvas diárias e, através de um processo de desagregação, transforma, para cada tempo de retorno, a chuva de 24 horas de duração em chuva de duração de 6 minutos e 1 hora.

Ao plotar as chuvas de 1 hora e 24 horas no papel de probabilidades de Hershfield e Wilson para 98 estações pluviográficas brasileiras analisadas por Pfafstetter (1956; 1982), Torrico (1974, *apud* Basso *et al*, 2016) constatou que, para determinadas áreas geográficas, ao prolongar as respectivas semirretas de alturas de chuva *versus* duração, elas tendiam a cortar o eixo das ordenadas em um mesmo ponto. Esse comportamento indica que nessas regiões a relação entre as precipitações de 1 hora e de 24 horas ($R_{1h/24h}$), assim como a relação entre a precipitação de 6 minutos e 24 horas ($R_{6min/24h}$), é homogênea e constante, independentemente da altura da precipitação.

Assim, cada região dessas seria classificada como Isozona. Com este método é possível estimar precipitações com durações inferiores a 24 horas, conforme mostrado na Tabela 2.4 (SANTOS, 2015). Desta forma, Torrico (1974) propôs a divisão do Brasil em oito Isozonas de comportamento de chuvas intensas, conforme mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Mapa de Isozonas apresentado por Torrico (1974)



Fonte: adaptado de Torrico (1974) *et al. apud* Santos, 2015.

Tabela 2.4 - Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas

Isozonas	1h/24h chuva										6min/24h	
	TR (anos)										TR (anos)	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	5-50	100
A	36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35,0	34,7	33,6	32,5	7,0	6,3
B	38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,4	37,2	36,0	8,4	7,5
C	40,1	39,7	39,5	39,3	39,2	39,1	38,8	38,4	37,2	36,0	9,8	8,8
D	42,0	41,6	41,4	41,2	41,1	41,0	40,7	40,3	39,0	37,8	11,2	10,0
E	44,0	43,6	43,3	43,2	43,0	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F	46,0	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,2	47,0	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,1	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,9	48,8	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Os passos para a aplicação do método são os seguintes:

- Obtenção da máxima chuva diária através da seleção do maior valor de precipitação diária de cada ano, e com esses valores máximos ajustar a uma distribuição de probabilidade. A distribuição mais utilizada para variáveis hidrológicas é o método de Gumbel (TUCCI, 2002). Assim com o ajustamento, obterá uma equação que retornará a precipitação provável de 1 dia de duração para o tempo de retorno selecionado;

- b) Transformação da chuva de um dia ($P_{1\text{dia}}$) em chuva de 24 horas de duração ($P_{24\text{h}}$) pela equação:

$$P_{24\text{h}} = 1,095 \cdot P_{1\text{dia}} \quad (2.13)$$

- c) Desagregação da chuva de 24 horas em precipitações intermediárias. Para um determinado tempo de retorno, seleciona-se o percentual correspondente ao mesmo de acordo com a respectiva Isozona na qual a região está localizada, conforme consta nas relações envolvendo a chuva 24 horas e as de 1 hora e 6 min da tabela 1. Assim, ficam determinadas as precipitações equivalentes. Com as precipitações de 6 minutos, 1 hora e 24 horas, traça-se no papel de probabilidades (mono-log) retas de precipitação, possibilitando assim a determinação de precipitações intermediárias por correlação linear;
- d) Cálculo das intensidades da chuva dividindo-se os valores de altura de precipitação pela respectiva duração.

Autores recentes utilizaram esse método: Basso *et al* (2016) analisaram as diversas zonas definidas por Torrico (1974) e constataram que as regiões propostas ainda são válidas; Santos (2015) calculou chuvas intensas por esse método utilizando postos pluviométricos das cidades de João Pessoa/PB e São Gonçalo/PB; Sobrinho *et al* (2014) utilizaram o método para estimar IDF na região do Cariri/CE sem dados pluviográficos e depois que validaram o método com outra estação com dados pluviográficos, constaram que o método é viável para elaboração de curva IDF.

2.5.5 Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (DAMÉ, 2001)

A modelagem estocástica de precipitação permite que, conhecendo-se as características estatísticas de uma série de precipitação, seja possível ajustar parâmetros de um modelo escolhido, e com isto se simule “n” séries com as mesmas características estatísticas (SOUZA, 2011).

O modelo Bartlett-Lewis de Pulso Retangular Modificado (BLPRM) simula a lâmina precipitada em duração horária e sub-horária, e possui seis parâmetros para cada um dos doze meses do ano.

Os parâmetros do modelo BLPRM são λ , ν , κ , μ_x , α e ϕ . O parâmetro λ (Δt^{-1}) governa o tempo de origem dos eventos; κ (adimensional) é responsável pela simulação do tempo de

origem das células de precipitação associadas aos eventos; φ (adimensional) é usado na simulação do tempo em que não mais se originam células de precipitação; μ_x (mm/ Δt) representa a média das alturas de células de precipitação associadas aos eventos, e α (adimensional) e v (Δt) são parâmetros de forma e escala da distribuição gama que, na simulação da precipitação por meio desse modelo, é usada para simular η (Δt^{-1}), o qual auxilia na estimativa da duração das células de precipitação (DAMÉ, 2008).

O modelo BLPRM supõe que o processo de precipitação tenha estacionaridade mensal, ou seja, que suas características estatísticas (média, variância, co-variância, probabilidade de ocorrência de períodos secos) não variem dentro do mês. Logo, a precipitação será simulada para cada um dos 12 meses do ano.

O procedimento para o ajuste dos parâmetros deste método consiste em minimizar a soma de quadrados dos desvios entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo. Neste esquema, os resíduos são normalizados pelos respectivos valores históricos. Assim, considerando $f_i = f_i(\lambda, v, \kappa, \mu_x, \alpha, \varphi)$ como sendo uma função do modelo e f_o como sendo o valor amostral tomado de uma série histórica de valores, e supondo ainda m funções, a estimativa dos parâmetros pode ser feita minimizando a seguinte soma de quadrados (BACK *et al*, 2011):

$$W = \sum_{i=1}^m (1 - f_i/f_o)^2 \quad (2.14)$$

onde W é função objetivo da minimização; f_i é a função analítica definida pelo modelo; f_o é o valor correspondente estimado dos dados observados, e m é número de funções consideradas.

A média dos valores observados para cada intervalo de duração é definida pela função:

$$\mu_x(h) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_k^{(h)}} Y_{i,j,k}^{(h)} / \{n_k^{(h)} n\} \quad (2.15)$$

em que, $\mu_x(h)$ é média observada para o intervalo de tempo de h horas (mm); k é o índice mensal do calendário ($k = 1$ para janeiro, 2 para fevereiro, etc...); $Y_{i,j,k}^{(h)}$ é valor de precipitação total do j -ésimo intervalo do ano i para o mês k ; $n_k^{(h)}$ é número total de intervalos de tempo de h horas no mês k ; e n é número de anos de dados.

A variância do valor de precipitação é estimada pela Equação 2.16.

$$\gamma_k(h) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_k^{(h)}} \{Y_{i,j,k}^{(h)} - \mu_x(h)\}^2}{n_k^{(h)} n} \quad (2.16)$$

onde, $\gamma_x(h)$ é a variância observada para o intervalo de tempo h horas, mm^{-2} .

A autocovariância com retardo 1 é estimada pela função:

$$\gamma_k(h, 1) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_k^{(h)}-1} \{Y_{i,j,k}^{(h)} - \mu_x(h)\} \{Y_{i,j,k}^{(h)} - \mu_x(h)\}}{(n_k^{(h)}-1)n} \quad (2.17)$$

em que, $\gamma_k(h, 1)$ é autocovariância com retardo 1, mm^{-2} .

O coeficiente de autocorrelação com retardo 1 é dado pela relação entre a autocovariância com retardo 1 e a variância, isto é:

$$\rho(h, 1) = \frac{\gamma_k(h,1)}{\gamma_k(h)} \quad (2.18)$$

A proporção de intervalos secos é estimada pela razão entre o número de intervalos secos de h horas e o número total de intervalos de h horas no mês k , conforme a Equação 2.17.

$$\emptyset_d(h) = n_d(h)/n_k^{(h)} \quad (2.19)$$

onde, \emptyset_d é proporção de intervalos de h horas de duração sem chuva, e n_d é o número observado desses intervalos.

A expressão analítica do modelo de pulsos retangulares de Bartlett-Lewis, que define a média dos valores de precipitação no intervalo de comprimento h horas, é dada por (CLÁUDIA, 2014):

$$E(Y_i^h) = \frac{\lambda \cdot h \cdot v \cdot \mu_x \cdot \mu_c}{\alpha - 1} \quad (2.20)$$

Em que, $E(Y_i^h)$ é a média da precipitação no intervalo de h horas, mm ; λ , v , κ , μ_x , α e φ são parâmetros do modelo; $\mu_c = 1 + \kappa/\varphi$; e h é o intervalo de tempo em h .

A variância da precipitação simulada pelo modelo é calculada pela Equação 2.21

$$\begin{aligned} \text{var}[Y_i^h] = & 2A_1[(\alpha - 3)hv^{2-\alpha} - v^{3-\alpha} + (v + h)^{3-\alpha}] - 2A_2[(\alpha - 3)\varphi hv^{2-\alpha} - v^{3-\alpha} + \\ & (v + \varphi h)^{3-\alpha}] \end{aligned} \quad (2.21)$$

em que,

$$A_1 = \frac{\lambda \cdot v^\alpha \cdot \mu_c}{(\alpha-1)((\alpha-2)(\alpha-3))} \left[E(X^2) + \frac{\kappa \cdot \varphi \cdot \mu_x^2}{\varphi^2 - 1} \right] \quad (2.22)$$

$$A_2 = \frac{\lambda \cdot \mu_c \cdot \kappa \cdot \mu_x^2 \cdot v^\alpha}{\varphi^2(\varphi^2-1)(\alpha-1)((\alpha-2)(\alpha-3))} \quad (2.23)$$

A profundidade da célula X é assumida como exponencialmente distribuída, $E(X^2) = 2 \cdot \mu_x^2$.

A autocovariância com retardo $\tau > 1$ é definida pela Equação 2.24:

$$\begin{aligned} \text{cov}[Y_i^h, Y_{i+\tau}^h] &= A_1 \{ [v + (\tau + 1)h]^{3-\alpha} - 2(v + \tau h)^{3-\alpha} + [v + (\tau - 1)h]^{3-\alpha} \} - \\ &A_2 \{ [v + (\tau + 1)\varphi h]^{3-\alpha} - 2(v + \tau\varphi h)^{3-\alpha} + [v + (\tau - 1)\varphi h]^{3-\alpha} \} \end{aligned} \quad (2.24)$$

A probabilidade de o período de comprimento de h horas ser seco é dado por:

$$\Pr(Y_i^h = 0) = \exp \left\{ -\lambda h - \lambda \mu_t + \frac{\lambda \varphi}{(\varphi + \kappa)} B_1 + \frac{\lambda \kappa}{(\varphi + \kappa)} B_2 \right\} \quad (2.25)$$

onde, Pr é probabilidade de o intervalo h horas ser seco;

$$\mu_t \approx \frac{v}{\varphi(\alpha-1)} \left[1 + \varphi(\kappa + \varphi) - \frac{1}{4} \varphi(\kappa + \varphi)(\kappa + 4\varphi) + \frac{1}{72} \varphi(\kappa + \varphi)(4\kappa^2 + 27\kappa\varphi + 72\varphi^2) \right] \quad (2.26)$$

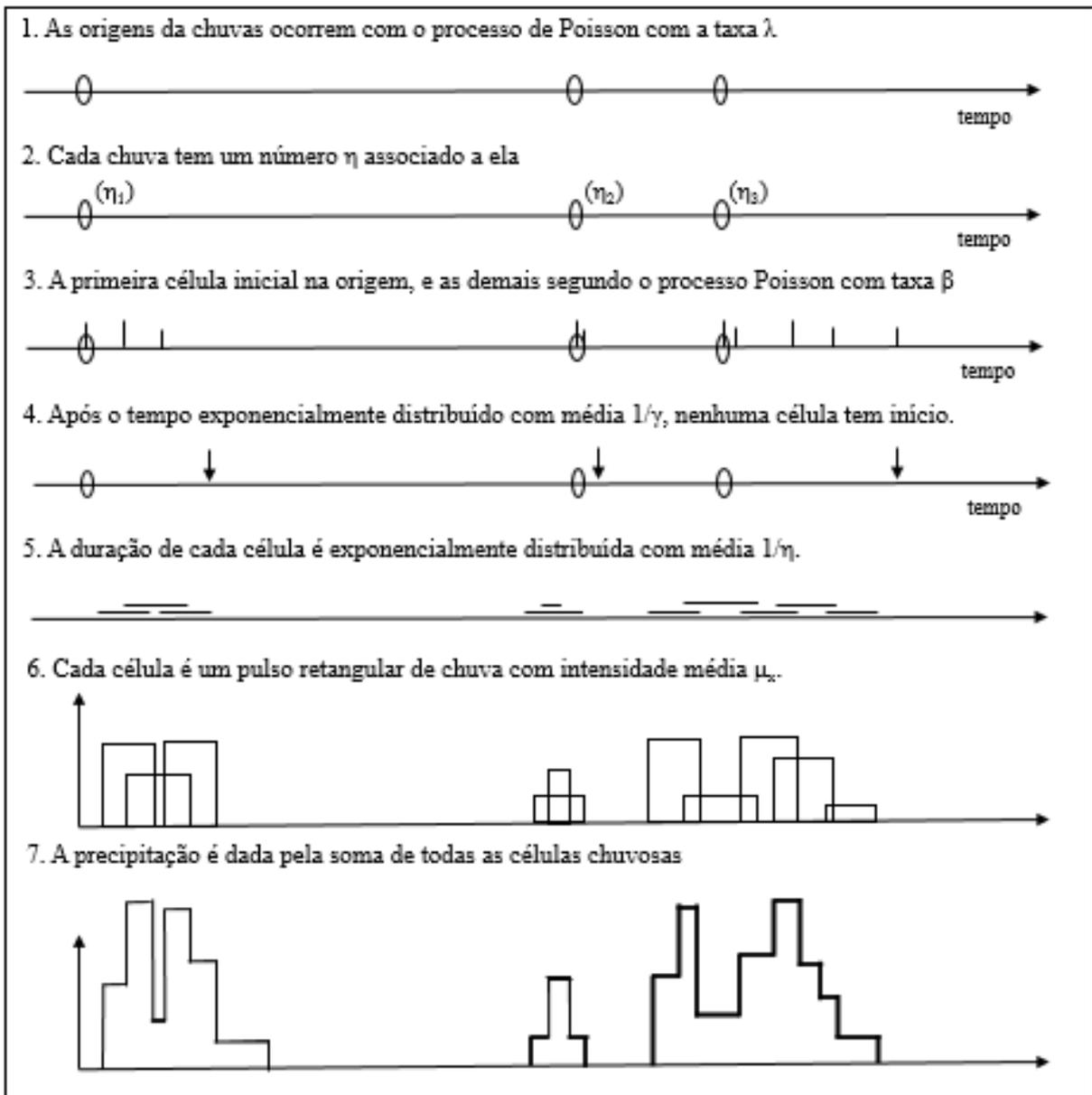
$$B_1 = \frac{v}{\varphi(\alpha-1)} \left(1 - \kappa - \varphi + \frac{3}{2} \kappa\varphi + \varphi^2 + \frac{1}{2} \kappa^2 \right) \quad (2.27)$$

$$B_2 = \frac{v^\alpha}{\varphi(\alpha-1)} [v + (\kappa + \varphi)h]^{1-\alpha} \left(1 - \kappa - \varphi + \frac{3}{2} \kappa\varphi + \varphi^2 + \frac{1}{2} \kappa^2 \right) \quad (2.28)$$

A chuva é simulada como o acúmulo de células chuvosas associadas com a chuva (Figura 2.3) da seguinte forma:

- Os tempos de início das chuvas ocorrem de acordo com o processo Poisson com taxa λh^{-1} , isto é, os tempos entre o início de chuvas consecutivas são variáveis aleatórias independentes e exponencialmente distribuídas com parâmetro $1/\lambda$;
- Cada chuva tem um número η , associada com ela, que especifica a intensidade da chuva. Esses números são variáveis aleatórias independentes, com distribuição gama de média $\frac{\alpha}{v}$ e variância $\frac{\alpha}{v^2}$;
- Cada célula é um pulso retangular de chuva, com intensidade exponencialmente distribuída com média μ_x mm h^{-1} , e duração exponencialmente distribuída, com média $1/\eta$ h;
- A precipitação total é dada pela soma de todas as células e todas as chuvas

Figura 2.3 - Representação do modelo de pulsos retangulares de Bartlett-Lewis modificado



Fonte: Back *et al.*, 2011

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os métodos que foram utilizados para realização do trabalho. A Figura 3.1 sintetiza toda a metodologia adotada no estudo, e nas Figuras 3.2 a 3.5 estão apresentados de maneira detalhada esse fluxograma. Os detalhes das etapas estão expostos nas seções posteriores.

Figura 3.1 - Fluxograma representativo da metodologia adotada para elaboração da dissertação

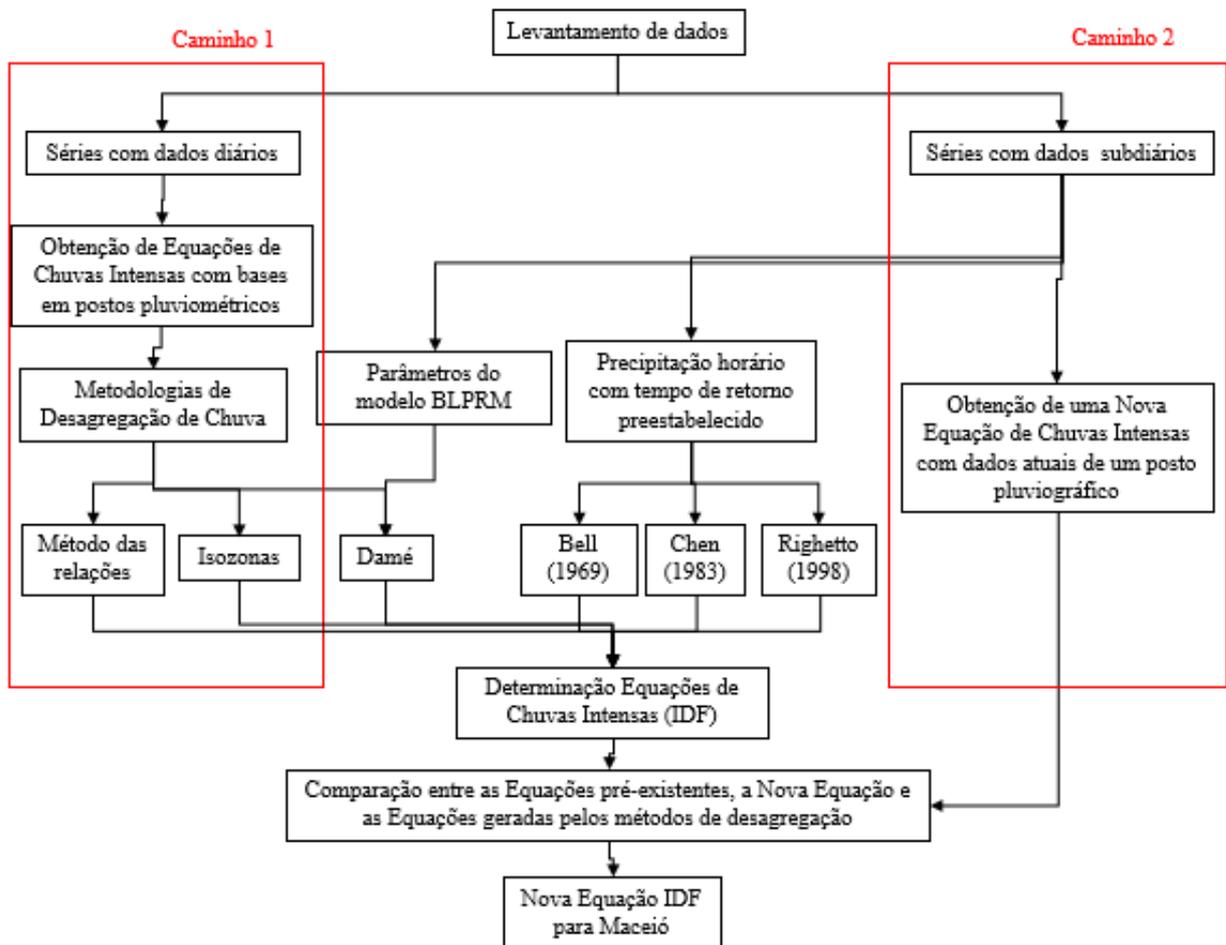


Figura 3.2 - Caminho 1 - Séries com os dados subsidiários

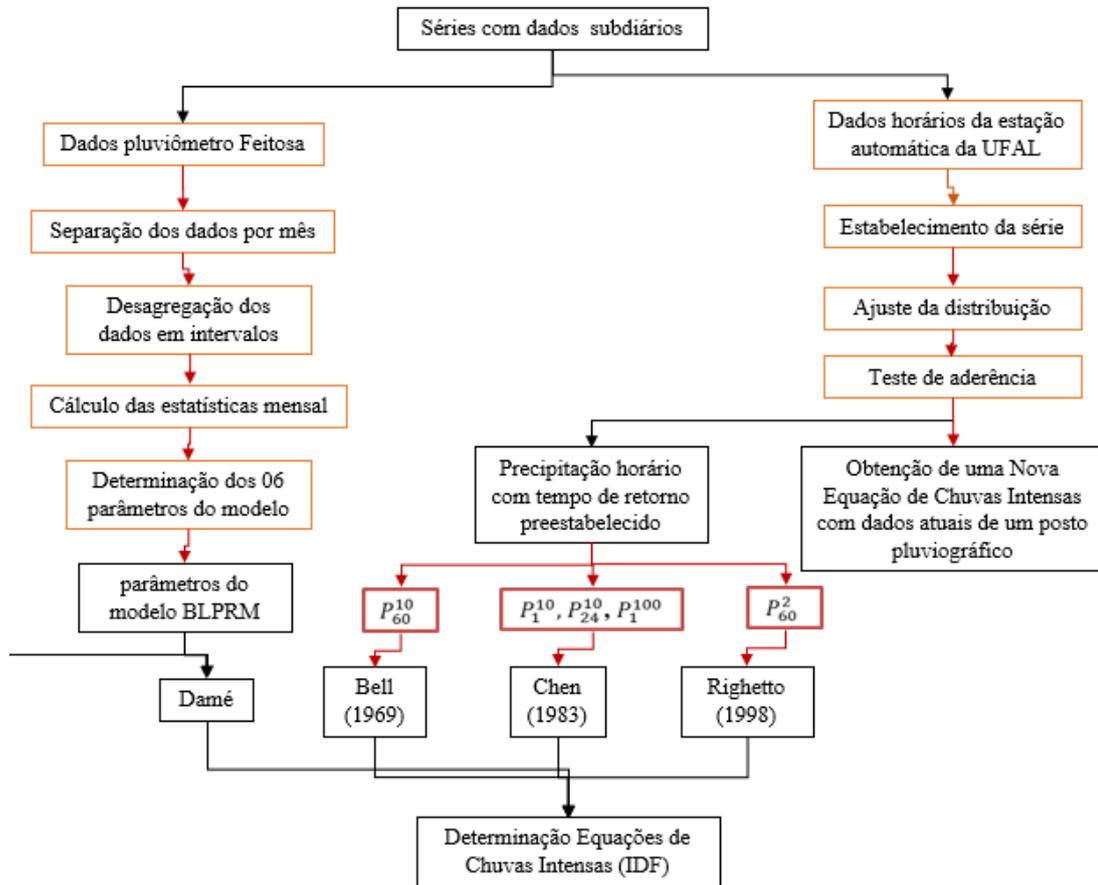


Figura 3.3 - Caminho 2 - Séries com dados diários

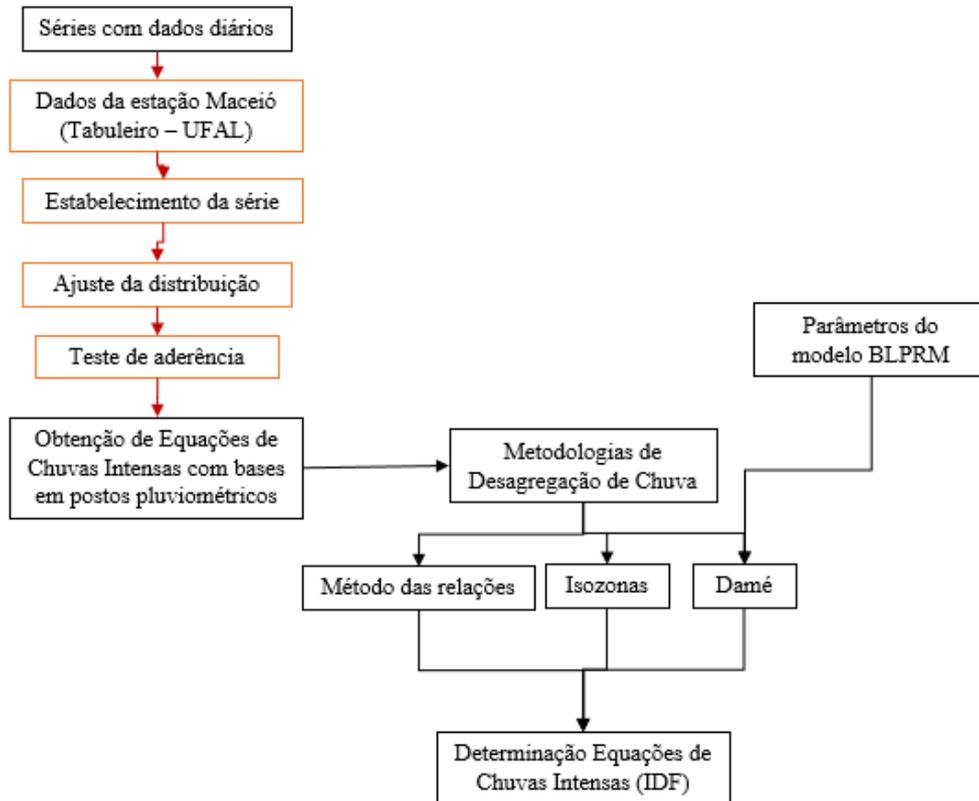
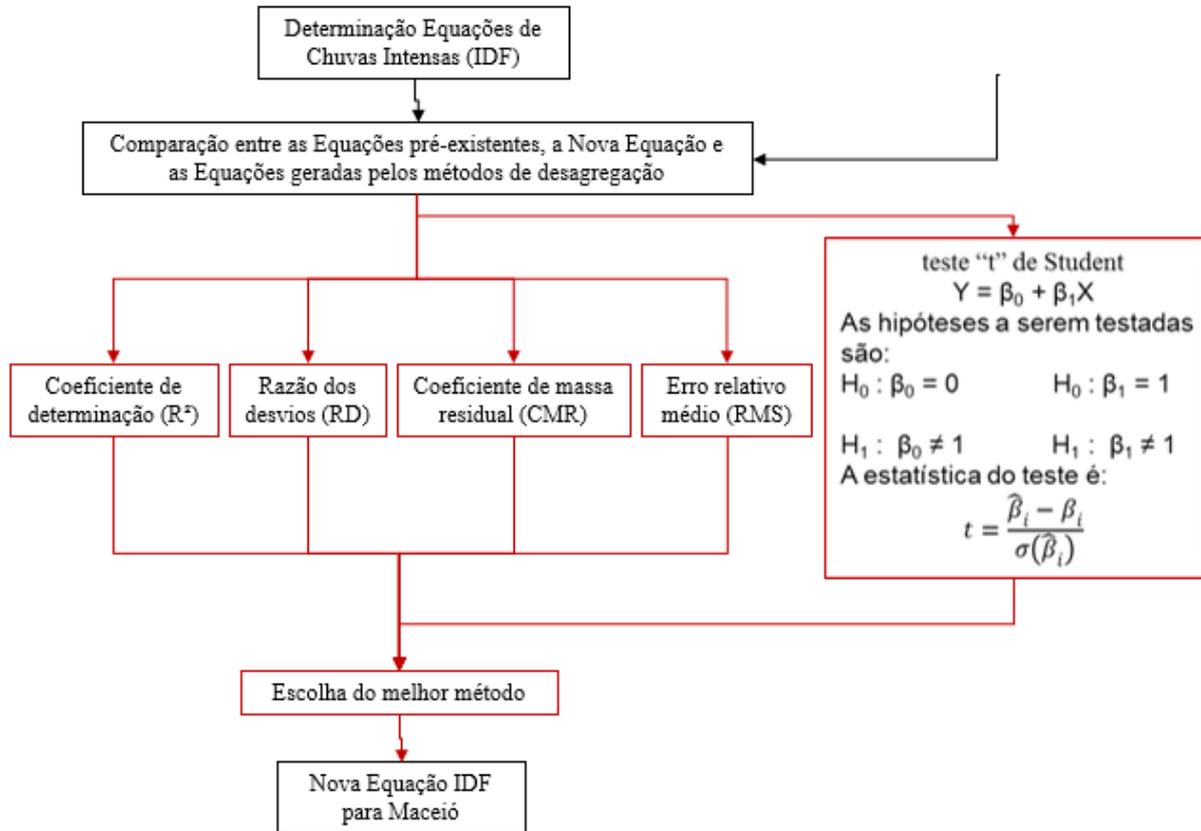


Figura 3.4 - Determinação das curvas IDF e comparação entre as metodologias utilizando os parâmetros estatísticos



3.1 Levantamento de dados

Foram levantados, no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), as estações pluviométricas para a cidade de Maceió/AL, conforme mostra a Tabela 3.1. Dentre estas somente 5 (cinco) possuíam séries de dados disponíveis: a Estação Maceió - Bebedouro, localizada no bairro Bebedouro; Saúde, bairro Saúde; Maceió (DNOCS), bairro Clima Bom; Maceió (SUDENE), Bairro Jaraguá; Maceió (Tabuleiro), localizada na Universidade Federal de Alagoas.

Em análise aos bancos de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH) para verificar a disponibilidade de dados com durações inferiores a 24 horas, foram encontradas 02 (duas) estações para a cidade de Maceió/AL, sendo uma automática (código OMM: 81998), aberta desde 2003, localizada na Universidade Federal de Alagoas. A outra estação convencional (código OMM: 81994), aberta desde 1909, localizada na praia do Bairro Ponta Verde.

Quanto à disposição e aquisição dos dados, o sistema de banco de dados do INMET disponibilizou somente a série de dados diários (entre os anos de 1961 a 2017) da estação convencional. Os dados da estação automática foram solicitados via e-mail, e obtido como resposta uma série de dados horários com período desde o ano de 2003 a 2017.

Foi observado que a estação convencional coincide com a estação de código 935031 da Agencia Nacional de Águas, Tabela 3.1. Entretanto os dados da série são similares aos dados da estação de código 935004 (ANA).

Seguindo o objetivo de verificar a disponibilidade de dados com durações inferiores a 24 horas, foram levantados dados de todas as estações de pluviômetros automáticos do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN). Os dados encontrados foram séries com curto período de dados (desde 2014).

A Tabela 3.1 mostra um quadro geral das estações com disponibilidade de dados de precipitação para a cidade de Maceió.

Tabela 3.1 - Quadro Geral de disponibilidade de dados para Maceió/AL

Código Estação Pluviométrica	Nome da Estação	Entidade Responsável	Tipo de Coleta	Estação apta a	Período de dados da série		Latitude	Longitude
					Início	Fim		
935031**	Maceió (UFAL - Inmet)	INMET	Convencional	Dados de chuva diária	1961	2017	-9,67	-35,7
935009*	Maceió - Bebedouro	SUDENE	Convencional	Dados de chuva diária	1978	1983	-9,13	-35,75
935024	Saúde	DNOCS	Convencional	Dados de chuva diária	1963	1994	-9,53	-35,63
935005	Maceió	DNOCS	Convencional	Dados de chuva diária	1912	1994	-9,57	-35,78
935008*	Maceió	SUDENE	Convencional	Dados de chuva diária	1966	1970	-9,67	-35,72
935004**	Maceió (Tabuleiro - UFAL)	INMET	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	1961	2017	-9,55	-35,77
81998	Universidade Federal de Alagoas (UFAL)	INMET	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2003	2017	-9,55	-35,77
935064	Maceió_Tabuleiro dos Martins2	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,58	-35,77
935065	Maceió - Farol	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,64	-35,74
935066	Maceió - Tabuleiro do Martins	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,59	-35,76
935067	Maceió - Farol2	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,63	-35,74
935068	Maceió - Trapiche da Barra	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,7	-35,78
935069	Maceió - Benedito Bentes I	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,55	-35,73
935070	Maceió - Ipioca1	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,53	-35,61
935071	Maceió - Cruz das Almas	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,63	-35,71
935072	Maceió - Antares	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,57	-35,74
935073	Maceió - Ipioca2	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,53	-35,62
935074	Maceió - Usinas de processamento de asfaltos	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,57	-35,78
935075	Maceió - Cidade Universitária	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,55	-35,76
935076	Maceió - Chã da Jaqueira	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,62	-35,75
935077	Maceió - Cambona	CEMADEN	Convencional / Telemétrica	Dados de chuva diária e subdiária	2014	2017	-9,65	-35,74

(*) Estação não se encontra em Operação, (**) Estação com dados de chuvas iguais

Além dessas fontes, há dados de pluviômetros de balsa instalados através de projetos de pesquisa desenvolvidos no âmbito do PPGRHS. Destacam-se aqueles instalados nos bairros do Feitosa e no bairro do Poço. O primeiro é um pluviômetro de balsa com registrador automático, datalogger, instalado no dia 12/07/2014, da marca Hydrological Services Pty Ltd, modelo TB6, basculada de 0,2 mm. O Segundo é um equipamento semelhante ao do Feitosa instalado até a data 02/04/2016. Depois disso, em 25/05/2016 foi utilizada a marca Onset, PLUVIÔMETRO DIGITAL - RG3-M, basculada 0,2 mm.

Os dados utilizados neste estudo, tanto os diários (estação convencional) como os horários (estação automática) foram extraídos da estação localizada na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), cidade de Maceió. Ambos os postos são mantidos e operados pelo Instituto de Nacional de Meteorologia. A estação convencional possui registro de dados desde 1961, entretanto apresenta algumas lacunas e falhas, principalmente entre os anos de 1970 a 1975, 1980 a 1986 e 1989 a 1993. O período de dados considerado, de fato, neste estudo para esta estação é de 24 anos (1993 a 2017). O período para estação automática foi de 14 anos (2003 a 2017).

As estações pluviométricas citadas foram selecionadas com base na extensão, qualidades e atualidade de seus dados.

3.2 Séries com dados subdiários

3.2.1 Seleção da precipitação para estabelecimento da série

As séries de precipitações máximas podem ser constituídas por um único valor para cada ano (séries anuais) ou pelos n maiores valores verificados no período total de observação (séries parciais), podendo haver anos com mais de um valor.

Segundo exposto na seção 2.5 deste estudo, a metodologia de séries parciais é utilizada quando a quantidade de dados é pequena (menos de 12 anos) e os tempos de retorno que serão utilizados são inferiores a 5 anos. A série anual é a mais utilizada quando se dispõe de muitos dados.

Com base nos dados da estação automática (dados horários) da UFAL, que apresentou uma série de 14 anos, a metodologia de séries anuais foi adotada neste estudo. Assim foi estabelecida uma série anual de precipitação máxima para cada duração. Porém, as

precipitações máximas ou chuvas intensas são definidas como aquelas que ultrapassam um determinado valor mínimo.

Uma vez estabelecida uma série anual para cada duração, foram verificados quais valores ultrapassaram os mínimos especificados, assim adotando-os. O valor mínimo adotado neste trabalho para cada duração foi baseado nos limites propostos por Pfafstetter (1957) e por Wilken (1978), conforme recomendado no trabalho de Davis e Naghettini, (2001). As durações que não foram abordadas pelos citados autores, os valores mínimos foram obtidos por interpolação dos limites. A Tabela 3.2 apresenta os valores propostos pelos autores, além dos valores adotados neste trabalho.

Tabela 3.2 - Valores estabelecidos como precipitações e intensidades mínimas consideradas como chuvas

Autor	Pfafstetter (1957)		Wilken(1978) apud Davis e Naghettini (2001)		Valores adotados		
	Duração(min)	P(mm)	I(mm/h)	P(mm)	I(mm/h)	P(mm)	I(mm/h)
	5	8	96	10	120	9,0	108,0
	10	-	-	12	72	12,0	72,0
	15	15	60	15	60	15,0	60,0
	30	20	40	20	40	20,0	40,0
	45	-	-	23	30,7	23,0	30,7
	60	25	25	25	25	25,0	25,0
	120	30	15	30	15	30,0	15,0
	180	-	-	33	11	33,0	11,0
	240	35	8,8	35	8,8	35,0	8,8
	360	-	-	-	-	37,5*	6,3
	480	40	5	-	-	40,0	5,0
	720	-	-	-	-	44,7*	3,7
	840	47	3,4	-	-	47,0	3,4
	1080	-	-	-	-	50,2*	2,8
	1440	55	2,3	-	-	55,0	2,3

*Valores interpolados

3.2.2 Ajuste da distribuição de probabilidade

Estabelecida a série anual de precipitações máxima para cada duração e observando os limites mínimos determinados para cada série, pode-se ajustar uma distribuição de probabilidade aos valores.

A distribuição estatística utilizada nesta pesquisa é a distribuição de valores extremos do Tipo I, também conhecida como distribuição de Gumbel. Esta foi escolhida por ter grande

aplicação para o estudo de eventos extremos, e é utilizada de forma generalizada nos trabalhos de chuvas intensas. A distribuição de Gumbel é a mais usada na análise de frequências de séries hidrológicas (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Neto *et al* (2016) determinaram curvas IDF para a cidade de Garapi – TO ajustando dados de precipitação máxima diária anual a distribuição de Gumbel. Os autores utilizaram o teste de aderência de Kolmogov-Smirnov para avaliar o ajuste da distribuição, e perceberam que a diferença máxima entre os valores observados e calculados para um o nível de significância 5% deu um valor de 0,083, onde o valor crítico do teste é de 0,264. Assim, os autores concluíram que a análise mostrou que a distribuição Gumbel, frequentemente, usada no cálculo de precipitações extremas representou adequadamente os dados, sendo significativo para todos os testes de aderência utilizados.

Barreto *et al* (2014) ajustaram a função distribuição de probabilidade de Gumbel aos dados de precipitação máxima diária anual de um posto pluviométrico da cidade de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte. Para verificar o ajuste os autores utilizaram os testes de aderência Qui-Quadrado, Kolmogov-Smirnov e Anderson-Darling. Assim, a partir dos resultados, observaram que a distribuição de Gumbel obteve uma boa adequação para todos os testes realizados, representando adequadamente os dados.

Fadhel *et al* (2017), em um estudo com série anual de precipitação máxima na região de West Yorkshire, norte da Inglaterra, para avaliar mudanças climáticas esperadas entre as curvas de IDF de clima atual e a de clima projetado para o futuro, utilizou a distribuição de Gumbel como sendo a que apresentou a maior representatividade dos dados quando feito os testes de aderência Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling.

El-Sebaie (2013) determinou relação intensidade-duração-frequência (IDF) para as regiões Najran e Hafr Albatin no reino da Arábia Saudita (KSA) utilizando um posto de dados pluviográficos para cada região, ambos com período de 1967 a 2001. Neste estudo, foram utilizados a distribuição de Gumbel e Log Pearson tipo III, e no teste de aderência Qui-quadrado mostrou que a distribuição de Gumbel teve um ajuste mais considerado quando comparado a Log Pearson tipo III.

Sherif (2013) utilizou diferentes distribuições de probabilidade para analisar características espaciais e temporais das chuvas nos Emirados Árabes Unidos (EAU). A distribuição que mostrou adequada na região foi a de Gumbel e Weibull.

Paola *et al* (2014) utilizou a distribuição de probabilidade de Gumbel para determinar curvas IDF para três cidades do continente africano, Addis Abeba (Etiópia), Dar Es Salaam (Tanzânia) e Douala (Camarões). O objetivo do estudo do autor foi revisar e atualizar as características de chuva para o cenário de mudanças climáticas.

Vários outros trabalhos utilizaram a distribuição de Gumbel e apresentaram resultados satisfatórios em comparação com outra distribuição. Os detalhes desta distribuição estão no Anexo A.

Foram adotados tempos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos. Uma vez que foram calculados as alturas da precipitação para cada período de retorno, determinou-se as intensidades de precipitação para todas as durações especificadas no item 3.2.2 através da equação a seguir:

$$i = \frac{x(T)}{t} \cdot 60 \quad (3.1)$$

onde, $x(T)$ é valor da altura de precipitação para o tempo de retorno adotado (mm), i é a intensidade de precipitação (mm/h); t é o tempo de duração da precipitação (minutos).

3.2.3 Teste de Aderência

Vários procedimentos estatísticos convencionais têm sido utilizados para garantir que os resultados estejam de acordo com a distribuição adotada para o conjunto de dados, tais como testes de comparação de médias, como o teste t, testes de comparação de variâncias (desvio padrão) como o teste F, intervalos de confiança e outros, a diferentes níveis de probabilidade. Para comparação de frequências de dados agrupados, são normalmente utilizados os testes Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e papéis de probabilidade.

O ajuste da distribuição de Gumbel foi avaliado pelo teste de aderência Kolmogorov-Smirnov, uma vez que esse teste é um dos mais utilizados em hidrologia para adequação das informações observadas a distribuição de frequência (SOUZA, 2014). O detalhe do teste está apresentado no Anexo B. Também foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) para avaliar a qualidade do ajuste.

3.2.4 Determinação da relação intensidade, duração e frequência.

Após verificada a aderência da distribuição de Gumbel, buscou-se determinar a relação intensidade-duração-frequência para a série dos dados levantados, denominada curva IDF. Essa

relação é expressa pela equação genérica empírica de chuvas intensas, que apresenta a seguinte forma:

$$i = \frac{kT^m}{(t+b)^n} = \frac{a}{(t+b)^n} \quad (3.2)$$

onde,

i = intensidade média da chuva em uma dada duração t relativo a um período de retorno T (anos); a , b , c e d são parâmetros adimensionais relativos ao local.

$$a = kT^m \quad (3.3)$$

A Equação 3.2 foi transformada em uma reta através da propriedade dos logaritmos:

$$\log i = \log a - n \log(t + b) \quad (3.4)$$

Os parâmetros $\log(a)$ e n são os coeficientes de regressão linear entre as variáveis $\log(i)$ e $\log(t+b)$.

