

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

INVARIÂNCIA DE ESCALA TEMPORAL EM
EQUAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-
FREQUÊNCIA (IDF) DA REGIÃO
METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

Guilherme Soares Almeida Rodrigues

Belo Horizonte

2020

**INVARIÂNCIA DE ESCALA TEMPORAL EM
EQUAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA
(IDF) DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE**

Guilherme Soares Almeida Rodrigues

Guilherme Soares Almeida Rodrigues

**INVARIÂNCIA DE ESCALA TEMPORAL EM
EQUAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA
(IDF) DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de Processos Hidrológicos

Orientador: Wilson dos Santos Fernandes

Coorientador: Eber José de Andrade Pinto

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2020

R696i

Rodrigues, Guilherme Soares Almeida.

Invariância de escala temporal em equações intensidade-duração-frequência (IDF) da região metropolitana de Belo Horizonte [recurso eletrônico] / Guilherme Soares Almeida Rodrigues. – 2020.

1 recurso online (ix, 175 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Wilson dos Santos Fernandes.
Coorientador; Eber José de Andrade Pinto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 86-175.

Bibliografia: f. 83-85.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Hidrologia estatística - Teses. 4. Hidrologia urbana - Teses. I. Fernandes, Wilson dos Santos. II. Pinto, Éber José de Andrade. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte – BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

http://www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Invariância de Escala Temporal Em Equações Intensidade-duração-frequência (IDF)
da Região Metropolitana de Belo Horizonte

GUILHERME SOARES ALMEIDA RODRIGUES

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. WILSON DOS SANTOS FERNANDES

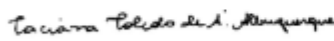

Prof. EBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO (COORIENTADOR)



Prof. FRANCISCO EUSTÁQUIO OLIVEIRA E SILVA


Prof. RAVIEL EURICO BASSO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por


Prof. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque
Subcoordenadora


Prof. Wilson dos Santos Fernandes
Orientador

Belo Horizonte, 13 de março de 2020.

“ A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo. ”

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao povo brasileiro que financia o ensino público, sem ele, não teria condições de chegar até aqui e entregar esta pesquisa.

Agradeço a Deus, pela oportunidade de desenvolver este estudo tão importante para cidade de Belo Horizonte.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Inês e Geraldo, por todo apoio que me deram ao longo desta trajetória. A minha irmã, Aline, por aguentar os dias bons e ruins. A minha amada Thays, que sempre me ajudou em todos os momentos e pelo companheirismo.

Aos meus orientadores, Wilson e Eber, pelas horas dedicadas ao ensino e compreensão dos fenômenos envolvidos na pesquisa e toda a dedicação no ensino e na pesquisa. A todos os professores do EHR, tanto os antigos, que tive a oportunidade de aprender conceitos básicos na graduação e serviram de inspiração para o traçado deste caminho, quanto aos novos que me mostraram com garra e determinação que ainda existe muita coisa a ser feita e melhorada.

Aos meus amigos e colegas do EHR por ajudarem com todas as dúvidas e conselhos. Agradeço também a Escola de Engenharia da UFMG por me trazer até aqui.

Agradeço à Capes pelo suporte financeiro da pesquisa.

Agradeço à CPRM pela receptividade em todas as vezes em que eu estive na sede em Belo Horizonte e pelo fornecimento dos dados utilizados na pesquisa.

RESUMO

Diversas cidades no mundo enfrentam problemas relacionados ao excesso ou escassez de água. Em períodos chuvosos as cidades e seus habitantes ficam sujeitos a alagamentos e deslizamentos de taludes. Para o dimensionamento de uma obra hidráulica a vazão de projeto pode ser conhecida através de medições diretas obtidas em estações fluviométricas, entretanto, no contexto urbano as bacias, em geral, não são monitoradas. A ausência de dados leva à estimativa da vazão de projeto de forma indireta, através de modelos chuva-vazão. O estudo de chuvas intensas é realizado através da análise da intensidade da chuva, sua duração e a frequência com que esta chuva intensa ocorre. Para facilitar a análise, é comum desenvolver equações que modelam a Intensidade-Duração-Frequência das chuvas, conhecidas como relações IDF. As relações IDF podem ser desenvolvidas para um local específico ou para uma região. Neste trabalho, foram realizadas expansões em séries de máximas intensidades anuais de modo a aumentar o tamanho da série e utilizar a metodologia de invariância de escala temporal das relações IDF para estimar a curva IDF da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Os fatores de escala foram obtidos para cada estação e conseguiu-se modelar um fator de escala regional. A distribuição de probabilidades foi obtida com o auxílio do *software* SEAF, que utiliza a lógica *fuzzy* para recomendar distribuições de probabilidades. Obteve-se como resultado uma equação IDF regional que depende apenas de dados diários de máxima intensidade diária anual. Os resultados obtidos pela relação IDF regional gerada no trabalho foram comparados aos dados observados e à IDF em vigor na região.

Palavras-Chave: Invariância de escala, Chuvas intensas, equações IDF, hidrologia urbana, modelagem hidrológica.

ABSTRACT

Several cities in the world face problems related to excess or scarcity of water. In rainy periods, cities and their inhabitants are subject to flooding and landslides. For the dimensioning of a hydraulic work the design flow can be known through direct measurements, obtained in fluvimetric stations. However, in the urban context the basins are generally not monitored. The absence of data leads to estimation of the design flow indirectly, through rain-flow models. The study of extreme rainfall is carried out through the analysis of rainfall intensity, its duration and the frequency with which this extreme rainfall occurs. To facilitate the analysis, it is common to develop equations that model the Intensity-Duration-Frequency of rains, known as IDF relations. IDF relationships can be developed for a specific location or region. In this paper, we carried out expansions in series of maximum annual intensities in order to increase the size of the series and use the time-scale invariance methodology of IDF relations to estimate the IDF curve of the Belo Horizonte Metropolitan Region. Scaling factors were obtained for each station and a regional scaling factor was modeled. The probability distribution was obtained with the aid of SEAF software, which uses fuzzy logic to recommend probability distributions. A regional IDF equation was obtained as a result that depends only on daily data of maximum daily annual intensity. The results obtained by the regional IDF ratio generated in the work were compared to the observed data and the IDF in force in the region.