Para determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas, lançam-se em coordenadas logarítmicas as séries de intensidades máximas em função do intervalo de duração, resultantes da Equação 3.1.

Para transformação das curvas em retas, com equações semelhantes à exposta acima (Equação 3.4), utiliza-se o procedimento de linearização ou anamorfose, substituindo a duração t da equação, por uma duração $t + b$, estimando, portanto, um valor para o parâmetro b .

O parâmetro b foi obtido pelo método de tentativa e erro, a qual somada as durações, lineariza a relação entre intensidade e $(t+b)$ em coordenadas logarítmicas.

Foram testados diversos valores de b e analisado a melhor linearização obtida. O parâmetro observado para o melhor valor de b é o R^2 , que é coeficiente de determinação. Assim o parâmetro b foi determinado conforme o maior coeficiente de determinação (R^2) da correlação linear entre o logaritmo da série de intensidade máxima ($\log(i)$) e o do intervalo de duração acrescido do parâmetro em questão ($\log(t+b)$) para o tempo de retorno arbitrado. Obteve-se então o parâmetro b para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos. Posteriormente, definiu-se um valor de b que representasse todo os tempos de retorno, e analisou-se o comportamento dos coeficientes de determinação e os valores do coeficiente angular (n) e linear ($\log a$) das retas de regressão determinados diante da mudança do parâmetro b .

O parâmetro n , da Equação 3.2, foi determinado adotando-se o valor médio entre os coeficientes angulares de cada uma das regressões determinadas para cada um dos tempos de retorno utilizados.

Para determinação dos parâmetros k e m , a Equação 3.3 também foi transformada na equação de uma reta através da propriedade dos logaritmos, resultando na equação:

$$\log a = \log k + m \log T \quad (3.5)$$

Os valores de $\log a$ gerados como coeficientes lineares das retas de regressão da Equação 3.4 foram lançados em um gráfico em função do logaritmo do período de retorno, resultando em uma reta cujo coeficiente linear corresponde ao logaritmo do parâmetro k e cujo coeficiente angular corresponde ao parâmetro m .

A partir da determinação do parâmetro b foi realizado análise de variância (ANOVA) da regressão linear da Equação 3.4 para cada tempo de retorno, a fim de verificar a existência de uma relação funcional entre a variável $\log(i)$ (dependente) com a variável $\log(t+b)$ (independente), ou seja, verificar quanto a reta da regressão “explica” os valores do ajuste. Para tanto foi realizada a metodologia do teste F para nível de significância $\alpha = 5\%$. Assim foi testada a hipótese de nulidade (H_0) para os coeficiente angular (β_1) de cada uma das regressões determinadas para cada um dos tempos de retorno utilizados. Assim, quando a estatística do teste F foi maior que os valores de F tabelado para o nível de probabilidade $(1 - \alpha)$, rejeitou-se a hipótese nula (H_0) e entendeu-se que há uma correlação linear significativa entre logaritmo do intervalo de duração acrescido do parâmetro b ($\log(t+b)$) e o logaritmo da série de intensidade máxima ($\log i$). Também foi realizada a análise de variância (ANOVA) para reta de regressão linear da Equação 3.5.

As hipóteses testadas são:

$$H_0 : \beta_1 = 0 \quad H_1 : \beta_1 \neq 0$$

A estatística do teste é:

$$F = \frac{QMreg}{QMR} \quad (3.6)$$

onde, $QMreg$ é a média dos quadrados dos desvios da regressão e QMR é a média dos quadrados dos desvios dos resíduos

Uma vez determinados os parâmetros k , n , b , e m , adquire-se a equação de chuvas intensas. Para comparar os valores das intensidades de precipitação calculados pela distribuição de Gumbel e os calculados pela Nova Equação de Chuvas Intensas, utilizou-se: o coeficiente de determinação (R^2); razão dos desvios (RD); e o coeficiente de massa residual (CMR). As equações são escritas da seguinte maneira:

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (3.7)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T}) \cdot (M_i - \bar{M})}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \right]^2 \quad (3.8)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (3.9)$$

em que: M_i = valores calculados pela Nova Equação de Chuvas Intensas de Maceió; T_i = valores calculados pela distribuição de Gumbel; N = número de pares de variáveis calculadas (distribuição e equação); \bar{T} , \bar{M} = médias dos valores calculados pela curva IDF e pela Distribuição de Gumbel, respectivamente.

O coeficiente de determinação (R^2) representa o grau de associação entre duas variáveis, ou seja, é a medida da relação linear entre os valores do ajuste e da nova equação. Quanto mais próximo de 1 (um) melhor é esta relação. A razão de desvios (RD) descreve a razão entre a dispersão dos valores ajustados pela distribuição e os calculados pela nova equação, tendendo a 1 (um), quando há igualdade entre estes valores. O coeficiente de massa residual (CMR) tende a 0 (zero), na ausência de desvios sistemáticos entre os valores observados e calculados. Quando $CMR > 0$ pode indicar superestimação ou $CMR < 0$ a subestimação da Equação de Chuvas Intensas.

3.3 Séries com dados diários

3.3.1 Seleção da precipitação de postos pluviométricos

Após o levantamento de todos os postos pluviométricos para a cidade de Maceió, e uma vez escolhido o posto pluviométrico (uma série de 24 anos de dados diários) com o menor número de falhas nos dados e com série maior que 15 anos, conforme o item 3.1, buscou-se

determinar a precipitação máxima diária anual. Assim, fez-se uma série de dados de precipitação máxima diária anual.

O passo seguinte foi o ajuste dos dados a uma distribuição teórica de probabilidade. A série das máximas diárias anuais foi ajustada à distribuição de probabilidade de Gumbel para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, conforme descrita no item 3.2.2.

Uma vez ajustados os dados de precipitação máxima diária anual para tempos de retornos, realizou-se o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov e o coeficiente de determinação (R^2), como detalhado no item 3.2.3.

3.3.2 Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo método das Relações (CETESB, 1979)

Após a verificação da aderência da distribuição de probabilidade e estimadas as precipitações máximas diárias para os períodos de retorno previamente estabelecidos, conforme descrito no item 3.3.1, procede-se na desagregação dessas chuvas diárias, utilizando-se as relações constantes de desagregação descritas no método das relações das durações (Tabela 2.3), gerando precipitações de durações de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 720 e 1440 minutos

Dessa maneira, é possível determinar as intensidades de precipitações para as durações e período de retorno citados. Posteriormente, buscou-se ajustar a equação de chuvas intensas (Equação 3.2)

3.3.3 Determinação da relação intensidade –duração- frequência (IDF) pelo Método das Isozonas

Com os dados ajustados à distribuição de probabilidade de Gumbel, realizado o teste de aderência e calculadas as precipitações máximas diárias anuais para cada tempo de retorno estabelecido, transformou-se a chuva de um dia em chuva de 24 horas através da Equação 2.13.

Uma vez calculada a precipitação de 24 horas, identificou-se a Isozona em que está inserido o posto pluviométrico, considerado no estudo, através da Tabela 2.4. Em sequência determinou-se a relação entre chuva de 1 hora e 24 horas ($R_{1h/24h}$), assim como a relação entre a precipitação 6 minutos e 24 horas ($R_{6min/24h}$) para o período de retorno selecionado, utilizando a Figura 2.2.

Uma vez que se obtiveram as relações ($R_{1h/24h}$) e ($R_{6min/24h}$), calculou-se as precipitações de 6 minutos e 1 hora de duração através das Equações 3.10 e 3.11.

$$P_{6min} = R_{6min/24h} \cdot P_{24h} \quad (3.10)$$

$$P_{1h} = R_{1h/24h} \cdot P_{24h} \quad (3.11)$$

De posse das precipitações de 24 horas, 1 hora e 6 minutos, traçou-se no papel de probabilidades (mono-log) retas de precipitação, possibilitando assim a determinação de precipitações para durações intermediárias, traçando-se uma reta vertical para as durações de interesse e interpolando os valores de precipitação.

Em seguida, determinou-se as intensidades de chuvas, e conseqüentemente uma curva IDF.

3.3.4 Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo método de Damé (2001)

Foram utilizados dados do pluviômetro de báscula do projeto de pesquisa desenvolvido no âmbito do PPGRHS, instalado no bairro do Feitosa, Maceió –AL. Este é um pluviômetro com registrador automático, datalogger, instalado no dia 12/07/2014, da marca Hydrological Services Pty Ltda, modelo TB6, com basculada de 0,2 mm.

Os dados foram separados mensalmente. Depois para cada mês, com a utilização de uma implementação no Matlab, estes foram desagregados em intervalo de 15 min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 12h e 24h. Este procedimento foi realizado para todos os anos dos dados. Assim, determinou-se séries no intervalo de 15 min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 12h e 24h para cada mês do ano.

Em seguida foram determinadas as estatísticas média, variância, covariância, probabilidade de ocorrência de períodos secos e coeficiente de autocorrelação com retardo 1, com a utilização das Equações 2.15 a 2.19, para todos os intervalos em que cada mês foi desagregado. Logo, as estatísticas foram calculadas para cada um dos 12 meses do ano. Os parâmetros do modelo BLPRM foram estimados para cada mês separadamente, devido à suposição de estacionariedade mensal.

As equações matemáticas do modelo BLPRM estão apresentadas pelas Equações 2.20 a 2.28 para estimativa da média, variância, covariância e probabilidade de ocorrência de períodos da chuva acumulada no intervalo de comprimento Δt .

Conforme apresentado na descrição do modelo, os seus parâmetros são λ , ν , κ , μ_x , α , ϕ . O parâmetro λ (Δt^{-1}) governa o tempo de origem das tormentas; κ (adimensional) é responsável pela simulação do tempo de origem das células de chuva associadas às tormentas; ϕ (adimensional) é usado na simulação do tempo em que não mais se originam células de chuva; μ_x ($\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$) representa a média das alturas de células de chuva associadas às tormentas, e α (adimensional) e ν (Δt) são parâmetros de forma e escala da distribuição gama, que, na simulação da chuva por meio desse modelo, é usado para simular $\eta(\Delta t^{-1})$, que auxilia na estimativa da duração das células de chuva.

Os parâmetros do modelo foram estimados, por meio do Método dos Momentos (MM), igualando-se as estatísticas históricas, obtidas dos dados do pluviômetro de báscula instalado no bairro do Feitosa, $f^{(o)} = (f_1^{(o)}, f_2^{(o)}, f_3^{(o)}, \dots, f_q^{(o)})$, com as correspondentes expressões do modelo, $f^{(m)}(z) = (f_1^{(m)}(z), f_2^{(m)}(z), f_3^{(m)}(z), \dots, f_q^{(m)}(z))$. O vetor z refere-se aos parâmetros $p(\lambda, \nu, \kappa, \mu_x, \alpha, \phi)$, enquanto q refere-se ao número de equações utilizadas. Dessa forma, constituiu-se um sistema composto de q equações não-lineares, com p variáveis, onde $q \geq p$. Essas equações foram resolvidas simultaneamente.

Os seis parâmetros do modelo BLPRM foram considerados estimados quando a função objetivo (Equação 2.14) teve seu valor minimizado. Para minimizar o somatório dessa função, foi utilizado o programa SOLVER da planilha eletrônica do EXCEL. Esse programa usa o código de otimização não-linear, denominado “Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2). A escolha desse programa foi inspirada no trabalho de Back (2011), que é um dos poucos trabalhos brasileiros que usa o modelo BLPRM.

Segundo Damé *et al* (2007), os valores dos parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis podem variar de acordo com a combinação das estatísticas usadas na função de ajuste dos modelos. Desta maneira foram estabelecidos cinco conjuntos de estatísticas denominados de A, B, C, D, E (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Combinações estatísticas utilizadas na estimativa dos parâmetros do modelo BLPRM. O nível de agregação temporal em minutos está mencionado para cada estatística

Combinações	Média (mm)	Variância (mm ²)	Coefficiente de autocorrelação de retardo 1	Proporção do período seco considerado (PD)
A	15	15, 1440	15	15, 1440
B	15	15, 1440	15, 1440	360, 1440
C	15	15, 30	15	15, 1440
D	15	30, 1440	720	15, 1440
E	15	15, 30, 60, 360, 720, 1440	15, 30, 60, 360, 720, 1440	15, 30, 60, 360, 720, 1440

Quando os conjuntos A, B, C e D foram usados, o sistema foi constituído por $q = 6$ equações, enquanto que, na combinação E, o sistema foi composto de $q = 19$ equações. As variáveis envolvidas foram os parâmetros (λ , v , κ , μ_x , α , ϕ) estimados.

Nos conjuntos A, B, C, D e E, foram usadas as alturas de chuva na duração de 15 minutos (menor duração estudada) para o cálculo da média. Para a determinação da proporção do período seco, nos conjuntos A, B, C e D, foram usadas as séries de chuva referentes à menor e maior duração (15 e 1440 minutos).

Buscou-se eleger uma combinação entre os cinco conjuntos, para ajustar os parâmetros do modelo BLPRM aos dados do pluviômetro de báscula do Feitosa. Para isto a melhor combinao para cada mês foi escolhida através do menor valor da funo objetivo (Equao 2.14).

Assim, as estatísticas históricas referentes ao período dos dados do pluviômetro de báscula do Feitosa foram igualadas às correspondentes expressões do modelo a partir de cada um dos cinco conjuntos. Então foram determinados os parâmetros do modelo BLPRM para cada um dos cinco conjuntos. Esse procedimento foi realizado para todos os doze meses do ano. O melhor conjunto de estatística mensal foi escolhido pelo menor valor da funo objetivo (Equao 2.14), e conseqüentemente, os seis parâmetros do modelo para cada mês.

Determinados os parâmetros do modelo BLPRM para cada mês, estes foram utilizados para desagregar os dados diários em intervalos de 15 minutos da estao pluviométrica da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), cidade de Maceió, mantida e operados pelo Instituto de Nacional de Meteorologia. O período de dados considerado nesta estao  de 24 anos (1993 a 2017).

De posse dos dados desagregados de chuva (mm), na duração de 15 minutos, esses foram agregados para as durações de 30-60-120-180-240-360-720-1440 minutos. Dessa forma, foram estabelecidas seis séries mensais de dados diários desagregados, sendo uma para cada duração. Essas alturas de chuva (mm) foram transformadas em intensidades de precipitação (mm.h^{-1}), que é a base sobre a qual foram constituídas as séries de máximas anuais e estabelecidas as curvas IDF sintéticas.

Os dados foram desagregados seguindo os algoritmos apresentados no Anexo C, referentes à simulação de chuva, pelo do modelo BLPRM. Para isto utilizou-se o software HyetosMinute, que é uma rotina computacional desenvolvida por Kossieris *et al* (2016).

HyetosMinute é um pacote para a simulação estocástica temporal do processo de chuva no horário fino escalas, ou seja, de cada dia a 1 minuto, com base no modelo de pulso retangular Bartlett-Lewis. Ele opera em vários modos e combinações deles (dependendo da disponibilidade de dados), como o operacional ou de teste, e simples simulação ou desagregação sequencial (KOSSIERIS *et al*, 2016).

No último caso, ele usa o modelo Bartlett-Lewis para gerar eventos de precipitação juntamente com desagregação comprovada técnicas que ajustam as variáveis de escala mais fina (por exemplo, por hora) para obter o mais grosso valor da escala (por exemplo, diariamente). O pacote compreende várias variantes do modelo Bartlett-Lewis, recursos gráficos, ferramentas de importação / exportação, bem como uma ferramenta de otimização para a estimativa de parâmetros do modelo.

Para rodar o software o HyetosMinute, este necessita ser inserido no software R, que é um ambiente de software livre para computação estatística e gráficos. Os dados de entrada no HyetosMinute são: os parâmetros do modelo Bartlett-Lewis, determinados para cada mês; a duração em que se deseja simular a chuva (neste trabalho é usada a duração de 15 minutos), e a série do mês que se deseja desagregar (neste trabalho é utilizada a série diárias do pluviômetro da UFAL).

3.4 Aplicação da metodologia de Bell (1969)

Para aplicação da Equação 2.5, determinada por Bell (1969), é necessário a precipitação de tempo de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos (P_{60}^{10}). Esta precipitação pode ser

obtida por meio de informações de chuvas intensas observadas, das curvas IDF locais, quando existente, caso contrário por meio das relações durações.

A Equação 2.8, proposta por Righetto (1998), tem como requisito a precipitação de tempo de retorno de 2 anos e duração de 60 minutos (P_{60}^2). Sendo que esta precipitação pode ser obtida por poucos anos de dados pluviográficos ou por meio de dados pluviométricos através da Equação 2.10.

Neste trabalho, a precipitação de tempo de retorno de 2 anos e duração de 60 minutos (P_{60}^2) como a precipitação de tempo de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos (P_{60}^{10}), foram obtidas a partir do ajuste dos dados da estação automática (dados horários) da UFAL a distribuição de Gumbel, conforme descrito no item 3.2

A partir destas informações foram estimadas as chuvas intensas com períodos de retorno já definido nesta pesquisa e durações de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 720 e 1440 minutos. O ajuste da equação de chuvas intensas e os critérios estatísticos seguiu o que foi descrito na revisão bibliográfica sobre o assunto.

3.5 Aplicação da metodologia de Chen (1983)

A aplicação da Equação 2.11, apresentada por Chen (1983), requer o conhecimento de três precipitações: P_1^{10} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 10 anos), P_{24}^{10} (chuva com duração de 24 horas e tempo de retorno de 10 anos) e P_1^{100} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 100 anos). Estas precipitações foram obtidas da mesma maneira apresentada na seção anterior.

A estimação das intensidades máximas, ajuste da equação de chuvas intensas e os critérios estatísticos seguiu a metodologia anteriormente apresentada neste estudo.

3.6 Comparação entre as diferentes metodologias

Uma vez aplicadas as metodologias propostas neste trabalho, foi necessário avaliar se há ou não diferença significativa, para o nível de significância α , entre os valores de intensidades máximas históricas (dados pluviográficos) e os que serão obtidos mediante os métodos de desagregação da precipitação diária. Para isto, foram utilizadas as metodologias do teste “t” de *Student* com n-k graus de liberdade, sendo “n” o tamanho da amostra e “k” o número

de variáveis explicativas para os coeficientes linear e angular da reta da Equação 3.11, e a metodologia do Erro Relativo Médio Quadrático (RMS).

A partir do teste “t” de *Student*, foram testadas a hipótese de nulidade (H_0) para os coeficientes linear (β_0) e angular (β_1). Assim, se a estatística do teste “t”, para ambos os coeficientes, for inferior aos valores de “t” tabelado para um nível de probabilidade $(1-\alpha)$, sendo $\alpha = 5\%$, deixa-se de rejeitar H_0 e entende-se que não há evidência para correlação entre os valores de intensidades máximas históricas (dados da estação automática da UFAL) e os valores de intensidades máximas, obtidas mediante os modelos de desagregação.

Os coeficientes β_0 e β_1 do modelo linear são apresentados na Equação 3.11, sendo X os valores de intensidades máximas históricos nas diversas durações e períodos de retorno, e Y os valores obtidos mediante a metodologia de desagregação.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (3.11)$$

As hipóteses a serem testadas são:

$$H_0 : \beta_0 = 0 \quad H_0 : \beta_1 = 1$$

$$H_1 : \beta_0 \neq 1 \quad H_1 : \beta_1 \neq 1$$

A estatística do teste é:

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i}{\sigma(\hat{\beta}_i)} \quad (3.12)$$

A estimativa do Erro Relativo Médio (RMS) que fornece indicação do grau de precisão dos modelos de desagregação testados será realizada pela equação 3.13

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{I_s - I_h}{I_h} \right)^2}{n}} \quad (3.13)$$

na qual, I_s são os valores de intensidades máximas sintéticos (mm h^{-1}), ocorridos na duração escolhida “D” (min) e período de retorno “ T_r ”, anos; I_h são os valores de intensidades máximas históricos (mm h^{-1}), ocorridos na duração escolhida “D” (min) e período de retorno “ T_r ”, anos, e n é o número de durações utilizadas no estabelecimento das curvas IDF.

Além das metodologias do teste “t” e do Erro Relativo Médio Quadrático (RMS), aplicou-se a análise comparativa pelo coeficiente de determinação (R^2), razão dos desvios (RD), e o coeficiente de massa residual (CMR).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Séries com dados subsidiários

Foram utilizados os dados da estação automática da Universidade Federal de Alagoas. A estação automática coleta informações minuto a minuto, mas os dados são integralizados e disponibilizados a cada hora para serem transmitidos, via satélite, para a sede do INMET, Brasília.

Deste modo, a curva IDF obtida a partir desses da série de dados horários não se aplicará a durações inferiores a 1 hora. As durações propostas no presente trabalho utilizando esses dados foram de 60, 120, 180, 240, 360, 720 e 1440 minutos. As séries anuais máximas referidas a cada uma delas estão apresentadas na Tabela 4.1.

Considerando-se os valores mínimos adotados para chuvas intensas, exibidos na Tabela 3.2 do capítulo de Metodologia, as séries da Tabela 4.1 foram analisadas e os valores inferiores aos mínimos estabelecidos foram desconsiderados, resultando nas séries expostas na Tabela 4.2. As séries resultantes das chuvas intensas foram, então, transformadas em intensidades de precipitação e encontram-se na Tabela 4.3, juntamente com os parâmetros estatísticos.

Tabela 4.1 - Séries anuais de precipitação máxima em mm, para diferentes durações, observadas durante o período de 2003 a 2017

Ano	Duração (minutos)						
	60	120	180	240	360	720	1440
2003	17,20	28,20	35,80	36,00	49,80	51,80	81,00
2004	44,80	76,80	86,80	110,40	121,80	122,80	231,80
2005	23,40	33,00	36,00	35,40	36,60	39,00	56,80
2006	32,00	36,00	44,40	46,00	76,80	90,60	103,80
2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2008	9,80	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20	14,20
2009	74,40	114,80	125,20	114,80	125,80	125,80	132,80
2010	34,00	45,40	61,20	56,20	72,60	84,80	96,40
2011	48,40	56,40	86,00	67,60	124,00	141,00	141,00
2012	44,20	55,00	58,40	71,40	40,20	81,20	85,80
2013	16,80	17,00	21,60	17,20	22,00	31,00	32,60
2014	16,20	25,20	29,20	36,20	46,20	56,40	74,40
2015	20,20	26,60	36,80	37,20	42,40	59,40	69,80
2016	24,20	38,00	44,00	47,00	64,60	83,40	87,80
2017	14,60	17,20	20,20	18,20	20,20	23,80	23,80
Maior	74,40	114,80	125,20	114,80	125,80	141,00	231,80
Menor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Média	28,01	38,92	46,65	47,19	57,15	67,01	82,13
Desvio	18,78	28,51	32,60	32,94	40,40	42,27	58,08

Tabela 4.2 - Séries anuais de precipitação máxima em mm, para diferentes durações, em ordem decrescente, considerando os valores mínimos adotados como chuvas intensas

Ano	Duração (minutos)						
	60	120	180	240	360	720	1440
1	74,40	114,80	125,20	114,80	125,80	141,00	231,80
2	48,40	76,80	86,80	110,40	124,00	125,80	141,00
3	44,80	56,40	86,00	71,40	121,80	122,80	132,80
4	44,20	55,00	61,20	67,60	76,80	90,60	103,80
5	34,00	45,40	58,40	56,20	72,60	84,80	96,40
6	32,00	38,00	44,40	47,00	64,60	83,40	87,80
7	-	36,00	44,00	46,00	49,80	81,20	85,80
8	-	33,00	36,80	37,20	46,20	59,40	81,00
9	-	-	36,00	36,20	42,40	56,40	74,40
10	-	-	35,80	36,00	40,20	51,80	69,80
11	-	-	-	35,40	-	-	56,80
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-
Maior	74,40	114,80	125,20	114,80	125,80	141,00	231,80
Menor	32,00	33,00	35,80	35,40	40,20	51,80	56,80
Média	46,30	56,93	61,46	59,84	76,42	89,72	105,58
Desvio	15,21	27,39	29,49	28,94	34,97	30,97	48,95

Tabela 4.3 - Séries anuais de intensidade máxima de precipitação (mm/h) para diferentes durações, em ordem decrescente, considerando-se os mínimos adotados para chuvas intensas

Ano	Duração (minutos)						
	60	120	180	240	360	720	1440
1	74,40	57,40	41,73	28,70	20,97	11,75	9,66
2	48,40	38,40	28,93	27,60	20,67	10,48	5,88
3	44,80	28,20	28,67	17,85	20,30	10,23	5,53
4	44,20	27,50	20,40	16,90	12,80	7,55	4,33
5	34,00	22,70	19,47	14,05	12,10	7,07	4,02
6	32,00	19,00	14,80	11,75	10,77	6,95	3,66
7	-	18,00	14,67	11,50	8,30	6,77	3,58
8	-	16,50	12,27	9,30	7,70	4,95	3,38
9	-	-	12,00	9,05	7,07	4,70	3,10
10	-	-	11,93	9,00	6,70	4,32	2,91
11	-	-	-	8,85	-	-	2,37
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-
Maior	74,40	57,40	41,73	28,70	20,97	11,75	9,66
Menor	32,00	16,50	11,93	8,85	6,70	4,32	2,37
Média	46,30	28,46	20,49	14,96	12,74	7,48	4,40
Desvio	15,21	13,69	9,83	7,24	5,83	2,58	2,04

Como já mencionado, foi utilizada a Distribuição de Gumbel. De posse das equações de ajuste de distribuição, expostas na seção 3.2.2 do presente estudo, foram calculadas as intensidades máximas de precipitação para os respectivos períodos de retorno, de acordo com a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Intensidade de precipitação máxima em mm/h calculada pelo Método de Gumbel e a intensidade de precipitação observada entre os anos de 2003 e 2017

Duração (minutos)	Tempo de Retorno (anos)								Máxima Observada
	2	5	10	15	20	25	50	100	
60,0	43,8	57,2	66,1	71,2	74,7	77,4	85,7	94,0	74,4
120,0	26,2	38,3	46,3	50,8	54,0	56,4	63,9	71,4	57,4
180,0	18,9	27,6	33,3	36,5	38,8	40,6	46,0	51,3	41,7
240,0	13,8	20,2	24,4	26,8	28,5	29,7	33,7	37,6	28,7
360,0	11,8	16,9	20,3	22,3	23,6	24,6	27,8	31,0	21,0
720,0	7,1	9,3	10,8	11,7	12,3	12,7	14,2	15,6	11,8
1440,0	4,1	5,9	7,1	7,7	8,2	8,6	9,7	10,8	9,7

O Ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel foi avaliado pelo teste de aderência de Kolmogov-Smirnov, para o nível de significância de 5%. A metodologia desse teste foi apresentado no Anexo B. Este teste consiste em rejeitar a hipótese de adequação do ajuste, se a diferença máxima entre os valores observados e ajustados for superior ao valor crítico tabelado, conforme o nível de significância especificado. Os valores críticos para cada nível de significância foram apresentados na Tabela 1 do Anexo B. Os valores do teste de aderência de Kolmogov-Smirnov calculados para cada duração ($D_{n,max}$), bem como os valores críticos ($D_{n,critico}$), definido em função do tamanho da amostra (N) estão expostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valor Absoluto do teste de aderência Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) para o ajuste da Distribuição de Gumbel, para cada duração especificada

Duração (minutos)	$D_{n,max}$	N	$D_{n,critico}$ para nível de significância de 5%
60	0,209	6	0,519
120	0,188	8	0,454
180	0,193	10	0,409
240	0,175	11	0,391
360	0,175	10	0,409
720	0,161	10	0,409
1440	0,172	11	0,391

Percebe-se na Tabela 4.5 que os valores absolutos do teste de aderência de Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) são bem menores que os críticos tabelados ($D_{n,critico}$), considerando o nível de significância de 5%. Sendo assim através do teste de Kolmogov-Smirnov percebe-se que a distribuição de Gumbel apresentou um bom ajuste aos dados da estação automática da UFAL, considerando um ajuste com nível de significância de 5% para todas as durações. No APÊNDICE A são apresentados os gráficos do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel aos dados observados para diferentes durações.

Os coeficientes de correlação resultantes dos ajustes da distribuição Gumbel, referentes às chuvas Intensas para cada duração a partir de 60 minutos, são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Coeficientes de Determinação R^2 resultantes do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel

Duração (minutos)	60	120	180	240	360	720	1440
Coeficiente de Determinação (R^2)	0,93	0,95	0,93	0,93	0,95	0,95	0,94

Uma vez que o ajuste da Distribuição de Probabilidade de Gumbel aos dados observados foi avaliado pelo teste de aderência de Kolmogov-Smirnov, buscou-se determinar a relação intensidade-duração-frequência para a série disponível de dados de chuva selecionada, expressa pela Equação Geral de Chuvas Intensas (Equação 3.2).

$$i = \frac{kT^m}{(t + b)^n}$$

Na primeira etapa buscou-se traçar as curvas intensidade-duração-frequência (Figura 4.1), a partir dos valores do método de Gumbel, Tabela 4.4.

O parâmetro b foi definido como aquele que proporcionou o maior coeficiente de determinação (R^2) da correlação linear entre o logaritmo da série de intensidade máxima ($\log i$) e o logaritmo do intervalo de duração acrescido do parâmetro em questão ($\log (t+b)$) para os períodos de retorno arbitrados. Posteriormente, seguiu-se o mesmo procedimento para os demais períodos de retorno considerados (2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 anos), buscando conferir se o parâmetro b anterior poderia ser mantido para os outros tempos de retorno. Para essa verificação, analisou-se o comportamento dos coeficientes de determinação. Assim definiu-se um valor de b que representou todos os períodos de retorno, uma vez que não foram observados mudanças significativas nos coeficientes de determinação e nos valores do coeficiente angular (n) e linear da reta de regressão determinados. A

Figura 4.2 apresenta as retas resultantes da linearização.

Figura 4.1 - Curvas intensidade x duração x frequência a partir dos valores calculados pelo Método de Gumbel

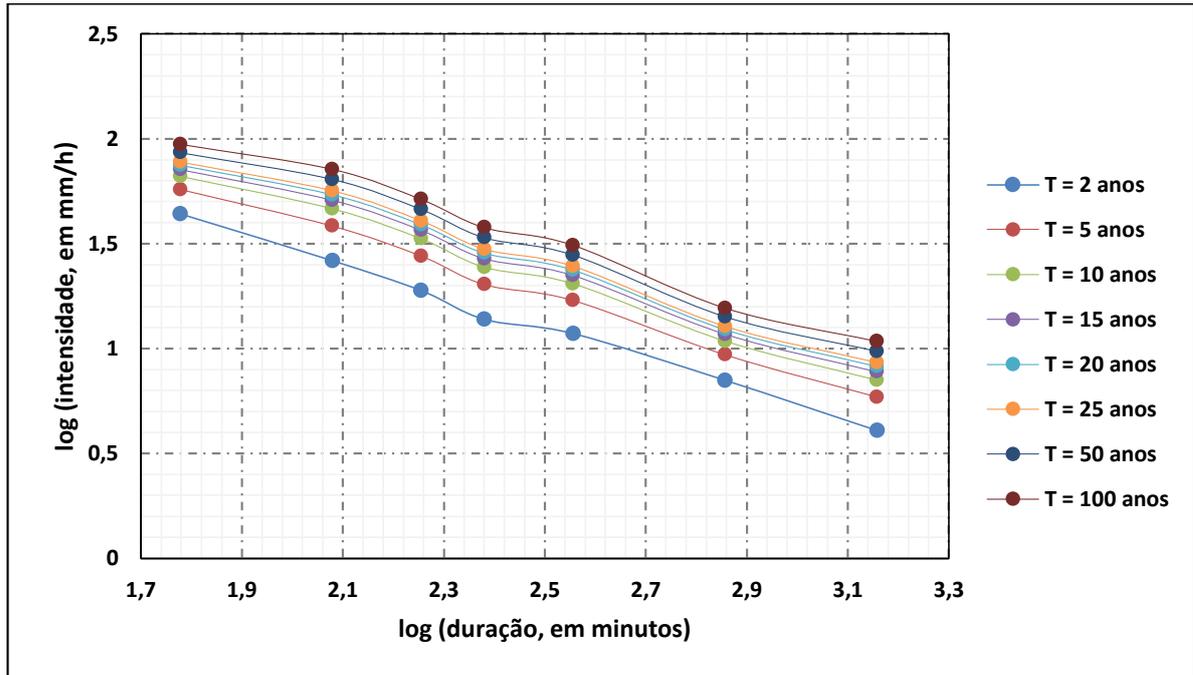
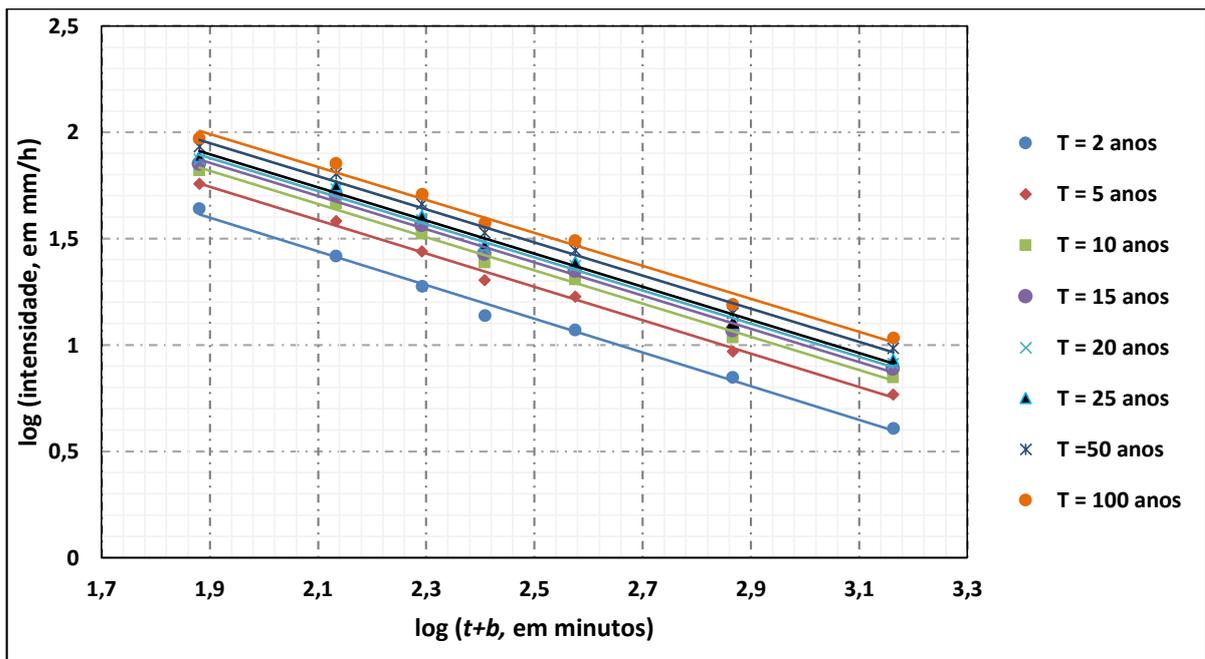


Figura 4.2 - Retas de regressão resultantes do processo de anamorfose das curvas intensidade x duração x frequência



A Tabela 4.7 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) das retas de regressão linear da Equação 3.4 com os valores de F calculados para nível de significância $\alpha = 5\%$ para cada período de retorno. Percebe-se na Tabela 4.7 que os valores de F calculados para os períodos de retorno foram maiores que o F tabela (6,6079), assim a hipótese nulidade (H_0)

foi rejeitada. O valor P da mesma tabela confirma isto. Logo conclui-se há uma correlação linear significativa entre logaritmo do intervalo de duração acrescido do parâmetro b ($\log(t+b)$) e o logaritmo da série de intensidade máxima ($\log i$), ou seja, $\log(t+b)$ é importante para explicar a variabilidade em $\log(i)$. Seguiu-se para determinação do parâmetro n da Equação 3.2.

O parâmetro n foi determinado adotando-se valor médio entre os coeficientes angulares de cada uma das regressões determinadas para cada um dos tempos de retorno utilizados. Para determinar os parâmetros k e m , foi gerado um gráfico (Figura 4.3) cuja abcissa foi definida pelos valores resultantes do logaritmo dos períodos de retorno e cuja ordenada recebeu os valores de $\log a$ gerados como coeficientes lineares das retas de regressão da Figura 4.2.

Com o traçado de uma reta de regressão linear pelos pontos traçados (Figura 4.3), adquiriu-se uma equação cujo o coeficiente linear corresponde ao logaritmo do parâmetro k e o coeficiente angular corresponde ao parâmetro m .

Tabela 4.7 - Tabela ANOVA para cada período de retorno

Período de Retorno	ESTATÍSTICAS					
	Fonte da variação	gl	SQ	MQ	F	Valor P
2	Regressão	1	0,714616	0,714616	775,63	0,0000011
	Resíduo	5	0,004607	0,000921		
	Total	6	0,719223			
5	Regressão	1	0,702898	0,702898	1228,65	0,0000004
	Resíduo	5	0,00286	0,000572		
	Total	6	0,705759			
10	Regressão	1	0,697886	0,697886	942,22	0,0000007
	Resíduo	5	0,003703	0,000741		
	Total	6	0,701589			
15	Regressão	1	0,695638	0,695638	798,71	0,0000010
	Resíduo	5	0,004355	0,000871		
	Total	6	0,699993			
20	Regressão	1	0,694252	0,694252	717,76	0,0000014
	Resíduo	5	0,004836	0,000967		
	Total	6	0,699088			
25	Fonte da variação	gl	SQ	MQ	F	Valor P

Período de Retorno	ESTATÍSTICAS					
		Regressão	1	0,693275	0,693275	665,12
	Resíduo	5	0,005212	0,001042		
	Total	6	0,698487			
50	Fonte da variação	gl	SQ	MQ	F	Valor P
	Regressão	1	0,690668	0,690668	543,50	0,0000027
	Resíduo	5	0,006354	0,001271		
	Total	6	0,697022			
100	Fonte da variação	gl	SQ	MQ	F	Valor P
	Regressão	1	0,688556	0,688556	463,68	0,0000040
	Resíduo	5	0,007425	0,001485		
	Total	6	0,695981			

SQ: soma dos quadrados dos desvios da regressão e dos resíduos; MQ: média dos quadrados dos desvios; gl: grau de liberdade; $F_{\text{tab}}=6,6079$

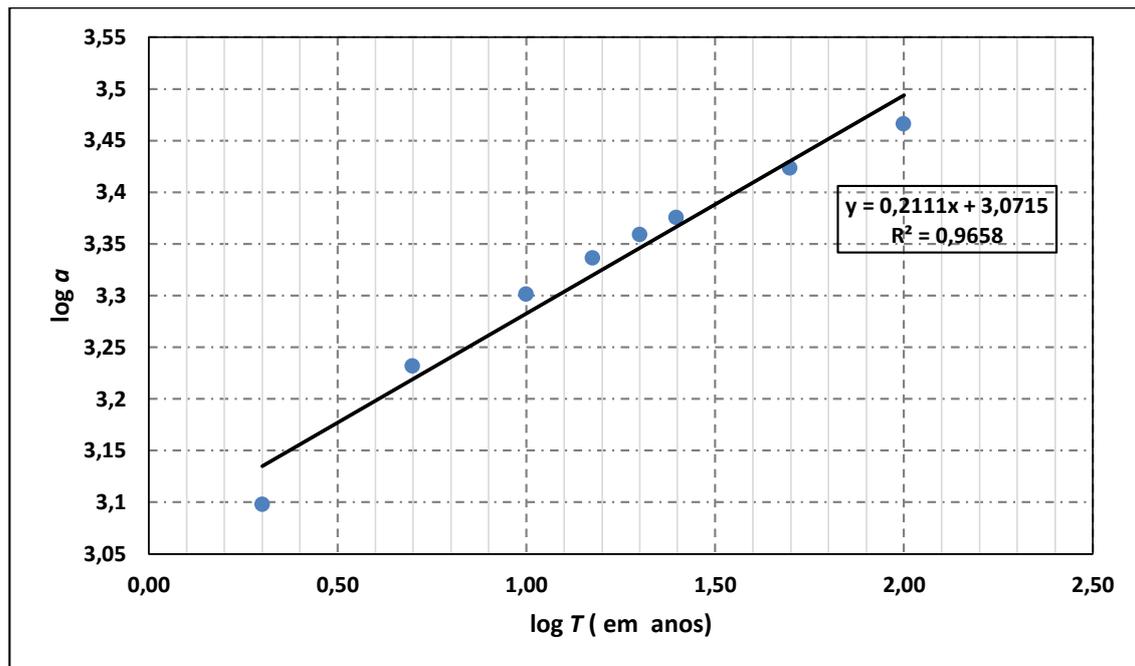
A Tabela 4.8 apresenta a análise de variância (ANOVA) para reta de regressão que dá origem aos parâmetros K e m (Figura 4.3). Observa-se na Tabela 4.8 que o valor do F calculado é extremamente maior que o valor de F tabelado, como mostrado pelo valor P . Com isso, rejeita-se a hipótese nula (H_0), entendendo-se que uma há correlação linear significativa entre valores resultantes do logaritmo dos períodos de retorno e os valores de $\log a$ gerados como coeficientes lineares das retas de regressão da Figura 4.2.

Tabela 4.8 - Tabela ANOVA para regressão linear que dá origem os parâmetros k e m

Fonte da variação	gl	SQ	MQ	F	Valor P
Regressão	1	0,09082	0,09082	169,23	0,000013
Resíduo	6	0,00322	0,00054		
Total	7	0,09404			

SQ: soma dos quadrados dos desvios da regressão e do resíduos; MQ: média dos quadrados dos desvios; gl: grau de liberdade; $F_{\text{tab}}=5,9874$

Figura 4.3 - Regressão linear que dar origem aos parâmetros K e m



Os parâmetros k , m , b e n determinados para Equação de Chuvas Intensas com os dados horários da estação automática da UFAL estão apresentados na Tabela 4.9. Assim, a Nova Equação de Chuvas intensas do posto da UFAL ficou com a seguinte forma da equação 4.1.