Keywords: Scale invariance, extreme rainfall, IDF equations, urban hydrology, hydrological modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Influência do vento na medição de precipitação.....	20
Figura 3.2:Pluviômetro Ville de Paris em inox.....	20
Figura 3.3: Pluviógrafo.....	21
Figura 3.4: Pluviômetro automático.....	22
Figura 3.5: Radar meteorológico.....	23
Figura 3.6: Interface do SEAF.....	34
Figura 3.7: Resposta do SEAF a uma série de máximos.....	36
Figura 4.1: Localização das estações pluviográficas.....	53
Figura 4.2 : Relevo da RMBH e localização das estações	54
Figura 4.3: Fluxograma das etapas metodológicas.....	55
Figura 4.4 Fluxograma da construção das séries	56
Figura 4.5 Conteúdo do arquivo GEDAC	57
Figura 4.6 Conteúdo gerado pelo ATLASPLU	59
Figura 4.7: Gráfico momento q versus duração com regressão de potência	62
Figura 4.8: Obtenção do fator de escala	63
Figura 4.9: Definição das relações IDF's subsidiárias	66
Figura 5.1 Tamanho e distribuição temporal das séries expandidas	70
Figura 5.2:Verificação empírica da invariância de escala - Vespasiano	72
Figura 5.3: Verificação empírica da invariância de escala - Caeté	72
Figura 5.4: Verificação empírica da invariância de escala – Caixa de Areia.....	73
Figura 5.5: Verificação empírica da invariância de escala – Ponte Raul Soares.....	73
Figura 5.6: Verificação empírica da invariância de escala - Lourdes	74
Figura 5.7: Verificação empírica da invariância de escala – Raja Gabágli.....	74
Figura 5.8: Verificação empírica da invariância de escala - Horto	75
Figura 5.9: Verificação empírica da invariância de escala – Ponte Nova do Paraopeba	75
Figura 5.10: Verificação empírica da invariância de escala – Pedro Leopoldo	76
Figura 5.11: Verificação empírica da invariância de escala – Lagoa Grande	76
Figura 5.12 Gráfico fator de escala <i>versus</i> altimetria.....	79
Figura 5.13: Gráfico fator de escala <i>versus</i> precipitação anual média	79
Figura 5.14: Curva de frequência – Vespasiano – 15 minutos.....	82
Figura 5.15: Curva de frequência – Caeté – 3 horas	83
Figura 5.16: Curva de frequência – Caixa de Areia – 24 horas	83
Figura 5.17: Erro relativo médio por duração	86
Figura 5.18: RRMSE x Tempo de Retorno	90
Figura 5.19: RRMSE x Tempo de Retorno	91
Figura 5.20: Curva de frequência – Vespasiano – 8 horas	93
Figura 5.21: Curva de frequência – Caeté – 8 horas	94
Figura 5.22: Curva de frequência – Caixa de Areia – 8 horas	95
Figura 5.23: Curva de frequência – Ponte Nova do Paraopeba – 8 horas	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores de β	50
Tabela 3.2: Valores de α	50
Tabela 3.3: Quantis adimensionais das probabilidades anuais.....	50
Tabela 4.1: Estações Pluviográficas utilizadas.....	52
Tabela 4.2: Grau de confiança de cada distribuição para duração de 10 minutos.....	64
Tabela 4.3: Distribuição escolhida para cada série.....	64
Tabela 5.1: Expansão das séries de máximos anuais da RMBH.....	69
Tabela 5.2: Média e desvio padrão das intensidades máximas anuais – d = 24 horas	71
Tabela 5.3: Expoentes dos momentos e fatores de escala das estações	77
Tabela 5.4: Fatores de escala, altimetria e precipitação anual média anual	78
Tabela 5.5: Número de vezes em que a distribuição foi recomendada pelo SEAF em 1º lugar na análise	80
Tabela 5.6: RRMSE das IDFs por duração e posto.....	87
Tabela 5.7: Erro absoluto médio das IDFs por duração e posto.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AAS	Amostra Aleatória Simples
ANA	Agência Nacional de Águas
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPRM	Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
d	Duração de projeto da equação IDF
$E[X]$	Esperança da variável aleatória X
η	Fator de escala da IDF de invariância de escala temporal
γ	Coefficiente de assimetria
I	Intensidade associada a uma duração e tempo de retorno, obtida em equação IDF
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IID	Independentes e Identicamente Distribuídas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LMOM	Método dos Momentos L
$\mu_{diário}$	Média dos dados de máxima intensidade diária anual
MOM	Método dos Momentos Convencionais

MVS	Método da Máxima Verossimilhança
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RRMSE	Erro Médio relativo Quadrático
$\sigma_{diário}$	Desvio padrão dos dados de máxima intensidade diária anual
SEAF	Sistema Especialista em Análise de Frequência
T	Tempo de Retorno
$Var[X]$	Variância da variável aleatória X
$X(T)$	Função de Quantis
WMO	World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES	17
3.1.1	<i>Aparelhos para medição de precipitação.....</i>	<i>18</i>
3.2	HIDROLOGIA ESTATÍSTICA	24
3.2.1	<i>Distribuições de Probabilidades</i>	<i>25</i>
3.2.2	<i>Estimação de Parâmetros</i>	<i>29</i>
3.2.3	<i>O software SEAF.....</i>	<i>33</i>
3.3	RELAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA (IDF).....	38
3.3.1	<i>Histórico sobre o desenvolvimento de relações IDF.....</i>	<i>38</i>
3.3.2	<i>Relação IDF da RMBH.....</i>	<i>49</i>
4	MATERIAL E MÉTODOS	52
4.1	LOCAL DE ESTUDO	52
4.2	ETAPAS METODOLÓGICAS	55
4.2.1	<i>Tratamento dos dados e construção das séries de máximos anuais subdiários e diários.....</i>	<i>56</i>
4.2.2	<i>Aplicação das propriedades de invariância temporal nas séries de dados diários e subdiários.....</i>	<i>62</i>
4.2.3	<i>Seleção e validação da distribuição de probabilidades.....</i>	<i>63</i>
4.2.4	<i>Dedução de relações IDF subdiárias.....</i>	<i>65</i>
4.2.5	<i>Verificação da viabilidade de regionalização das IDF's subdiárias através de dados diários.....</i>	<i>66</i>
4.2.6	<i>Comparação da regionalização com a IDF apresentada por Pinheiro (1997)</i>	<i>67</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1	CONSTRUÇÃO DAS SÉRIES	68
5.2	APLICAÇÃO DA PROPRIEDADE DE INVARIÂNCIA TEMPORAL.....	71
5.2.1	<i>Verificação da existência da invariância de escala temporal.....</i>	<i>71</i>
5.2.2	<i>Cálculo do fator de escala das estações.....</i>	<i>77</i>
5.3	ESCOLHA DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES.....	80
5.4	CONSTRUÇÃO DAS IDFS DAS ESTAÇÕES E IDF REGIONAL.....	81
5.5	VALIDAÇÃO DA IDF REGIONAL ATRAVÉS DA ANÁLISE DO ERRO DE ESTIMATIVA	85
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – Exemplos de códigos em Scilab e R utilizados.....	105
	APÊNDICE B – Séries de Máxima Intensidade Anual.....	114
	APÊNDICE C – Grau De Recomendação Das Distribuições Pelo Seaf.....	130
	APÊNDICE D – Curvas Regionais De Frequência.....	142

1 INTRODUÇÃO

Diversas cidades no mundo enfrentam problemas relacionados ao excesso ou escassez de água. Em períodos chuvosos as cidades e seus habitantes ficam sujeitos a alagamentos e deslizamentos de taludes. Os alagamentos estão relacionados ao uso e ocupação do solo, obstrução do sistema de drenagem por acúmulo de materiais e resíduos sólidos, além de um projeto de drenagem urbana inadequado, por vezes, subdimensionado ou obsoleto. Este fato se deve a mudanças na taxa de impermeabilização do solo, comportamento da bacia hidrográfica ou dificuldade de se encontrar séries históricas com tamanhos relevantes e consistentes, o que pode levar a adoção de uma distribuição de probabilidades para modelar os dados amostrais que seria rejeitada caso a série possuísse um tamanho considerável.

Para o correto dimensionamento de dispositivos de drenagem, a determinação da vazão de projeto é fundamental e, por se tratar de uma variável aleatória, está sujeita à análise através da teoria de probabilidades e estatística (PINHEIRO, 1997).

Para o dimensionamento de uma obra hidráulica a vazão de projeto pode ser conhecida através de medições diretas obtidas em estações fluviométricas, entretanto, no contexto urbano as bacias, em geral, não são monitoradas.

A ausência de dados fluviométricos leva à estimativa da vazão de projeto de forma indireta, através de modelos chuva-vazão. A medição da chuva pode ser realizada em equipamentos acumuladores, como os pluviômetros, no qual a leitura da altura precipitada é realizada em horários fixos, ou em equipamentos registradores de altura e duração da chuva. Os instrumentos registradores podem ser gráficos como os pluviógrafos ou eletrônicos. As estações pluviográficas, em geral, possuem séries pequenas e com pouca representatividade espacial, gerando um novo complicador para a estimativa de quantis de chuvas intensas de curta duração.

Com a baixa disponibilidade de séries de dados pluviográficos subdiários, é usual realizar a desagregação de precipitações diárias para uma análise subdiária. Por isso, é fundamental pesquisar e desenvolver métodos que auxiliem na estimativa de precipitações em locais não monitorados ou com pequenas séries, de modo a reduzir as incertezas.