Tabela 4.9 - Parâmetros determinado para Nova Equação de Chuvas Intensas do posto da UFAL

k	1178,96
m	0,2111
b	16
n	0,78044

$$\hat{i} = \frac{1178,96T^{0,2111}}{(t+16)^{0,78044}}, \quad \text{para } t \geq 60 \text{ minutos} \quad (4.1)$$

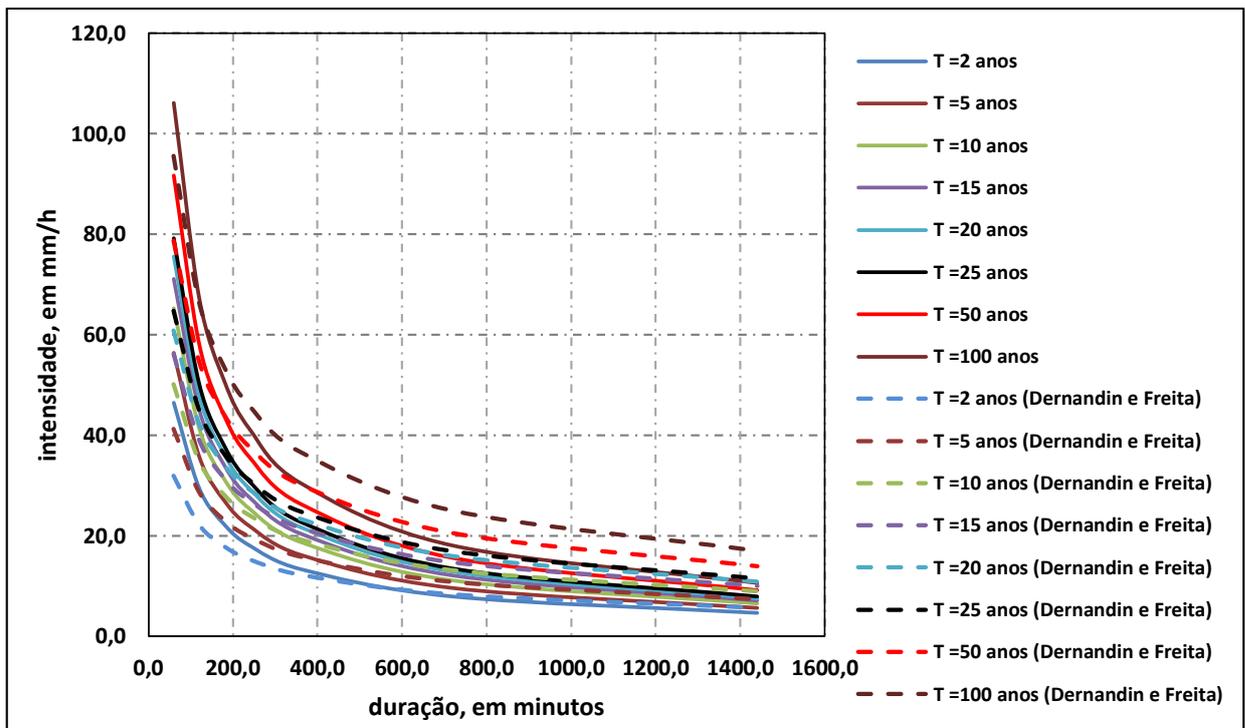
As intensidades de precipitação máxima, para cada duração e período de retorno considerados, obtidas através desta equação estão apresentadas na Tabela 4.10, como também os parâmetros estatísticos utilizados para comparar os valores da intensidade calculada pela distribuição de Gumbel aos determinados pela Nova Equação.

Tabela 4.10 - Intensidade de precipitação máxima (mm/h) pela nova equação de chuvas intensas

Duração (minutos)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
60,0	46,5	56,4	65,3	71,1	75,6	79,2	91,7	106,1
120,0	29,5	35,8	41,4	45,2	48,0	50,3	58,2	67,4
180,0	22,2	26,9	31,2	33,9	36,1	37,8	43,8	50,7
240,0	18,0	21,9	25,3	27,6	29,3	30,7	35,5	41,1
360,0	13,3	16,2	18,7	20,4	21,7	22,7	26,3	30,5
720,0	7,9	9,6	11,1	12,1	12,8	13,5	15,6	18,0
1440,0	4,6	5,6	6,5	7,1	7,5	7,9	9,2	10,6
Parâmetros Estatísticos de Ajuste:			$R^2 = 0,983$		$RD = 1,024$		$CMD = -0,00554$	

A Figura 4.4 apresenta um gráfico comparativo entre a Nova Equação e a equação de Denardin e Freitas (1982) para a cidade de Maceió para duração acima de 60 minutos.

Figura 4.4 - Comparação entre a nova equação e a de Denardin e Freitas (1982) para duração acima de 60 minutos



4.2 Séries com dados diários

Foram utilizados os dados da estação pluviométrica da Universidade Federal de Alagoas. O período da série foi entre 1993 a 2017 (24 anos de dados diários). A Tabela 4.11 mostra a série de precipitação máxima diária anual referente a cada ano do período.

Tabela 4.11 - Precipitação máxima diária anual de cada ano

Ano	Precipitação máxima diária Anual
1993	91,7
1994	104,8
1995	72,2
1996	64,6
1997	71,8
1998	75,0
1999	93,8
2000	141,5
2001	75,1
2002	77,7
2003	64,2
2004	180,7
2005	56,4
2006	139,6
2008	17,90
2009	155,2
2010	187,8
2011	135,0
2012	110,5
2013	145,2
2014	83,2
2015	59,2
2016	173,0
2017	173,0
Média	106,21
Desvio	46,73

A análise estatística aplicada nesta etapa foi a Distribuição de Probabilidade de Gumbel, através da qual foi calculado, para cada período de retorno, uma precipitação máxima diária. O resultado está apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Precipitação máxima diária anual (mm) em função do tempo de retorno

Período de Retorno	Precipitação máxima diária
2	99,27
5	140,57
10	167,92
15	183,34
20	194,14
25	202,46
50	228,10
100	253,54

O teste de aderência de Kolmogov-Smirnov, para o nível de significância de 5% foi aplicado. Os valores do teste de aderência de Kolmogov-Smirnov calculados para cada duração ($D_{n,max}$), bem como os valores críticos ($D_{n,crítico}$), definido em função do tamanho da amostra (n) estão expostos na Tabela 4.13.

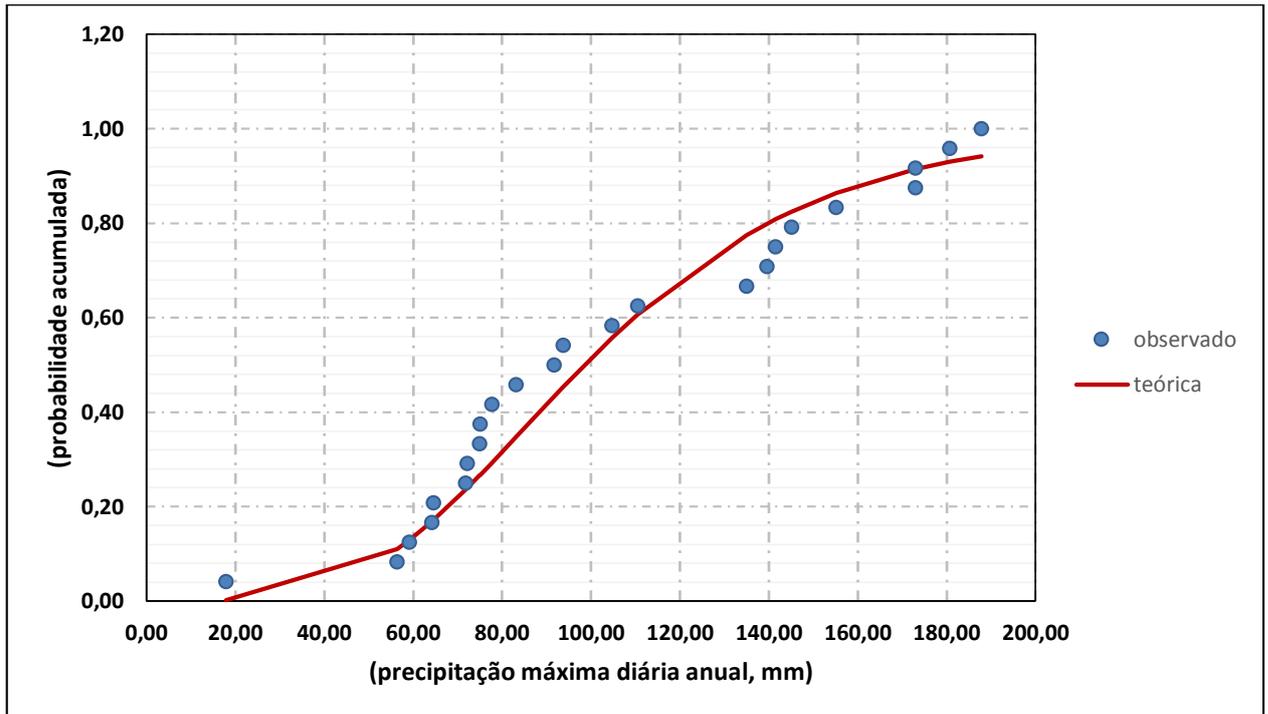
Tabela 4.13 - Valor Absoluto do teste de aderência Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) para o ajuste da Distribuição de Gumbel.

$D_{n,max}$	N	$D_{n,crítico}$ para nível de significância de 5%
0,124	24	0,269

Analisando os valores absolutos da aplicação do teste de Kolmogov-Smirnov na (primeira coluna da Tabela 4.13) aos valores críticos (terceira coluna da Tabela 4.13) para o nível de significância, constatou-se que a distribuição de probabilidade de Gumbel pode ser empregada para ajustar os dados do posto pluviométrico da UFAL, considerando um ajuste com nível de significância de 5%.

A Figura 4.5 apresenta o gráfico do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel aos dados observados.

Figura 4.5 - Ajuste da distribuição de Gumbel aos dados observados



O coeficiente de correlação resultante do ajuste da distribuição de Gumbel apresentou o coeficiente de determinação $R^2 = 0,97$.

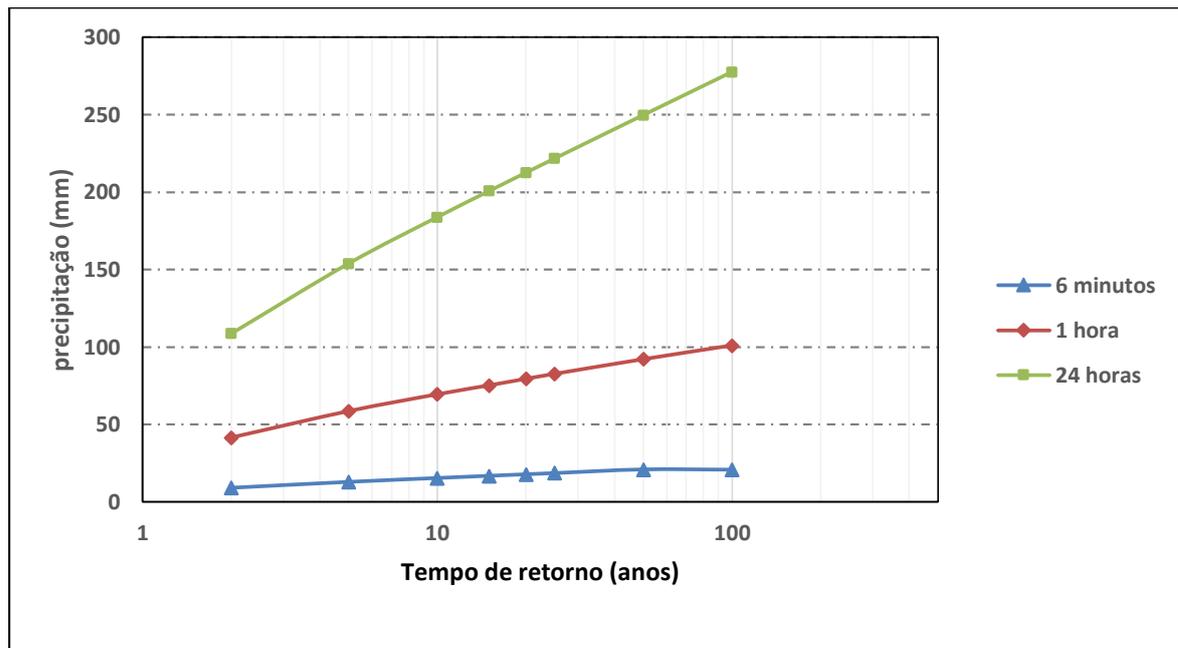
4.2.1 Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo Método da Isozonas

Após selecionar, para cada ano, o valor da precipitação máxima diária formando a série de máximas anuais, ajustada pela distribuição de probabilidade de Gumbel, estabelecendo, assim, para cada tempo de retorno uma precipitação diária máxima anual, transformou-se a chuva de 1 dia na chuva de 24 horas através da Equação 2.13.

Identificou-se que o posto pluviométrico utilizado no trabalho se localiza na Isozona B (Figura 2.2). No passo seguinte, calculou-se através das Equações 3.10 e 3.11 as precipitações de 1 hora e 6 minutos e se traçaram os valores no papel probabilidade.

A Figura 4.6 mostra as retas de probabilidades obtidas para as durações de 6 min, 1h e 24 h após o ajuste de Gumbel e devidas transformações. Através das mesmas obtiveram-se as precipitações para durações intermediárias, traçando-se uma reta vertical para as durações de interesse e interpolando os valores de precipitação.

Figura 4.6 - Ajuste das retas de probabilidades



A Tabela 4.14 exibe os valores da precipitação calculada método as Isozonas para o posto pluviométrico da UFAL, enquanto a Tabela 4.15 apresenta as intensidades de precipitação por este método.

Tabela 4.14 - Valores de precipitação, em mm, calculado pelo método da Isozonas

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)						
	5	10	15	20	25	50	100
6	12,9	15,4	16,9	17,9	18,6	21,0	20,8
10	16,3	19,4	21,2	22,4	23,4	26,3	26,8
15	20,5	24,5	26,6	28,1	29,3	32,8	34,2
20	24,8	29,5	32,0	33,8	35,2	39,4	41,6
30	33,2	39,5	42,8	45,3	47,1	52,6	56,5
60	58,6	69,5	75,3	79,5	82,7	92,2	101,1
120	62,8	74,5	80,7	85,3	88,7	99,0	108,7
180	66,9	79,4	86,2	91,1	94,8	105,9	116,4
240	71,1	84,4	91,7	96,9	100,8	112,7	124,1
360	79,4	94,4	102,6	108,4	112,9	126,4	139,4
720	104,2	124,2	135,3	143,2	149,2	167,5	185,5
1440	153,9	183,9	200,8	212,6	221,7	249,8	277,6

Tabela 4.15 - Relação das intensidades máxima da precipitação, em mm/h, método das Isozonas

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)						
	5	10	15	20	25	50	100
6	129,3	154,4	168,6	178,6	186,2	209,8	208,2
10	97,9	116,7	127,1	134,5	140,2	157,5	160,6
15	82,2	97,8	106,4	112,5	117,2	131,4	136,8
30	74,3	88,4	96,0	101,5	105,7	118,3	124,9
50	66,5	78,9	85,7	90,5	94,2	105,2	113,0
60	58,6	69,5	75,3	79,5	82,7	92,2	101,1
360	31,4	37,2	40,4	42,6	44,4	49,5	54,4
480	22,3	26,5	28,7	30,4	31,6	35,3	38,8
600	17,8	21,1	22,9	24,2	25,2	28,2	31,0
720	13,2	15,7	17,1	18,1	18,8	21,1	23,2
720	8,7	10,3	11,3	11,9	12,4	14,0	15,5
1440	6,4	7,7	8,4	8,9	9,2	10,4	11,6

4.2.2 Determinação da relação intensidade-duração-frequência pelo Método das Relações das Durações (CETESB, 1979)

Uma vez que foi verificada a aderência da distribuição de probabilidade e estimadas as precipitações máximas diárias para os períodos de retorno previamente estabelecidos, como resultado nesta seção, procede-se na desagregação dessas chuvas diárias utilizando-se as relações constantes de desagregação descritas no método das relações das durações (Tabela 2.3), gerando precipitações de durações de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 720 e 1440 minutos.

Na

Tabela **4.16**, encontram-se os valores de precipitação máxima (mm), como também na Tabela **4.17**, os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos pelo Método das Relações (CETESB, 1979).

Tabela 4.16 - Precipitação máxima (mm) pelo método das relações de durações

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	16,2	22,9	27,3	29,8	31,6	33,0	37,1	41,3
10	25,7	36,3	43,4	47,4	50,2	52,3	59,0	65,6
15	33,3	47,1	56,3	61,4	65,1	67,9	76,4	85,0
20	38,5	54,5	65,1	71,1	75,3	78,5	88,5	98,3
30	35,2	49,8	59,5	65,0	68,8	71,7	80,8	89,8
60	47,5	67,3	80,4	87,8	93,0	96,9	109,2	121,4
120	54,3	76,9	91,9	100,3	106,2	110,8	124,8	138,7

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
180	61,1	86,5	103,4	112,9	119,5	124,6	140,4	156,1
240	67,9	96,2	114,9	125,4	132,8	138,5	156,0	173,4
360	81,5	115,4	137,8	150,5	159,4	166,2	187,2	208,1
720	96,2	136,2	162,7	177,7	188,1	196,2	221,0	245,7
1440	113,2	160,3	191,4	209,0	221,3	230,8	260,0	289,0

Tabela 4.17 - Relação das intensidades máximas de precipitação, em mm/h, calculada pelo método das relações de durações

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	193,9	274,6	328,0	358,2	379,3	395,5	445,6	495,3
10	154,0	218,1	260,5	284,4	301,2	314,1	353,8	393,3
15	133,1	188,5	225,1	245,8	260,3	271,4	305,8	339,9
20	115,5	163,6	195,4	213,3	225,9	235,6	265,4	295,0
30	70,3	99,6	119,0	129,9	137,6	143,5	161,6	179,7
60	47,5	67,3	80,4	87,8	93,0	96,9	109,2	121,4
120	27,2	38,5	45,9	50,2	53,1	55,4	62,4	69,4
180	20,4	28,8	34,5	37,6	39,8	41,5	46,8	52,0
240	17,0	24,0	28,7	31,4	33,2	34,6	39,0	43,4
360	13,6	19,2	23,0	25,1	26,6	27,7	31,2	34,7
720	8,0	11,4	13,6	14,8	15,7	16,3	18,4	20,5
1440	4,7	6,7	8,0	8,7	9,2	9,6	10,8	12,0

4.2.3 Determinação da relação intensidade-duração-frequência Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (DAMÉ, 2001)

Os dados do pluviômetro de balsa do Feitosa foram separados por mês e depois desagregados em intervalos subsidiários através de uma implementação do Matlab. Em seguida foram calculadas as estatísticas mensais (média, variância, probabilidade de ocorrência de períodos secos e coeficiente de autocorrelação com retardo 1). Na Tabela 4.18 estão apresentados os valores das estatísticas mensais.

Tabela 4.18 - Estatísticas históricas das alturas de chuva (mm) do pluviômetro de balsa do Feitosa para todos os meses do ano desagregado em intervalos desde 15 minutos a 24 horas.

Mês	Estatística	Duração								
		15min	30 min	1h	2h	3h	4h	6h	12h	24h
Jan	Média	0,017	0,033	0,067	0,133	0,200	0,266	0,398	0,793	1,566
	Variância	0,042	0,125	0,348	0,769	1,931	1,902	4,027	9,054	24,780
	Cac_1	0,487	0,511	0,407	0,431	0,097	0,336	0,098	0,227	0,057
	PD	0,767	0,764	0,760	0,753	0,747	0,741	0,730	0,681	0,632

Mês	Estatística	Duração								
		15min	30 min	1h	2h	3h	4h	6h	12h	24h
Fev	Média	0,030	0,059	0,118	0,236	0,354	0,471	0,705	1,419	2,772
	Variância	0,086	0,273	1,012	2,954	5,784	9,471	19,476	69,705	154,377
	Cac_1	0,522	0,789	0,653	0,690	0,669	0,622	0,519	0,107	0,132
	PD	0,788	0,787	0,783	0,775	0,768	0,764	0,743	0,700	0,644
Mar	Média	0,018	0,037	0,074	0,147	0,220	0,293	0,439	0,871	1,733
	Variância	0,024	0,071	0,233	0,667	1,216	1,732	3,630	8,739	19,649
	Cac_1	0,585	0,535	0,370	0,363	0,325	0,346	0,172	0,068	0,013
	PD	0,817	0,815	0,812	0,800	0,793	0,784	0,760	0,720	0,600
Abr	Média	0,033	0,066	0,132	0,264	0,395	0,643	0,789	1,569	3,099
	Variância	0,046	0,128	0,366	1,106	2,098	3,786	6,595	15,994	37,895
	Cac_1	0,475	0,481	0,497	0,423	0,372	0,330	0,189	0,248	0,348
	PD	0,698	0,695	0,689	0,681	0,668	0,602	0,644	0,621	0,480
Mai	Média	0,110	0,219	0,438	0,876	1,313	1,751	2,617	5,203	10,283
	Variância	0,357	1,079	3,122	9,895	19,347	33,023	58,000	174,718	447,906
	Cac_1	0,518	0,492	0,571	0,585	0,563	0,447	0,477	0,357	0,392
	PD	0,504	0,500	0,494	0,485	0,476	0,464	0,451	0,406	0,291
Jun	Média	0,088	0,175	0,350	0,700	1,048	1,396	2,090	4,154	8,274
	Variância	0,162	0,494	1,538	4,686	8,295	12,963	23,866	68,278	165,431
	Cac_1	0,515	0,516	0,480	0,397	0,422	0,384	0,363	0,282	0,336
	PD	0,426	0,422	0,414	0,398	0,385	0,375	0,354	0,309	0,189
Jul	Média	0,079	0,157	0,315	0,629	0,942	1,253	1,876	3,722	7,328
	Variância	0,133	0,401	1,280	4,031	7,185	11,464	21,878	53,569	148,277
	Cac_1	0,564	0,564	0,488	0,410	0,451	0,376	0,306	0,259	0,113
	PD	0,402	0,399	0,391	0,379	0,365	0,351	0,332	0,274	0,188
Ago	Média	0,045	0,089	0,179	0,357	0,535	0,713	1,066	2,114	4,163
	Variância	0,063	0,184	0,530	1,511	2,933	4,625	8,231	25,200	70,226
	Cac_1	0,427	0,420	0,449	0,512	0,472	0,493	0,526	0,383	0,328
	PD	0,625	0,622	0,616	0,608	0,599	0,589	0,572	0,532	0,453
Set	Média	0,020	0,044	0,087	0,174	0,261	0,348	0,520	1,032	2,047
	Variância	0,042	0,087	0,245	0,640	1,221	1,615	3,005	7,569	17,987
	Cac_1	0,298	0,379	0,389	0,405	0,329	0,383	0,307	0,292	0,196
	PD	0,731	0,626	0,623	0,617	0,609	0,605	0,593	0,578	0,520
Out	Média	0,022	0,044	0,088	0,175	0,262	0,349	0,522	1,035	2,070
	Variância	0,059	0,179	0,454	1,211	1,847	3,399	5,485	15,551	50,575
	Cac_1	0,442	0,358	0,345	0,330	0,487	0,231	0,372	0,538	0,452
	PD	0,769	0,767	0,763	0,756	0,753	0,747	0,732	0,706	0,627
Nov	Média	0,005	0,009	0,018	0,037	0,055	0,073	0,109	0,216	0,430
	Variância	0,004	0,011	0,026	0,075	0,124	0,169	0,279	0,605	1,275
	Cac_1	0,579	0,362	0,295	0,107	0,086	0,086	0,049	0,012	0,022
	PD	0,877	0,875	0,872	0,866	0,856	0,855	0,837	0,814	0,707
Dez	Média	0,012	0,024	0,048	0,095	0,143	0,190	0,284	0,564	1,112
	Variância	0,014	0,040	0,110	0,337	0,640	1,043	1,924	6,957	15,713
	Cac_1	0,455	0,440	0,507	0,508	0,514	0,490	0,423	0,083	0,125
	PD	0,857	0,856	0,853	0,845	0,839	0,832	0,821	0,787	0,695

Cac_1 → coeficiente de autocorrelação de retardo 1

PD → probabilidade de ocorrência de períodos secos

Nas Tabela 4.19 e Tabela 4.20, encontram-se os valores das estatísticas das séries de precipitação em intervalos desde 15 minutos a 24 horas para as séries históricas desagregadas do pluviômetro de báscula (1) e obtidos pelas equações do modelo de Bartlett-Lewis

Modificado (BLPRM) (2) para os cinco conjuntos de combinações (A, B, C, D e E) quando aplicado o programa SOLVER da planilha eletrônica do EXCEL para minimizar a função objetivo para os 12 (doze) meses do ano.

Deste maneira foram determinados os 6 (seis) parâmetros do modelo de pulsos retangulares de Bartlett-Lewis modificado (BLPRM) para os 5 (cinco) conjuntos de estatísticas (A, B, C, D e E) quando a função objetivo $((f^{(m)}/f^{(o)}) - 1)^2$ teve seu valor minimizado. Os resultados estão no APÊNCIDE B, e na Figura 4.7 é apresentado o comportamento dos seis parâmetros do modelo para cada mês do ano, bem como para cada um dos cinco conjuntos de estatísticas estabelecidos para o ajuste.

Quanto à variabilidade dos seis parâmetros, pôde-se perceber que λ foi o parâmetro mais estável, quando estimado através das combinações A, B, C, D, E. Esse resultado foi coerente com os encontrados por Rodriguez-Iturbe et al. (1987 b) e Khaliq e Cunnane (1996).

Entretanto, percebe-se na Figura 4.7 que não há nenhum consenso em relação à combinação estatística que deve ser usada na estimação dos parâmetros, uma vez que nem as combinações que usam seis estatísticas (A, B, C e D) e nem a que usa dezenove (E), foram coerentes em termos de maior e menor variação.

O desempenho do modelo pode ser avaliado comparando os momentos do modelo com as características dos valores históricos. Analisando nas Tabela 4.19 e Tabela 4.20 as estatísticas dos valores históricos observados do pluviômetro de báscula e obtidos pelas equações do modelo de Bartlett-Lewis Modificado (BLPRM), percebe-se que para os meses de janeiro, fevereiro, março e novembro, a combinação C foi a que apresentou os valores das estatísticas muito próximos quando comparado o simulado pelas equações do modelo e os obtidos dos valores históricos.

Nos meses de maio, junho, julho, agosto e dezembro, a combinação A foi a que apresentou os melhores resultados na comparação dos valores das estatísticas simulados pelas equações do modelo e os obtidos dos dados históricos. Para os meses de setembro e outubro, a combinação D foi a melhor.

Assim, buscou-se eleger a melhor combinação entre os cinco conjuntos que representasse cada mês utilizando o menor valor da função objetivo. A Tabela 4.21 apresenta os valores da função objetivo para os cinco conjuntos de dados.

Tabela 4.19 - Valores históricos observados do pluviômetro de báscula (1) e obtidos pelas equações do modelo de Bartlett-Lewis Modificado (BLPRM) (2) para as cinco combinações (A, B, C, D e E) quando aplicado o programa SOLVER da planilha eletrônica do EXCEL para minimizar a funo objetivo para os meses de janeiro a junho.

Comb.	Estatística	Janeiro		Fevereiro		Maro		Abril		Maio		Junho	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
A	Média (mm)	0,017	0,016	0,030	0,030	0,018	0,018	0,033	0,034	0,110	0,113	0,088	0,094
	Variância	0,042	0,044	0,086	0,087	0,024	0,025	0,046	0,045	0,357	0,347	0,162	0,148
	Cac_1	0,487	0,531	0,522	0,566	0,585	0,629	0,475	0,442	0,518	0,512	0,515	0,498
	PD	0,767	0,884	0,788	0,813	0,817	0,899	0,698	0,702	0,504	0,509	0,426	0,432
	Variância	24,78	24,179	154,377	149,490	19,649	19,348	37,895	37,905	447,906	451,896	165,431	167,919
	PD	0,632	0,585	0,644	0,643	0,600	0,564	0,480	0,475	0,291	0,293	0,189	0,188
B	Mdia (mm)	0,017	0,054	0,030	0,048	0,018	0,028	0,033	0,075	0,110	0,218	0,088	0,200
	Variância	0,042	0,051	0,086	0,100	0,024	0,028	0,046	0,053	0,357	0,404	0,162	0,187
	Cac_1	0,487	0,550	0,522	0,594	0,585	0,685	0,475	0,520	0,518	0,557	0,515	0,561
	PD	0,767	0,768	0,743	0,708	0,760	0,698	0,644	0,644	0,451	0,451	0,354	0,354
	Variância	24,78	10,148	154,377	41,902	19,649	12,963	37,895	10,394	447,906	81,578	165,431	37,908
	Cac_1	0,057	0,003	0,132	0,001	0,013	0,001	0,348	0,003	0,392	0,003	0,336	0,003
C	PD	0,632	0,631	0,644	0,664	0,600	0,633	0,480	0,480	0,291	0,291	0,189	0,189
	Mdia (mm)	0,017	0,017	0,030	0,030	0,018	0,018	0,033	0,033	0,110	0,058	0,088	0,043
	Variância	0,042	0,043	0,086	0,089	0,024	0,024	0,046	0,046	0,357	0,396	0,162	0,181
	Cac_1	0,487	0,489	0,522	0,527	0,585	0,585	0,475	0,475	0,518	0,541	0,515	0,538
	PD	0,767	0,763	0,788	0,781	0,817	0,817	0,698	0,698	0,504	0,569	0,426	0,471
	Variância	0,125	0,123	0,273	0,264	0,071	0,071	0,128	0,128	1,079	1,083	0,494	0,494
D	PD	0,632	0,635	0,644	0,650	0,600	0,600	0,480	0,480	0,291	0,240	0,189	0,163
	Mdia (mm)	0,017	0,045	0,030	0,030	0,018	0,017	0,033	0,028	0,110	0,095	0,088	0,084
	Variância	0,125	1,052	0,273	0,316	0,071	0,073	0,128	0,159	1,079	1,346	0,494	0,592
	Cac_1	0,227	0,238	0,107	0,110	0,068	0,073	0,248	0,272	0,357	0,401	0,282	0,316
	PD	0,767	0,789	0,788	0,788	0,817	0,987	0,698	0,768	0,504	0,543	0,426	0,436
	Variância	24,78	148,566	154,377	36,998	19,649	16,326	37,895	23,511	447,906	231,659	165,431	106,040
E	PD	0,632	0,612	0,644	0,644	0,600	0,590	0,480	0,417	0,291	0,265	0,189	0,182
	Mdia (mm)	0,017	0,002	0,030	0,028	0,037	0,031	0,033	0,020	0,110	0,063	0,088	0,080
	Variância	0,042	0,000	0,086	0,121	0,071	0,048	0,046	0,058	0,357	0,465	0,162	0,228
	Cac_1	0,487	0,001	0,522	0,758	0,535	0,784	0,475	0,682	0,518	0,733	0,515	0,767
	PD	0,767	0,968	0,788	0,802	0,815	0,806	0,698	0,753	0,504	0,538	0,426	0,436
	Variância	0,125	0,001	0,273	0,304	0,071	0,102	0,128	0,164	1,079	1,327	0,494	0,584
	Cac_1	0,511	0,001	0,789	0,301	0,535	0,371	0,481	0,242	0,492	0,257	0,516	0,300
	PD	0,764	0,965	0,787	0,799	0,815	0,803	0,695	0,748	0,500	0,534	0,422	0,432
	Variância	0,348	0,002	1,012	0,718	0,233	0,223	0,366	0,399	3,122	3,263	1,538	1,382
	Cac_1	0,407	0,000	0,653	0,127	0,370	0,169	0,497	0,099	0,571	0,105	0,480	0,127
	PD	0,760	0,958	0,783	0,795	0,812	0,797	0,689	0,738	0,494	0,526	0,414	0,424
	Variância	4,027	0,009	19,476	5,524	3,630	2,406	6,595	2,790	58,000	23,001	23,866	10,584
	Cac_1	0,098	0,000	0,519	0,017	0,172	0,016	0,189	0,014	0,477	0,015	0,363	0,017
	PD	0,730	0,893	0,743	0,747	0,760	0,740	0,644	0,645	0,451	0,448	0,354	0,354
	Variância	9,054	0,019	69,705	11,683	8,739	7,040	15,994	5,659	174,718	46,689	68,278	22,300
	Cac_1	0,227	0,000	0,107	0,008	0,068	0,005	0,248	0,007	0,357	0,007	0,282	0,008
PD	0,681	0,821	0,700	0,694	0,720	0,678	0,621	0,549	0,406	0,369	0,309	0,285	
Variância	24,78	0,038	154,377	24,376	19,649	21,223	37,895	11,397	447,906	94,066	165,431	46,350	
Cac_1	0,057	0,000	0,132	0,004	0,013	0,002	0,348	0,003	0,392	0,004	0,336	0,004	
PD	0,632	0,694	0,644	0,599	0,600	0,568	0,480	0,398	0,291	0,251	0,189	0,185	

Cac_1 → coeficiente de autocorrelação de retardol

PD → probabilidade de ocorrência de períodos secos

Tabela 4.20 - Valores históricos observados do pluviômetro de báscula (1) e obtidos pelas equações do modelo de Bartlett-Lewis Modificado (BLPRM) (2) para as cinco combinações (A, B, C, D e E) quando aplicado o programa SOLVER da planilha eletrônica do EXCEL para de julho a dezembro

Comb.	Estatística	Julho		Agosto		Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
A	Média (mm)	0,079	0,080	0,045	0,045	0,020	0,021	0,022	0,022	0,005	0,004	0,012	0,012
	Variância	0,133	0,126	0,063	0,064	0,042	0,040	0,059	0,059	0,004	0,004	0,014	0,012
	Cac_1	0,564	0,499	0,427	0,442	0,298	0,291	0,442	0,417	0,579	0,589	0,455	0,429
	PD	0,402	0,409	0,625	0,630	0,731	0,807	0,769	0,804	0,877	0,914	0,857	0,857
	Variância	148,277	154,556	70,226	68,455	17,987	18,225	50,575	50,759	1,275	1,281	1,924	2,132
	PD	0,188	0,186	0,453	0,451	0,520	0,523	0,627	0,592	0,707	0,677	0,821	0,821
B	Mdia (mm)	0,079	0,020	0,045	0,008	0,020	0,002	0,022	0,007	0,005	0,002	0,012	0,004
	Variância	0,133	0,151	0,063	0,072	0,042	0,050	0,059	0,068	0,004	0,004	0,014	0,016
	Cac_1	0,564	0,604	0,427	0,449	0,298	0,321	0,442	0,470	0,579	0,662	0,455	0,483
	PD	0,332	0,332	0,572	0,572	0,593	0,593	0,732	0,732	0,837	0,838	0,821	0,821
	Variância	148,277	28,335	70,226	12,100	17,987	7,606	50,575	11,645	1,275	0,848	15,713	2,731
	Cac_1	0,113	0,003	0,328	0,003	0,196	0,002	0,452	0,003	0,022	0,003	0,125	0,003
C	Mdia (mm)	0,079	0,039	0,045	0,021	0,020	0,015	0,022	0,019	0,005	0,005	0,012	0,008
	Variância	0,133	0,146	0,063	0,070	0,042	0,039	0,059	0,064	0,004	0,004	0,014	0,015
	Cac_1	0,564	0,588	0,427	0,444	0,298	0,299	0,442	0,454	0,579	0,584	0,455	0,470
	PD	0,402	0,446	0,625	0,720	0,731	0,989	0,769	0,991	0,877	0,902	0,857	0,992
	Variância	0,401	0,405	0,184	0,186	0,087	0,098	0,179	0,171	0,011	0,011	0,040	0,040
	PD	0,188	0,161	0,453	0,351	0,520	0,448	0,627	0,549	0,707	0,701	0,821	0,594
D	Mdia (mm)	0,079	0,079	0,045	0,042	0,020	0,020	0,022	0,022	0,005	0,005	0,012	0,012
	Variância	0,401	0,484	0,184	0,219	0,087	0,091	0,179	0,185	0,011	0,012	0,040	0,021
	Cac_1	0,259	0,281	0,383	0,434	0,292	0,301	0,538	0,551	0,012	0,013	0,083	0,080
	PD	0,402	0,402	0,625	0,659	0,731	0,739	0,769	0,780	0,877	0,877	0,857	0,865
	Variância	148,277	72,210	70,226	47,993	17,987	17,045	50,575	48,841	1,275	1,167	1,924	2,322
	PD	0,188	0,187	0,453	0,414	0,520	0,512	0,627	0,616	0,707	0,707	0,821	0,813
E	Mdia (mm)	0,079	0,071	0,045	0,041	0,020	0,019	0,022	0,021	0,005	0,004	0,012	0,011
	Variância	0,133	0,186	0,063	0,086	0,042	0,050	0,059	0,083	0,004	0,005	0,014	0,019
	Cac_1	0,564	0,852	0,427	0,614	0,298	0,430	0,442	0,650	0,579	0,857	0,455	0,673
	PD	0,402	0,409	0,625	0,641	0,731	0,671	0,769	0,793	0,877	0,891	0,857	0,880
	Variância	0,401	0,478	0,184	0,218	0,087	0,116	0,179	0,199	0,011	0,011	0,040	0,046
	Cac_1	0,564	0,331	0,420	0,241	0,379	0,186	0,358	0,270	0,362	0,353	0,440	0,278
	PD	0,399	0,405	0,622	0,638	0,626	0,668	0,767	0,790	0,875	0,888	0,856	0,877
	Variância	1,280	1,143	0,530	0,508	0,245	0,259	0,454	0,460	0,026	0,027	0,110	0,106
	Cac_1	0,488	0,139	0,449	0,103	0,389	0,083	0,345	0,117	0,295	0,150	0,507	0,120
	PD	0,391	0,398	0,616	0,632	0,623	0,663	0,763	0,785	0,872	0,884	0,853	0,871
	Variância	21,878	9,006	8,231	3,687	3,005	1,837	5,485	3,509	0,279	0,224	1,924	0,815
	Cac_1	0,306	0,018	0,526	0,014	0,307	0,012	0,372	0,015	0,049	0,018	0,423	0,016
	PD	0,332	0,334	0,572	0,577	0,593	0,614	0,732	0,732	0,837	0,836	0,821	0,814
	Variância	53,569	19,181	25,200	7,625	7,569	3,822	15,551	7,459	0,605	0,496	6,957	1,740
Cac_1	0,259	0,008	0,383	0,007	0,292	0,006	0,538	0,007	0,012	0,008	0,083	0,007	
PD	0,274	0,270	0,532	0,517	0,578	0,560	0,706	0,674	0,814	0,782	0,787	0,751	
Variância	148,277	40,274	70,226	15,593	17,987	7,879	50,575	15,674	1,275	1,088	15,713	3,674	
Cac_1	0,113	0,004	0,328	0,003	0,196	0,003	0,452	0,003	0,022	0,004	0,125	0,003	
PD	0,188	0,177	0,453	0,415	0,520	0,465	0,627	0,571	0,707	0,685	0,695	0,639	

Cac_1 → coeficiente de autocorrelação de retardo 1

PD → probabilidade de ocorrência de períodos secos

Figura 4.7 - Parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustado aos dados do pluviômetro de báscula do Feitosa obtidos das combinaes de estatísticas A, B, C, D, E para os 12 (doze) meses do ano

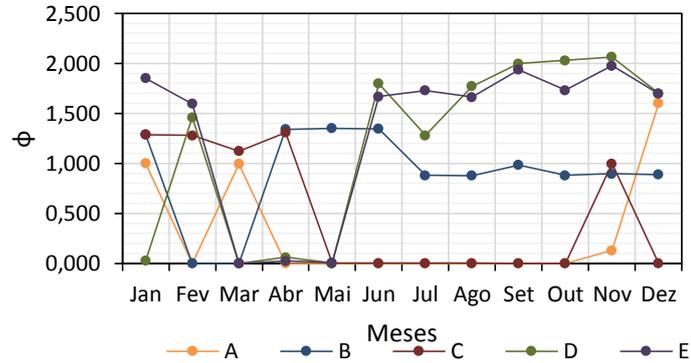
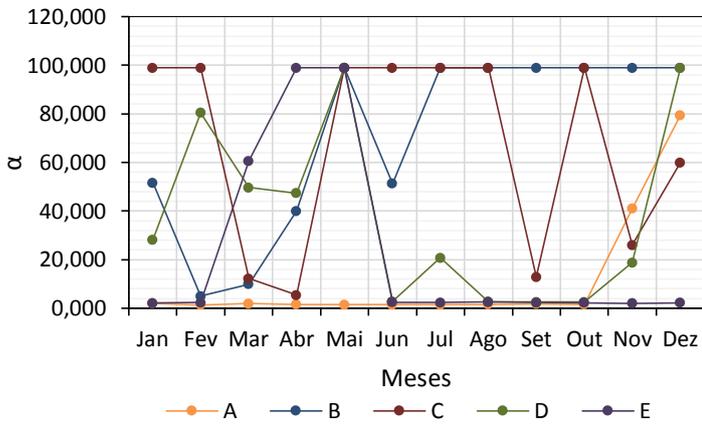
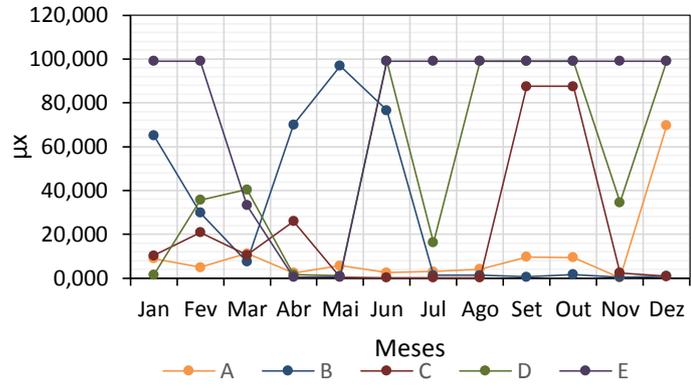
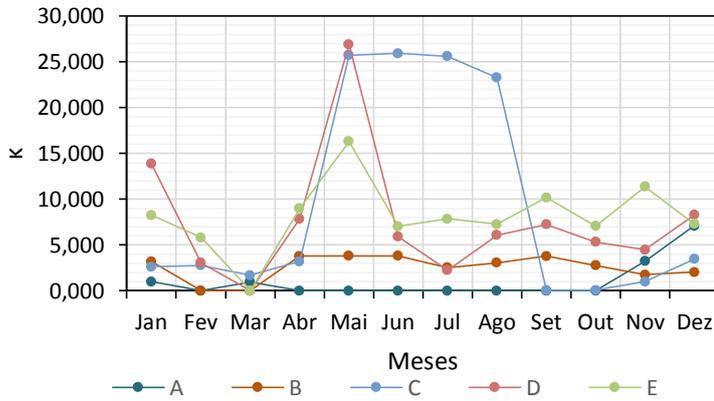
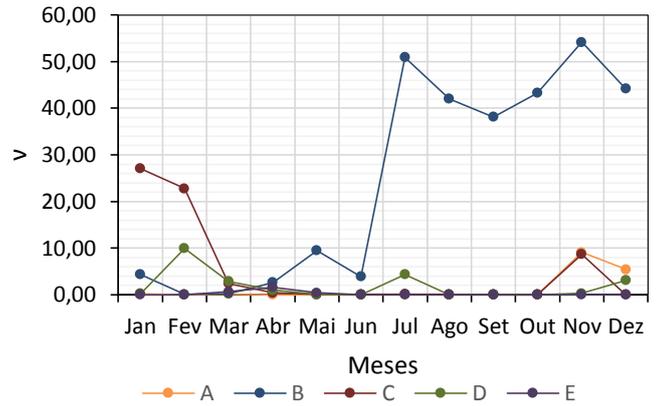
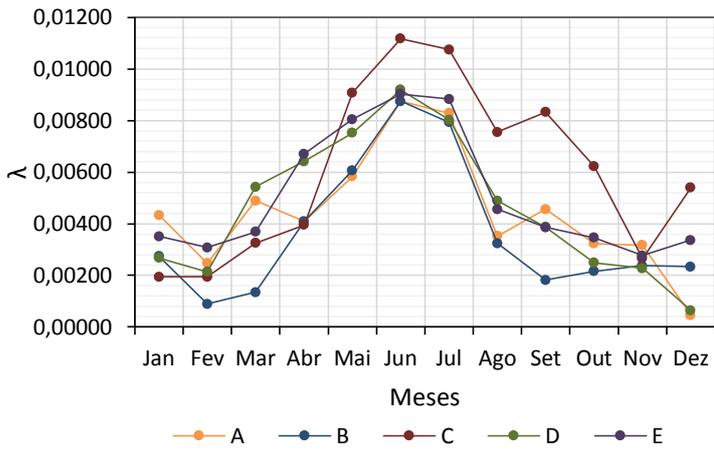


Tabela 4.21 - Valores da função objetivo para os conjuntos A, B, C, D, E

Combinação	Função Objetivo											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A	0,040	0,010	0,022	0,005	0,002	0,014	0,018	0,002	0,016	0,009	0,005	0,035
B	1,313	1,560	0,972	1,549	1,678	1,609	1,622	1,688	1,359	1,608	0,885	1,659
C	0,001	0,003	0,000	0,000	0,283	0,299	0,300	0,356	0,225	0,131	0,003	0,195
D	0,060	0,604	0,080	0,268	0,340	0,186	0,313	0,169	0,006	0,003	0,012	0,267
E	4,104	6,159	3,508	5,477	5,844	5,296	5,215	5,427	4,834	4,670	1,862	5,299

Analisando a Tabela 4.21, percebe-se que para o mês de janeiro, o valor da função objetivo que deu mais próximo de zero foi o conjunto C. Isso se repetiu para os meses de fevereiro, março, abril e novembro. Para os meses de maio, junho, julho, agosto e dezembro, o conjunto estatístico A foi o que apresentou o menor valor da função objetivo. Para setembro e outubro, o conjunto D foi o menor. O conjunto E, como também o conjunto B, foram os que apresentaram os maiores resultados da função objetivo para todos os meses do ano.

Baseado nos resultados da Tabela 4.21 foi escolhido a melhor combinação ou conjunto de estatísticas que representasse cada mês, e conseqüentemente, os seis parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis de pulso retangular modificado para os 12 (doze) meses do ano.

Na Figura 4.8 são apresentadas as estatísticas de precipitação histórica do pluviômetro de báscula e a simuladas de acordo com as equações do modelo BLPRM estimadas pelos conjuntos de estatísticas A (maio, junho, julho, agosto, dezembro), C (janeiro, fevereiro, maro, abril, novembro) e D (setembro, outubro) para a duração de 15 minutos, conforme os valores da Tabela 4.19 e Tabela 4.20.

A partir da Tabela 4.21, determinou-se os seis parâmetros do modelo BLPRM que representa cada mês de ano. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.22. Na Figura 4.9 estão apresentados a variação mensal dos parâmetros.

Figura 4.8 - Estatísticas de séries de precipitação históricas e a gerada pelo modelo BLPRM para as combinações escolhidas para cada mês na duração de 15 min

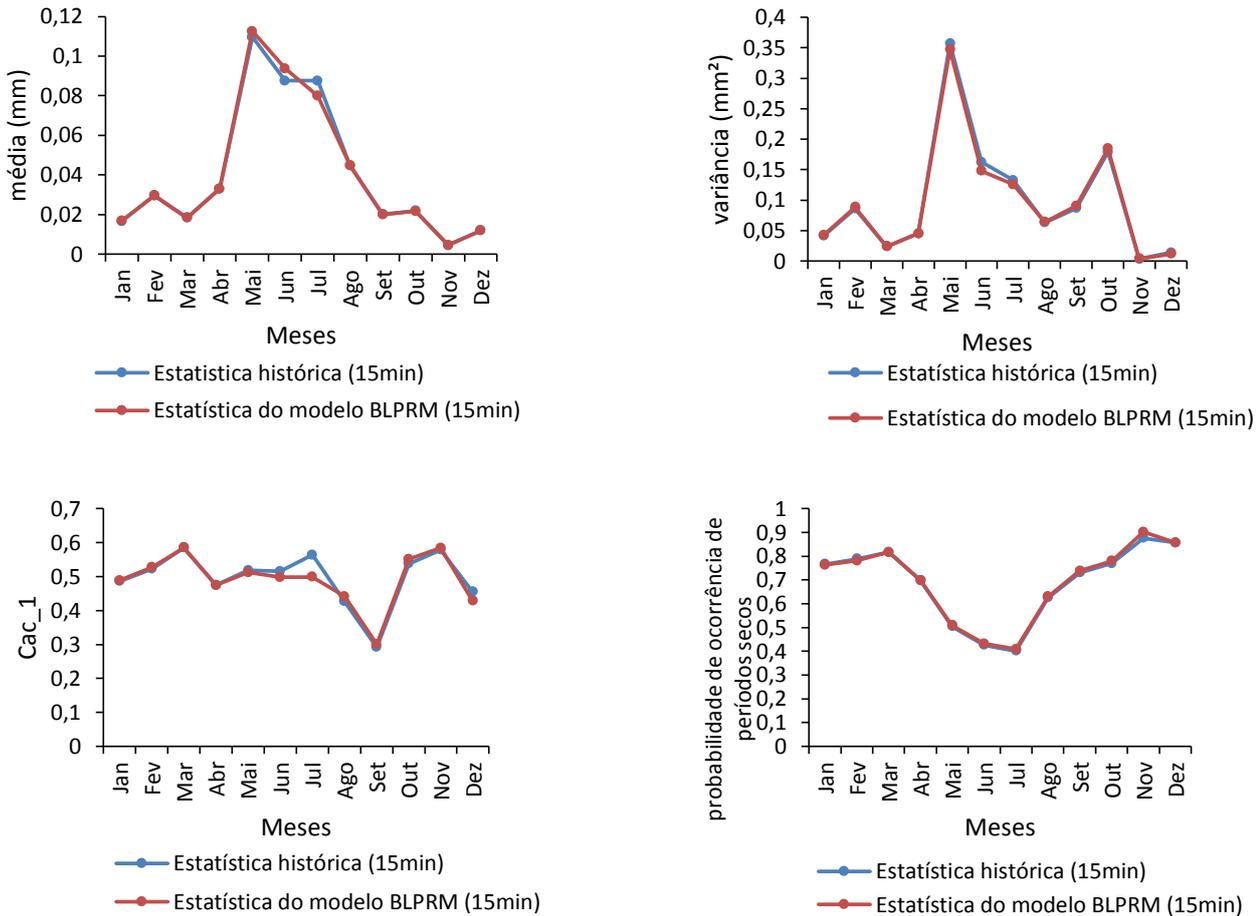
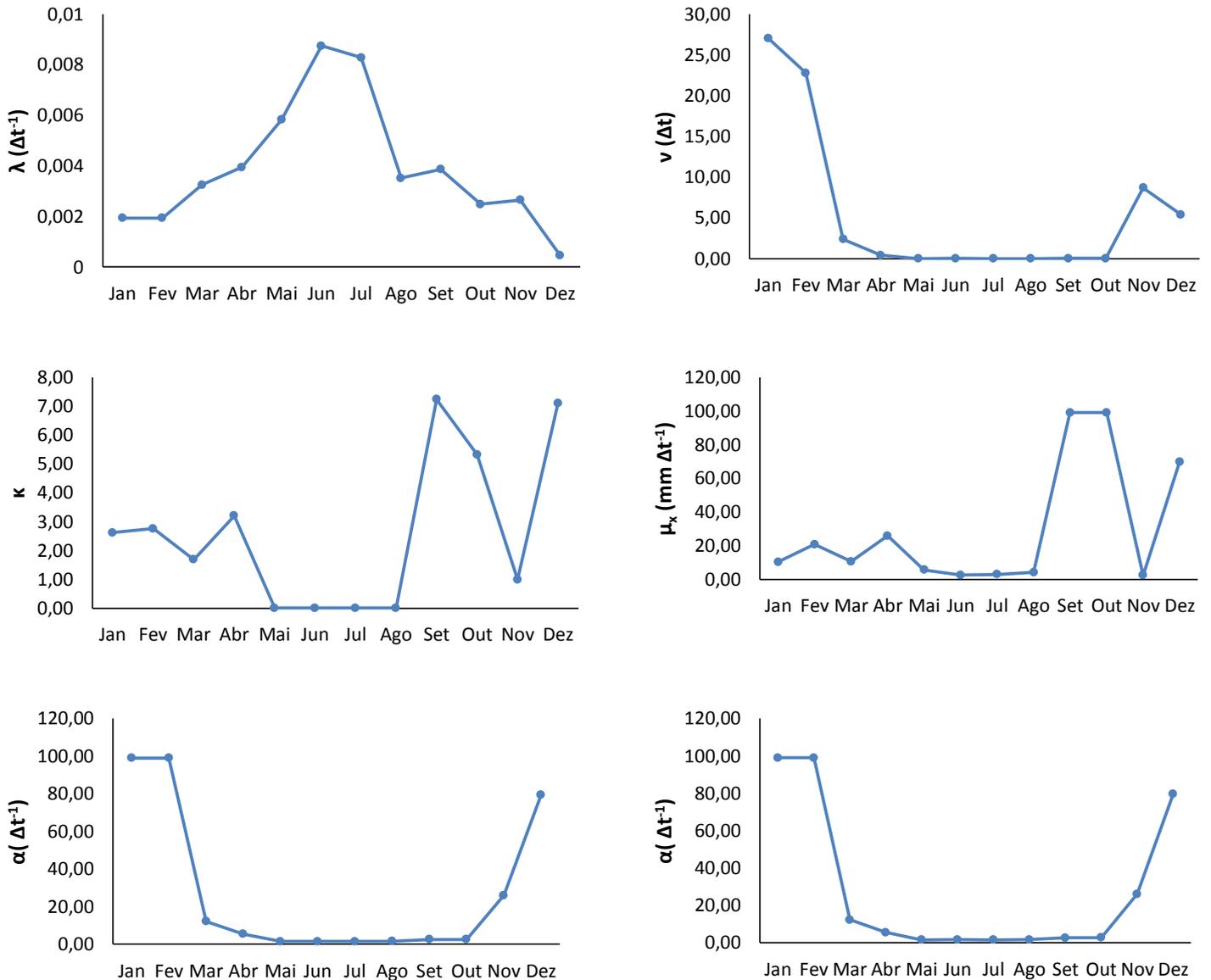


Tabela 4.22 - Parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustados para os doze meses de ano determinado através dos cinco conjuntos de dados

Mês	Parâmetros do modelo					
	$\lambda (\Delta t^{-1})$	$\nu (\Delta t)$	κ	$\mu_x (\text{mm } \Delta t^{-1})$	$\alpha (\Delta t^{-1})$	$\varphi (\Delta t)$
Janeiro	0,001939	27,04941	2,619129	10,289072	99,00000	1,286551
Fevereiro	0,001941	22,79047	2,755081	20,818012	99,00000	1,278111
Março	0,003252	2,393965	1,682903	10,588120	12,180531	1,121826
Abril	0,003948	0,411466	3,199727	25,913235	5,383376	1,309009
Mai	0,005833	0,011549	0,003319	5,696151	1,463187	0,000025
Junho	0,008749	0,02173	0,002431	2,516996	1,508139	0,000025
Julho	0,008285	0,011746	0,004041	3,011612	1,480786	0,000031
Agosto	0,003524	0,006689	0,00878	4,122700	1,545399	0,000035
Setembro	0,003869	0,017585	7,236529	99,00000	2,558161	1,998658
Outubro	0,002489	0,038445	5,31878	99,00000	2,573188	2,029491
Novembro	0,002659	8,711235	0,992565	2,473352	25,946452	0,998216
Dezembro	0,000457	5,410937	7,101744	69,660692	79,485881	1,601979

Figura 4.9 - Variação mensal dos parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustados para os doze meses de ano determinado através dos cinco conjuntos de dados



Após determinados os parâmetros do modelo BLPRM para cada mês, conforme mostrado na Tabela 4.22, estes foram utilizados para desagregar os dados diários da Tabela 4.11 em intervalo de 15 minutos com a utilização do software HyetosMinute, que é um programa computacional que simula a precipitação seguindo a rotina do modelo Bartlett-Lewis de pulso retangular modificado (BLPRM) (Anexo C).

Depois de desagregados em intervalo de 15 minutos, estes foram agregados para as durações de 30-60-120-180-240-360-720-1440 minutos, formando assim séries de dados para cada um destes intervalos. As séries de precipitações anuais máximas referidas a cada uma destas durações estão apresentadas na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Séries anuais de precipitação máxima em mm, para diferentes durações, obtidas dos dados diários desagregados através do HyetosMinute

Ano	Duração (minutos)								
	15	30	60	120	180	240	360	720	1440
1993	9,8	13,3	13,3	18,1	26,9	31,7	36,4	64,3	91,7
1994	13,5	21,8	36,2	59,6	43,1	60,3	65,0	104,8	104,8
1995	17,2	30,3	36,2	36,2	50,9	46,0	52,8	60,0	72,2
1996	11,3	22,7	34,7	43,9	43,9	58,8	43,9	64,6	64,6
1997	9,3	18,7	29,0	36,4	59,9	62,4	62,4	71,8	71,8
1998	7,9	12,8	24,3	36,7	60,4	60,4	60,4	75,0	75,0
1999	8,8	13,4	26,8	53,5	80,3	58,8	88,5	93,8	93,8
2000	16,1	26,5	34,8	40,6	61,5	61,5	61,5	104,7	141,5
2001	17,4	26,2	28,4	46,5	63,0	63,0	63,0	75,1	75,1
2002	9,7	15,3	30,7	38,5	54,2	48,0	69,1	70,0	77,7
2003	14,0	18,1	36,2	53,9	64,2	53,9	64,2	64,2	64,2
2004	13,5	26,2	26,7	45,4	48,2	86,0	71,9	93,9	180,7
2005	17,1	28,1	28,1	34,0	39,8	50,6	56,4	56,4	56,4
2006	12,0	14,7	25,9	42,1	63,2	84,2	78,6	83,0	139,6
2007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	8,0	12,6	12,6	12,6	12,6	17,9	12,6	17,9	17,9
2009	15,0	29,2	29,7	44,0	56,5	60,2	90,3	150,2	155,2
2010	15,2	30,3	35,3	70,5	105,8	116,6	116,6	120,8	187,8
2011	13,0	21,9	43,9	54,3	55,2	105,7	81,6	105,7	135,0
2012	9,1	18,2	35,6	48,0	60,5	68,7	109,0	110,5	110,5
2013	11,3	18,6	34,8	41,1	53,3	65,5	89,9	97,4	145,2
2014	16,2	26,1	47,3	57,0	64,7	57,0	68,6	83,2	83,2
2015	12,5	25,1	29,2	50,9	51,9	50,9	59,2	59,2	59,2
2016	10,7	10,8	18,7	37,5	56,2	75,0	103,8	103,8	173,0
2017	18,0	31,1	31,1	54,1	56,2	75,0	103,8	103,8	173,0
Maior	18,0	31,1	47,3	70,5	105,8	116,6	116,6	150,2	187,8
Menor	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	12,3	20,5	29,2	42,2	53,3	60,7	68,4	81,4	102,0
Desvio	4,1	7,7	10,0	17,5	23,7	29,8	33,1	38,9	61,3

Através dos valores mínimos exibidos na Tabela 3.2, as séries da Tabela 4.24, resultou nas séries da Tabela 4.25. As séries resultantes das chuvas intensas foram, então, transformadas em intensidades de precipitação e encontram-se na Tabela 4.26.

Tabela 4.24 - Séries anuais de precipitação máxima (mm) para diferentes durações, obtidas dos dados diários desagregados através do HyetosMinute, em ordem decrescente, considerando-se os mínimos adotados para chuvas intensas

Ano	Duração (minutos)								
	15	30	60	120	180	240	360	720	1440
1	18,0	31,1	47,3	70,5	105,8	116,6	116,6	150,2	187,8
2	17,4	30,3	43,9	59,6	80,3	105,7	109,0	120,8	180,7
3	17,2	30,3	36,2	57,0	64,7	86,0	103,8	110,5	173,0
4	17,1	29,2	36,2	54,3	64,2	84,2	103,8	105,7	173,0
5	16,2	28,1	36,2	54,1	63,2	75,0	90,3	104,8	155,2
6	16,1	26,5	35,6	53,9	63,0	75,0	89,9	104,7	145,2
7	15,2	26,2	35,3	53,5	61,5	68,7	88,5	103,8	141,5
8		26,2	34,8	50,9	60,5	65,5	81,6	103,8	139,6
9		26,1	34,8	48,0	60,4	63,0	78,6	97,4	135,0
10		25,1	34,7	46,5	59,9	62,4	71,9	93,9	110,5
11		22,7	31,1	45,4	56,5	61,5	69,1	93,8	104,8
12		21,9	30,7	44,0	56,2	60,4	68,6	83,2	93,8
13		21,8	29,7	43,9	56,2	60,3	65,0	83,0	91,7
14			29,2	42,1	55,2	60,2	64,2	75,1	83,2
15			29,0	41,1	54,2	58,8	63,0	75,0	77,7
16			28,4	40,6	53,3	58,8	62,4	71,8	75,1
17			28,1	38,5	51,9	57,0	61,5	70,0	75,0
18			26,8	37,5	50,9	53,9	60,4	64,6	72,2
19			26,7	36,7	48,2	50,9	59,2	64,3	71,8
20			25,9	36,4	43,9	50,6	56,4	64,2	64,6
21				36,2	43,1	48,0	52,8	60,0	64,2
22				34,0	39,8	46,0	43,9	59,2	59,2
23								56,4	56,4
24									
25									
Maior	18,0	31,1	47,3	70,5	105,8	116,6	116,6	150,2	187,8
Menor	15,2	21,8	25,9	34,0	39,8	46,0	43,9	56,4	56,4
Média	16,7	26,6	33,0	46,6	58,8	66,7	75,5	87,7	110,1
Desvio	1,0	3,1	5,6	9,3	13,7	17,8	19,9	23,6	43,7

Tabela 4.25 - Séries anuais de intensidade máxima de precipitação (mm/h) para diferentes durações, obtidas dos dados diários desagregados através do HyetosMinute, em ordem decrescente, considerando-se os mínimos adotados para chuvas intensas

Ano	Duração (minutos)								
	15	30	60	120	180	240	360	720	1440
1	71,92	62,12	47,29	35,26	35,26	29,14	19,43	12,51	7,83
2	69,52	60,61	43,89	29,78	26,75	26,43	18,17	10,06	7,53
3	68,90	60,59	36,21	28,49	21,58	21,50	17,30	9,21	7,21
4	68,48	58,42	36,20	27,17	21,40	21,06	17,30	8,81	7,21
5	64,67	56,29	36,17	27,05	21,06	18,74	15,05	8,73	6,47
6	64,20	52,90	35,56	26,95	21,00	18,74	14,98	8,72	6,05
7	60,61	52,44	35,26	26,75	20,50	17,17	14,76	8,65	5,90
8		52,40	34,84	25,43	20,16	16,38	13,60	8,65	5,82
9		52,23	34,77	24,00	20,13	15,75	13,10	8,12	5,63
10		50,19	34,66	23,23	19,98	15,60	11,98	7,82	4,60
11		45,34	31,06	22,70	18,83	15,38	11,51	7,82	4,37
12		43,89	30,66	21,99	18,74	15,10	11,43	6,93	3,91
13		43,69	29,71	21,95	18,74	15,08	10,83	6,92	3,82
14			29,18	21,06	18,40	15,05	10,70	6,26	3,47
15			29,00	20,57	18,07	14,70	10,50	6,25	3,24
16			28,37	20,31	17,77	14,69	10,40	5,98	3,13
17			28,14	19,24	17,30	14,25	10,25	5,83	3,13
18			26,75	18,74	16,98	13,47	10,07	5,38	3,01
19			26,73	18,35	16,07	12,72	9,87	5,36	2,99
20			25,90	18,20	14,63	12,66	9,40	5,35	2,69
21				18,10	14,37	12,00	8,80	5,00	2,68
22				17,00	13,27	11,49	7,32	4,93	2,47
23								4,70	2,35
24									
25									
Maior	71,92	62,12	47,29	35,26	35,26	29,14	19,43	12,51	7,83
Menor	60,61	43,69	25,90	17,00	13,27	11,49	7,32	4,70	2,35
Média	66,90	53,16	33,02	23,29	19,59	16,69	12,58	7,30	4,59
Desvio	3,88	6,30	5,61	4,63	4,55	4,46	3,31	1,96	1,82

Na Tabela 4.26 estão apresentadas as intensidades máximas de precipitação para os respectivos períodos de retorno determinadas pela distribuição de Gumbel.

Tabela 4.26 - Intensidade de precipitação máxima em mm/h calculada pelo Método de Gumbel e a intensidade de precipitação gerada

Duração (minutos)	Tempo de Retorno (ano)								Máxima Gerada
	2	5	10	15	20	25	50	100	
15,0	66,3	69,7	72,0	73,2	74,1	74,8	77,0	79,1	71,9
30,0	52,1	57,7	61,4	63,5	64,9	66,0	69,5	72,9	62,1
60,0	32,1	37,1	40,3	42,2	43,5	44,5	47,6	50,6	47,3
120,0	22,5	26,6	29,3	30,9	31,9	32,8	35,3	37,8	35,3
180,0	18,8	22,9	25,5	27,0	28,1	28,9	31,4	33,9	35,3
240,0	16,0	19,9	22,5	24,0	25,0	25,8	28,2	30,7	29,1
360,0	12,0	15,0	16,9	18,0	18,8	19,3	21,2	23,0	19,4
720	7,0	8,7	9,9	10,5	11,0	11,3	12,4	13,5	12,5
1440	4,3	5,9	7,0	7,6	8,0	8,3	9,3	10,3	7,8

Os valores do teste de aderência de Kolmogov-Smirnov calculados para cada duração ($D_{n,max}$), bem como os valores críticos ($D_{n,critico}$) para o nível de significância de 5%, definido em função do tamanho da amostra (n) estão expostos na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 - Valor Absoluto do teste de aderência Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) para o ajuste da Distribuição de Gumbel, para cada duração especificada

Duração (minutos)	$D_{n,max}$	N	$D_{n,critico}$ para nível de significância de 5%
15	0,146	7	0,483
30	0,168	13	0,361
60	0,137	20	0,294
120	0,094	22	0,281
180	0,184	22	0,281
240	0,157	22	0,281
360	0,123	22	0,281
720	0,121	23	0,275
1440	0,158	23	0,275

Analisando a Tabela 4.27, verifica-se que os valores absolutos do teste de aderência de Kolmogov-Smirnov ($D_{n,max}$) são menores que os críticos tabelados ($D_{n,critico}$), considerando o nível de significância de 5%. Assim a distribuição de Gumbel ajustou aos dados. No APÊNDICE C são apresentados os gráficos do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel aos dados gerados para diferentes durações.

Os coeficientes de determinação resultantes dos ajustes da distribuição Gumbel, referentes às chuvas Intensas para as durações 15, 30, 60, 120, 180, 40, 360, 720 e 1440 estão apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 - Coeficientes de Determinação R^2 resultantes do ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel dos dados gerado pelo modelo BLPRM

Duração (minutos)	15	30	60	120	180	240	360	720	1440
Coeficiente de Determinação (R^2)	0,91	0,94	0,95	0,98	0,95	0,96	0,97	0,96	0,95

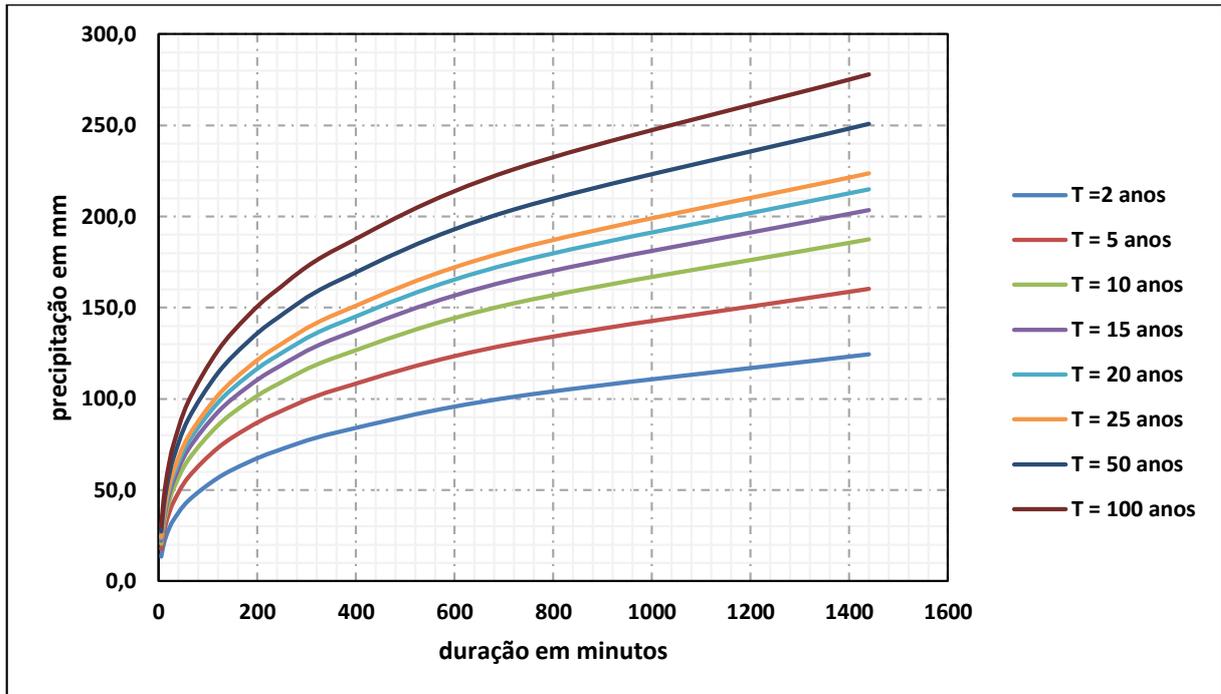
4.3 Aplicação da metodologia de Bell (1969)

Neste estudo, utilizou-se a precipitação de tempo de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos de dados observados na estação automática da Universidade Federal de Alagoas (Tabela 4.4). A Tabela 4.29 mostra o resultado da relação precipitação-duração-frequência (IDF) determinado pelo método de Bell (1969). Na Figura 4.10 os resultados estão apresentados em gráfico.

Tabela 4.29 - Precipitação em mm, calculada pelo método de Bell (1969)

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	13,5	17,4	20,4	22,1	23,4	24,3	27,3	30,2
10	20,3	26,1	30,5	33,1	35,0	36,4	40,8	45,3
15	24,8	31,9	37,3	40,5	42,8	44,5	49,9	55,3
20	28,3	36,4	42,6	46,2	48,8	50,8	57,0	63,1
30	33,6	43,3	50,7	55,0	58,0	60,4	67,8	75,1
60	44,1	56,9	66,6	72,2	76,2	79,3	89,0	98,6
90	51,2	66,0	77,2	83,7	88,4	92,0	103,2	114,4
120	56,7	73,0	85,4	92,7	97,8	101,8	114,2	126,6
360	81,5	105,1	122,9	133,4	140,8	146,5	164,3	182,1
480	89,2	115,0	134,6	146,0	154,1	160,4	179,9	199,4
600	95,6	123,3	144,2	156,4	165,1	171,8	192,7	213,7
720	101,1	130,3	152,5	165,4	174,6	181,7	203,8	225,9
1440	124,4	160,4	187,6	203,5	214,8	223,5	250,8	278,0

Figura 4.10 - Relação precipitação-duração-frequência determinada pelo método de Bell (1969)



Na Tabela 4.30 é apresentada a relação intensidade-duração-frequência determinada pela metodologia de Bell (1969).

Tabela 4.30 - Relação intensidade, em mm/h calculada pelo método de Bell (1969)

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	162,4	209,4	244,9	265,7	280,4	291,8	327,4	362,9
10	121,6	156,7	183,3	198,8	209,9	218,4	245,0	271,6
15	99,1	127,7	149,4	162,1	171,0	178,0	199,7	221,4
20	84,8	109,3	127,8	138,7	146,4	152,3	170,9	189,4
30	67,2	86,7	101,4	110,0	116,1	120,8	135,5	150,2
60	44,1	56,9	66,6	72,2	76,2	79,3	89,0	98,6
90	34,1	44,0	51,5	55,8	58,9	61,3	68,8	76,3
120	28,3	36,5	42,7	46,3	48,9	50,9	57,1	63,3
360	13,6	17,5	20,5	22,2	23,5	24,4	27,4	30,4
480	11,2	14,4	16,8	18,2	19,3	20,0	22,5	24,9
600	9,6	12,3	14,4	15,6	16,5	17,2	19,3	21,4
720	8,4	10,9	12,7	13,8	14,5	15,1	17,0	18,8
1440	5,2	6,7	7,8	8,5	8,9	9,3	10,4	11,6

A Tabela 4.31 apresenta a relação intensidade-duração-frequência proposta pela metodologia de Righetto (1998).

Tabela 4.31 - Intensidade de precipitação, em mm/h pelo método de Righetto (1998)

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	113,4	148,6	175,3	190,8	201,9	210,5	237,1	263,7
10	92,8	121,6	143,4	156,1	165,2	172,2	194,0	215,8
15	78,5	102,9	121,3	132,1	139,8	145,7	164,1	182,6
20	68,7	90,1	106,2	115,7	122,4	127,6	143,7	159,9
30	56,2	73,6	86,8	94,5	100,0	104,2	117,4	130,6
60	38,6	50,5	59,6	64,9	68,6	71,5	80,6	89,7
120	25,8	33,8	39,8	43,4	45,9	47,8	53,9	59,9
180	20,2	26,4	31,2	34,0	35,9	37,4	42,2	46,9
240	16,9	22,2	26,1	28,5	30,1	31,4	35,4	39,3
360	13,1	17,2	20,3	22,1	23,4	24,4	27,5	30,5
720	8,5	11,1	13,1	14,2	15,0	15,7	17,7	19,7
1440	5,4	7,1	8,3	9,1	9,6	10,0	11,3	12,5

4.4 Relação intensidade-duração-frequência pelo método de Chen (1983)

O modelo de Chen (1983) requer o conhecimento de três precipitações: P_1^{10} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 10 anos), P_{24}^{10} (chuva com duração de 24 hora e tempo de retorno de 10 anos) e P_1^{100} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 100 anos). Com o modelo de Bell (1969) e o adaptado por Righetto (1998), essas três precipitações foram obtidas da relação intensidade-duração-frequência dos dados do posto da estação automática citada nesta pesquisa.

De posse das precipitações P_1^{10} , P_{24}^{10} , P_1^{100} , expostas na Tabela 4.4, foram calculadas, através da Equação 2.11, as precipitações para os respectivos períodos de retorno e durações, de acordo com a Tabela 4.32. Na Tabela 4.33 estão apresentadas as intensidades máximas de precipitação para os tempos de retorno.

Tabela 4.32 - Relação de precipitação, em mm, calculada pelo método de Chen (1983)

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	12,4	16,2	19,4	20,4	21,4	22,2	25,2	27,9
10	19,5	25,3	30,1	31,6	33,2	34,4	38,9	43,1
15	24,3	31,4	37,4	39,3	41,2	42,8	48,4	53,6
20	27,9	36,1	43,0	45,1	47,4	49,2	55,6	61,6
30	33,2	42,9	51,3	53,9	56,6	58,7	66,5	73,8
60	42,5	55,3	66,6	70,1	73,7	76,4	86,8	96,9
120	52,1	68,7	83,5	88,4	92,9	96,3	110,0	123,8
180	58,0	77,1	94,4	100,3	105,4	109,3	125,3	141,6
240	62,4	83,5	102,8	109,4	115,0	119,3	137,0	155,5
360	68,9	93,1	115,5	123,4	129,7	134,5	155,1	177,0
720	81,0	111,6	140,2	150,9	158,5	164,4	190,8	219,9
1440	94,7	133,3	169,7	183,8	193,1	200,3	234,0	272,5

Tabela 4.33 - Relação de intensidade máxima de precipitação pela metodologia de Chen (1983)

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	148,4	194,9	232,4	244,3	256,7	266,2	301,8	335,0
10	116,7	151,7	180,5	189,4	199,0	206,4	233,6	258,7
15	97,2	125,7	149,7	157,0	165,0	171,1	193,6	214,4
20	83,8	108,2	129,0	135,3	142,2	147,5	166,9	184,9
30	66,4	85,8	102,6	107,7	113,2	117,4	132,9	147,6
60	42,5	55,3	66,6	70,1	73,7	76,4	86,8	96,9
120	26,1	34,3	41,8	44,2	46,4	48,2	55,0	61,9
180	19,3	25,7	31,5	33,4	35,1	36,4	41,8	47,2
240	15,6	20,9	25,7	27,4	28,8	29,8	34,3	38,9
360	11,5	15,5	19,2	20,6	21,6	22,4	25,8	29,5
720	6,7	9,3	11,7	12,6	13,2	13,7	15,9	18,3
1440	3,9	5,6	7,1	7,7	8,0	8,3	9,8	11,4

4.5 Comparação entre as diferentes metodologias

A curva IDF gerada a partir dos dados horários da estação automática da UFAL (seção 4.2) foi obtida para duração acima de 1 hora, uma vez que não existem dados de precipitação com duração inferior e com série longa.

Desta forma, a comparação das relações intensidade-duração-frequência ocorreu com durações acima de 1 hora. Na Tabela 4.34, encontram-se os valores de intensidade máxima

(mm/h) obtidos da curva IDF de dados observados (históricos), pelo Método de Bell (1969), Método de Chen (1983), Método de Righetto (1998), Método da Isozonas, Método das Relações (CETESB, 1979) e Modelo BLPRM (DAMÉ, 2001). Os resultados dessas relações IDF foram apresentados nas seções 4.2, 4.3 e 4.4 deste estudo.

Tabela 4.34 - Valores de intensidade máxima (mm/h) obtidos da curva IDF de dados observados da cidade de Maceió, e por métodos diversos

Tempo de Retorno (anos)	Duração (min)	Dados Históricos (estação automática)	Bell (1969)	Righetto (1998)	Chen (1983)	Isozonas	Método das Relações	Modelo BLPRM (Damé)
2	60	43,8	44,1	38,6	42,5	-	47,5	32,1
	120	26,2	28,3	25,8	26,1	-	27,2	22,5
	180	18,9	21,7	20,2	19,3	-	20,4	18,8
	240	13,8	17,9	16,9	15,6	-	17	16,0
	360	11,8	13,6	13,1	11,5	-	13,6	12,0
	720	7,1	8,4	8,5	6,7	-	8	7,0
	1440	4,1	5,2	5,4	3,9	-	4,7	4,3
5	60	57,2	56,9	50,5	55,3	58,6	67,3	37,1
	120	38,3	36,5	33,8	34,3	31,4	38,5	26,6
	180	27,6	28,0	26,4	25,7	22,3	28,8	22,9
	240	20,2	23,1	22,2	20,9	17,8	24	19,9
	360	16,9	17,5	17,2	15,5	13,2	19,2	15,0
	720	9,3	10,9	11,1	9,3	8,7	11,4	8,7
	1440	5,9	6,7	7,1	5,6	6,4	6,7	5,9
10	60	66,1	66,6	59,6	66,6	69,5	80,4	40,3
	120	46,3	42,7	39,8	41,8	37,2	45,9	29,3
	180	33,3	32,7	31,2	31,5	26,5	34,5	25,5
	240	24,4	27,0	26,1	25,7	21,1	28,7	22,5
	360	20,3	20,5	20,3	19,2	15,7	23	16,9
	720	10,8	12,7	13,1	11,7	10,3	13,6	9,9
	1440	7,1	7,8	8,3	7,1	7,7	8,0	7,0
15	60	71,2	72,2	64,9	70,1	75,3	87,8	42,2
	120	50,8	46,3	43,4	44,2	40,4	50,2	30,9
	180	36,5	35,5	34	33,4	28,7	37,6	27,0
	240	26,8	29,3	28,5	27,4	22,9	31,4	24,0
	360	22,3	22,2	22,1	20,6	17,1	25,1	18,0
	720	11,7	13,8	14,2	12,6	11,3	14,8	10,5
	1440	7,7	8,5	9,1	7,7	8,4	8,7	7,6
20	60	74,7	76,2	68,6	73,7	79,5	93	43,5
	120	54,0	48,9	45,9	46,4	42,6	53,1	31,9
	180	38,8	37,4	35,9	35,1	30,4	39,8	28,1
	240	28,5	30,9	30,1	28,8	24,2	33,2	25,0
	360	23,6	23,5	23,4	21,6	18,1	26,6	18,8
	720	12,3	14,5	15	13,2	11,9	15,7	11,0

Tempo de Retorno (anos)	Duração (min)	Dados Históricos (estação automática)	Bell (1969)	Righetto (1998)	Chen (1983)	Isozonas	Método das Relações	Modelo BLPRM (Damé)
	1440	8,2	8,9	9,6	8	8,9	9,2	8,0
25	60	77,4	79,3	71,5	76,4	82,7	96,9	44,5
	120	56,4	50,9	47,8	48,2	44,4	55,4	32,8
	180	40,6	39,0	37,4	36,4	31,6	41,5	28,9
	240	29,7	32,1	31,4	29,8	25,2	34,6	25,8
	360	24,6	24,4	24,4	22,4	18,8	27,7	19,3
	720	12,7	15,1	15,7	13,7	12,4	16,3	11,3
	1440	8,6	9,3	10	8,3	9,2	9,6	8,3
50	60	85,7	89,0	80,6	86,8	92,2	109,2	47,6
	120	63,9	57,1	53,9	55	49,5	62,4	35,3
	180	46,0	43,7	42,2	41,8	35,3	46,8	31,4
	240	33,7	36,1	35,4	34,3	28,2	39	28,2
	360	27,8	27,4	27,5	25,8	21,1	31,2	21,2
	720	14,2	17,0	17,7	15,9	14,0	18,4	12,4
	1440	9,7	10,4	11,3	9,8	10,4	10,8	9,3
100	60	94,0	98,6	89,7	96,9	101,1	121,4	50,6
	120	71,4	63,3	59,9	61,9	54,4	69,4	37,8
	180	51,3	48,4	46,9	47,2	38,8	52	33,9
	240	37,6	40,0	39,3	38,9	31,0	43,4	30,7
	360	31,0	30,4	30,5	29,5	23,2	34,7	23,0
	720	15,6	18,8	19,7	18,3	15,5	20,5	13,5
	1440	10,8	11,6	12,5	11,4	11,6	12,0	10,3

Na Tabela 4.35 encontram-se as diferenças entre os valores calculados pelo dados observados e os calculados pelos métodos em análise, como também os desvios relativos. Observa-se, na Tabela 4.35, que para o período de retorno de 2 anos a metodologia aplicada por Chen (1969) apresentou a menor variação e desvio relativos para todas as durações expostas na Tabela 4.35, exceto para a duração de 180 minutos, uma vez que o modelo BLPRM (Damé) obteve menor resultado. Esse método de Chen (1969) apresentou a maior variação e desvio relativo na duração de 240 minutos quando comparada com as curvas IDF determinada pelo os dados observados.