O estudo de chuvas intensas é realizado através da análise da intensidade da chuva, sua duração e a frequência com que esta chuva intensa ocorre. Para facilitar a análise, é comum desenvolver equações que modelam a Intensidade-Duração-Frequência das chuvas. Essas relações são conhecidas como relações IDF e podem ser desenvolvidas localmente ou para uma região.

Para contornar a ausência de dados é comum encontrar trabalhos que regionalizam curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de modo a permitir a elaboração de projetos em bacias sem monitoramento, necessitando apenas de conhecimentos de características regionais que estão correlacionadas às intensidades máximas. A regionalização de curvas IDF de postos pluviográficos pode ser encontrada em trabalhos como Pinheiro (1998), COPPETEC (2014) e Back (2006). Outros autores desenvolveram estudos de equações IDF através de dados diários e realizaram a desagregação em diferentes durações (BASSO (2019), SOUZA *et al.* (2012) e GUIMARÃES *et al.* (2016)).

Segundo Koutsoyiannis *et al.* (1998), a dificuldade para construir curvas IDFs regionalizadas em países em desenvolvimento se deve ao grande espaçamento físico entre as estações e ausência de dados. Em Minas Gerais, existem equações IDF's para algumas regiões ou cidades como, por exemplo, a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (PINHEIRO, 1997), Juiz de Fora (CPRM, 2014) e Uberaba (EHR-UFMG,2005). Portanto, é notória a importância do estudo de chuvas intensas e o estabelecimento de relações IDF para o planejamento e concepção de obras de drenagem urbana.

Na Região Metropolitana de Belo Horizonte é comum encontrar notícias de córregos transbordando e gerando danos humanos, materiais e ambientais. Após uma série de transbordamentos do Córrego Vilarinho e do Ribeirão Arrudas, a Prefeitura de Belo Horizonte, por meio da defesa civil da cidade, começou a emitir alertas para pessoas que se cadastram ou seguem as redes sociais da defesa civil, caso exista previsão de ocorrência de chuvas intensas, que aumentam a probabilidade de transbordamento dos rios. Concomitante ao acompanhamento das previsões de chuvas intensas, também é realizado o monitoramento dos níveis dos rios. Assim, quando os níveis dos cursos d'água alcançam uma cota de referência definida em estudos previamente realizados, a defesa civil inicia o bloqueio das ruas que dão acesso às planícies de inundação dos rios

A solução encontrada pela Prefeitura de Belo Horizonte é conhecida como uma medida não estrutural, ou seja, as ações visam controlar o uso e ocupação do solo em um determinado tempo e espaço, porém, sem de fato evitar que a resposta do corpo d'água a uma chuva intensa seja o transbordamento. Parte deste problema é decorrente da ocupação desordenada das planícies de inundação dos rios, em que se tem uma ocupação humana em uma região que durante o período de seca não existe escoamento do corpo d'água, mas em períodos chuvosos integra a calha do rio. A solução encontrada em diversos centros urbanos que realizaram a ocupação urbana das planícies de inundações foi revestir os leitos dos rios e aumentar a declividade, de modo que a vazão de pico suportada pelo canal fosse maior que a vazão anterior à obra.

Seja qual for o objetivo do projeto de drenagem, para fins urbanos, mineração ou irrigação, o conhecimento acerca da chuva de projeto e suas incertezas é fundamental. Portanto, este trabalho se justifica no sentido de aumentar a série de máximas intensidades anuais e permitir uma avaliação a respeito de uma nova alternativa de estimação de IDF através de dados diários. Ademais, possibilita a comparação entre uma IDF construída com dados diários com uma IDF construída através de dados subdiários. Esta comparação fornece subsídios para avaliar a metodologia proposta por Koutsoyiannis *et al* (1998) e Menabde *et al* (1999) para aplicação em locais desprovidos de informações subdiárias.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O propósito desta pesquisa consiste em desenvolver modelos matemáticos para realizar a estimativa de curvas IDF's subdiárias a partir de dados pluviométricos diários através da propriedade de invariância de escala temporal de curvas IDF.

2.2 *Objetivos específicos*

- Verificar a invariância de escala em séries de chuvas para diferentes durações.
- Verificar se as propriedades de invariância de escala apresentam um comportamento regional.
- Generalizar a metodologia para regionalização de curvas IDF em locais desprovidos de informações subdiárias.
- Atualizar as séries de Máximos Anuais para a Região Metropolitana de Belo Horizonte.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Processos de formação de precipitações*

A hidrologia, segundo Tucci (1993), é a ciência que trata da água no planeta Terra conforme sua ocorrência, distribuição e circulação, além das suas propriedades físicas, químicas e interação com o meio ambiente e com os seres humanos. No âmbito da engenharia de recursos hídricos, a hidrologia, é aquela que estuda a ocorrência e aproveitamento da água em bacias hidrográficas, quantificando os recursos hídricos quanto ao tempo e espaço. A quantificação é utilizada para a realização de projetos e planejamento de recursos hídricos.

A medida em que a compreensão do ciclo hidrológico avançava aumentava também a compreensão do processo de formação das precipitações, parcela fundamental do ciclo hidrológico. Segundo Oliveira (2019), a água é a única substância que é encontrada em suas três fases da matéria na superfície terrestre. A troca de fase envolve consumo ou liberação de energia, na forma de calor latente, o que propicia a condensação do vapor d'água ao se atingir o ponto de saturação. O ponto de saturação é a quantidade máxima de vapor d'água que um volume de ar pode conter, mantendo-se constantes a temperatura e a pressão.

Segundo Wang (2013) *apud* Oliveira (2019), a condensação do vapor d'água não ocorreria se não houvesse material particulado no ar, conhecidos como aerossóis, que pode ser de origem natural, como poeiras, fumaça produzida por erupções vulcânicas e incêndios florestais e microrganismos ou de origem antrópica, como a queima de combustíveis e processos industriais.

A formação de nuvens ocorre quando uma parcela de ar ascende para níveis de baixa pressão atmosférica, ocorrendo aumento de volume na massa de ar. Com a expansão, ocorre uma redução nos níveis de energia interna e temperatura, o que é conhecido como resfriamento adiabático. A massa de ar sujeita ao resfriamento adiabático entra em contato com os aerossóis presentes na atmosfera e inicia o processo de formação de gotículas água e/ou cristais de gelo, que se agrupam e formam as nuvens. (OLIVEIRA, 2019)

Segundo Ahrens e Henson *apud* Oliveira (2019) as precipitações ocorrem quando as gotículas de água atingem um diâmetro de 1 mm, provocando um desequilíbrio nas forças de flutuação

térmica e iniciando o processo de formação das chuvas. As precipitações podem ser classificadas de acordo com o seu processo de formação:

Chuvas convectivas: são chuvas de grandes intensidades e pequena duração, restritas a pequenas áreas. São geradas a partir do aquecimento do ar ao nível do solo. O ar ascende de forma rápida a grandes altitudes, ocorrendo a condensação do vapor d'água.

Chuvas orográficas: são chuvas formadas pela elevação do ar quente e úmido devido ao encontro com uma barreira topográfica. Ao se elevar, a massa de ar se condensa, iniciando o processo de precipitação.

Chuvas frontais ou ciclônicas: são chuvas que se formam pela movimentação de massas de ar de diferentes temperaturas, que fluem de uma zona de alta pressão para uma zona de baixa pressão. Ao se encontrarem, a massa de ar quente se sobrepõe à massa de ar frio, alterando a temperatura e pressão. A massa de ar quente é resfriada e ocorre a condensação do vapor d'água, o que produz chuvas de longa duração e, em geral, pequenas intensidades em uma grande região.