Tabela 4.35 - Variação e os desvios relativos entre a relação IDF calculada por dados observados e pelo método aplicado no estudo

Tempo de Retorno (anos)	Duração (min)	Bell (1969)		Righetto (1998)		Chen (1983)		Isozonas		Método das Relações		Modelo BLPRM (Damé)	
		Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R
2	60	-0,3	-0,8%	5,2	11,9%	1,3	3,0%	-	-	-3,7	-8,4%	11,7	26,7%
	120	-2,1	-8,1%	0,4	1,6%	0,1	0,4%	-	-	-1,0	-3,8%	3,7	14,1%
	180	-2,8	-14,9%	-1,3	-7,0%	-0,4	-2,3%	-	-	-1,5	-8,1%	0,0	0,2%
	240	-4,1	-29,9%	-3,1	-22,7%	-1,8	-13,3%	-	-	-3,2	-23,5%	-2,2	-15,9%
	360	-1,8	-15,4%	-1,3	-11,2%	0,3	2,4%	-	-	-1,8	-15,5%	-0,3	-2,2%
	720	-1,4	-19,5%	-1,4	-20,5%	0,4	5,0%	-	-	-0,9	-13,4%	0,1	1,0%
	1440	-1,1	-27,5%	-1,3	-32,9%	0,2	4,0%	-	-	-0,6	-15,6%	-0,2	-5,5%
5	60	0,3	0,6%	6,7	11,8%	1,9	3,4%	-1,4	-2,5%	-10,1	-17,6%	20,2	35,3%
	120	1,8	4,7%	4,5	11,8%	4,0	10,5%	6,9	18,0%	-0,2	-0,5%	11,7	30,5%
	180	-0,4	-1,4%	1,2	4,2%	1,9	6,7%	5,2	19,0%	-1,2	-4,5%	4,7	17,0%
	240	-2,9	-14,4%	-2,0	-10,1%	-0,7	-3,7%	2,4	11,9%	-3,8	-19,0%	0,3	1,3%
	360	-0,6	-3,5%	-0,3	-1,6%	1,4	8,4%	3,7	21,9%	-2,3	-13,4%	2,0	11,6%
	720	-1,5	-16,4%	-1,8	-18,9%	0,0	0,3%	0,6	6,9%	-2,1	-22,2%	0,6	6,6%
	1440	-0,8	-13,9%	-1,2	-21,0%	0,3	4,5%	-0,5	-9,3%	-0,8	-14,2%	0,0	-0,5%
10	60	-0,4	-0,6%	6,5	9,9%	-0,5	-0,7%	-3,4	-5,1%	-14,3	-21,6%	25,8	39,0%
	120	3,6	7,8%	6,5	14,1%	4,5	9,8%	9,1	19,6%	0,4	0,9%	17,0	36,7%
	180	0,6	1,8%	2,1	6,3%	1,8	5,4%	6,8	20,5%	-1,2	-3,6%	7,8	23,4%
	240	-2,6	-10,5%	-1,7	-7,0%	-1,3	-5,4%	3,3	13,5%	-4,3	-17,6%	1,9	7,8%
	360	-0,1	-0,7%	0,0	0,2%	1,1	5,6%	4,6	22,7%	-2,7	-13,1%	3,4	16,9%
	720	-1,9	-17,2%	-2,3	-20,8%	-0,9	-7,9%	0,5	4,5%	-2,8	-25,4%	1,0	9,0%
	1440	-0,8	-10,7%	-1,2	-17,6%	0,0	-0,6%	-0,6	-8,5%	-0,9	-13,3%	0,1	1,4%
15	60	-1,1	-1,5%	6,3	8,8%	1,1	1,5%	-4,1	-5,8%	-16,6	-23,4%	29,0	40,7%
	120	4,5	8,8%	7,4	14,6%	6,6	13,1%	10,5	20,6%	0,6	1,3%	20,0	39,3%
	180	1,1	3,0%	2,5	7,0%	3,1	8,6%	7,8	21,4%	-1,1	-2,9%	9,5	26,0%
	240	-2,5	-9,2%	-1,7	-6,4%	-0,6	-2,3%	3,9	14,4%	-4,6	-17,2%	2,8	10,5%
	360	0,0	0,2%	0,2	0,7%	1,7	7,5%	5,2	23,2%	-2,8	-12,8%	4,3	19,2%
	720	-2,1	-17,9%	-2,5	-21,4%	-0,9	-7,8%	0,4	3,6%	-3,1	-26,6%	1,2	10,1%
	1440	-0,7	-9,7%	-1,4	-17,7%	0,0	0,4%	-0,6	-8,2%	-1,0	-12,5%	0,2	2,2%
20	60	-1,5	-2,1%	6,1	8,1%	1,0	1,3%	-4,8	-6,5%	-18,3	-24,6%	31,2	41,8%
	120	5,1	9,4%	8,1	15,0%	7,6	14,1%	11,4	21,0%	0,9	1,7%	22,1	40,9%
	180	1,4	3,6%	2,9	7,5%	3,7	9,6%	8,5	21,8%	-1,0	-2,5%	10,7	27,7%
	240	-2,4	-8,5%	-1,6	-5,8%	-0,3	-1,2%	4,2	14,9%	-4,7	-16,7%	3,4	12,1%
	360	0,1	0,6%	0,2	0,9%	2,0	8,5%	5,5	23,4%	-3,0	-12,7%	4,9	20,5%
	720	-2,3	-18,4%	-2,7	-22,1%	-0,9	-7,4%	0,4	2,9%	-3,4	-27,8%	1,3	10,7%
	1440	-0,7	-9,1%	-1,4	-17,0%	0,2	2,5%	-0,7	-8,0%	-1,0	-12,2%	0,2	2,7%
25	60	-1,9	-2,5%	5,9	7,6%	1,0	1,3%	-5,3	-6,9%	-19,5	-25,2%	32,9	42,5%
	120	5,5	9,8%	8,6	15,3%	8,2	14,6%	12,1	21,4%	1,0	1,8%	23,7	42,0%
	180	1,6	4,0%	3,2	7,8%	4,2	10,3%	9,0	22,1%	-0,9	-2,3%	11,7	28,8%

Tempo de Retorno (anos)	Duração (min)	Bell (1969)		Righetto (1998)		Chen (1983)		Isozonas		Método das Relações		Modelo BLPRM (Damé)	
		Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R	Var.	Desv. R
	240	-2,4	-8,1%	-1,7	-5,6%	-0,1	-0,2%	4,5	15,3%	-4,9	-16,3%	3,9	13,3%
	360	0,2	0,9%	0,2	1,0%	2,2	9,1%	5,8	23,6%	-3,1	-12,4%	5,3	21,5%
	720	-2,4	-18,8%	-3,0	-23,1%	-1,0	-7,5%	0,3	2,5%	-3,6	-27,9%	1,4	11,2%
	1440	-0,7	-8,7%	-1,4	-16,7%	0,3	3,1%	-0,7	-7,8%	-1,0	-12,1%	0,3	3,0%
50	60	-3,3	-3,8%	5,1	6,0%	-1,1	-1,3%	-6,5	-7,5%	-23,5	-27,4%	38,1	44,5%
	120	6,8	10,7%	10,0	15,7%	8,9	14,0%	14,4	22,6%	1,5	2,4%	28,6	44,8%
	180	2,3	4,9%	3,8	8,2%	4,2	9,0%	10,7	23,2%	-0,8	-1,8%	14,6	31,7%
	240	-2,3	-6,9%	-1,7	-5,0%	-0,6	-1,8%	5,5	16,4%	-5,3	-15,7%	5,5	16,2%
	360	0,5	1,6%	0,3	1,2%	2,0	7,3%	6,8	24,3%	-3,4	-12,1%	6,7	24,0%
	720	-2,8	-19,9%	-3,5	-25,0%	-1,7	-12,3%	0,2	1,4%	-4,2	-29,9%	1,8	12,5%
	1440	-0,8	-7,9%	-1,6	-16,7%	-0,1	-1,2%	-0,7	-7,5%	-1,1	-11,5%	0,4	3,9%
100	60	-4,6	-4,9%	4,3	4,6%	-2,9	-3,1%	-7,1	-7,5%	-27,4	-29,2%	43,4	46,1%
	120	8,1	11,3%	11,5	16,1%	9,5	13,3%	17,0	23,9%	2,0	2,8%	33,6	47,0%
	180	2,9	5,6%	4,4	8,6%	4,1	8,0%	12,5	24,4%	-0,7	-1,3%	17,4	34,0%
	240	-2,3	-6,1%	-1,7	-4,4%	-1,3	-3,3%	6,6	17,6%	-5,8	-15,3%	7,0	18,5%
	360	0,7	2,1%	0,5	1,7%	1,5	4,9%	7,8	25,1%	-3,7	-11,9%	8,0	26,0%
	720	-3,3	-20,9%	-4,1	-26,5%	-2,7	-17,5%	0,1	0,7%	-4,9	-31,7%	2,1	13,5%
	1440	-0,8	-7,3%	-1,7	-15,8%	-0,6	-5,6%	-0,8	-7,2%	-1,2	-11,2%	0,5	4,6%

Var → variação

Desv. R → desvio relativo

No tempo de retorno de 5 anos a metodologia de Chen (1983) e Bell (1969) apresentaram uma variação e desvio relativo menos significativos que as outras. Dentre essas duas, a metodologia de Bell (1969) obteve, em quatro durações, variação menor que a de Chen (1983), entretanto percebe-se que as variações do método de Chen (1983), para todas as durações, estão mais próximas dos valores obtidos dos dados observados, o que a torna com maior precisão quando comparados com os outros métodos. Isto foi percebido em todos os períodos de retorno.

O modelo BLPRM (Damé) apresentou resultado com as maiores variações e desvios relativos para todos os períodos, ou seja, as curvas IDF gerada por esse modelo obteve resultados menores do que àquelas gerada por dados observados. Para duração acima de 800 minutos, percebeu-se que todos os métodos para cada tempo de retorno, a variação e o desvio relativo apresentaram resultados maiores que os calculados por dados observados. Com exceção ao modelo BLPRM que apresentou resultados menores. Entretanto teve métodos como o de

Bell (1969) e Chen (1983) que esses resultados foram maiores a partir da duração de 240 minutos. Nas Figuras de 4.11 a 4.16 pode perceber visualmente esses resultados.

Figura 4.11 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Bell (1969)

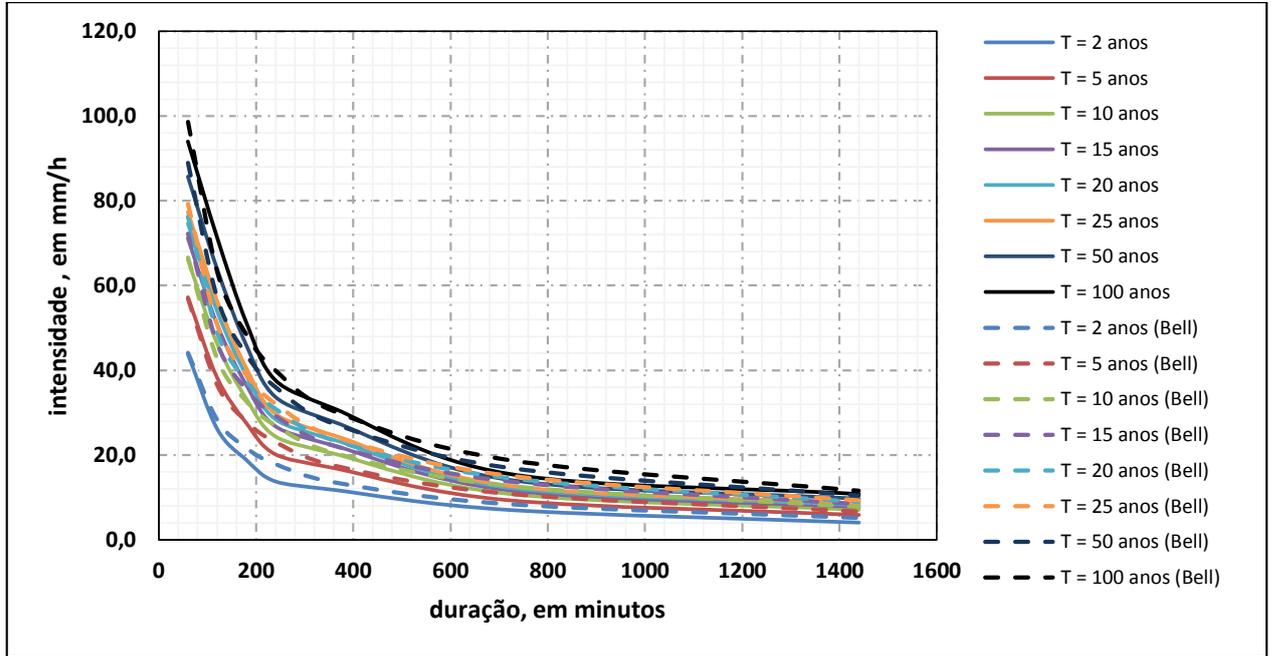


Figura 4.12 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Righetto (1998)

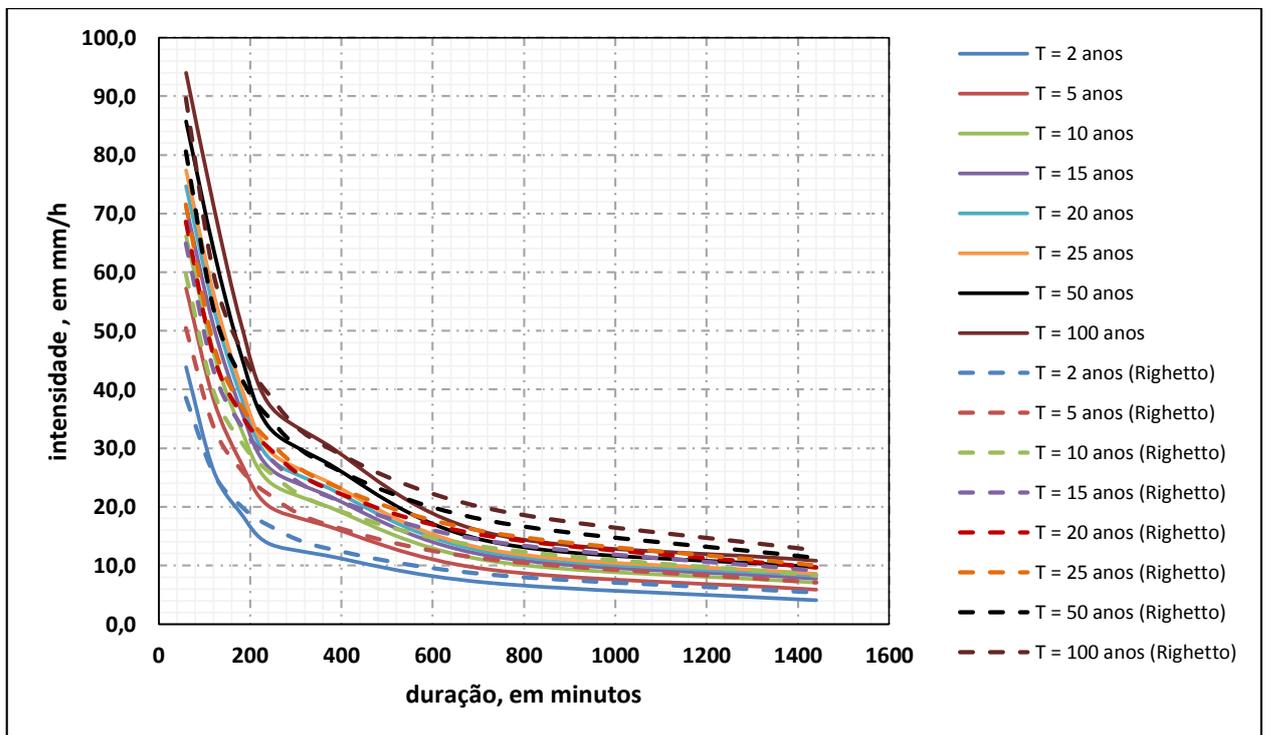


Figura 4.13 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Chen (1983)

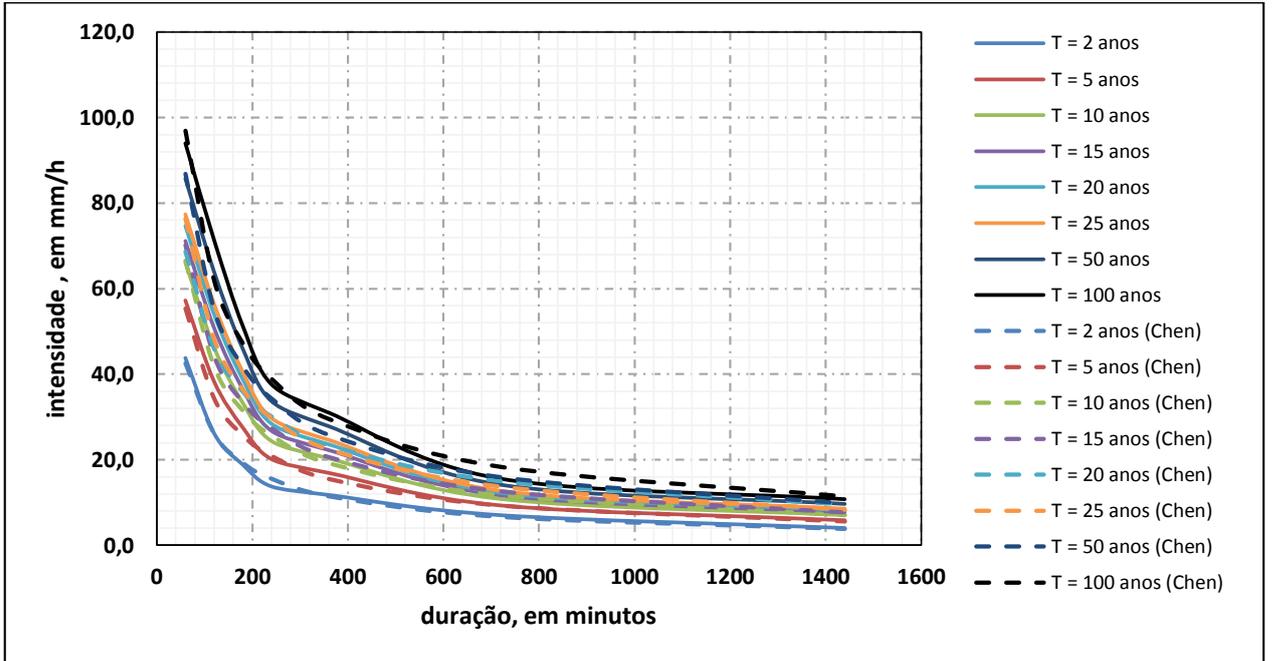


Figura 4.14 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método de Isozonas

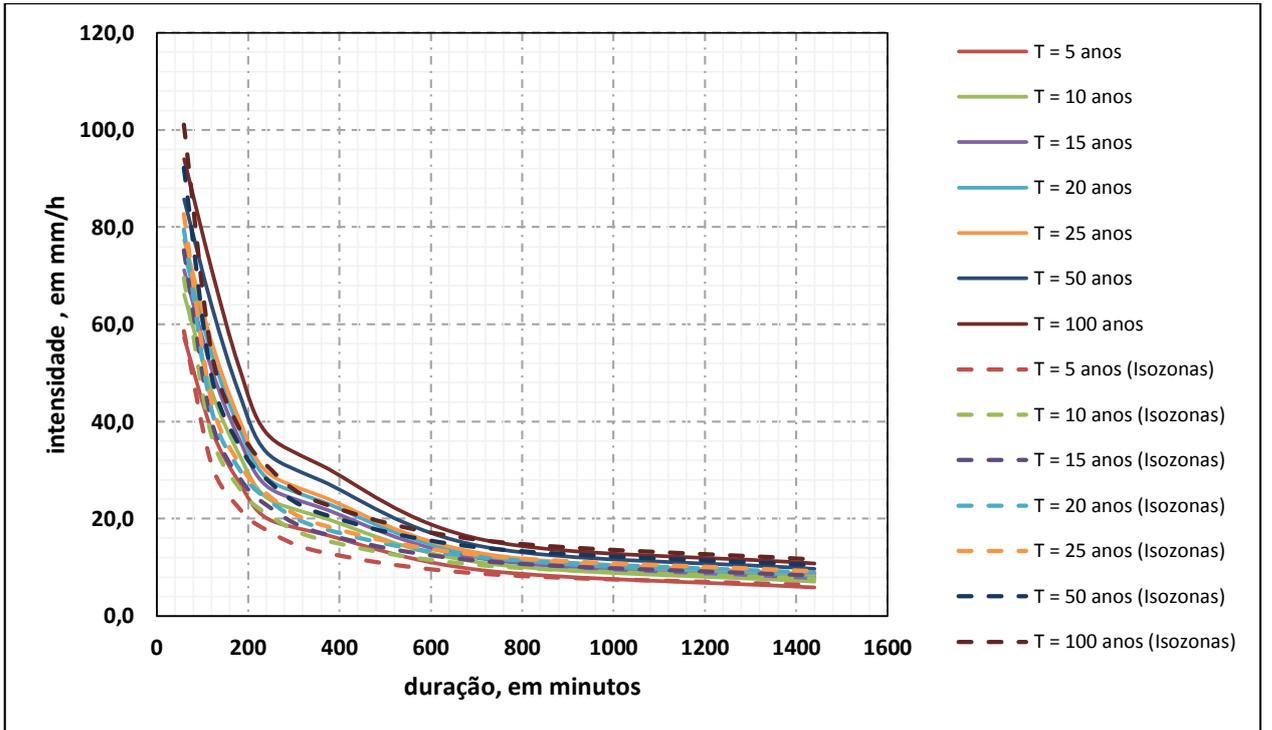


Figura 4.15 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o Método das Relações (CETESB, 1979)

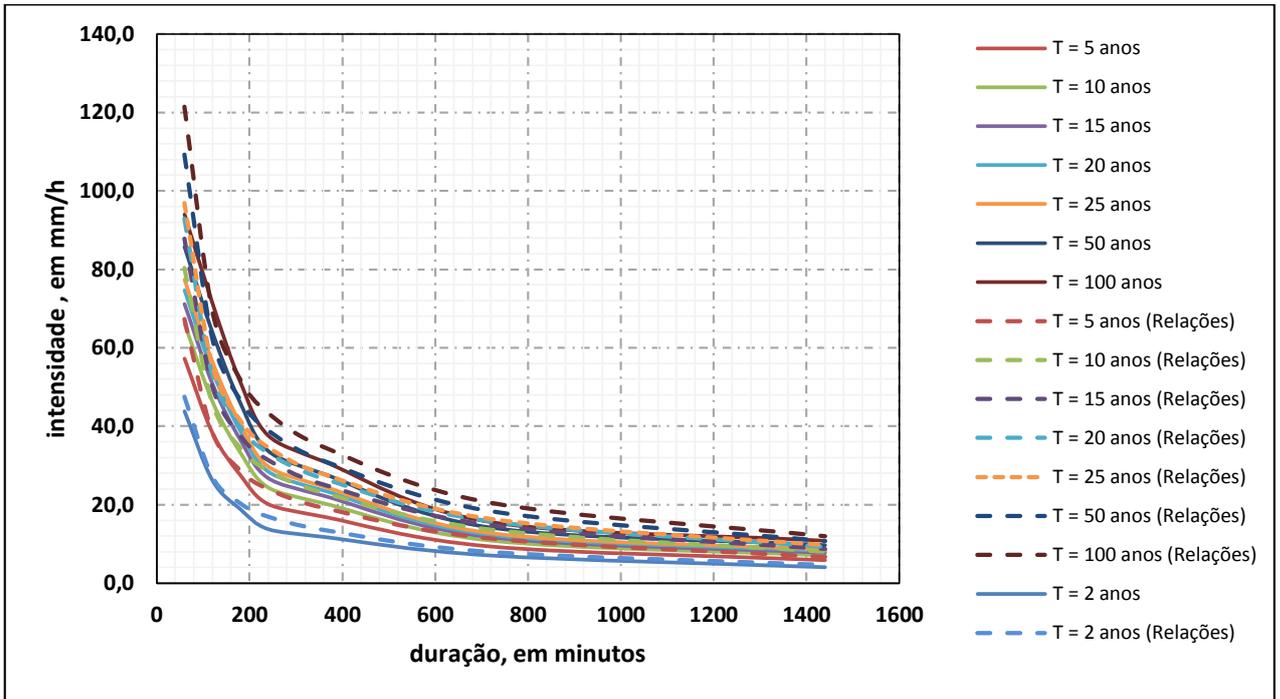
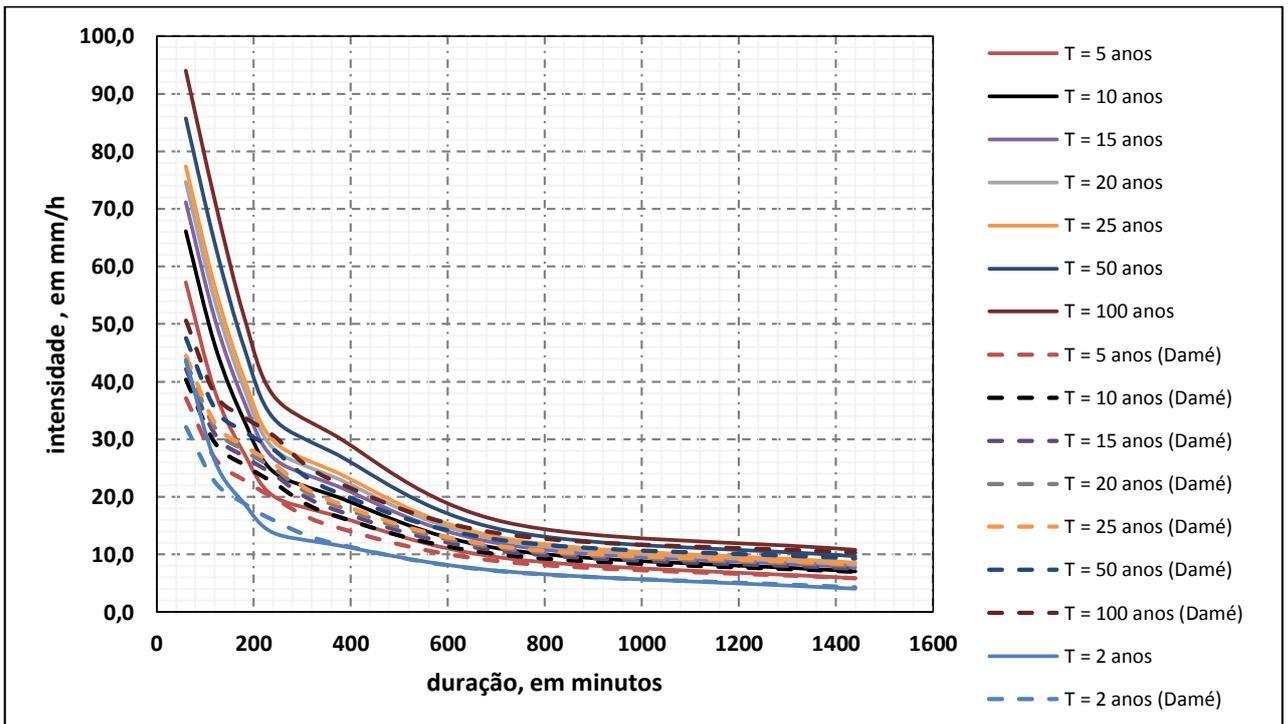


Figura 4.16 - Comparação entre a relação intensidade calculado com dados observados e o modelo BLPRM (DAMÉ, 2001)



Os resultados do teste “t” aplicados aos coeficientes linear e angular para cada um dos métodos de desagregação estudados são apresentados na Tabela 4.36 e no APENDICE D estão mostrados graficamente.

Observa-se na Tabela 4.36 que para qualquer período de retorno o teste $t(\beta_1)$ para o Modelo BLPRM (Damé), a hipótese de nulidade deixou de ser aceita. Assim há evidência para diferença significativa entre os valores de intensidades máximas históricas (estação automática da UFAL) e os valores de intensidades máximas, obtida mediante este modelo. O que, possivelmente, dever ter ocorrido é que a série de dados utilizada para determinação dos parâmetros do modelo foi curta.

Percebe-se na Tabela 4.36 que o método de Bell (1969), Chen (1983), método das Relações (CETESB, 1979) e das Isozonas, para todos os períodos de retorno, a hipótese de nulidade foi aceita, visto que não houve diferença significativa, a 5% de probabilidade, e portanto, as quatro metodologias estudadas são consideradas adequadas para a obtenção das curvas IDF para a cidade de Maceió, uma vez que a hipótese de nulidade foi aceita.

Considerando os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15 e 20 anos, o teste $t(\beta_1)$ indicou que o método de Righetto (1998) apresentou diferenças significativas a 5% de probabilidade quando comparado com os valores históricos (estação automática da UFAL).

Tabela 4.36 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h⁻¹) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL, pelo Método das Relações (CETESB, 1979), BELL (1969), RIGHETTO (1998), CHEN (1983), Método das Isozonas e DAMÉ (2001), para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos.

Tempo de Retorno (anos)	Método	β_0	β_1	$t(\beta_0)$	$t(\beta_1)$
2	Bell (1969)	2,4387	0,9730	2,5036	-0,6222
	Righetto (1998)	3,5416	0,8260	3,3546	-3,7058
	Chen (1983)	0,5587	0,9692	0,7853	-0,9721
	Isozonas	-	-	-	-
	Método das Relações	0,8373	1,0557	1,1027	1,6488
	Modelo BLPRM (Damé)	3,7903	0,6865	2,3151	-4,3064
5	Bell (1969)	1,7856	0,9521	1,8544	-1,5779
	Righetto (1998)	3,4575	0,8216	3,7902	-6,2076
	Chen (1983)	0,1317	0,9446	0,1321	-1,7629
	Isozonas	-2,1873	0,9907	-0,8769	-0,1186
	Método das Relações	-0,2458	1,1268	-0,1219	1,9964

Tempo de Retorno (anos)	Método	β_0	β_1	$t(\beta_0)$	$t(\beta_1)$
	Modelo BLPRM (Damé)	4,6635	0,5893	2,8406	-7,9392
10	Bell (1969)	1,5270	0,9562	1,0920	-1,2068
	Righetto (1998)	3,5251	0,8337	2,6199	-4,3908
	Chen (1983)	0,2043	0,9702	0,1163	-0,6032
	Isozonas	-2,9599	1,0019	-0,7406	0,0169
	Método das Relações)	-0,8406	1,1516	-0,2435	1,5602
	Modelo BLPRM (Damé)	5,4081	0,5450	2,6922	-8,0449
15	Bell (1969)	1,4104	0,9598	0,8340	-1,0083
	Righetto (1998)	3,6279	0,8405	2,1331	-3,5418
	Chen (1983)	0,3587	0,9405	0,1619	-1,0151
	Isozonas	-3,3102	1,0009	-0,6688	0,0068
	Método das Relações	-1,2017	1,1630	-0,2741	1,4047
	Modelo BLPRM (Damé)	5,8600	0,5247	2,5944	-7,9491
20	Bell (1969)	1,3377	0,9625	0,7024	-0,8913
	Righetto (1998)	3,6835	0,8445	1,8546	-3,0833
	Chen (1983)	0,1638	0,9401	0,0620	-0,8940
	Isozonas	-3,5761	1,0024	-0,6290	0,0169
	Método das Relações	-1,4272	1,1689	-0,2781	1,2963
	Modelo BLPRM (Damé)	6,1860	0,5120	2,5234	-7,8388
25	Bell (1969)	1,2858	0,9645	0,6207	-0,8127
	Righetto (1998)	3,7712	0,8469	1,6665	-2,7488
	Chen (1983)	0,0642	0,9387	0,0219	-0,8485
	Isozonas	-3,7647	1,0025	-0,5996	0,0161
	Método das Relações	-1,6109	1,1727	-0,2830	1,2335
	Modelo BLPRM (Damé)	6,4422	0,5030	2,4684	-7,7378
50	Bell (1969)	1,1443	0,9702	0,4409	-0,6213
	Righetto (1998)	3,9857	0,8566	1,2624	-2,0251
	Chen (1983)	0,2686	0,9520	0,0654	-0,5210
	Isozonas	-4,2625	0,9979	-0,5167	-0,0114
	Método das Relações	-2,0968	1,1832	-0,2717	1,0579
	Modelo BLPRM (Damé)	7,2498	0,4790	2,3037	-7,3788
100	Bell (1969)	1,0251	0,9750	0,3284	-0,4873
	Righetto (1998)	4,1288	0,8649	0,9710	-1,5429
	Chen (1983)	0,7739	0,9582	0,1445	-0,3791
	Isozonas	-4,6382	0,9880	-0,4459	-0,0559
	Método das Relações	-2,5379	1,1907	-0,2534	0,9250
	Modelo BLPRM (Damé)	8,0733	0,4594	2,1520	-6,9980

β_0 e β_1 : coeficientes linear e angular do ajuste linear; $t_{\text{tab}} (5 \%) = 2,776$; Probabilidade: 5%.

Os valores do Erro Relativo Médio Quadrático (RMS), encontrados na Tabela 4.37, indicam que o método de Chen (1983) foi o que apresentou maior aproximação para todos os tempos de retorno, quando comparados com os demais, valor percentual médio de 7,38%. Isto comprova a análise das variações (Tabela 4.35), como já exposto acima. O segundo método que apresentou uma boa precisão foi o proposto por Bell (1969), valor percentual médio de 10,74%. O método que apresentou maior Erro Relativo Médio Quadrático (RMS) foi o modelo de BLPRM (Damé).

Tabela 4.37 - Valores de erro relativo médio quadrático (RMS) dos dados de intensidade máxima de precipitação obtidos pelos métodos utilizados, comparados aos dados observados

Tempo de Retorno (anos)	Bell (1969)	Righetto (1980)	Chen (1983)	Isozonas	Método das Relações	Modelo BLPRM (Damé)
	RMS (%)	RMS (%)	RMS (%)	RMS (%)	RMS (%)	RMS (%)
2	19,10%	18,27%	5,83%	-	13,97%	13,09%
5	10,03%	13,10%	6,23%	14,39%	14,95%	19,44%
10	9,15%	12,69%	5,95%	15,21%	15,98%	23,42%
15	9,16%	12,84%	7,25%	15,78%	16,39%	25,25%
20	9,25%	12,86%	7,80%	16,05%	16,77%	26,38%
25	9,35%	13,10%	8,18%	16,27%	16,85%	27,17%
50	9,73%	13,51%	8,35%	17,00%	17,65%	29,28%
100	10,13%	13,78%	9,45%	17,77%	18,38%	30,98%
Médio	10,74%	13,77%	7,38%	16,07%	16,37%	24,38%

Também foi aplicado uma análise pelo coeficiente de determinação R^2 , razão dos desvios – RD, e o coeficiente de massa residual – CMR, como apresentados na Tabela 4.38. Como citado neste estudo, o coeficiente de determinação (R^2) representa o grau de associação entre duas variáveis, ou seja, é a medida da relação linear entre os valores do ajuste e da nova equação. Quanto mais próximo de 1 (um) melhor é esta relação. A razão de desvios (RD) descreve a razão entre a dispersão dos valores ajustados pela distribuição e os calculados pela nova equação, tendendo a 1 (um), quando há igualdade entre estes valores. O coeficiente de massa residual (CMR) tende a 0 (zero), na ausência de desvios sistemáticos entre os valores observados e calculados.

Tabela 4.38 - Comparativo pelo coeficiente de determinação R², razão dos desvios – RD, e o coeficiente de massa residual – CMR.

Tempo de Retorno (anos)	Bell (1969)			Righetto (1980)			Chen (1988)			Isozonas			Método das Relações (CETESB, 1979)			Modelo BLPRM (DAMÉ, 2001)		
	R ²	RD	CMD	R ²	RD	CMD	R ²	RD	CMD	R ²	RD	CMD	R ²	RD	CMD	R ²	RD	CMD
2	0,992	0,954	-0,109	0,987	0,691	-0,023	0,996	0,943	0,000	-	-	-	0,996	1,119	-0,102	0,957	0,492	0,102
5	0,995	0,911	-0,023	0,994	0,679	0,040	0,995	0,897	0,050	0,971	1,011	0,097	0,985	1,289	-0,117	0,965	0,360	0,225
10	0,992	0,922	-0,007	0,993	0,700	0,048	0,991	0,950	0,023	0,958	1,048	0,098	0,976	1,359	-0,123	0,964	0,308	0,273
15	0,990	0,931	-0,003	0,980	0,713	0,048	0,989	0,895	0,048	0,952	1,053	0,101	0,971	1,393	-0,126	0,963	0,286	0,295
20	0,988	0,937	-0,001	0,991	0,720	0,048	0,987	0,896	0,055	0,947	1,061	0,102	0,968	1,412	-0,127	0,962	0,273	0,308
25	0,987	0,943	0,000	0,989	0,725	0,103	0,985	0,894	0,059	0,944	1,065	0,103	0,966	0,000	-0,128	0,961	0,263	0,317
50	0,983	0,958	0,001	0,986	0,744	0,044	0,981	0,923	0,041	0,935	0,923	0,108	0,959	1,460	-0,131	0,958	0,240	0,340
100	0,979	0,971	0,002	0,983	0,761	0,042	0,978	0,938	0,024	0,928	0,938	0,116	0,953	1,489	-0,134	0,955	0,221	0,359
Médio	0,988	0,941	-0,018	0,988	0,717	0,044	0,988	0,917	0,038	0,948	1,014	0,103	0,972	1,190	-0,124	0,961	0,305	0,277

Percebe-se, na Tabela 4.38, que os valores do coeficiente de determinação médio (R^2) para os Métodos de Bell (1969), Righetto (1998) e Chen (1983), apresentaram valores iguais e muito próximo de 1 (um), o que mostra uma associação bastante significativa entre esses métodos com os dados das curvas IDF gerado por dados observados. A razão de desvios (RD) que apresentou valores mais próximo de 1 (um) foi o método das Isozonas seguido da metodologia de Bell (1969) e Chen (1983). Estas duas últimas metodologias apresentaram também o coeficiente de massa residual (CMR) mais próximo de 0 (zero).

Na Tabela 4.38 a análise somente foi feita com os tempos de retornos. Na Tabela 4.39 são apresentados a análise dos coeficientes de determinação R^2 , razão dos desvios – RD , e o coeficiente de massa residual – CMR para tempos de retornos e durações simultaneamente.

Tabela 4.39 - Comparativo pelo coeficiente de determinação R^2 , razão dos desvios – RD , e o coeficiente de massa residual – CMR considerando tempos de retorno e durações

Método de obtenção de Chuvas Intensas	R^2	RD	CMD
Bell (1969)	0,9875	0,9356	-0,0108
Righetto (1980)	0,9889	0,7409	0,0408
Chen (1988)	0,9865	0,9156	0,0395
Isozonas	0,9487	1,0138	0,1046
Método das Relações (CETESB, 1979)	0,9691	1,3997	-0,1257
Modelo BLPRM (DAMÉ, 2001)	0,9545	0,2690	0,2950

Observa-se na Tabela 4.39 que os valores dos coeficientes de determinação (R^2) para os Métodos de Bell (1969), Righetto (1998) e Chen (1983), foram praticamente iguais ao da Tabela 4.35, ambos apresentaram valores iguais e muito próximo de 1 (um). A razão de desvios (RD) que obteve valores mais próximo de 1 (um) foram os métodos de Bell (1969), Chen(1983) e Isozonas. Os valores de coeficiente de massa residual (CMR) foram mais perto de 0 (zero) para os Métodos de Bell (1969), Righetto (1998) e Chen (1983).

Em análise a todas as metodologias apresentadas neste estudo, verificou-se que para o coeficiente de determinação (R^2), os Métodos de Bell (1969), Righetto (1998) e Chen (1983) foram os que apresentaram melhor grau de explicação ou associação quando comparados com a relação IDF obtidas de dados observados. Estes resultados confirmam o estudo de Santos *et al* (2017) que aplicaram as Equações 2.3 e 2.4, do método de Bell, com dados de curvas IDF que são utilizadas nas capitais do Nordeste do Brasil. Eles perceberam que estas equações

apresentaram coeficiente de determinação (R^2) de 0,996 e 0,979 quando comparado com as curvas IDF utilizadas na cidade de Maceió, estado de Alagoas.

Estes três métodos também apresentaram o coeficiente de massa residual (CMR) perto de 0 (zero). Entretanto, os Métodos de Bell (1969) e Chen (1983) foram os que apresentaram a razão de desvios (RD) com os melhores resultados, próximo de 1 (um).

Deste modo, as metodologias que representaram a amostra de dados de intensidade máxima de precipitação para localidade de Maceió, nos períodos de retorno especificados e com durações de 60, 120, 180, 240, 360, 720 e 1440 foram a metodologia de Bell (1969) e Chen (1983) quando analisou os coeficientes de determinação (R^2), razão dos desvios (RD), e o de massa residual (CMR).

Entretanto, analisando estes dois métodos, observou-se na Tabela 4.35 e nas Figuras 4.11 a 4.16 que a variação dos maiores desvios relativos para cada tempo de retorno apareceram na metodologia de Bell (1969) em relação a de Chen (1983). Isto foi comprovado quando foi estimado o Erro Relativo Médio Quadrático (RMS) (Tabela 4.37), onde foi demonstrado que o método de Chen (1983) obteve o maior grau de precisão quando comparado com as outras metodologias.

Assim, para este estudo, considerou-se que a metodologia de Chen (1983) é a que mais se adequa aos dados de intensidade máxima de precipitação para localidade de Maceió.

4.6 Uma Nova Equação de Chuvas Intensas para Maceió

Neste estudo foi apresentado na seção 2.3 que a cidade de Maceió possui duas curvas IDF. A primeira de Otto Pfafstetter, 1957 (PFAFSTETTER, 1982). A segunda, mais recente, é a de Denardin e Freitas (1982), com base em 80 (oitenta) estações pluviográficas.

Entretanto estudos recentes (seção 2.2 desta pesquisa) mostraram que as curvas IDF não são estacionárias. As mudanças climáticas afetam diretamente os eventos de chuvas máximas, causando mudanças nas IDF. Deste modo, buscou-se estimar uma Nova Equação de Chuvas Intensas para Maceió baseados nos dados e nas metodologias deste trabalho.

Na Tabela 4.4 foi determinada a intensidade de precipitação máxima calculada pelo método de distribuição de probabilidade de Gumbel baseados nos dados horários da estação automática da UFAL. O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov comprovou o ajuste da distribuição aos dados. Entretanto percebe-se na Tabela 4.4 que a relação IDF está estimada

para duração acima de 60 minutos. Mesmo assim ajustou-se matematicamente a Equação 3.2 e foi gerada uma Nova Equação de Chuvas Intensas (Equação 4.1) com duração acima de 60 minutos que pode representar a região de Maceió.

Nestas condições, as curvas IDF geradas pela Equação 4.1 só servem para durações aplicadas em atividades relacionadas à macrodrenagem. Entretanto quando se precisar de dados de intensidade máxima de precipitação para durações inferiores a 60 minutos a Equação 4.1 se tornará ineficaz.

Na seção anterior (seção 4.5) deste trabalho, discutiu-se a validação de diferentes métodos de obtenção da relação intensidade-duração-frequência (IDF) que representasse os dados da Tabela 4.4 (curvas IDF obtidas por dados horários observados, histórico). Desta análise percebeu que o método de Chen (1983) foi o mais representativo.

Assim a Nova Equação de Chuvas Intensas para a cidade de Maceió foi composta de dados de relação intensidade-duração-frequência (IDF) da Tabela 4.4 com duração acima 60 minutos, e de dados de relação intensidade-duração-frequência (IDF) obtida pelo método de Chen (1983) (Tabela 4.33).

A Tabela 4.40 demonstra a intensidade máxima de precipitação com base na relação intensidade-duração-frequência (IDF) da Tabela 4.4 e do método de Chen (1983) (Tabela 4.33).

Tabela 4.40 - Intensidade máxima de precipitação, em mm/h, obtida pela distribuição de Gumbel e pelo Método de Chen (1983)

Duração (min)	Tempo de Retorno (anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	148,4	194,9	232,4	244,3	256,7	266,2	301,8	335,0
10	116,7	151,7	180,5	189,4	199,0	206,4	233,6	258,7
15	97,2	125,7	149,7	157,0	165,0	171,1	193,6	214,4
20	83,8	108,2	129,0	135,3	142,2	147,5	166,9	184,9
30	66,4	85,8	102,6	107,7	113,2	117,4	132,9	147,6
60	43,8	57,2	66,1	71,2	74,7	77,4	85,7	94,0
120	26,2	38,3	46,3	50,8	54,0	56,4	63,9	71,4
180	18,9	27,6	33,3	36,5	38,8	40,6	46,0	51,3
240	13,8	20,2	24,4	26,8	28,5	29,7	33,7	37,6
360	11,8	16,9	20,3	22,3	23,6	24,6	27,8	31,0
720	7,1	9,3	10,8	11,7	12,3	12,7	14,2	15,6
1440	4,1	5,9	7,1	7,7	8,2	8,6	9,7	10,8

O ajuste da Equação 3.2 aos dados de intensidade máxima de precipitação seguiu-se a mesma metodologia da seção 3.2.4, e como resultado na seção 4.1 deste estudo. Buscou-se traçar as curvas intensidade-duração-frequência (IDF) (Figura 4.17), a partir dos valores da Tabela 4.40. Em seguida procede-se a linearização destas curvas IDF (Figura 4.18).

Figura 4.17 - Curvas intensidade x duração x frequência a partir dos valores da Tabela 4.40

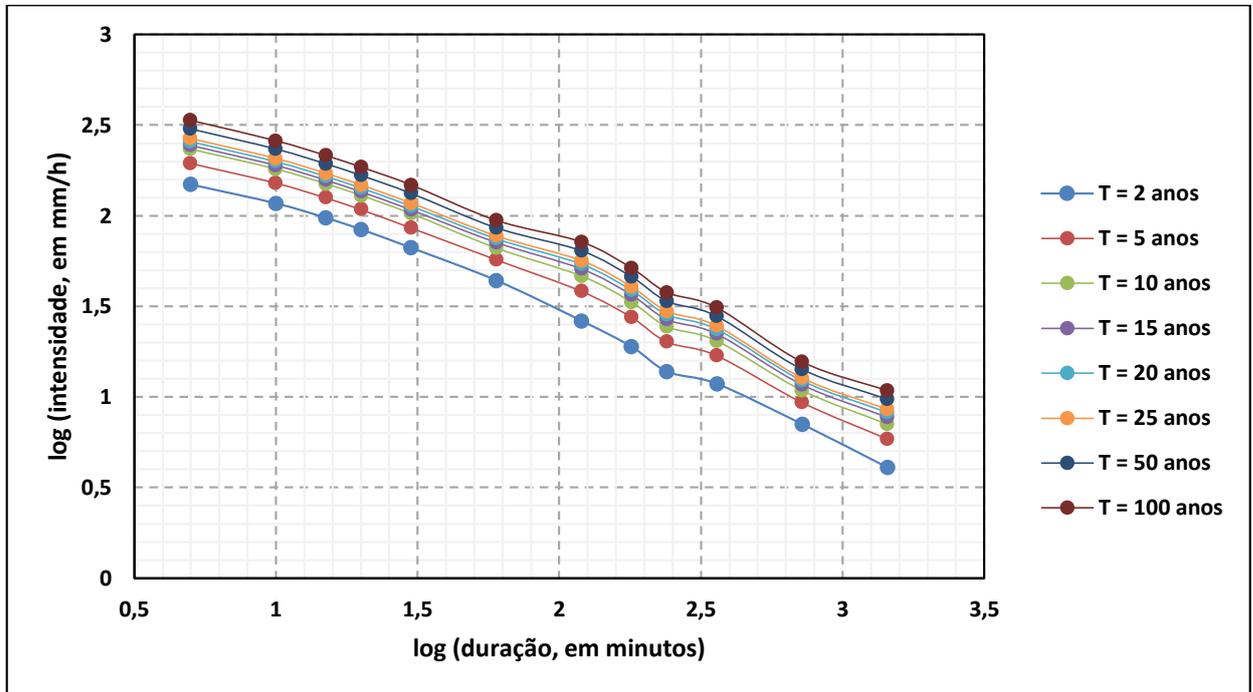
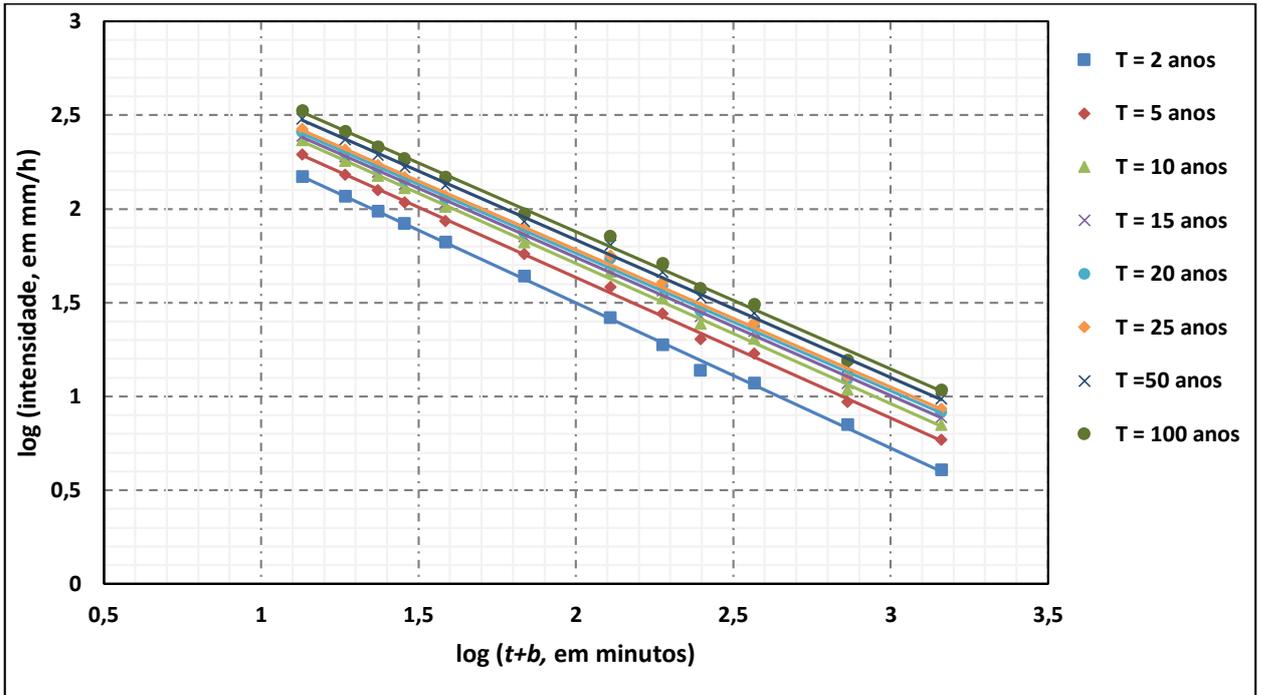


Figura 4.18 - Retas de regressão resultantes do processo de anamorfose das curvas intensidade x duração x frequência



Para determinar os parâmetros k e m , foi gerado um gráfico (Figura 4.19) cuja abcissa foi definida pelos valores resultantes do logaritmo dos períodos de retorno e cuja ordenada recebeu os valores de $\log a$ gerados como coeficientes lineares das retas de regressão da Figura 4.18.

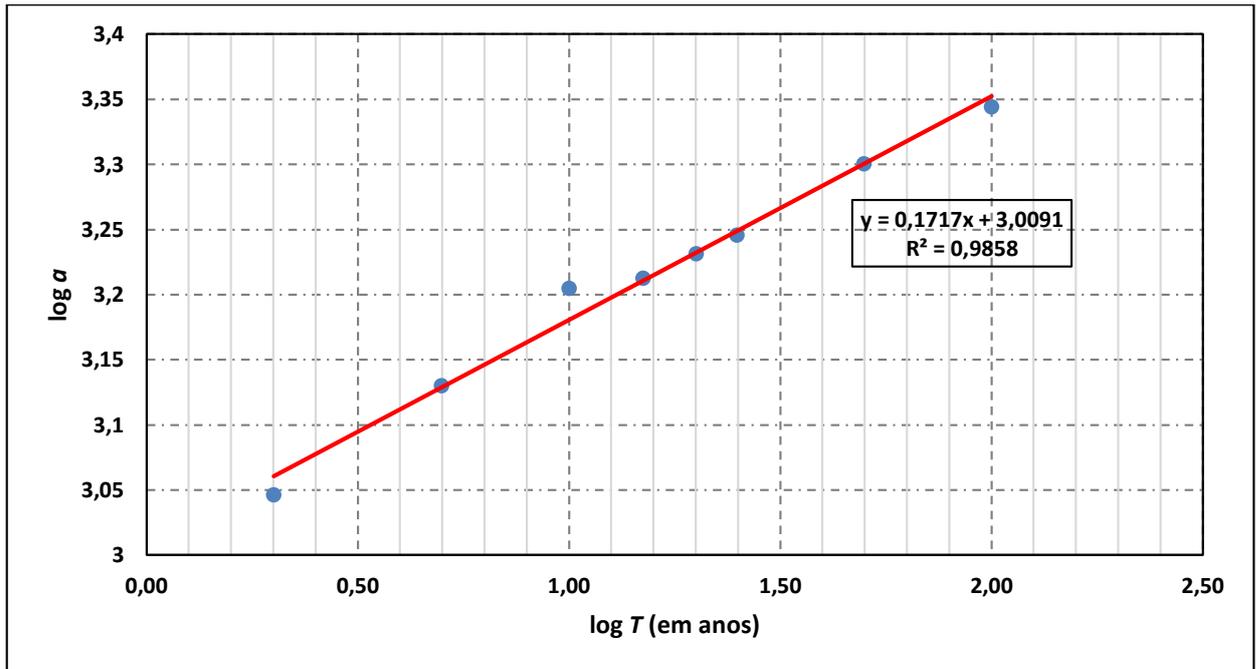
Com o traçado de uma reta de regressão linear pelos pontos traçados (Figura 4.19), adquiriu-se uma equação cujo o coeficiente linear corresponde ao logaritmo do parâmetro k e o coeficiente angular corresponde ao parâmetro m .

Os parâmetros k , m , b e n determinados para Equação de Chuvas Intensas com os dados horários da estação automática da UFAL estão apresentados na Tabela 4.41.

Tabela 4.41 - Parâmetros determinados para Nova Equação de Chuvas Intensas da cidade de Maceió

k	1.012,17
m	0,1717
b	8,5
n	0,7423

Figura 4.19 - Regressão linear que dá origem aos parâmetros K e m



Assim, a Nova curva IDF para a cidade de Maceió ficou com a seguinte forma:

$$\hat{i} = \frac{1.021,17T^{0,1717}}{(t+8,5)^{0,7423}} \quad (4.2)$$

As intensidades de precipitação máxima, para cada duração e período de retorno considerados, obtidas através desta equação estão apresentadas na Tabela 4.42, como também os parâmetros estatísticos utilizados para comparar os valores da intensidade da Tabela 4.40 aos determinados pela Nova Equação para cidade de Maceió.

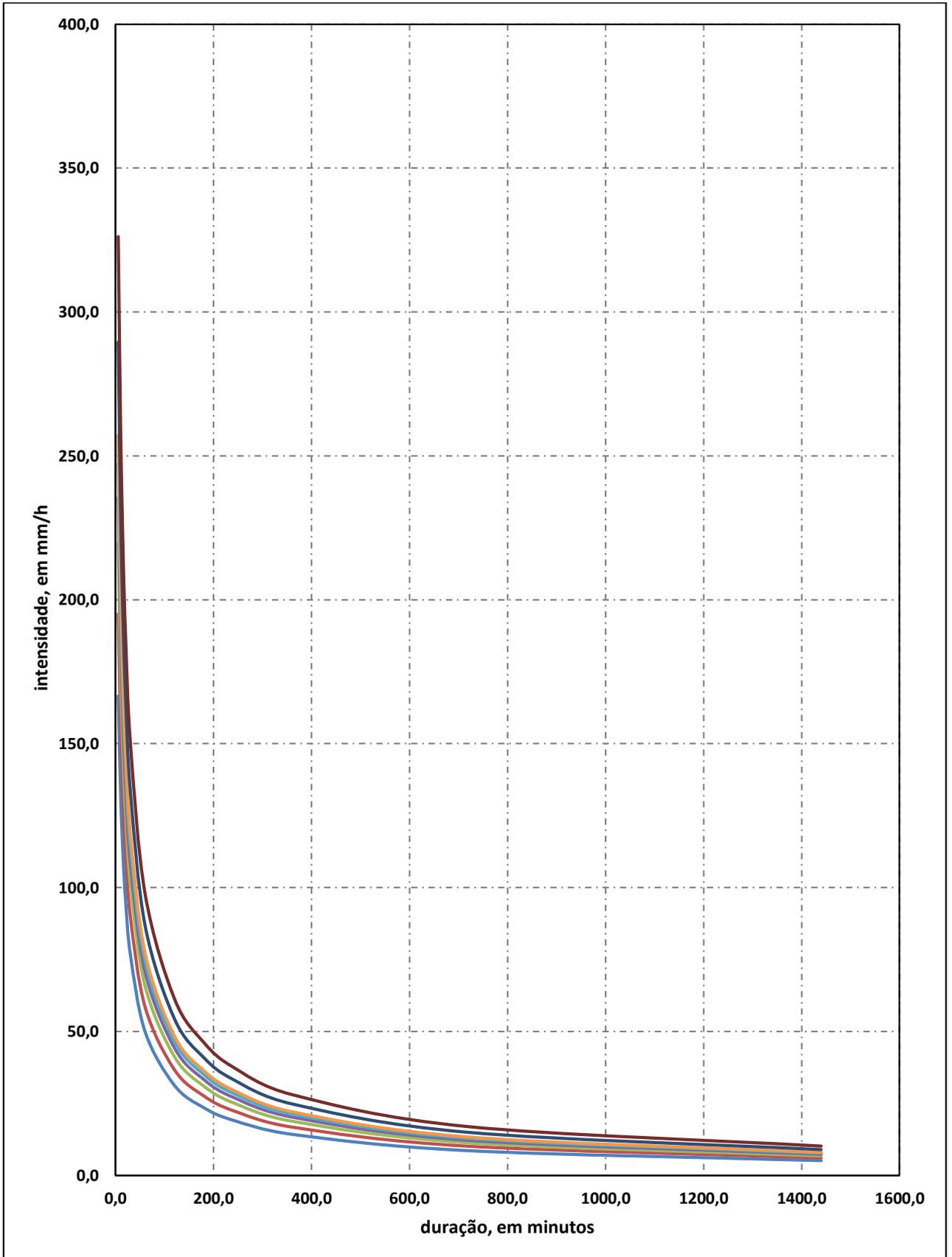
Tabela 4.42 - Intensidade de precipitação máxima em mm/h calculada pela Nova Equação de Chuvas Intensas

Duração (minutos)	Tempo de Retorno (ano)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	166,6	195,0	219,7	235,5	247,4	257,1	289,6	326,2
10	131,9	154,3	173,9	186,4	195,8	203,5	229,2	258,2
15	110,4	129,2	145,6	156,1	164,0	170,4	191,9	216,1
20	95,7	112,0	126,1	135,2	142,1	147,6	166,3	187,3
30	76,5	89,6	100,9	108,2	113,7	118,1	133,0	149,8
60	49,9	58,4	65,8	70,5	74,1	77,0	86,7	97,7
120	31,3	36,6	41,2	44,2	46,5	48,3	54,4	61,2
180	23,5	27,6	31,0	33,3	35,0	36,3	40,9	46,1
240	19,2	22,4	25,3	27,1	28,5	29,6	33,3	37,5
360	14,3	16,8	18,9	20,2	21,3	22,1	24,9	28,0
720	8,6	10,1	11,4	12,2	12,8	13,3	15,0	16,9
1440	5,2	6,1	6,8	7,3	7,7	8,0	9,0	10,1
Parâmetros Estatísticos de Ajuste:			R² = 0,996		RD = 0,9697		CMD = - 0,0067	

As curvas intensidade-duração-frequência (IDF) geradas pela Nova Equação de Chuvas Intensas para Maceió, por fim, é apresentada na Figura 4.20.

Os resultados obtidos por essa Nova Equação de Chuvas Intensas foram comparados a resultados obtidos pela equação de Pfafstetter (1957) e pela equação de Denardin e Freitas (1982) para a cidade de Maceió. É considerável destacar que os períodos utilizados para a obtenção de cada Equação de Chuva desenvolvida para a cidade de Maceió são bastante diferentes.

Figura 4.20 - Curvas intensidade-duração-frequência gerada pelo Nova Equação de Chuvas Intensas para Maceió



Na Tabela 4.43 encontram-se os desvios relativos entre os valores calculados pela Nova Equação para Maceió e os calculados pela equação de Pfafstetter, e na Tabela 4.44 os calculados pela equação de Denardin e Freitas. Através da análise, tanto da Tabela 4.43 como da Tabela 4.44, verificou-se que as intensidades de precipitação obtidas pela Nova Equação de Chuvas Intensas produz valores mais distantes das equações acima citadas nas durações até 30 minutos, até 54% maiores do que as obtidas pela equação de Pfafstetter e 48% maiores do que as obtidas por Denardin e Freitas.

Tabela 4.43 - Variação entre as curvas IDF calculadas pela Nova Equação e as calculadas pela equação de Pfafstetter

Duração (minutos)	Tempo de retorno (ano)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	40,4%	43,8%	46,2%	47,6%	48,5%	49,3%	51,5%	53,6%
10	37,9%	40,4%	42,4%	43,5%	44,3%	45,0%	47,0%	49,0%
15	35,8%	37,4%	39,1%	40,1%	40,8%	41,4%	43,3%	45,3%
20	34,1%	35,0%	36,2%	37,0%	37,7%	38,2%	39,9%	41,8%
30	31,2%	30,7%	31,1%	31,6%	32,0%	32,4%	33,8%	35,4%
60	23,0%	16,2%	13,4%	12,5%	12,2%	12,1%	12,5%	13,8%
120	20,8%	12,9%	9,3%	8,1%	7,7%	7,3%	7,1%	7,6%
180	19,8%	11,9%	7,8%	6,5%	5,9%	5,3%	4,8%	5,3%
240	19,5%	10,7%	6,8%	5,1%	4,4%	3,8%	2,9%	3,0%
360	19,0%	10,7%	6,4%	4,4%	3,9%	3,2%	2,4%	2,3%
720	18,4%	9,9%	5,9%	4,0%	3,0%	2,5%	1,8%	1,9%
1440	17,9%	9,7%	4,8%	3,4%	3,1%	2,7%	2,0%	2,1%

Essas variações se devem, provavelmente, aos períodos de dados considerados que originaram estas últimas equações e as possíveis mudanças na precipitação já ocorridas devido às mudanças climáticas ou até mudanças no balanço energético devido à evolução das superfícies que ocorrem com a urbanização na cidade. Assim demonstram que a utilização das equações de Pfafstetter e de Denardin e Freitas deve ser revista, sobretudo para tempos de concentração menores típicos de microdrenagem.

As Figuras 4.21 a 4.28 apresentam graficamente as citadas equações desenvolvidas para a região em estudo, em curvas intensidade-duração, para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos.

Tabela 4.44 - Variação entre as curvas IDF calculadas pela Nova Equação e as calculadas pela equação de Denardin e Freitas

Duração (minutos)	Tempo de retorno (ano)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
5	47,7%	42,2%	37,7%	34,9%	32,9%	31,2%	25,9%	20,1%
10	46,4%	40,8%	36,2%	33,4%	31,2%	29,6%	24,1%	18,2%
15	45,0%	39,3%	34,6%	31,7%	29,5%	27,8%	22,1%	16,0%
20	43,7%	37,9%	33,0%	30,0%	27,8%	26,0%	20,3%	14,0%
30	41,3%	35,3%	30,2%	27,1%	24,8%	22,9%	16,9%	10,4%
60	36,0%	29,3%	23,8%	20,3%	17,8%	15,8%	9,2%	2,2%
120	28,9%	21,4%	15,3%	11,5%	8,8%	6,6%	-0,7%	-8,7%
180	23,9%	16,2%	9,5%	5,6%	2,6%	0,1%	-7,7%	-16,0%
240	20,3%	11,8%	5,1%	0,8%	-2,3%	-4,8%	-13,1%	-22,0%
360	14,4%	5,8%	-1,7%	-6,6%	-9,5%	-12,4%	-21,1%	-30,8%
720	3,0%	-6,8%	-14,9%	-20,2%	-24,2%	-27,2%	-37,0%	-47,6%
1440	-9,1%	-20,2%	-30,9%	-36,6%	-40,4%	-43,8%	-55,2%	-67,9%

Figura 4.21 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 2 anos

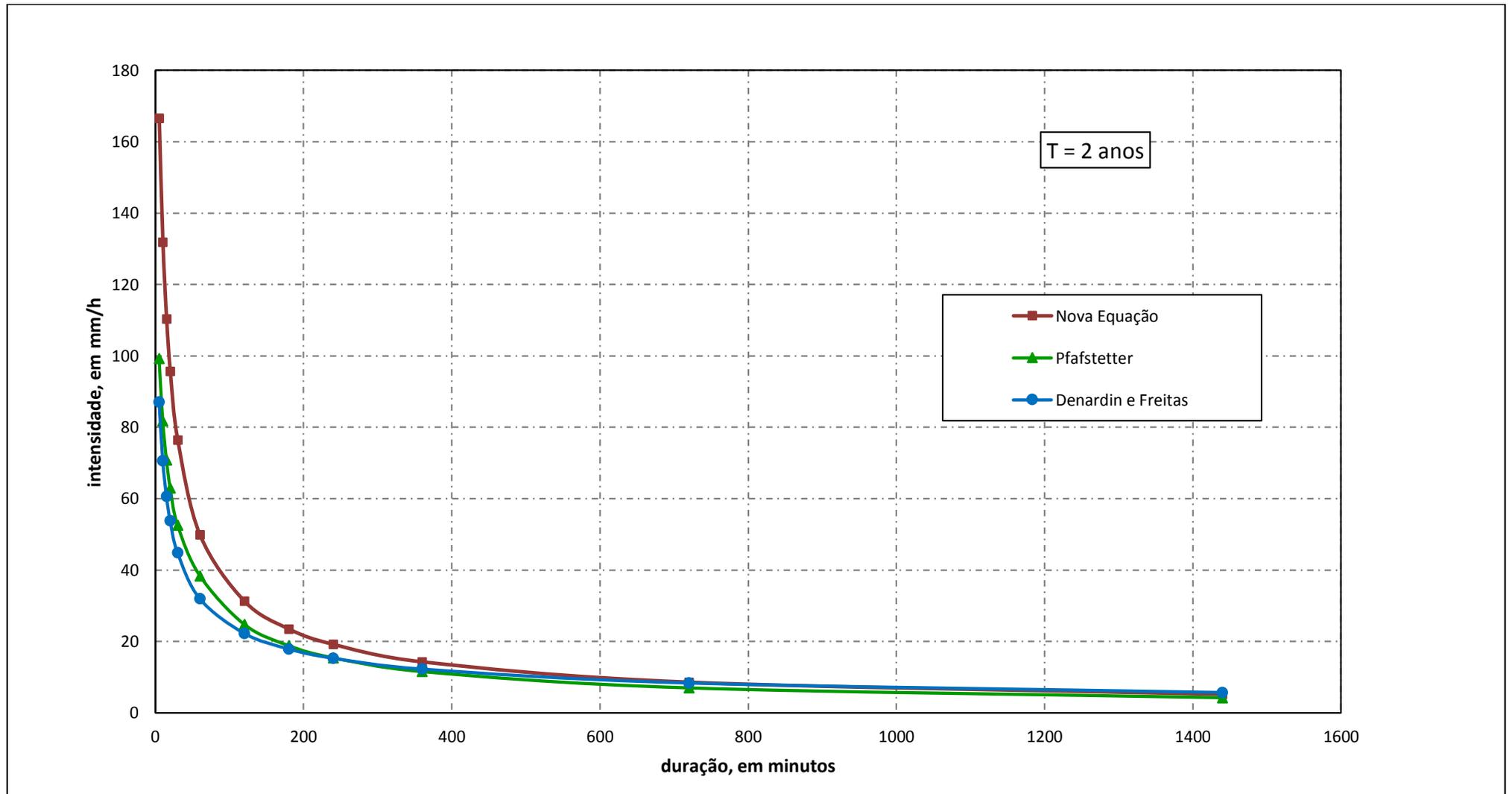


Figura 4.22 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 5 anos

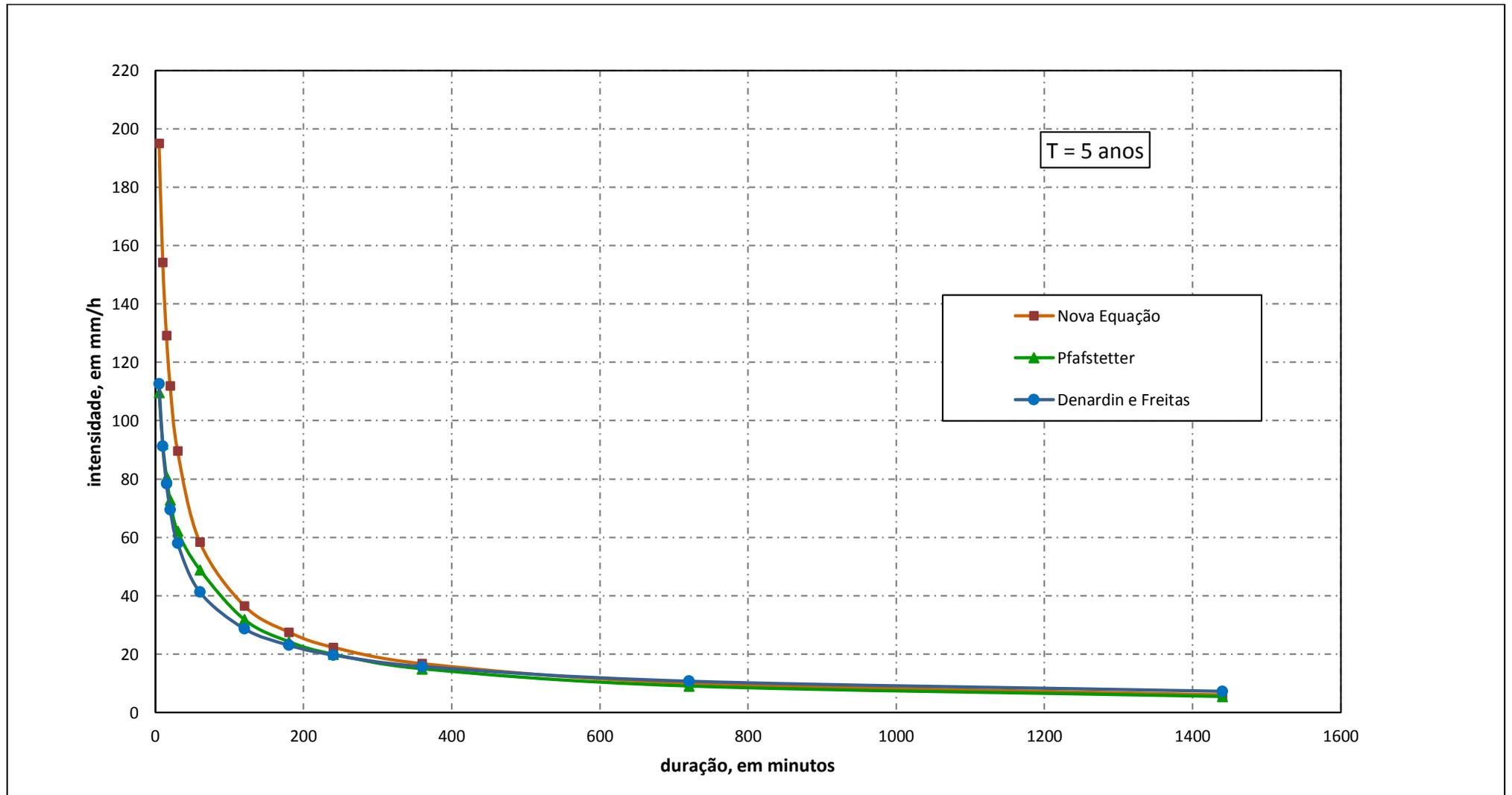


Figura 4.23 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 10 anos

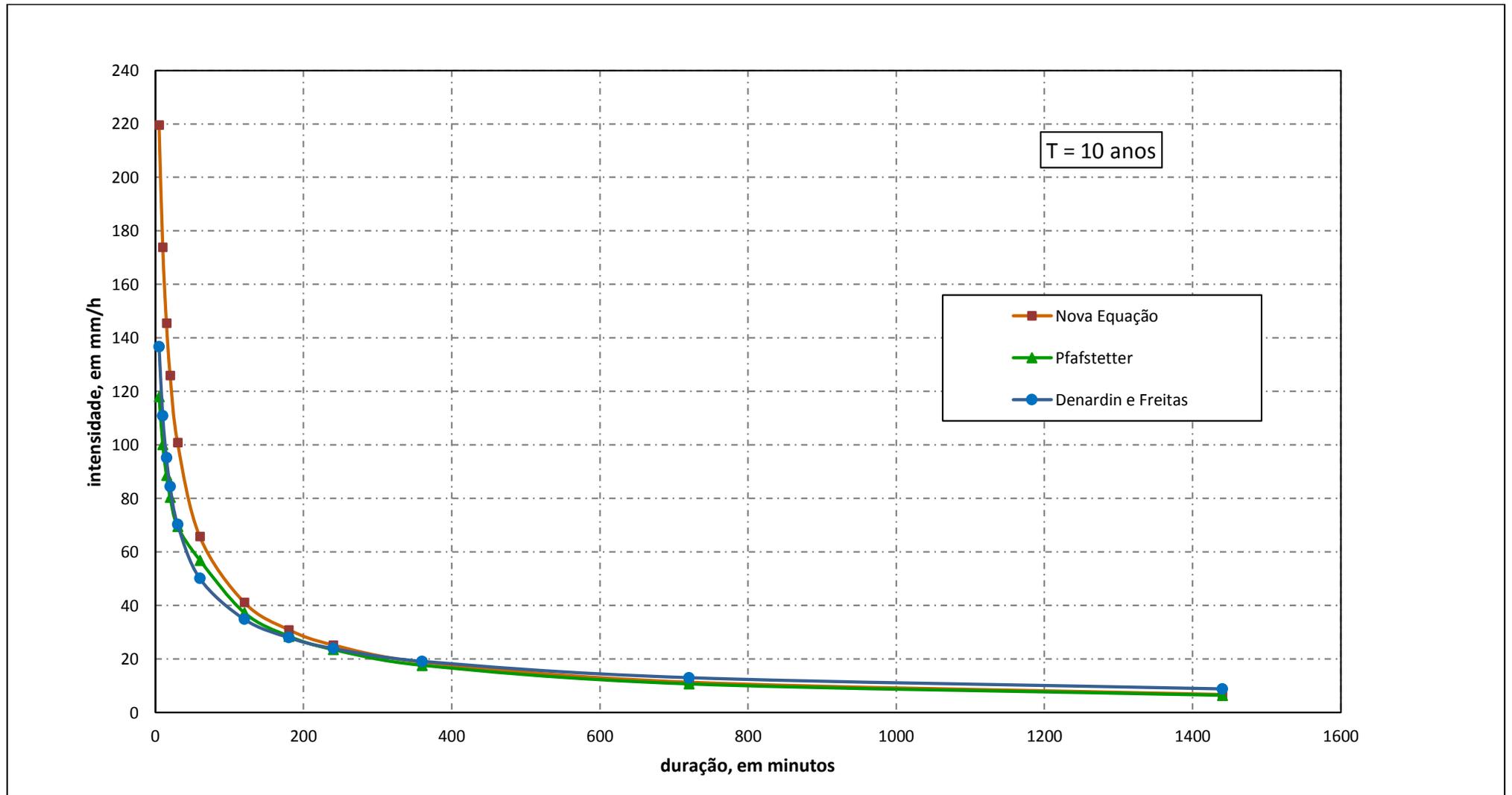


Figura 4.24 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 15 anos

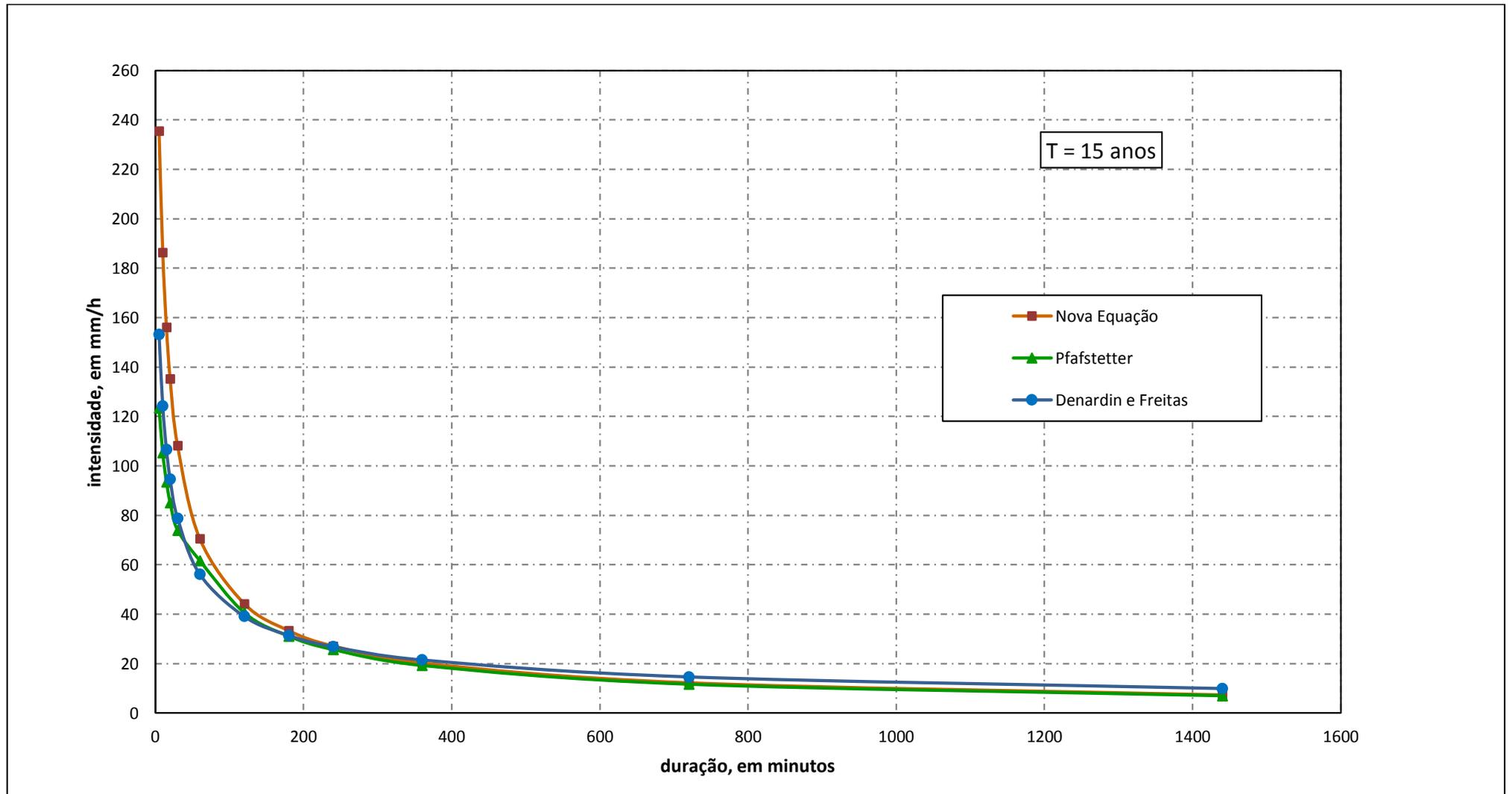


Figura 4.25 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 20 anos

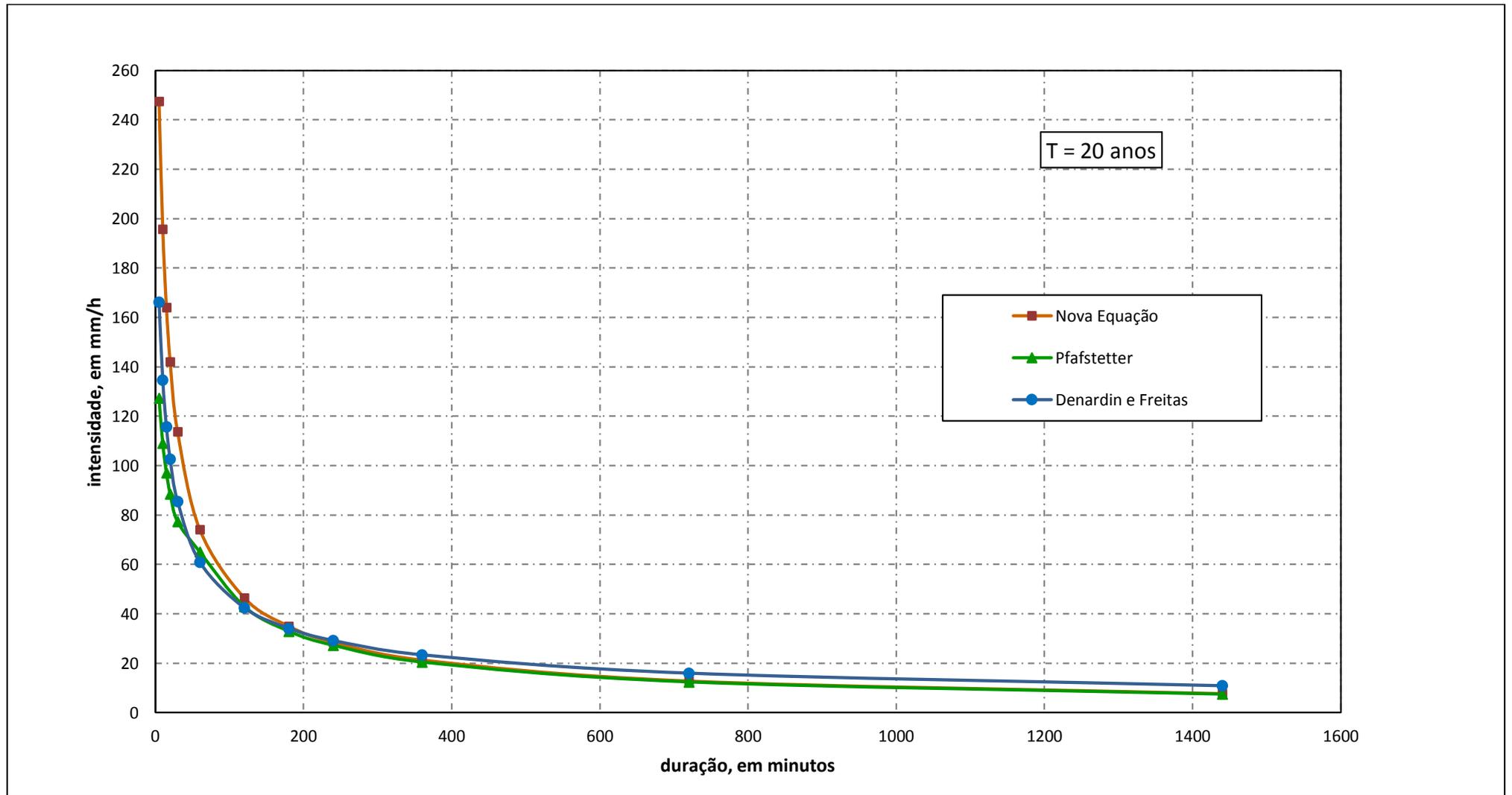


Figura 4.26 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes por região em estudo, para o períodos de retorno de 25 anos

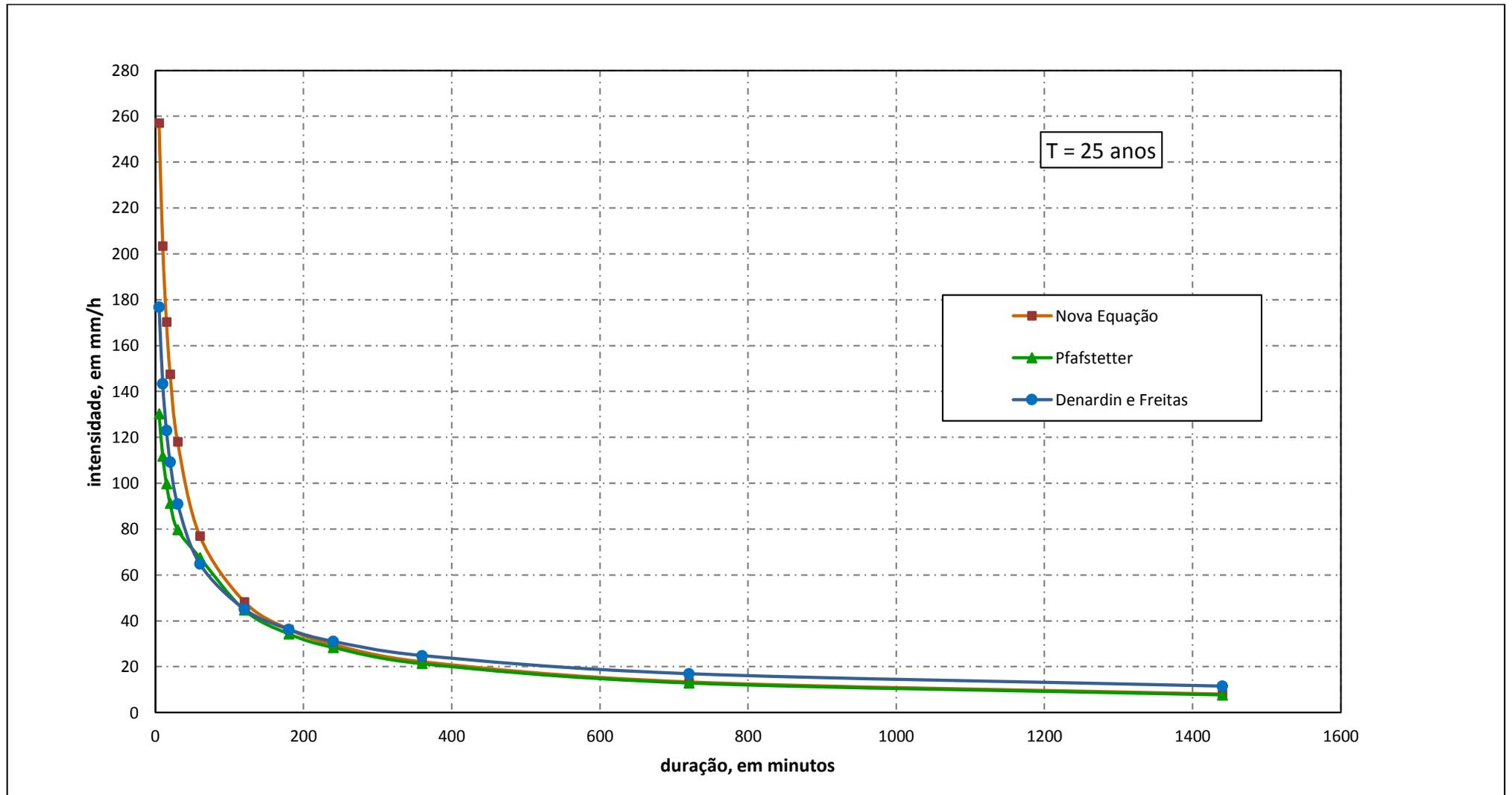


Figura 4.27 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes par região em estudo, para o períodos de retorno de 50 anos