Na RMBH, o regime de chuva é influenciado por diversos fatores e processos. Este fato se deve a localização em uma zona de transição e o principal fenômeno atuante é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS se deve à interação entre a Frente Polar Atlântica e as linhas de convecção tropical, criando uma banda de nebulosidade orientada de noroeste a sudeste do Brasil, ocasionando chuvas em sua extensão no verão na RMBH. A ZCAS apresenta a característica de estagnação, que dura entre quatro a dez dias. (NOGUEIRA, 2019)

De modo a registrar a quantidade de chuva precipitada, foram desenvolvidos equipamentos de medição, conforme apresentado nos itens a seguir.

3.1.1 Aparelhos para medição de precipitação

Segundo a WMO (2008), a análise de precipitação é facilitada e confiável se as estações e postos possuírem equipamentos semelhantes e adotarem o mesmo critério de operação em toda a rede. A medição de precipitação é muito sensível à exposição ao vento, por isso, os

equipamentos recomendados pela WMO são aqueles que estão sujeitos ao menor efeito do vento.

Para a medição de chuva existem principais 3 tipos de equipamentos em operação no Brasil: pluviômetros, pluviógrafos e pluviômetros automáticos.

3.1.1.1 Pluviômetros

Os pluviômetros foram os primeiros equipamentos utilizados na medição de eventos de precipitação e medem a quantidade de água (volume) precipitada sobre uma área de captação com as leituras sendo realizadas em intervalos de tempo fixo. É um aparelho acumulador de chuva que permite conhecer a altura da precipitação, mas não possibilita medir a sua duração. Segundo Strangeways (2010), existem registros dos primeiros pluviômetros que datam do século IV a.c. e eram utilizados na Índia para monitorar algum evento específico. Entretanto, acredita-se que os chineses utilizavam pluviômetros no século X a.C. e começaram a operar de modo sistemático no século II a.c. (CHOW *et al.*, 1988). Em geral, os pluviômetros são operados em escalas de tempo, ou seja, o conteúdo precipitado é medido uma vez a cada intervalo de tempo conforme convenções internacionais ou do órgão responsável pela operação. No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) opera suas estações pluviométricas conforme horários estabelecidos pela WMO, enquanto a Agência Nacional de Águas (ANA) opera suas estações em intervalos de tempo diários com medição às 7:00 horas.

Conforme diretrizes da WMO (2008), os pluviômetros devem estar protegidos contra ação do vento e evaporação. A calibragem e manutenção do pluviômetro consiste em passar uma quantidade de água conhecida com diferentes intensidades e verificar o volume coletado, além da realização de operações de limpeza de detritos e sujeiras acumuladas. Os pluviômetros devem possuir área de abertura entre 200 cm² e 500 cm² e a leitura é realizada através do despejo do conteúdo interno em uma proveta calibrada à área.

A Figura 3.1 mostra diversos formatos de pluviômetros em relação à ação do vento, sendo que o pluviômetro 1 possui maior impacto nas medições e o pluviômetro 6 é o que tem a menor influência do vento nos registros.

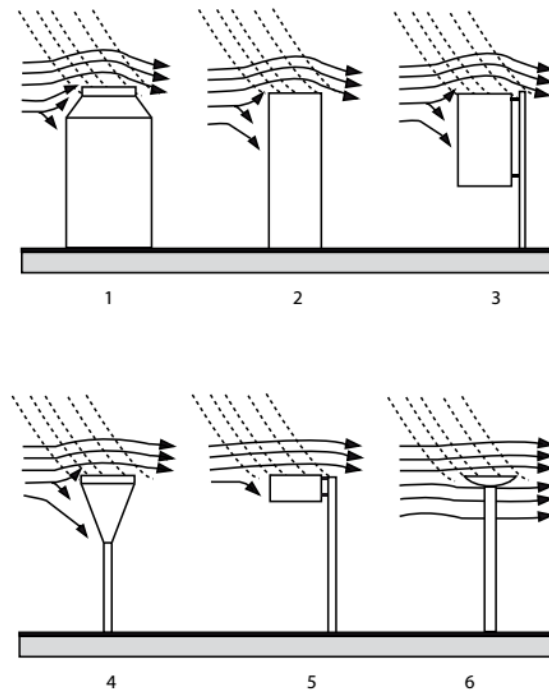


Figura 3.1: Influência do vento na medição de precipitação.

Fonte: WMO (2008).

No Brasil, o pluviômetro mais utilizado é o Ville de Paris, que possui área superficial de 400 cm² e uma aerodinâmica que diminui efeitos advindos do vento. A Figura 3.2 mostra o pluviômetro Ville de Paris em inox, um pluviômetro paulista e um pluviógrafo Hellmann ao fundo, em branco.



Figura 3.2: Pluviômetro Ville de Paris em inox.

Fonte: <<http://meteoropole.com.br/2016/04/duvida-do-leitor-capacidade-de-um-pluviometro/>> acesso em 20/11/2019

3.1.1.2 Pluviógrafos

Os pluviógrafos são instrumentos utilizados para registrar a chuva em um local específico e de modo contínuo no tempo, ou seja, é um medidor pontual que permite identificar as intensidades de precipitação em intervalos de tempo pequenos. Os pluviógrafos são compostos por um sistema de básculas ou peso que é conectado à uma pena que registra, em um um papel graduado, a altura e o horário da precipitação.

A instalação do pluviógrafos segue as mesmas diretrizes do pluviômetro e os registros do pluviógrafo são realizados em um papel chamado pluviograma. Estes são substituídos diariamente às 7:00 horas. A Figura 3.3 mostra um pluviógrafo parcialmente desmontado para manutenção.



Figura 3.3: Pluviógrafo

Fonte: <<http://keri.kerala.gov.in/portfolio/self-recording-rain-gauge/>> acesso em 20/11/2019

Os pluviogramas são gráficos que registram a quantidade de precipitação no tempo. O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) digitaliza os gráficos através de uma mesa e mouse próprios por

meio do *software* Hidrograph 1.02 desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Viçosa. A digitalização é realizada através da tomada de pontos de inflexão dos pluviogramas, assim, o *software* gera um mesmo pluviograma digital permitindo a discretização da chuva de 1 em 1 minuto.

3.1.1.3 Pluviômetros automáticos

Os pluviômetros automáticos ou pluviômetros digitais são dispositivos que permitem a medição e o registro em arquivos digitais da precipitação e da data-hora de ocorrência em um local específico. Se estes dispositivos possuem equipamentos telemétricos é possível acompanhar em tempo real os eventos de chuva. O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) utiliza pluviômetros automáticos para monitorar a possibilidade de deslizamentos de taludes e inundações. O pluviômetro automático, que em geral é do tipo de balsa, trabalha com a emissão de pulsos elétricos que são enviados a um sistema de gravação, conhecido como *datalogger*, a cada vez que um volume fixo de chuva é registrado. O sistema de gravação pode ser acoplado a um painel solar e tem o funcionamento à bateria. A coleta dos dados pode ser realizada através da cópia dos dados do *datalogger* in loco, através da conexão a uma rede de telefonia, sistemas de redes de celulares, via sinal de rádio ou via satélite. A Figura 3.4 mostra um pluviômetro automático conectado a um painel solar e um *datalogger*.



Figura 3.4: Pluviômetro automático.

Fonte: < https://blogpautaaberta.blogspot.com/2019/03/blog-post_915.html > acesso em 25/11/2019

Os pluviômetros automáticos ainda apresentam divergências em relação à medição realizada em pluviômetros tradicionais. Milanesi *et al.* (2017) apresenta diversos trabalhos que

concluíram a existência de submedição dos pluviômetros automáticos em eventos extremos de precipitação.

3.1.1.4 Radares Meteorológicos

Segundo Hong e Gourley (2015) *apud* Oliveira (2019), os radares meteorológicos foram inicialmente desenvolvidos para detectar aeronaves, navios e submarinos em um contexto de guerra. Com os avanços tecnológicos, os radares começaram a ser utilizados em contextos civis e comerciais. Assim, foi possível realizar o monitoramento de precipitações, estimando o volume precipitado e o local da precipitação.