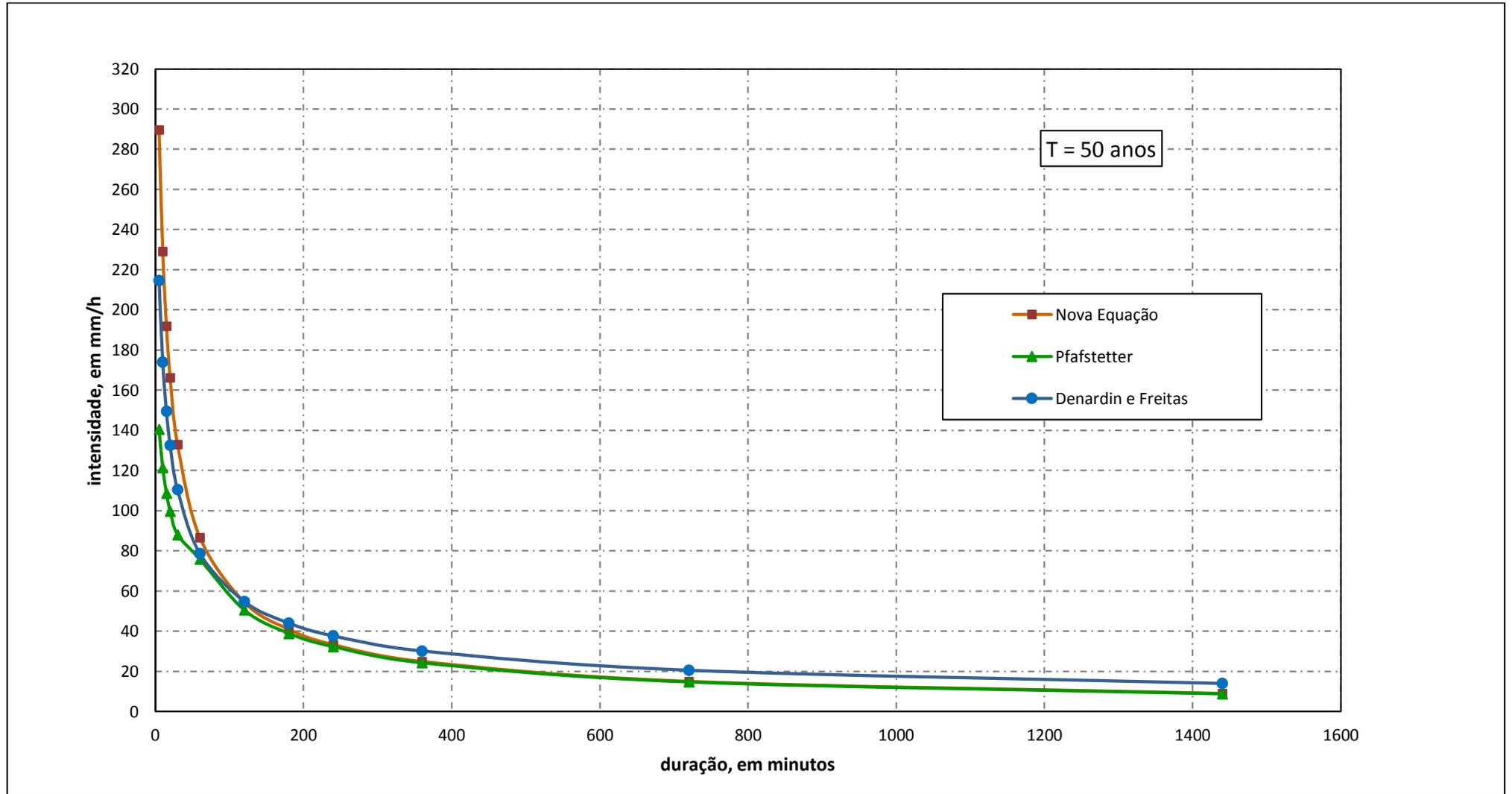
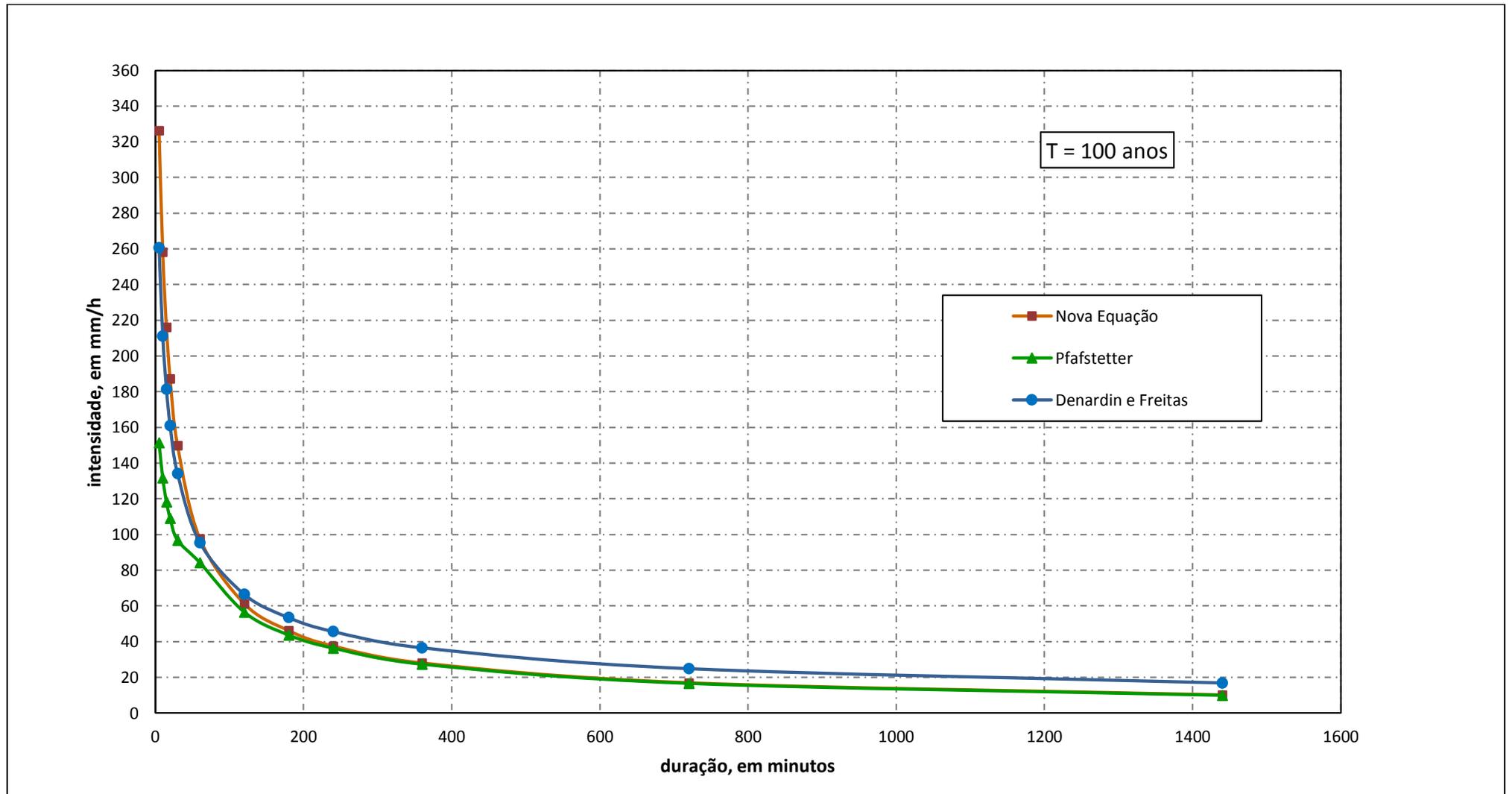


Figura 4.28 - Comparação das equações de chuvas intensas existentes par região em estudo, para o períodos de retorno de 100 anos



5 CONCLUSÃO

O objetivo principal proposto neste estudo foi estabelecer relação entre intensidade, duração e frequência (IDF) de precipitação máxima para a cidade de Maceió, a partir de diferentes métodos de obtenção de Chuvas Intensas.

Primeiramente, através de dados subsidiários, utilizaram-se dados de chuvas disponíveis que possibilitaram curvas IDF com duração igual ou superior a 60 minutos (1h), uma vez que os dados de uma estação automática da Universidade Federal de Alagoas são horários. Na determinação das curvas IDF, os dados foram ajustados à distribuição de probabilidade de Gumbel, que forneceu um bom ajuste aos dados observados para todas as durações (60, 120, 180, 240, 360, 720 e 1440 minutos), com um nível de significância de 5%, segundo o teste de Kolmogorov – Smirnov. O coeficiente de determinação (R^2) do ajuste variou entre 0,93 e 0,95 para as durações.

Com um bom ajuste da distribuição, foi possível obter uma Nova Equação de Chuvas Intensas para a cidade de Maceió com durações maiores que 1h. Os resultados de valores de intensidades de precipitação dessa Nova Equação obtiveram R^2 de 0,982, razão de desvios (RD) de 1,024 e coeficiente de massa residual (CMR) de -0,00554 em relação às intensidades de precipitação calculados pela distribuição de Gumbel.

Em seguida, com dados diários de uma estação pluviométrica da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), foi obtida uma série de precipitação máxima diária anual, que foi ajustada à distribuição de Gumbel confirmada no teste de Kolmogorov – Smirnov com nível de significância de 5%. O ajuste da distribuição pode ser comprovado pelo R^2 que foi igual a 0,97. Este estudo confirma a grande aplicabilidade da distribuição de Gumbel, por diversos autores, ao estudo de eventos extremos, uma vez que esta ajusta bem a estes eventos.

Tanto na metodologia de Bell (1969) como na Chen (1983) e também na Righetto (1998), que são metodologias de determinação de curvas IDF, foram necessárias algumas precipitações com duração inferior a 24 horas e com tempo de retorno preestabelecido para sua aplicabilidade. No método de Bell (1969) a precipitação de tempo de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos (P_{60}^{10}) é necessária para aplicação da metodologia. Para o método de Chen (1983) precisou-se de três precipitações: P_1^{10} (chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 10 anos), P_{24}^{10} (chuva com duração de 24 hora e tempo de retorno de 10 anos) e P_1^{100}

(chuva com duração de 1 hora e tempo de retorno de 100 anos). O de Righetto (1998) precisou da precipitação de tempo de retorno de 2 anos e duração de 60 minutos (P_{60}^2). Todas essas precipitações foram obtidas do ajuste dos dados horários da estação automática da Universidade Federal de Alagoas.

Os métodos das Relações (CETESB, 1979) e das Isozonas, utilizaram-se os dados de precipitação máxima diária anual ajustados à distribuição de Gumbel para estabelecer relação intensidade-duração-frequência (IDF). Para determinação dos parâmetros do modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM) (DAMÉ, 2001) foram utilizados dados do pluviômetro de balsa do projeto de pesquisa desenvolvido no âmbito do PPGRHS instalado no bairro do Feitosa, Maceió –AL. A partir daí desagregou os dados diários utilizados neste estudo e determinou relação intensidade-duração-frequência.

Através de um comparativo da relação intensidade-duração-frequência (IDF) obtida pela metodologia de dados subdiários com as geradas pelo Método de Bell (1969), Método de Chen (1983), Método de Righetto (1998), Método da Isozonas, Método das Relações (CETESB, 1979) e Modelo BLPRM (DAMÉ, 2001), concluiu-se que o método de Chen (1983) foi que mais se adequou aos dados de intensidade máxima de precipitação para localidade de Maceió/AL. Esta comparação ocorreu com durações acima de 1 hora, uma vez que os dados utilizados na aplicação da metodologia de dados subdiários foram horários.

A partir dos resultados apresentados pela metodologia do teste “t” de *Student* pode-se concluir que tanto o modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM) (DAMÉ, 2001) como o método Righetto (1998), este último para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 15 e 20 anos, não representaram os valores de intensidades máximas históricas (estação automática da UFAL) para a cidade de Maceió.

Na estimativa do Erro Relativo Médio (RMS) que fornece indicação do grau de precisão, o método Chen (1983) que apresentou menor Erro Relativo Médio (7,38%) seguido do método de Bell (10,74%) e do Righetto (13,77%). O maior Erro Relativo Médio foi o apresentado pelo modelo BLPRM (DAMÉ, 2001). A pesar que método Righetto (1998) foi rejeitado no teste “t” de *Student*, este apresentou Erro menor que o método das Isozonas e das Relações (CETESB, 1979).

Na aplicação de análise pelo coeficiente de determinação R^2 , razão dos desvios – RD, e o coeficiente de massa residual – CMR, os valores do coeficiente de determinação médio (R^2) para os Métodos de Bell (1969) ($R^2 = 0,988$), Righetto (1998) ($R^2 = 0,988$) e Chen (1983) (R^2

=0,988), foram iguais e mais próximos de 1 (um) que o Método da Isozonas ($R^2 = 0,948$), Método das Relações (CETESB, 1979) ($R^2 = 0,972$) e Modelo BLPRM (DAMÉ, 2001) ($R^2 = 0,961$). Entretanto os outros métodos estão bem próximo de 1(um) também.

A razão de desvios (RD) que apresentou valores mais próximo de 1 (um) foi o método das Isozonas (RD = 1,014) seguido da metodologia de Bell (1969) (RD = 0,941) e Chen (1983) (RD = 0,917). O Modelo de BLPRM (DAMÉ, 2001) apresentou o pior resultado da razão de desvios com valor RD = 0,305.

O coeficiente de massa residual (CMR) que indica que há ausência de desvios sistemáticos entre os valores observados e calculados obteve os valores mais próximo de 1 (um) nas metodologia de Bell (1969) (CMR = -0,018) e Chen (1983) (CMR = 0,038) seguido da de Righetto (1998) (CMR = 0,044).

Em análise a todas as metodologias apresentadas neste estudo, foi verificado através dos resultados que para o coeficiente de determinação (R^2), os Métodos de Bell (1969), Righetto (1998) e Chen (1983) foram os que apresentaram melhor grau de explicação ou associação quando comparados com a relação IDF obtidas de dados observados. Estes três métodos também apresentaram o coeficiente de massa residual (CMR) perto de 0 (zero). Entretanto o método de Righetto (1998) foi rejeitado no teste “t” de *Student* e os Métodos de Bell (1969) e Chen (1983) foram os que apresentaram a razão de desvios (RD) com os melhores resultados, próximo de 1 (um).

Por outro lado o método de Bell (1969) obteve Erro Relativo Médio Quadrático (RMS) maior que o método de Chen (1983), portanto, menos preciso que este último. Assim, como citado acima, foi concluído que o método de Chen (1983) foi o mais adequado para estimar a intensidade máxima de precipitação para localidade de Maceió/AL para duração superior a 60 minutos.

A Nova Equação de Chuvas Intensas gerada para Maceió foi com duração acima de 60 minuto. Sendo assim, esta serve somente para utilização de dimensionamento de sistema e macrodrenagem, não podendo ser utilizada para estimativa de intensidade para menores durações (5, 10, 15, 30 minutos), uma vez que estas apresentam as maiores intensidades que podem dar origem a alagamentos e inundações.

Desta maneira foi proposto neste trabalho uma Nova Equação de Chuvas Intensas para cidade de Maceió que abrangesse todas as durações, tanto para durações acima de 60 minutos

como para menores. Então esta Nova Equação foi baseada na relação intensidade-duração-frequência (IDF) obtida pela metodologia de dados subsidiários que serve somente para duração superior a 60 minutos, e para duração inferior a 60 minutos utilizou a relação intensidade-duração-frequência (IDF) gerada do método de Chen (1983).

A Nova Equação de Chuvas Intensas proposta foi comparada com equação de Pfafstetter (1957) e pela equação de Denardin e Freitas (1982), que são as equações utilizadas para a cidade de Maceió. Percebe-se que para durações menores (5, 10, 15, 20 e 30 minutos), a Nova Equação de Chuvas Intensas proposta atinge resultados maiores que 50% dos valores das equações antigas. Então conclui-se que essas variações podem ter ocorrido, possivelmente, ao períodos de dados que originaram as equações e devido as mudanças climáticas, como já citado neste estudo por diversos autores.

A pesar que o método de Chen (1983) foi o proposto neste estudo o melhor método que representa a cidade de Maceió/AL, isso não elimina o método de Bell (1969), que em algumas metodologias comparativas superou o de Chen (1983), o Método das Relações (CETESB, 1979) e o Método da Isozonas.

Assim, recomenda-se neste trabalho que quando não a disponibilidade de dados subsidiários para obtenção de curvas IDF para região em estudo, pode-se utilizar do Método de Bell (1969), Método de Chen (1983), Método da Isozonas e Método das Relações (CETESB, 1979), uma vez que estes métodos apresentaram bons resultados nas metodologias comparativas deste estudo.

REFERÊNCIAS

AL MAMOON, A. et al. Design rainfall in Qatar: sensitivity to climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 81, p. 1797 – 1810, 2016.

ALAN, S. M.; AMIN, E. Quantification of the climate change-induced variations in Intensity–Duration–Frequency curves in the Canadian Prairies. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 990-1005, 2015.

ARNBJERG-NIELSEN, K. Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. **Journal Urban Water**, v. 9, n. 2, p. 57 – 65, 2012.

BACK, Á. J. **Chuvas intensas e chuva para dimensionamento de estruturas de drenagem para o Estado de Santa Catarina (Com programa HidroChuSC para cálculos)**. Florianópolis: Epagri, 2013, 193p.

BACK, Á. J.; HENN, A.; OLIVEIRA, J. L. R. Duration-Frequency relationships of heavy rainfall in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1015-1022, 2011.

BACK, Á. J.; UGGIONI, E.; VIEIRA, H. J. Aplicação do modelo de pulsos retangulares de Bartlett-Lewis modificado para estimativa de eventos extremos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 287 - 294, 2011.

BARRETO, H. B. F. et al. Relação intensidade-duração-frequência para precipitação extrema em Mossoró – RN. **Gl. Sci Technol**, Rio Verde, v. 07, n. 03, p.103 - 109, 2014.

BASSO, R. E. et al. Revisão das Isozonas de chuvas intensas do Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 635 - 641, 2016.

BELL, F. G. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. **Journal of Hydraulics Division –ASCE**, v. 95, p. 311 - 327, 1969.

BELTRAME, L. F. S.; LANNA, A. E. L.; LOUZADA, J. A. S. **Chuvas intensas**. Porto Alegre: IPHUFGRS, 1991. 69 p.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. (2009). **Precipitação. In: Tucci, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª Edição. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4.**

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. **Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). Hidrologia Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002, cap. 5, p. 177-231.**

BIELENKI JUNIOR, C. et al. Determinação de curva intensidade-duração-frequência por meio de emprego do método paramétrico de ajustamento de observações. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, p. 2237 - 8642, 2016.

CAMPOS, A. R. et al. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 45, n. 3, p. 488 - 498, 2014.

CARVALHO, O. O; GAZEN, A. F.; SILVA, A. **Chuvas intensas em Porto Alegre**. Porto Alegre: DEMA. 1972.

CLÁUDIA, F.A.; GANDRA, T.; DAMÉ, R. C. F. Bartlett-Lewis of rectangular pulse modified model: Estimative of parameters for simulation of precipitaton in sub-hourly duration. **Revista de Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 34, n. 5, p. 925 - 934, 2014

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S. Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para Pelotas-RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, p. 245 - 255, 2008.

DAMÉ, R. C.F. et al. Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção de precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 46 - 54, 2010.

DAMÉ, R.C.F.; TEIXEIRA, C.F.A.; LORENSI, R.P. Simulação de precipitação com duração horária mediante o uso do modelo Bartlett-Lewis do pulso retangular modificado. **Revista Brasileira de Agrociências**, Pelotas, v.13, n.1, p.13-18, 2007.

DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. **Estudos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM, p. 15, 2001.

DE PAOLA, F. et al. Intensity-Duration Frequency (IDF) rainfall curves, for data series and climate projection in African cities. **SpringerOpen Journal**, p. 133, 2014.

DENARDIN, J.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 10, p. 1409 -1416, 1982.

EL-SEBAIE I, H. Developing rainfall intensity–duration–frequency relationship for two regions in Saudi Arabia. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, p. 131 - 140, 2013.

EWEA, H. A.; ELFEKI, A. M.; AL-AMRI, N. S. Development of intensity–duration–frequency curves for the Kingdom of Saudi Arabia. **Journal Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, p. 570 - 584, 2017.

FADHEL, S.; RAMIREZ, M. A.; HAN. D. Uncertainty of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods. **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 600 - 612, 2017.

GONÇALVES, L. S. **Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

KHALIQ, M. N.; CUNNANE, C. Modelling point rainfall occurrences with the Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulses Model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.180, p.109-138, 1996.

KOSSIERIS, P. et al. A rainfall disaggregation scheme for sub-hourly time scales: Coupling a Bartlett-Lewis based model with adjusting procedures. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 980 - 992, 2016.

- MAURINO, M. F. Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships: Applicability in Different Climatic Regions of Argentina. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, p. 269 - 274, 2004.
- MIRHOSSEINI, G.; SRIVASTAVA, P.; STEFANOVA, L. The impact of climate change on rainfall Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves in Alabama. **Regional Environmental Change**, v. 13, p. 25 - 33, 2013.
- MORBIDELLI, R. et al. Effect of temporal aggregation on the estimate of annual maximum rainfall depths for the design of hydraulic infrastructure systems. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 710 - 720, 2017.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). **Hidrologia Estatística**, Belo Horizonte: CPRM, 552p.
- NATHAN, R. et al. Estimating the exceedance probability of extreme rainfalls up to the probable maximum precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 543, p. 706 - 720, 2016.
- NETO, V. L. S. et al. Relação intensidade-duração-frequência (IDF) para precipitação extrema em Guaraí - TO. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia**, v. 13, n. 23; p. 1147, 2016.
- OLIVEIRA, L. F. C. et al. Modelos de predição de chuvas intensas para o estado do Mato Grosso, Brasil. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 274 - 290, 2011.
- OLIVEIRA, L. F. C.; ANTONINI, J. C. A.; GRIEBELER, N. P. **Estimativa de chuvas intensas para o estado de Góias**. Engenharia Agrícola Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 22-33, 2008.
- PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 1957. 246 p.
- Prodanovic, P.; Simonovic, S. P. Development of rainfall intensity duration frequency curves for the City of London under the changing climate. **Water Resour Res Report**, London, 2007.
- RAMOS, A. M. **Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade**. Tese (Doutorado) – Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2010.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.
- RODRÍGUEZ, R et al. Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). **International Journal of Climatolology**, v. 34, p. 643 – 654, 2013.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; COX, D.R.; ISHAM, V. A point process model for rainfall: further developments. **Proceeding of Royal Society A**, London, v.417, p.283-298, 1987b.
- SAMPAIO, M. V. **Determinação e especialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

- SAMPAIO, M. V; ROBAINA, A. D; PEITER, M. X; PINTO, L. M. Equações de chuvas intensas na região hidrográfica do Guaíba, RS, Brasil. **Revista Tecnol. & Ciên. Agropec**, v. 5, n. 3, p. 1 - 8, 2011.
- SANTOS, P. R. et al. Relação generalizada de intensidade-duração-frequência aplicada a região nordeste brasileira. **XI Encontro Nacional de Águas Urbanas**. Belo Horizonte, 2017.
- SANTOS, R. A. Cálculo da chuva intensa pelo método das Isozonas para cidades do estado da Paraíba. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1334 - 1343, 2015.
- SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 176 - 185, 2014.
- SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change. **Water Resour Manage** **28**, p. 2539 - 2562, 2014.
- SHERIF, M. M. et al. Analysis of rainfall, PMP and drought in the United Arab Emirates. **International Journal of Climatology**, p. 1318 - 1328, 2013.
- SILVA, B. M. et al. Chuvas intensas em localidades do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 135 - 147, 2012.
- SILVA, F. O. E.; JÚNIOR, F. F. R. P.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, ed. 192, v. 30, p. 48 - 59, 2013.
- SINGH, V. P.; ZHANG, L. IDF curves using the Frank Archimedean copula. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 6, p. 651 - 662, 2007.
- SOBRINHO, V. F. et al. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p.727 - 734, 2014.
- SOUZA, J. C. B. **A influência do método de escolha do parâmetro “C” na determinação de equação de chuvas intensas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade de Federal de Pernambuco, 2014.
- SUBYANI, A. M.; AL-AMRI, N. S. IDF curves and daily rainfall generation for Al-Madinah city, western Saudi Arabia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, p. 11107 - 11119, 2015.
- TORRICO, J.J.T. **Práticas hidrológicas**. Rio de Janeiro: Transcon, 120p. 1975.
- TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 3ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. p. 177 - 231.
- TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 943p.
- WANG, Q. J. The POT model described by the generalized Pareto distribution with Poisson arrival rate. **Journal of Hydrology**, v. 129, p. 263 – 280, 1991.

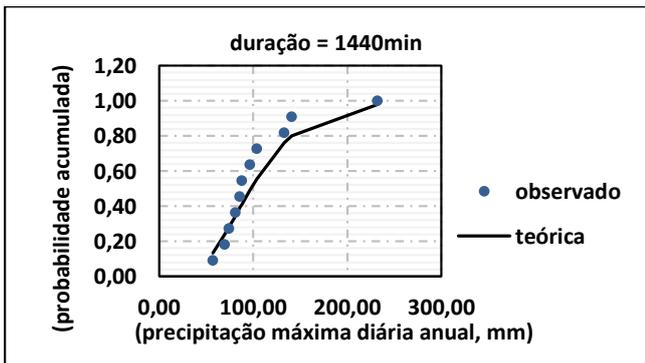
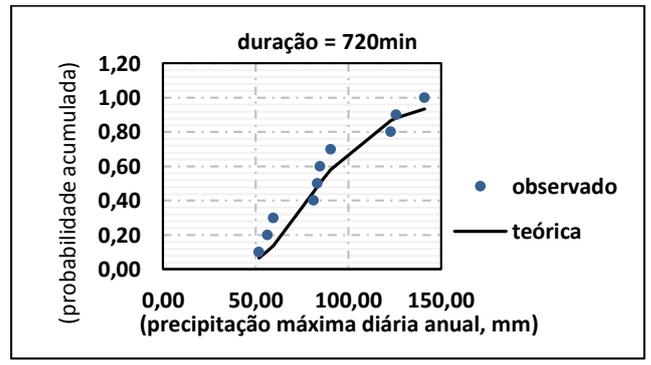
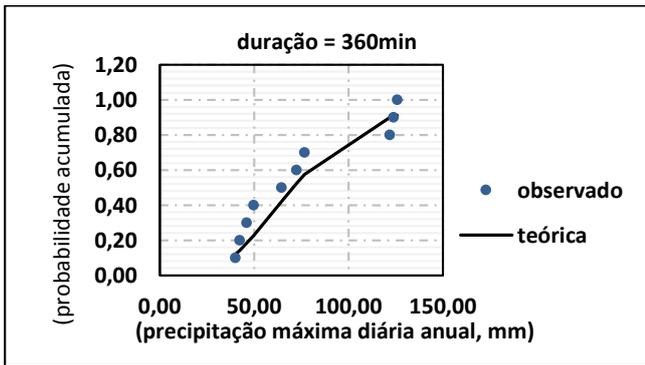
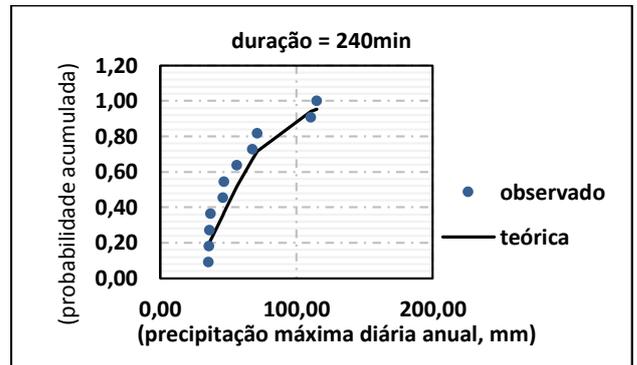
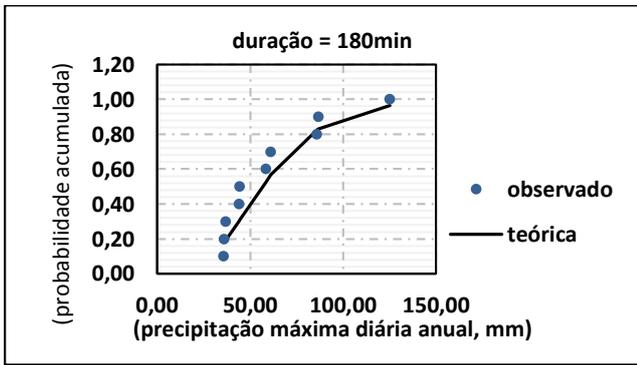
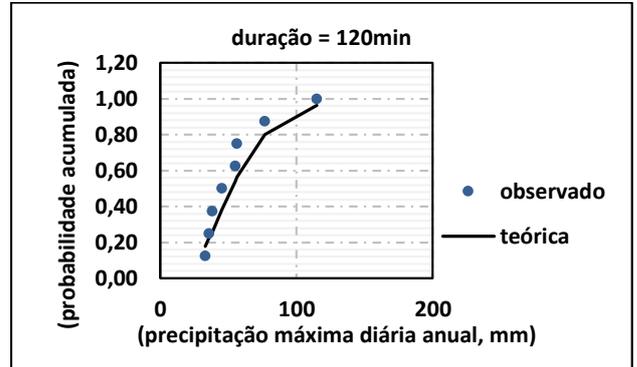
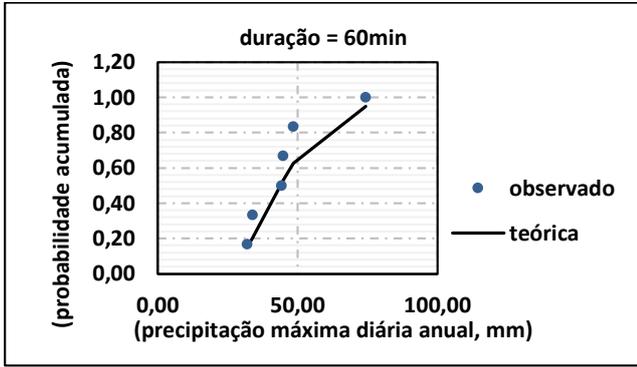
YU, P. S.; YANG, T.C.; LIN, C. S. Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. **Journal of Hidrology**, p. 108 - 123, 2004.

ZOPE, P. E.; ELDHO, T. I.; JOTHIPRAKASH, V. Development of Rainfall Intensity Duration Frequency Curves for Mumbai City, India. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 756 - 765, 2016.

ZUFFO, A. C. Equações de Chuvas São Eternas? **XXI Congresso Latino-americanos de Hidráulica**. São Pedro, São Paulo, 2007.

APÊNDICE

A - Ajuste da distribuição de Gumbel aos dados horários observados na estação automática da Universidade Federal de Alagoas para a duração de 60, 120, 180, 240, 360, 720 e 1440 minutos.

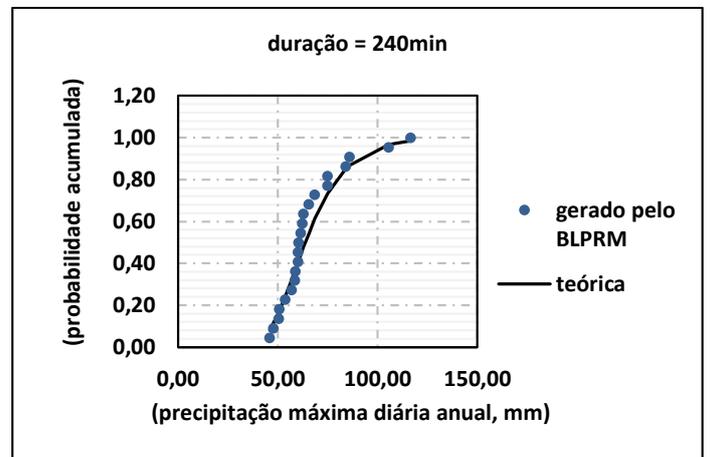
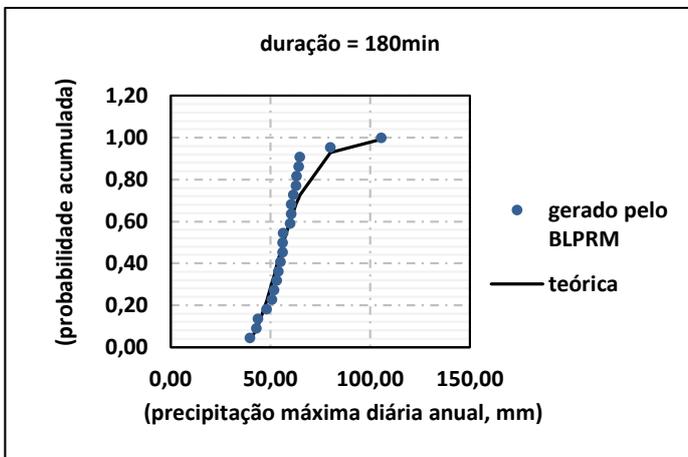
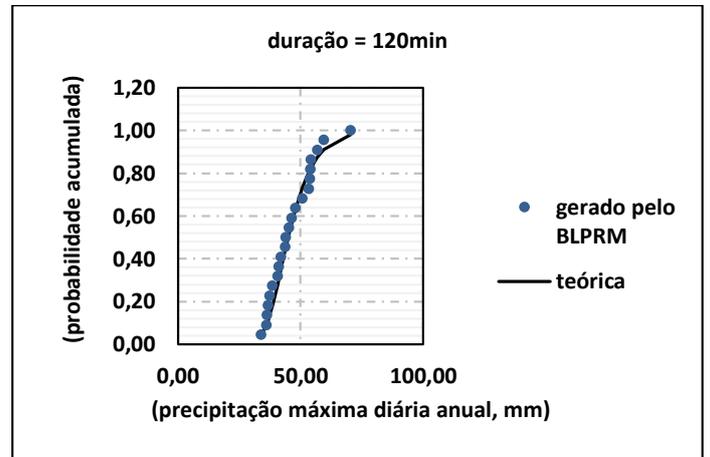
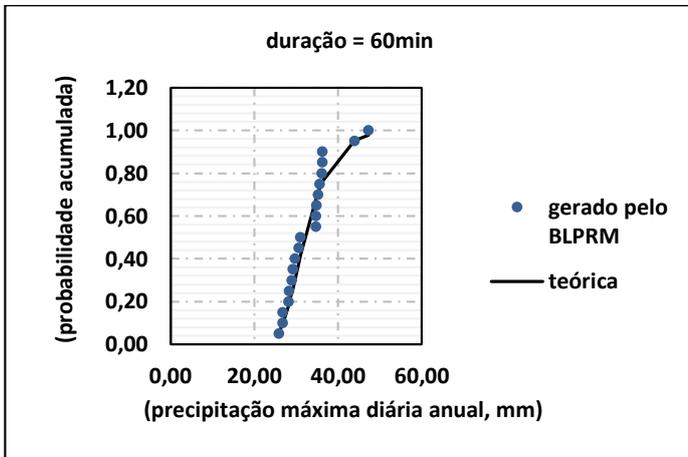
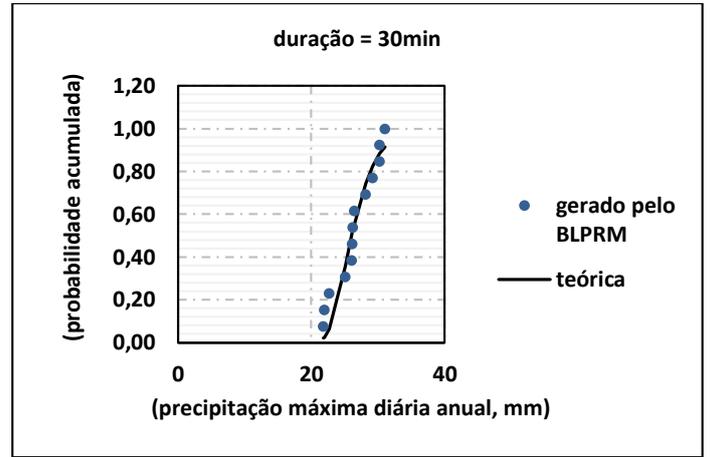
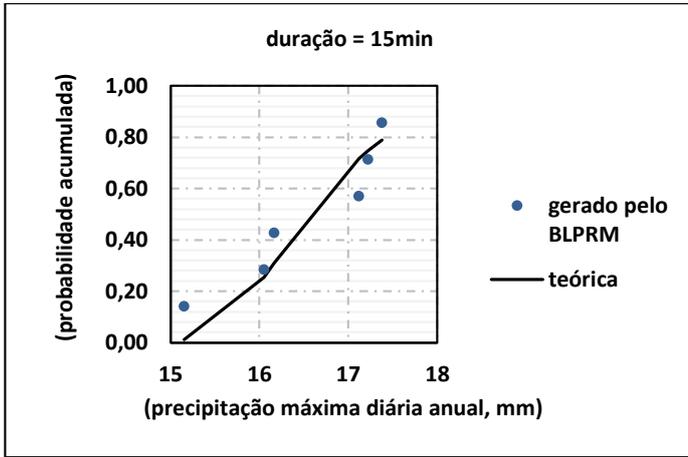


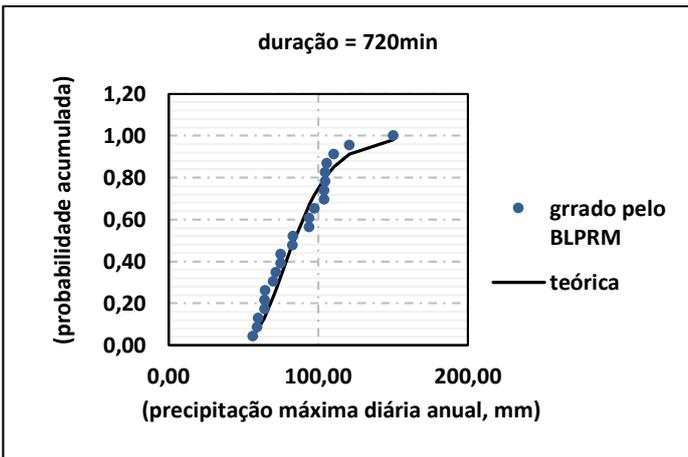
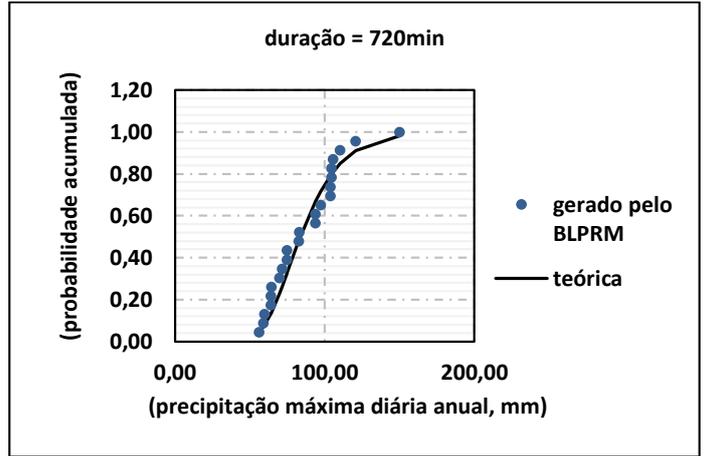
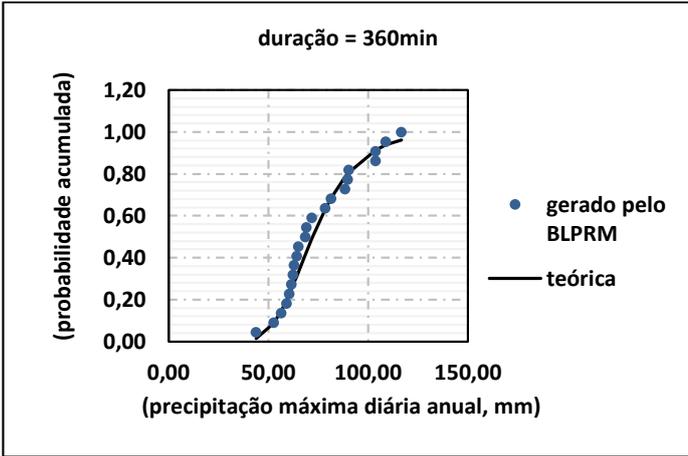
B - Parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustado aos dados do pluviômetro de báscula do Feitosa obtidos das combinações de estatísticas A, B, C, D, E para os 12 (doze) meses do ano.