Apesar de possuírem uma boa resolução espacial, os radares estão sujeitos a diversos erros como a presença de obstáculos, que podem ser prédios ou cadeias de montanhas, atenuação do sinal devido a umidade e erro na conversão da função refletividade em intensidade precipitada, conhecida como função Z-R. Além disso, o acesso aos dados e a extensão territorial coberta por radares é um obstáculo à sua utilização. A Figura 3.5 mostra um radar meteorológico do CEMADEN.



Figura 3.5: Radar meteorológico.

Fonte: < <https://www.cemaden.gov.br/imagem11/> > acesso em 20/01/2020

3.1.1.5 Satélite

Segundo Oliveira (2019), os dados de satélite fornecem uma ampla cobertura territorial, sendo que os primeiros satélites utilizados para o monitoramento meteorológico foram lançados em 1960. O primeiro satélite meteorológico lançado foi o satélite americano TIROS-1, fornecia imagens sobre os padrões de nuvens terrestres.

Com os avanços tecnológicos e o lançamento de novas missões, os satélites ganharam novos sensores que permitem estimar a precipitação através de algoritmos desenvolvidos pelas agências espaciais. Apesar de cobrirem uma grande extensão territorial, os satélites não possuem dados de precipitação com uma grande discretização temporal. Os satélites não conseguem realizar o monitoramento com estimativa do volume precipitado de forma tão precisa quanto as medições diretas. Eles apenas coletam dados instantâneos à medida em que sua órbita passa sobre o local. Por isso, algumas chuvas convectivas não são monitoradas pelo satélite, visto que a sua ocorrência é realizada em tempo inferior à passagem do satélite. Os registros de satélite podem variar de 15 minutos a escala mensal, sendo mais comum a escala temporal de 3 horas.

Outro fator que dificulta a utilização dos dados de satélite é a incerteza no valor da medição de precipitação realizada. Oliveira (2019) desenvolveu um estudo para tentar caracterizar as diferenças de estimativa de precipitação por satélites e pluviômetros. Foi constatado que as estimativas de satélite apresentavam diferenças expressivas em relações aos dados monitorados pelos pluviômetros, em especial, quando da ocorrência de alturas de chuva superiores a 40 mm.

Como o objetivo do trabalho é construir um modelo de invariância de escala temporal para a dedução de equações IDF de dados diários para subdiários, os dados de satélite carregam grandes incertezas e não serão utilizados no presente trabalho.

3.2 *Hidrologia estatística*

Com o advento da medição de precipitação e à medida em que as séries começaram a crescer, iniciou-se a modelagem de processos do ciclo hidrológico. Os processos hidrológicos

determinísticos são raríssimos e, portanto, os fenômenos são modelados através de processos estocásticos ou regidos por leis de probabilidades. (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

3.2.1 Distribuições de Probabilidades

Segundo Naghettini e Pinto (2007), um modelo de distribuição de probabilidades é uma forma abstrata matemática que deve ser capaz de representar as possíveis variações de uma variável aleatória. Os modelos de distribuição de probabilidade são parâmetros, ou seja, possuem parâmetros que devem ser definidos conforme a amostra de observações da variável aleatória.

A variável aleatória para máximos anuais, em geral relacionada a vazões, intensidades ou precipitações máximas, é modelada comumente por distribuições que possuem característica assimétrica e ilimitada superiormente. Na literatura é comum encontrar a modelagem estatística pela distribuição de Gumbel, GEV e Log-Normal. (VYVER (2015), PUNLUM *et al.* (2017), LANGOUSIS e VENEZIANO (2007) e HASSANZADEH *et al.* (2014))

Os próximos subitens mostram o equacionamento de tais distribuições conforme apresentado em Naghettini e Pinto (2007).

3.2.1.1 Distribuição de Gumbel (máximos)

A distribuição de Gumbel, desenvolvida por Emil Gumbel, apresenta uma função para valores extremos de máximos e uma função para mínimos. Como, no presente trabalho, o objetivo é modelar máximas precipitações e intensidades anuais, será apresentado apenas o equacionamento da distribuição para máximos.

A distribuição de Gumbel é a distribuição mais utilizada em análise de frequência de variáveis hidrológicas e diversas aplicações em equações IDF. A função densidade de probabilidades da distribuição de Gumbel está apresentada na equação (3.1).

$$f_x(X) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{X - \beta}{\alpha} - \exp \left(-\frac{X - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (3.1)$$

onde, α é o fator de escala e β representa o fator de posição.

A função acumulada de probabilidades é dada pela equação (3.2).

$$F_x(X) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{X - \beta}{\alpha} \right) \right], \text{ para } -\infty < x < \infty, -\infty < \beta < \infty \text{ e } \alpha > 0 \quad (3.2)$$

O valor esperado e a variância da distribuição de Gumbel estão apresentados nas equações (3.3) e (3.4) enquanto a assimetria da distribuição é constante e equivale a 1,1396:

$$E[X] = \mu_X = \beta + 0,5772\alpha \quad (3.3)$$

$$Var[X] = \sigma_X^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (3.4)$$

A função inversa da função acumulada de probabilidades, também conhecida como função de quantis, é descrita na equação (3.5).

$$X(F) = \beta - \alpha \ln[-\ln(F)] \quad \text{ou} \quad (3.5)$$

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

em que F é a frequência ou probabilidade anual de não superação e T é o tempo de retorno em anos.

3.2.1.2 Distribuição GEV

A distribuição Generalizada de Valores Extremos, ou simplesmente distribuição GEV, foi apresentada por Jenkinson em 1955 e agrega três formas assintóticas de valores extremos de máximos em uma única expressão. A forma assintótica depende do fator de forma κ . A equação (3.6) apresenta a função densidade de probabilidades da GEV.

$$f_x(X) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \kappa \left(\frac{X - \beta}{\alpha} \right) \right]^{1/\kappa - 1} \exp \left\{ - \left[1 - \kappa \left(\frac{X - \beta}{\alpha} \right) \right]^{1/\kappa} \right\} \quad (3.6)$$

onde κ é o fator de forma, α é o fator de escala e β o fator de posição.

A função acumulada de probabilidades é dada pela equação (3.7).

$$F_x(X) = \exp\left\{-\left[1 - \kappa\left(\frac{X - \beta}{\alpha}\right)\right]^{1/\kappa}\right\} \quad (3.7)$$

O valor de κ determina qual forma assintótica que a distribuição assume. Caso $\kappa < 0$, a distribuição assume forma exponencial simples. Caso $\kappa = 0$, a distribuição GEV assume forma exponencial dupla e equivale a distribuição de Gumbel e, por fim, caso $\kappa > 0$, a distribuição apresenta limite superior, o que inviabiliza a análise de máximos.

Os momentos de ordem n da distribuição GEV só existem caso $\kappa > -1/n$, ou seja, o valor esperado, a variância e a assimetria existem somente se $\kappa > -1$, $\kappa > -1/2$ e $\kappa > -1/3$, respectivamente. Caso a condição seja atendida, as equações (3.8), (3.9) e (3.10) podem ser utilizadas para o cálculo destes momentos.

$$E[X] = \mu_X = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} [1 - \Gamma(1 + \kappa)] \quad (3.8)$$

$$Var[X] = \sigma_X^2 = \left(\frac{\alpha}{\kappa}\right)^2 [\Gamma(1 + 2\kappa) - \Gamma^2(1 + \kappa)] \quad (3.9)$$

$$\gamma = \langle \text{ sinal de } \kappa \rangle \frac{-\Gamma(1 + 3\kappa) + 3\Gamma(1 + \kappa)\Gamma(1 + 2\kappa) - 2\Gamma^3(1 + \kappa)}{[\Gamma(1 + 2\kappa) - \Gamma^2(1 + \kappa)]^{3/2}} \quad (3.10)$$

onde Γ é a função Gama.

A função de quantis da distribuição GEV está apresentada na equação (3.11).

$$X(F) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \{1 - [-\ln(F)]^\kappa\} \quad \text{ou} \quad (3.11)$$

$$X(T) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \left\{1 - \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^\kappa\right\}$$

onde F é a frequência ou probabilidade anual de não superação e T é o tempo de retorno, em anos.

3.2.1.3 Distribuição Log-Normal

A distribuição Log-Normal é uma distribuição derivada da distribuição Normal, apresentada por Karl Friedrich Gauss, e consiste na modelagem da variável aleatória X através de seu logaritmo natural, conforme equação (3.12):

$$Y = \ln(X) \quad (3.12)$$

Assim, a função densidade de probabilidades de uma variável aleatória Log-Normal X é dada pela equação (3.13):

$$f_x(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln(X)}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-\mu_{\ln(X)}}{\sigma_{\ln(X)}}\right]^2\right\}, \text{ para } x > 0 \quad (3.13)$$

O valor esperado e a variância de uma variável Log-Normal são apresentadas nas equações (3.14) e (3.15):

$$E[X] = \mu_X = \exp\left[\mu_{\ln(X)} + \frac{\sigma_{\ln(X)}^2}{2}\right] \quad (3.14)$$

$$Var[X] = \sigma_X^2 = \mu_X^2[\exp(\sigma_{\ln(X)}^2) - 1] \quad (3.15)$$

O coeficiente de assimetria da distribuição Log-Normal é dependente do coeficiente de variação CV e está apresentado na equação (3.17).

$$CV_X = \sqrt{\exp[\sigma_{\ln(X)}^2] - 1} \quad (3.16)$$

$$\gamma = 3CV_X + (CV_X)^3 \quad (3.17)$$

O cálculo das probabilidades e funções inversas segue o procedimento da distribuição Normal considerando Y da equação (3.12) como variável aleatória. Os quantis são obtidos pelo exponencial de Y .

3.2.2 Estimação de Parâmetros

A estimação de parâmetros das distribuições de probabilidades consiste em realizar uma aproximação do valor do parâmetro populacional a partir de uma amostra, uma vez que os verdadeiros valores dos parâmetros somente seriam descobertos caso se conhecesse a população. Os métodos de estimação pontual de parâmetros mais utilizados são:

- Método dos Momentos Convencionais (MOM)
- Método da Máxima Verossimilhança (MVS)
- Método dos Momentos L (LMOM)

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a estimação de parâmetros necessita que as realizações da variável aleatória sejam independentes e identicamente distribuídas (IID), ou seja, caso as realizações possuam a mesma distribuição de probabilidades e sejam independentes umas das outras. Formalmente, a definição de estimação de parâmetros consiste em considerar um conjunto de dados amostrais x com extensão n (x_1, x_2, \dots, x_n) que sejam realizações da variável aleatória X . Então, a função $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é a realização da variável aleatória $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ e pode ser utilizada para estimação do parâmetro θ da distribuição $f_X(x)$. Assim, a estimativa θ é a realização do estimador $\hat{\theta}$ da população.

3.2.2.1 Método dos Momentos Convencionais (MOM)

O Método dos Momentos Convencionais (MOM) é o método mais simples de estimação de parâmetros e consiste em igualar os momentos amostrais aos momentos populacionais. A definição formal é realizada através da consideração de que as observações y_1, y_2, \dots, y_n sejam constituintes de uma amostra aleatória simples (AAS) retirada de uma população de uma variável aleatória distribuída conforme $f_y(y, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ de k parâmetros. Se μ_j e m_j representam momentos populacionais e amostrais, respectivamente, o sistema de equações do método dos momentos está apresentado na equação (3.18).

$$\mu_j(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_k) = m_j \text{ com } j = 1, 2, \dots, k \quad (3.18)$$

Segundo Jesus (2016), o MOM apresenta como vantagens a simplicidade no cálculo e a aplicabilidade direta em distribuições frequentemente utilizadas na engenharia de recursos hídricos. Naghettini e Pinto (2007) ressaltam que o MOM pode apresentar desempenho superior na estimativa dos parâmetros se comparado ao MVS quando se possui pequenas amostras e possui desvantagem de apresentar qualidade dos estimadores inferior a outros métodos para distribuições de três ou mais parâmetros, além de ter menos robustez a *outliers* da amostra.

3.2.2.2 Método da Máxima Verossimilhança (MVS)

O Método da Máxima Verossimilhança busca maximizar uma função dos parâmetros da distribuição que é conhecida como função de verossimilhança. Segundo Naghettini e Pinto (2007), a definição formal do método consiste em considerar que os valores da amostra y_1, y_2, \dots, y_n sejam realizações da variável aleatória e constituem uma AAS retirada da população da variável aleatória. A distribuição de probabilidades da variável aleatória é dada pela função $f_y(y, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ de k parâmetros. A função densidade de probabilidades conjunta da AAS constituída por Y_1, Y_2, \dots, Y_n é dada por $f_{Y_1, Y_2, \dots, Y_n}(y_1, y_2, \dots, y_n) = f_Y(y_1)f_Y(y_2) \dots f_Y(y_n)$. Assim, o MVS é apresentado conforme equação (3.19):

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^N f_y(y, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (3.19)$$

onde $L(\theta)$ é a função de verossimilhança.

Para maximizar a função de verossimilhança é necessário igualar a zero a derivadas parciais da função de verossimilhança, formando um sistema de equações conforme equação (3.20).

$$\frac{\partial L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)}{\partial \theta_j} = 0, j = 1, 2, \dots, k \quad (3.20)$$

As soluções do sistema levam a obtenção dos estimadores de máxima verossimilhança. Segundo Van Gelder (2004) *apud* Jesus (2016), o MVS possui como vantagens estimadores não enviesados com menor erro quadrático quando a amostra tende ao infinito e possui a

desvantagem de gerar grandes erros em amostras pequenas, necessitando de grandes amostras, o que não é usual em engenharia de recursos hídricos.

3.2.2.3 Método dos Momentos L (LMOM)

Segundo Naghettini e Pinto (2007), os momentos ponderados por probabilidades foram inicialmente apresentados por Greenwood *et al.* (1979) *apud* Naghettini e Pinto (2007) e definidos pela equação (3.21).

$$M_{p,r,s} = E\{X^p[F_X(x)]^r[1 - F_X(x)]^s\} = \int_0^1 [x(F)]^p F^r (1 - F)^s dF \quad (3.21)$$

onde $M_{p,r,s}$ é o momento ponderado por probabilidades, p, r e s são números reais de ponderação, $x(F)$ é a função de quantis da distribuição em análise e F é a função acumulada de probabilidades

Os momentos $M_{1,0,s}$ e $M_{1,r,0}$ são utilizados para caracterizar distribuições de probabilidades e se apresentam nas equações (3.22) e (3.23).

$$M_{1,0,s} = \alpha_s = \int_0^1 x(F)(1 - F)^s dF \quad (3.22)$$

$$M_{1,r,0} = \beta_r = \int_0^1 x(F)F^r dF \quad (3.23)$$

Os termos α_s e β_r que correspondem aos momentos ponderados $M_{1,0,s}$ e $M_{1,r,0}$, respectivamente, possuem generalidade para estimação de parâmetros além de apresentar maior robustez a *outliers*. Para uma amostra ordenada em modo crescente, as estimativas de α_s e β_r , não enviesadas, podem ser calculadas pelas equações (3.24), (3.25) e (3.26).

$$\alpha_s = \alpha_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{N-i}{s}}{\binom{N-1}{s}} x_i \quad (3.24)$$

$$b_r = \beta_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{i-1}{r}}{\binom{N-1}{r}} x_i \quad (3.25)$$

$$\alpha_s = \sum_{i=1}^s \binom{s}{i} (-1)^i \beta_i \text{ ou } \beta_r = \sum_{i=1}^r \binom{r}{i} (-1)^i \alpha_i \quad (3.26)$$

O conceito de método dos momentos L (LMOM) foi introduzido por Hosking (1990), sendo o momento L de ordem r , denotado por λ_r , combinação linear de α_s e β_r e definido na equação (3.27).

$$\lambda_r = (-1)^{r-1} \sum_{k=1}^{r-1} P_{r-1,k} \alpha_k = \sum_{k=1}^{r-1} P_{r-1,k} \beta_k \quad (3.27)$$

onde $P_{r-1,k} = (-1)^{r-k-1} \binom{r-1}{k} \binom{r+k-1}{k}$ e sua substituição na equação (3.27) resulta nos momentos L das equações (3.28) a (3.31).