Tabela B1 - Parâmetros do modelo de Bartlett-Lewis modificado ajustado aos dados do pluviômetro de báscula do Feitosa obtidos das combinações de estatísticas A, B, C, D, E para os 12 (doze) meses do ano

Parâmetro	Comb.	Meses do Ano											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$\lambda (\Delta t^{-1})$	A	0,00434	0,00247	0,00489	0,00410	0,00583	0,00875	0,00828	0,00352	0,00456	0,00323	0,00317	0,00046
	B	0,00274	0,00089	0,00135	0,00409	0,00607	0,00875	0,00794	0,00324	0,00182	0,00216	0,00238	0,00233
	C	0,00194	0,00194	0,00325	0,00395	0,00907	0,01118	0,01075	0,00755	0,00833	0,00622	0,00266	0,00540
	D	0,00267	0,00213	0,00542	0,00642	0,00753	0,00919	0,00803	0,00489	0,00387	0,00249	0,00227	0,00065
	E	0,00351	0,00308	0,00369	0,00670	0,00805	0,00903	0,00883	0,00456	0,00386	0,00346	0,00276	0,00337
ν	A	0,21047	0,00793	0,14071	0,02202	0,01155	0,02173	0,01175	0,00669	0,00674	0,00512	9,07840	5,41094
	B	4,34226	0,05030	0,27057	2,67145	9,50400	3,91542	50,89556	42,01524	38,10337	43,28661	54,17224	44,15288
	C	27,04941	22,79047	2,39397	0,41147	0,08882	0,09425	0,10944	0,08349	0,00053	0,00842	8,71124	0,00230
	D	0,22237	9,96541	2,87823	0,98849	0,10228	0,03700	4,33607	0,03216	0,01759	0,03845	0,32645	3,09314
	E	0,00907	0,02720	0,65880	1,60030	0,44448	0,02384	0,01899	0,02726	0,01050	0,01453	0,00243	0,00757
κ	A	0,99578	0,00586	0,97690	0,00158	0,00332	0,00243	0,00404	0,00878	0,00116	0,00099	3,23844	7,10174
	B	3,21290	0,00255	0,00574	3,78302	3,82418	3,81035	2,53823	3,05767	3,77441	2,76507	1,74499	2,05600
	C	2,61913	2,75508	1,68290	3,19973	25,73783	25,94559	25,60903	23,29804	0,06389	0,06805	0,99257	3,45653
	D	13,89986	3,05953	0,00001	7,85968	26,90842	5,91416	2,23299	6,07263	7,23653	5,31878	4,48094	8,29017
	E	8,25531	5,81214	0,00237	8,97533	16,32562	7,03011	7,86425	7,27523	10,16997	7,07369	11,38477	7,31442
$\mu_x (\text{mm } \Delta t^{-1})$	A	9,00896	5,00084	11,25056	2,47248	5,69615	2,51700	3,01161	4,12270	9,67776	9,40146	0,24213	69,66069
	B	65,18789	29,83898	7,51781	69,98211	96,88956	76,60877	1,27258	1,32873	0,55507	1,69729	0,52777	1,01354
	C	10,28907	20,81801	10,58812	25,91324	0,44242	0,26772	0,23880	0,24732	87,56079	87,54628	2,47335	0,89717
	D	1,47184	35,64473	40,45737	1,58834	1,07612	99,00000	16,25991	99,00000	99,00000	99,00000	34,54034	99,00000
	E	99,00000	99,00000	33,24116	0,50239	0,69858	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000
$\alpha (\Delta t^{-1})$	A	2,01457	1,39255	1,86959	1,58625	1,46319	1,50814	1,48079	1,54540	1,75229	1,55324	41,03902	79,48588
	B	51,59105	4,91664	9,94148	40,04057	99,00000	51,24898	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000
	C	99,00000	99,00000	12,18053	5,38338	99,00000	99,00000	99,00000	99,00000	12,84296	99,00000	25,94645	60,00004
	D	28,18951	80,40222	49,67590	47,41063	99,00000	2,72809	20,72236	2,64096	2,55816	2,57319	18,71729	99,00000
	E	2,10238	2,35201	60,61384	99,00000	99,00000	2,39387	2,30648	2,60126	2,33801	2,23370	2,00590	2,19707
$\varphi (\Delta t)$	A	0,99898	0,00005	0,99524	0,00002	0,00002	0,00002	0,00003	0,00004	0,00002	0,00001	0,13119	1,60198
	B	1,28842	0,00002	0,00006	1,34120	1,35091	1,34520	0,88074	0,87684	0,98479	0,87939	0,89717	0,88905
	C	1,28655	1,27811	1,12183	1,30901	0,00161	0,00172	0,00188	0,00173	0,00014	0,00017	0,99822	0,00008
	D	0,02728	1,46101	0,00002	0,06228	0,00239	1,79840	1,28013	1,77079	1,99866	2,02949	2,06334	1,70059
	E	1,85018	1,59481	0,00011	0,02490	0,00664	1,66724	1,72912	1,66150	1,93592	1,73245	1,97771	1,69751

C - Ajuste da distribuição de Gumbel aos dados subsidiários gerados pelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM)





D - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL, pelo Método das Relações (CETESB, 1979), BELL (1969), RIGHETTO (1998), CHEN (1983), Método das Isozonas e DAMÉ (2001), para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos

Figura D1 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo método de BELL (1969).

Figura D2 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método RIGHETTO (1998).

Figura D3 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método de CHEN (1983).

Figura D4 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método das Isozonas.

Figura D5 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método das Relações (CETESB, 1979).

Figura D6 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método de DAMÉ (2001).

Figura D1 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo método de BELL (1969)

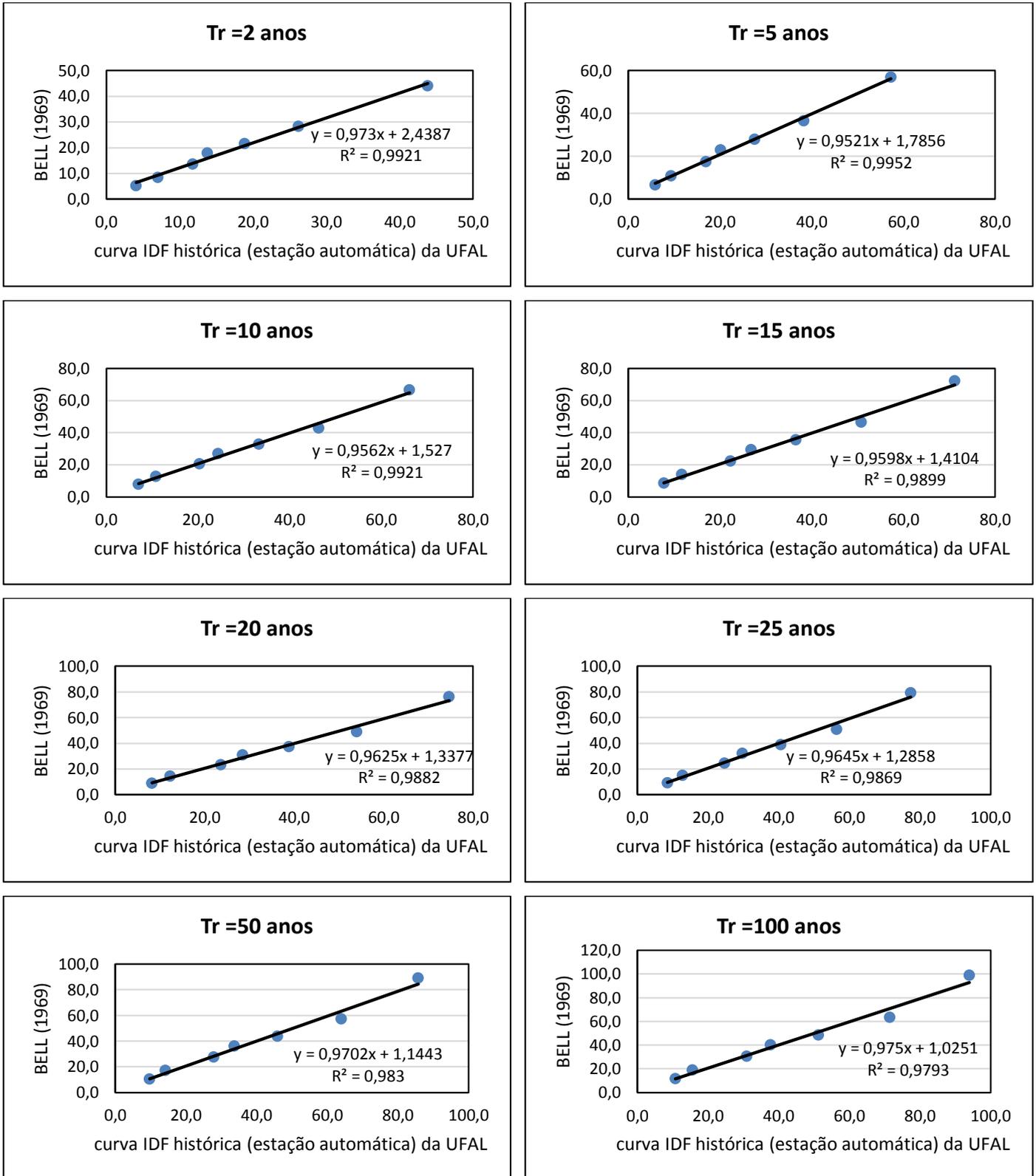


Figura D2 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método RIGHETTO (1998).

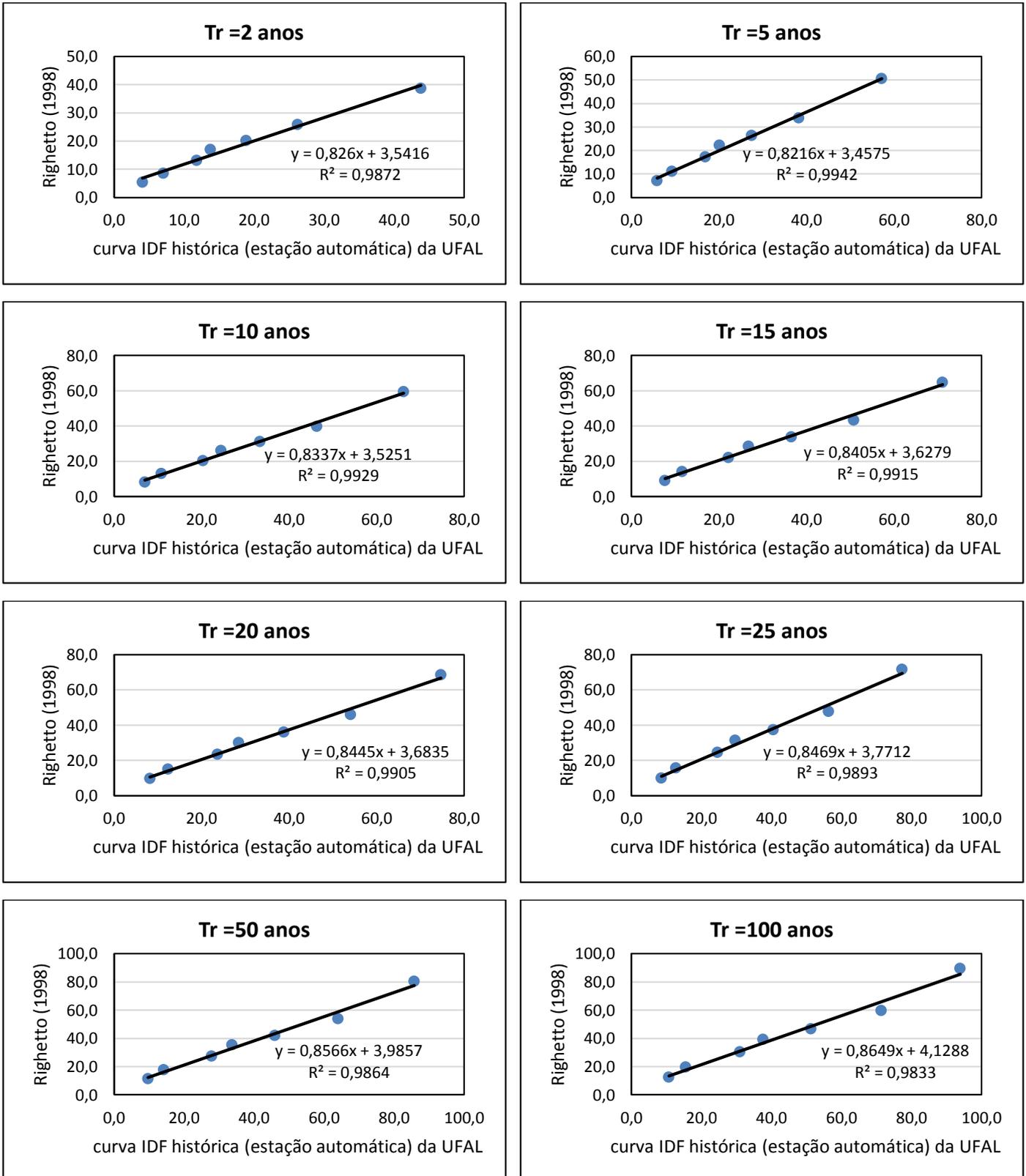


Figura D3 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método de CHEN (1983).

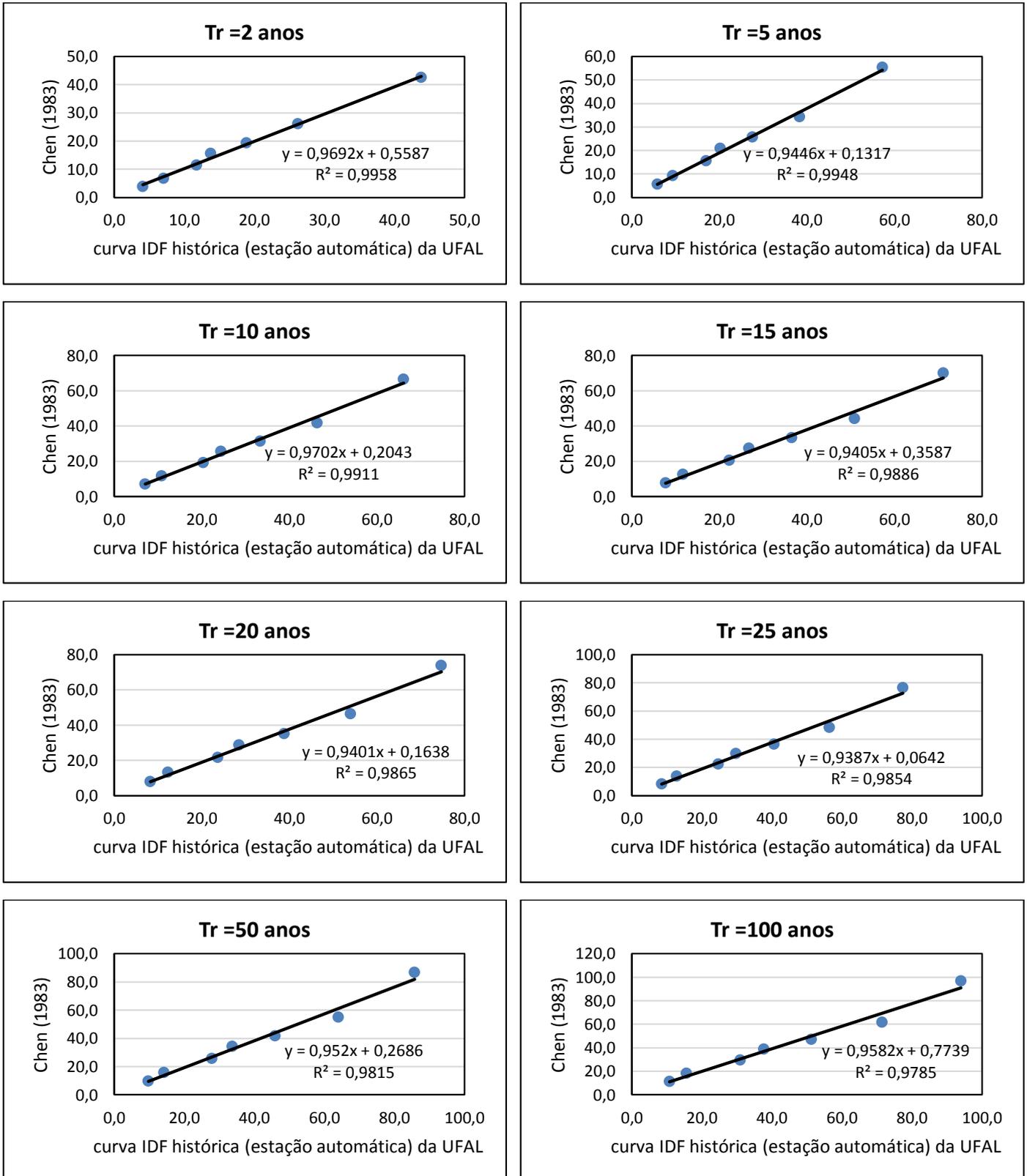


Figura D4 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método das Isozonas.

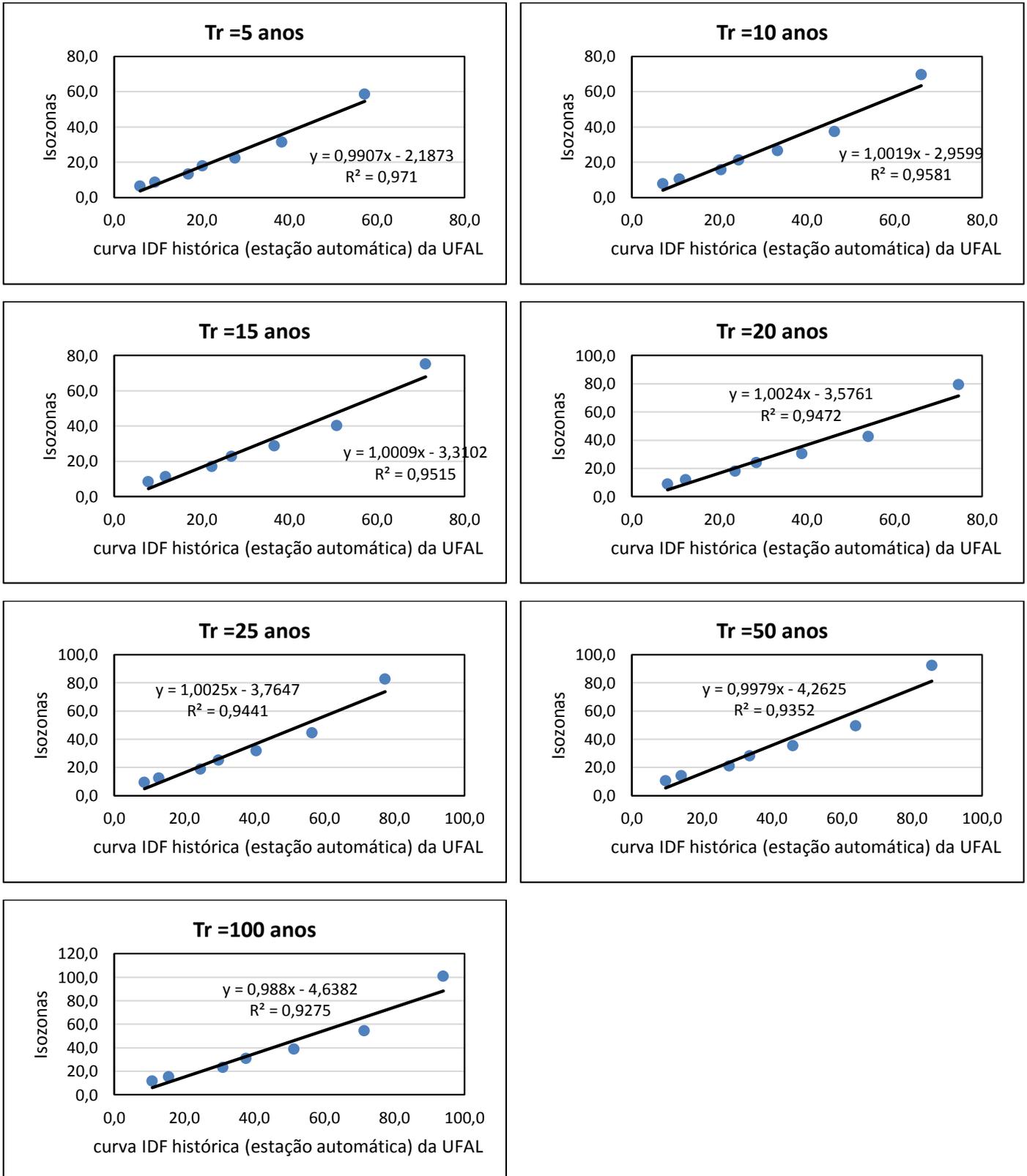


Figura D5 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método das Relações (CETESB, 1979)

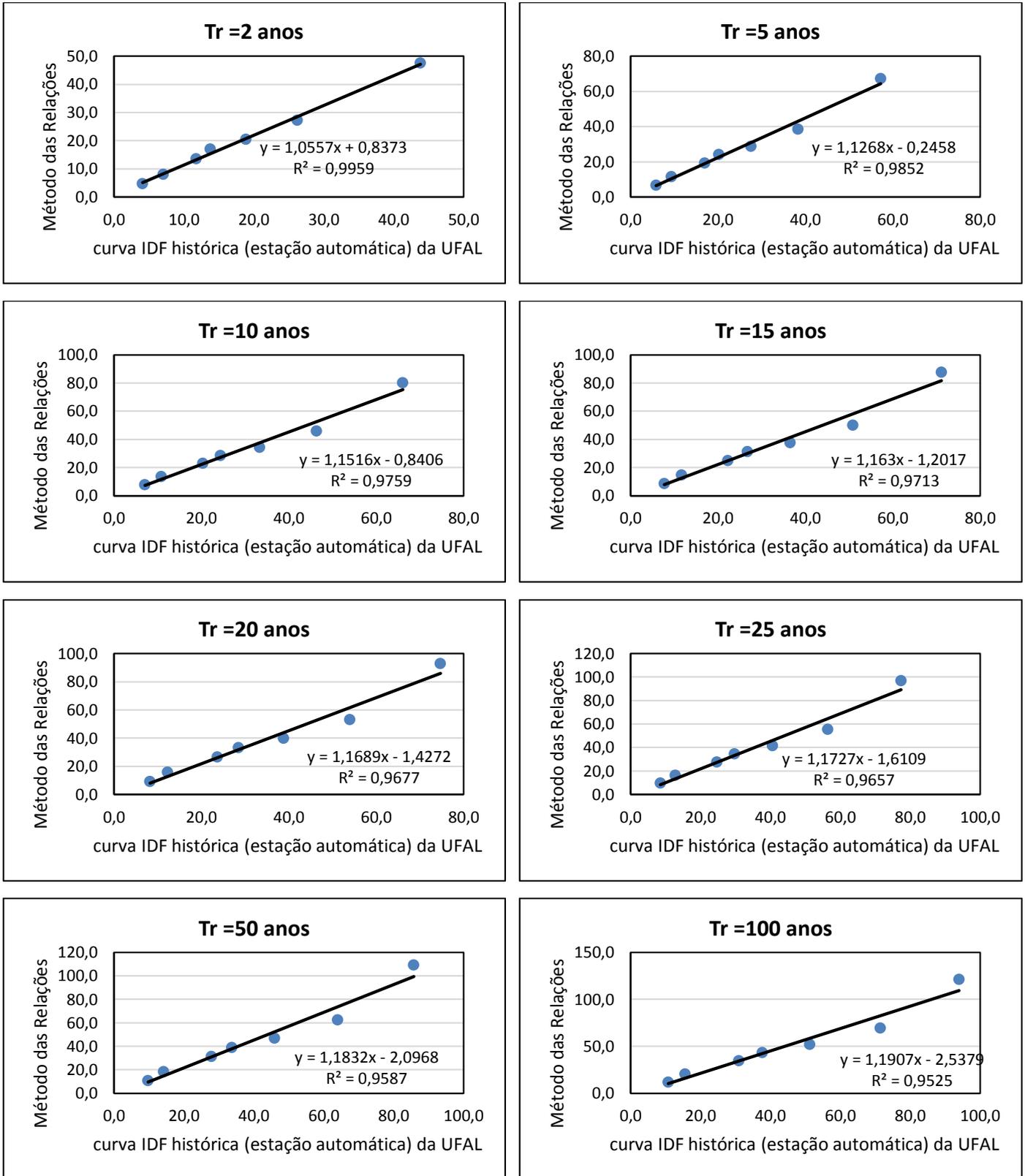
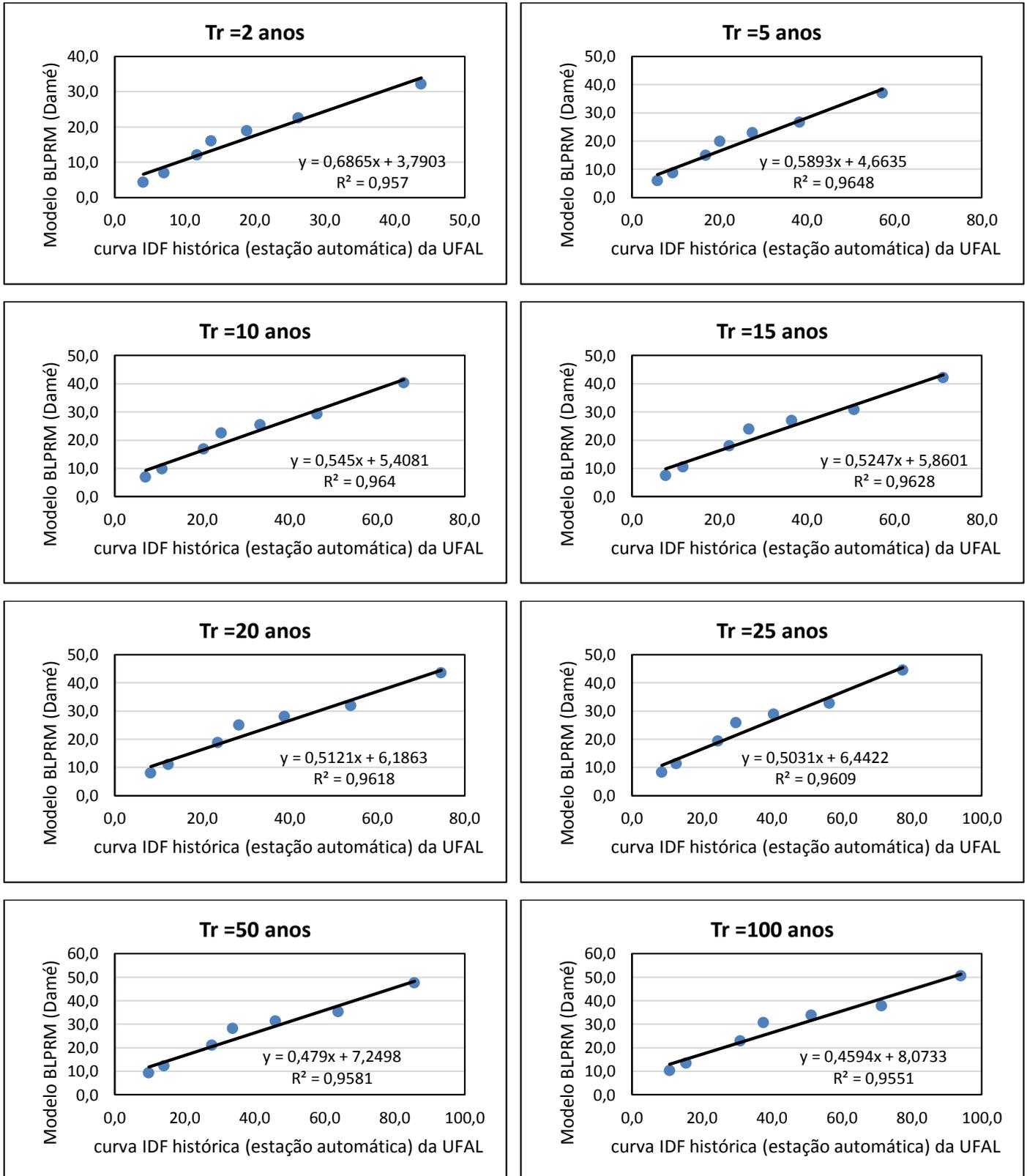


Figura D6 - Resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) entre os valores de intensidades máximas (mm h^{-1}) obtidos da curva IDF histórica (estação automática) da UFAL e pelo Método de DAMÉ (2001).



ANEXOS

ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL

A função acumulada de probabilidades (FAP) da distribuição de Gumbel e dada pela Equação 1 (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

$$F_X(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (1)$$

em que: x é o valor que pode ser assumido pela variável aleatória associada a valores máximos do período; α é parâmetro de escala, β é parâmetro de posição, e $-\alpha < \beta < \alpha$.

A inversa da equação acima pode ser escrita da seguinte forma:

$$x(T) = \beta - \alpha \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

onde T é o tempo de retorno (anos) e $x(T)$ é o valor da variável hidrológica associada a um tempo de retorno.

Os parâmetros α e β serão estimados pelo método dos momentos. Este método consiste em igualar os momentos amostrais aos populacionais, resultando as estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidade de Gumbel (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Neste caso, temos dois parâmetros a estimar: a média e a variância de dada por:

$$\bar{X} = \beta + 0,5772\alpha \quad (3)$$

$$\sigma_x^2 = \left[\left(\frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \right) \right] \quad (4)$$

Substituindo nessas equações os momentos populacionais pelos amostrais e resolvendo β e α , tem-se como resultado os seguintes estimadores da distribuição de Gumbel:

$$\alpha = \left[\left(\frac{\sigma_x}{1,283} \right) \right] \quad (5)$$

$$\beta = \bar{X} - 0,45\sigma_x \quad (6)$$

onde \bar{X} é a média amostral, σ_x é o desvio padrão amostral e σ_x^2 é a variância amostral.

Substituindo-se os parâmetros estimados pelo método dos momentos, pelas as Equações 6 e 7 em 2 e fazendo simplificações necessárias, temos:

$$x(T) = \bar{X} + \left\{ -0,45 - \frac{1}{1,283} \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \cdot \sigma_x \quad (7)$$

O valor da variável hidrológica, que neste caso seriam as alturas de precipitação, pode ser obtido pela equação proposta por Chow (CARVALHO *et al.*, 1972):

$$x(T) = \bar{X} + K_T \cdot \sigma_x \quad (8)$$

em que K_T é um fator de frequência, função do tempo de retorno e da distribuição de probabilidades empregada na análise.

Assim a equação do fator de frequência K_T é escrito pela seguinte equação:

$$K_T = - \left\{ 0,45 - \frac{1}{1,283} \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

Para Naghettini e Pinto (2007) o fator de frequência pode ser obtido em tabela, ou determinado pela equação a seguir.

$$K_T = \frac{Y_T - \bar{X}_{Y_i}}{\sigma_{Y_i}} \quad (10)$$

Na qual Y_T é variável reduzida de Gumbel, associada ao tempo de retorno, calculada por:

$$Y_T = - \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (11)$$

\bar{X}_{Y_i} é a média de $Y_i(n)$; $Y_i(n)$ é a variável reduzida de Gumbel associada aos dados observados e σ_{Y_i} é o desvio padrão dos $Y_i(n)$

Portanto, substituindo a Equação 11 na equação 7, resultará na equação que será utilizada no trabalho de ajuste da distribuição neste estudo:

$$x(T) = \bar{X} + \left\{ -0,45 + \frac{1}{1,283} Y_T \right\} \cdot \sigma_x \quad (12)$$

onde, $x(T)$ é valor da altura de precipitação para o tempo de retorno adotado (mm); \bar{X} é média das alturas de precipitação (mm); σ_x é desvio padrão das alturas de precipitação (mm) e Y_T é variável reduzida de Gumbel para o tempo de retorno adotado.

ANEXO B – TESTE DE ADERÊNCIA KOLMOGOROV-SMIRNOV

O teste de Kolmogorov-Smirnov consiste em rejeitar a hipótese de adequação do ajuste se a diferença máxima entre os valores observados e calculados for superior ao crítico, para o nível de significância especificado. O teste é dado por:

$$D_{n,max} = \max D_n \quad (1)$$

onde,

$$D_n = |F_n(x) - F_x(x)| \quad (2)$$

Na qual: D_n é valor absoluto do teste Kolmogorov-Smirnov para cada amostra; n é o tamanho da amostra; $F_n(x)$ função probabilidade acumulada empírica, ou seja, frequência acumulada observada, que é dada por:

$$F_n(x) = \frac{m}{n} \quad (3)$$

Em que: m é ordem de classificação da amostra; $F_x(x)$ é a função de probabilidade acumulada teórica, ou seja, frequência acumulada da distribuição de probabilidade avaliada, que por ser a de Gumbel, dada, conforme Equação 1 do Anexo A, por:

$$F_x = \frac{1}{T} = 1 - e^{-e^{-Y}} \quad (4)$$

onde: Y é a variável reduzida de Gumbel, associada ao tempo de retorno.

A hipótese de nulidade é aceita, quando o valor máximo $D_{n,max}$ for menor que o valor crítico tabelado.

A Tabela 1 exhibe os valores críticos de D_n , em função do tamanho do amostra e do nível de significância

Tabela.0.1 - Valores Críticos por nível de significância para o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov

<i>N</i>	<i>D_{n,0,20}</i>	<i>D_{n,0,10}</i>	<i>D_{n,0,05}</i>	<i>D_{n,0,02}</i>	<i>D_{n,0,01}</i>	<i>N</i>	<i>D_{n,0,20}</i>	<i>D_{n,0,10}</i>	<i>D_{n,0,05}</i>	<i>D_{n,0,02}</i>	<i>D_{n,0,01}</i>
1	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995	21	0,226	0,259	0,287	0,321	0,344
2	0,684	0,776	0,842	0,900	0,929	22	0,221	0,253	0,281	0,314	0,337
3	0,565	0,636	0,708	0,785	0,829	23	0,216	0,247	0,275	0,307	0,330
4	0,493	0,565	0,624	0,689	0,734	24	0,212	0,242	0,269	0,301	0,323
5	0,447	0,509	0,563	0,627	0,669	25	0,208	0,238	0,264	0,295	0,317
6	0,410	0,468	0,519	0,577	0,617	26	0,204	0,233	0,259	0,290	0,311
7	0,381	0,436	0,483	0,538	0,576	27	0,200	0,229	0,254	0,284	0,305
8	0,358	0,410	0,454	0,407	0,542	28	0,197	0,225	0,250	0,279	0,300
9	0,339	0,387	0,430	0,480	0,513	29	0,193	0,221	0,246	0,275	0,295
10	0,323	0,369	0,409	0,457	0,489	30	0,190	0,218	0,242	0,270	0,290
11	0,308	0,352	0,391	0,437	0,468	31	0,187	0,214	0,238	0,266	0,285
12	0,296	0,338	0,375	0,419	0,449	32	0,184	0,211	0,234	0,262	0,281
13	0,285	0,325	0,361	0,404	0,432	33	0,182	0,208	0,231	0,258	0,277
14	0,275	0,314	0,349	0,390	0,418	34	0,179	0,205	0,227	0,254	0,273
15	0,266	0,304	0,338	0,377	0,404	35	0,177	0,202	0,224	0,251	0,269
16	0,258	0,295	0,327	0,366	0,392	36	0,174	0,199	0,221	0,247	0,265
17	0,250	0,286	0,318	0,355	0,381	37	0,172	0,196	0,218	0,244	0,262
18	0,244	0,279	0,309	0,346	0,371	38	0,170	0,194	0,215	0,241	0,258
19	0,237	0,271	0,301	0,337	0,361	39	0,168	0,191	0,213	0,238	0,255
20	0,232	0,265	0,294	0,329	0,352	40	0,165	0,189	0,210	0,235	0,252
						>40	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,52}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$

ANEXO C – DESAGREGAÇÃO SEGUNDO DAMÉ (2001)

Para iniciar o processo de simulação, os meses do ano serão divididos em intervalos de tempo de 15 minutos ($n\Delta t$), em que “n” é o número de intervalos de tempo (Δt) de 15 minutos existente em cada mês. Para os meses com 31 dias, o valor de $n = 2.976$, para 30 dias $n = 2.880$, para 29 dias $n = 2.784$ e para 28 dias $n = 2.688$.

O procedimento de simulação obedecerá à seguinte ordem: primeiro serão simulados os tempos de início dos eventos de precipitação (TIT_i); após, os tempos de início das células de precipitações ($TIOC$) $_{i,j}$, associadas a cada um dos eventos, e, para cada uma dessas células, serão simuladas as suas durações ($D_{i,j}$) e respectivas intensidades ($I_{i,j}$).

Para simular o tempo de início dos eventos (TIT_i), dentro de cada mês, serão gerados valores pseudo-aleatórios com distribuição exponencial, a partir de valores com distribuição uniforme entre 0 e 1, conforme a equação 1.

$$TIT_i = \frac{\text{Ln}(u)}{-\lambda} + TIT_{(i-1)} \quad (1)$$

Em que, TIT_i é o tempo de início do evento i (Δt), para $TIT_i \leq (n\Delta t)$; i é o evento 1,2,3z; u é valores com distribuição uniforme entre 0 e 1; e λ é o parâmetro do modelo BLPRM que governa o tempo de origem dos eventos, Δt^{-1} .

Cada valor de TIT_i simulado foi comparado ao ($n\Delta t$) do mês. O processo de simulação do TIT_i termina quando for simulado um valor de $TIT_i > (n\Delta t)$. O significado de um valor de $TIT_i > (n\Delta t)$ é que o evento não pertence ao mês no qual está sendo simulada a precipitação. Na simulação do primeiro valor de TIT_i , o valor de $TIT_{(i-1)}$ é nulo.

No eixo do tempo, esse processo pode ser representado assim:



Os tempos em que ocorrem as células de precipitação associadas aos eventos ($TIOC$) $_{i,j}$ são variáveis aleatórias exponencialmente distribuídas, assim como os TIT_i . Logo, a expressão usada na simulação de ($TIOC$) $_{i,j}$ é a equação 2:

$$(TIOC)_{i,j} = \frac{\text{Ln}(u)}{-\kappa\eta_i} + (TIOC)_{i,j-1} \quad (2)$$

em que, ($TIOC$) $_{i,j}$ é tempo de início de origem de células de precipitação “j”, associadas aos eventos “i” (Δt); i é o evento 1,2,3.....z; j é a célula de precipitação 1,2,3...y, associada ao

sendo: $U_p \rightarrow$ variável com distribuição normal padrão, com média zero e desvio padrão 1.

Para cada tormenta simulada dentro do mês, foi simulado um valor de η , que conforme apresentado nas expressões (2) e (3), foi utilizado na simulação do $(TIOC)_{i,j}$ e do $(TFOC)_i$.

A duração das células de precipitação, associada a cada evento, é considerada uma variável aleatória com distribuição exponencial, cuja média é $1/\eta$ (Δt). Para simular a duração de cada uma dessas células, serão gerados valores pseudo-aleatórios com distribuição exponencial, a partir de valores com distribuição uniforme entre 0 e 1, conforme mostra a equação 6.

$$D_{i,j} = \frac{\text{Ln}(u)}{-\eta} \quad (6)$$

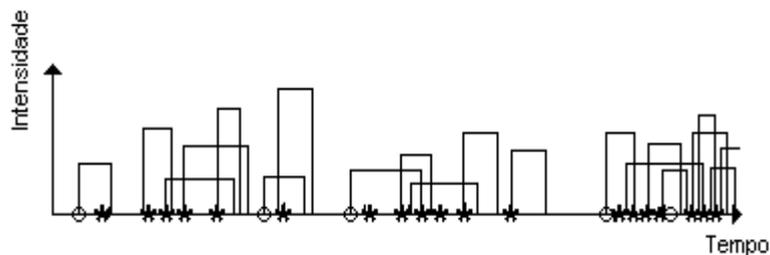
em que, $D_{i,j}$ é duração da célula de precipitação “j”, associada ao evento “i”, Δt ; i é evento 1,2,3.....z, e j é a célula de precipitação 1,2,3.....y, associada ao evento i.

As intensidades das células também são consideradas variáveis aleatórias, com distribuição exponencial, e seus valores serão obtidos pela equação 7:

$$I_{i,j} = \frac{\text{Ln}(u)}{-1/\mu_x} \quad (7)$$

em que, $I_{i,j}$ é a intensidade da célula de precipitação “j”, associada ao evento “i”, $\text{mm } \Delta t^{-1}$, e μ_x é o parâmetro do modelo BLPRM, que representa a média das intensidades das células de precipitação associadas aos eventos, $\text{mm } \Delta t^{-1}$.

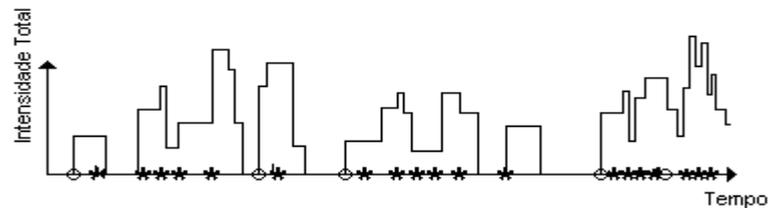
As células de chuvas podem ser representadas da seguinte forma:



Uma vez simulada a ocorrência, intensidade e duração das células de chuva em $\Delta t=15$ minutos, a intensidade de cada tormenta foi obtida somando-se a intensidade de cada uma das células de chuva.

A chuva total mensal foi obtida somando-se o total precipitado em cada uma das tormentas ocorridas dentro do mês.

De forma esquemática, isso pode ser representado como segue:



Depois de simulada a ocorrência, a intensidade e a duração das células de precipitação em $\Delta t = 15$ minutos, a intensidade de cada evento será obtida somando-se a intensidade de cada uma das células de precipitação. A precipitação total mensal será obtida somando-se o total precipitado em cada um dos eventos ocorridos dentro do mês.

Depois de simulada a precipitação na duração de 15 minutos, esses valores serão agregados na duração de 24 horas. Tal procedimento será feito porque as séries de precipitação, nas durações de 15 minutos e 24 horas, serão usadas na desagregação da precipitação diária.

De posse dos dados desagregados de precipitação (mm), na duração de 15 minutos, esses foram agregados para as durações preestabelecidas. Essas alturas de precipitação (mm) foram transformadas em intensidades (mm/h) e, a partir dessas, obtidas as curvas IDF sintéticas.