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0 \quad (3.28)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (3.29)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (3.30)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (3.31)$$

O momento L de primeira ordem, λ_1 , é equivalente à média e, portanto, é um parâmetro de posição. Para momentos de ordem superior a 1 é definida a razão de momentos L para descrever a escala, assimetria e forma das distribuições. As razões de momentos L estão apresentadas nas equações (3.32), (3.33) e (3.34) e representam o parâmetro de escala, assimetria e curtose, respectivamente. (NAGHETTINI e PINTO, 2007)

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (3.32)$$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (3.33)$$

$$\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (3.34)$$

Os momentos L amostrais são calculados quando se iguala os momentos ponderados amostrais aos populacionais, $a_s = \alpha_s$ e $b_r = \beta_r$, e os momentos L amostrais aos populacionais $l_r = \lambda_r$.

O LMOM possui como vantagem a resistência a *outliers* e um bom desempenho para amostras pequenas e como desvantagem pode apresentar um erro quadrático médio dos estimadores superior a outros métodos. (VAN GELDER (2004) *apud* JESUS (2016) e HOSKING (1990))

3.2.3 O software SEAF

O *software* SEAF, acrônimo para Sistema Especialista em Análise de Frequência, proposto por Cândido (2003) e disponível para download no site <http://www.ehr.ufmg.br/downloads/> é um programa de auxílio à decisão que leva em consideração uma análise multicritério para a escolha de uma ou mais distribuições de probabilidades adequadas à modelagem de eventos hidrológicos de máximos anuais.

A escolha da distribuição se baseia na teoria da lógica fuzzy e a estimação de parâmetros das distribuições analisadas são realizadas através do LMOM. Segundo Cândido e Naghettini (2008), o modelo utilizado no SEAF não foi desenvolvido para identificar a verdadeira distribuição de probabilidades de uma amostra, mas comparar e selecionar entre distribuições candidatas a que se apresenta mais apropriada para se ajustar aos dados fornecidos.

Segundo Orchard (1998) a lógica fuzzy é utilizada quando os limites da classificação da informação não são muito claros, e como exemplo apresenta o conceito de juventude, que pode ser atribuído para uma pessoa de 25 anos ou para uma pessoa de 35 anos. O conceito que classifica um indivíduo como jovem não tem uma definição clara, entretanto, uma pessoa de 100 anos não pode ser classificada como jovem. Neste contexto, a lógica fuzzy utiliza uma

probabilidade de um indivíduo de 25 anos ser considerado jovem superior à probabilidade de um indivíduo de 35 anos. Desta forma, é definida uma probabilidade de uma pessoa ser considerada jovem. No caso do SEAF, a lógica fuzzy é utilizada para comparar as distribuições de probabilidades frente aos dados observados.

O *software* foi desenvolvido para trabalhar em sistema operacional Windows 98 ou versões inferiores e arquitetura 32 bits, o que leva à incompatibilidade frente aos principais sistemas operacionais disponíveis nos computadores da atualidade. Para contornar este problema pode-se emular um sistema 32 bits através de uma máquina virtual. A máquina virtual Virtual Box 6.1.0, disponível em <https://www.virtualbox.org/wiki/Downloads> é uma alternativa para emular um sistema operacional 32 bits em um computador com arquitetura 64 bits.

Conforme descrito por Cândido e Naghettini (2008), o SEAF recebe uma entrada de texto com os valores de máximos anuais de dados hidrológicos e extrai informações numéricas. Com base nas informações extraídas o sistema toma decisões baseado em leis heurísticas e a sua interface com lógica fuzzy e inteligência artificial o auxiliam no tratamento das incertezas inerentes ao processo de seleção da distribuição o mais próximo possível de uma decisão humana. A Figura 3.6 apresenta a interface do SEAF.

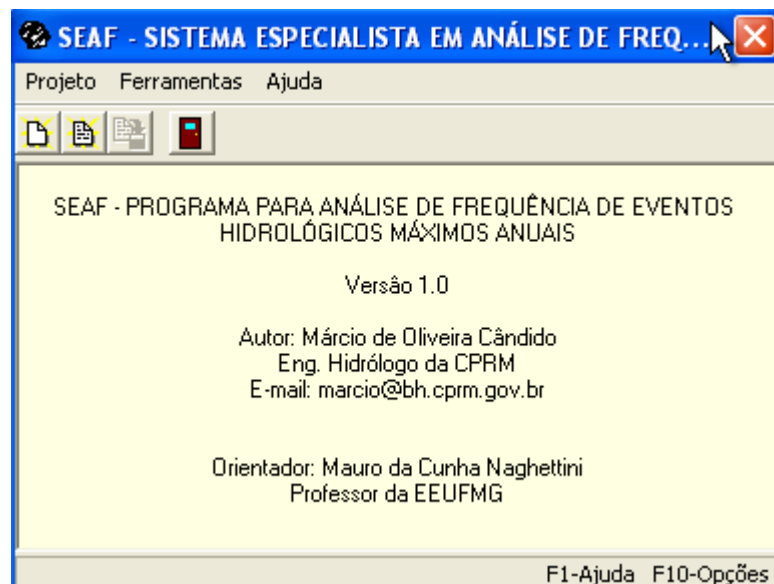


Figura 3.6: Interface do SEAF

Para comparar as diversas distribuições frente aos dados, o SEAF realiza diversos cálculos como os momentos L e as razões de momentos L. De posse dos momentos L, o *software* estabelece intervalos de confiança para os parâmetros de assimetria e curtose, e seleciona as distribuições que estão dentro do intervalo. Após a primeira seleção, é aplicado o teste de correlação linear de Filliben para estimar um intervalo de confiança e remover distribuições da análise. Por fim, é analisado se as distribuições selecionadas possuem limitações que impeçam a utilização para estimar máximos anuais, como por exemplo o fator de forma $\kappa > 0$ na distribuição GEV, e se realiza um teste de parcimônia que avalia a relação custo benefício de se adotar uma distribuição semelhante de 3 parâmetros a frente a uma distribuição 2 parâmetros de mesmas características. As distribuições que não foram rejeitadas são submetidas à lógica *fuzzy* para avaliar cada uma baseando-se nos intervalos de confiança. Após estes passos o SEAF ordena as distribuições de acordo com seus níveis de confiança e atribui uma probabilidade de cada distribuição se adequar aos dados.

Os resultados da análise são apresentados em uma tela informando o resultado do teste de Filliben, a rejeição de distribuições por serem limitadas e pelo critério de parcimônia, além de recomendar distribuições com sua respectiva confiança, conforme Figura 3.7.

```

C:\PROGRA-1\SEAF\CLIPSCMD.EXE
(2)Selecionando uma distribuição pelo teste de Filliben...
- a distribuição LogNormal é selecionada com 0.62 de confiança
- a distribuição Gumbel é selecionada com 0.89 de confiança
- a distribuição Exponencial é selecionada com 0.79 de confiança
- a distribuição Pearson-III é selecionada com 0.87 de confiança
- a distribuição LogPearson-III é selecionada com 0.78 de confiança
- a distribuição GEV é selecionada com 0.76 de confiança
- a distribuição GPA é selecionada com 0.92 de confiança

(3)Procurando razões para rejeitar alguma das distribuições selecionadas...
- a distribuição GPA é rejeitada, porque o parâmetro de forma
  é positivo

(4)Verificando a parsimônia entre as distribuições selecionadas...
- O aumento da incerteza na estimativa de mais um parâmetro
  para distribuição GEV não é justificado pelo teste de
  parsimônia em relação a distribuição Gumbel.

(5)Distribuições recomendadas...
- LogPearson-III com 0.7401 de confiança
- Pearson-III com 0.8616 de confiança
- Exponencial com 0.7357 de confiança
- Gumbel com 0.9145 de confiança
- LogNormal com 0.6001 de confiança

```

Figura 3.7: Resposta do SEAF a uma série de máximos

3.2.3.1 Testes de hipóteses

Segundo Naghettini e Pinto (2007), os testes de hipóteses são procedimentos usuais da inferência estatística e auxiliam à tomada de decisão a respeito da forma ou o valor de um parâmetro de uma distribuição de probabilidades da qual se conhece apenas a amostra de observações. Os testes consistem em formular uma hipótese, que pode se tratar de um valor de um parâmetro populacional, formulado *a priori*, de uma variável aleatória. Ao se fazer a análise pode-se rejeitar ou não a hipótese levantada, conhecida como hipótese nula.

A rejeição significa que a hipótese nula está em desacordo com a realidade imposta pelas observações, enquanto a não rejeição significa que não foram encontrados motivos para rejeitar a hipótese, porém, não significa que a hipótese nula é verdadeira. A medida que a amostragem for crescendo o mesmo teste pode rejeitar uma hipótese que foi não rejeitada em outro momento.

Dentre os diversos testes de hipóteses disponíveis existem os testes de aderência. Estes visam verificar a forma de uma distribuição de probabilidades frente aos dados observados. O teste de Filliben é um teste de aderência desenvolvido por Filliben em 1975 e consiste em um teste

de verificação da hipótese nula de normalidade, ou seja, se os dados observados podem ser modelados por uma distribuição normal. O teste foi adaptado para contemplar a verificação de diversas distribuições.

A construção do teste se baseia na hipótese de que existe uma forte correlação linear entre os dados observados x_i e w_i , que são os quantis teóricos obtidos pela distribuição de probabilidades testada. Formalmente, a estatística de teste de Filliben é expressa pela equação (3.35):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) (w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2}} \quad (3.35)$$

onde

$w_i = F_X^{-1}(1 - q_i)$, sendo q_i a posição de plotagem,

$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i)}{N}$, corresponde à média das observações,

$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^N (w_i)}{N}$, corresponde à média dos quantis gerados.

Para o cálculo da posição de plotagem, existem diversas equações desenvolvidas na literatura, sendo a mais comumente utilizada a posição de plotagem de Weibull, descrita na equação (3.36):

$$q_i = \frac{i}{N + 1} \quad (3.36)$$

onde, i é a posição do valor observado na série ordenada e N é o tamanho da série.

3.3 Relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

3.3.1 Histórico sobre o desenvolvimento de relações IDF

A relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é uma técnica amplamente utilizada na engenharia de recursos hídricos para dimensionamento, operação e planejamento de obras hidráulicas. As equações IDF surgiram da necessidade de se modelar chuvas intensas, que são aquelas que apresentam grandes lâminas precipitadas em um determinado intervalo de tempo que pode variar de alguns minutos a horas e dias e, em geral, é utilizada como critério de projetos de drenagem. Estas chuvas podem provocar prejuízos devido a inundações, erosões de solo, perda de nutrientes do solo e assoreamento de corpos d'água (CAMPOS *et al.*, 2014). As equações IDF permitem relacionar a intensidade, a duração e o tempo de retorno (ou frequência) de precipitações intensas na engenharia de recursos hídricos. As relações começaram a ser desenvolvidas na década de 1930 com a publicação dos trabalhos de Sherman (1931), Bernard (1932) e Bilham (1935) (NTPC, 2007). Sherman desenvolveu uma relação empírica que deveria ser calibrada para cada região, conforme equação (3.37):

$$I = \frac{KT^a}{(d + c)^b} \quad (3.37)$$

Onde I é a intensidade de projeto, d é a duração, T é o tempo de retorno associado ao evento e K , a , b e c são constantes dependentes da localização geográfica em análise.

Bernard desenvolveu uma relação empírica semelhante à encontrada por Sherman, sendo as constantes a_0 , a_1 e a_2 dependentes da localização geográfica, conforme equação (3.38):

$$I = \frac{a_0 T^{a_1}}{d^{a_2}} \quad (3.38)$$

Segundo Koutsoyiannis *et al.* (1998), em 1960 a técnica começou a ser amplamente utilizada em países desenvolvidos através da criação de diversos mapas relacionando altura de precipitação (ou intensidade) para diferentes tempos de retorno e durações. Diversos trabalhos foram realizados ao redor do mundo, como Pfafstetter (1957), que desenvolveu estudos de chuvas intensas para 98 postos pluviográficos no Brasil, estabelecendo suas respectivas IDFs.

Outros trabalhos de grande importância foram realizados por Chow (1964), Bell (1969), Chen (1983) e Rao et al. (1983) (NTPC, 2007). A metodologia para cálculo de curvas IDF's são mais fortemente baseadas em aspectos empíricos do que em consistência técnica, por isso, Koutsoyiannis *et al.* (1998) desenvolveu um método com modelagem estatística para o cálculo das relações. A formulação genérica de uma curva IDF pode ser representada pelas equações (3.39) e (3.40):

$$I = \frac{\omega}{(d^{\nu} + \theta)^{\eta}} \quad (3.39)$$

$$I = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (3.40)$$

onde ω , ν , θ e η são coeficientes não negativos e a princípio dependentes do tempo de retorno.

A regionalização de curvas IDF começou a ser desenvolvida nos Estados Unidos na década de 1960 e consistia em mapas de isoietas de altura de precipitação de projeto em função do tempo de retorno e da duração (CHOW *et al.*, 1988). Assim, era possível determinar as precipitações para projetar, operar e planejar obras hidráulicas em locais desprovidos de monitoramento.

3.3.1.1 Método de estimativa local de equações IDF

As estimativas locais de equações IDF constituem as técnicas mais antigas de geração de equações IDF. A equação de Sherman, desenvolvida em 1932 e apresentada na equação (3.37) é a equação mais utilizada em estimativas de IDFs locais.

O cálculo dos coeficientes K, a, b e c é realizado através de transformações logarítmicas e regressão simples. Primeiramente, agrupa-se o numerador em uma única variável A conforme equação (3.41):

$$I = \frac{KT^a}{(d+c)^b} = \frac{A}{(d+c)^b} \quad (3.41)$$

Tomando-se o logaritmo em ambos os lados:

$$\log I = \log A - b \cdot \log(d + c) \quad (3.42)$$

Para resolver a regressão da equação (3.42), o valor de c é obtido por tentativa e erro. Após obter os valores de A, b e c , é realizada uma nova regressão linear:

$$\log A = a \cdot \log T + \log K \quad (3.43)$$

Por fim, através regressão da equação (3.43) obtém os valores de a e K .

3.3.1.2 Método de estimativa regional de equações IDF (Index-Flood)

O método *index-flood* foi introduzido por Darlymple (1960) *apud* Naghettini e Pinto (2007) com o objetivo de regionalizar vazões de cheia. O método consiste em adimensionalizar dados de máximos obtidos em pontos distintos em uma região estatisticamente homogênea para transpor a análise a uma região não monitorada, gerando-se assim, uma regionalização de vazões, precipitações ou IDFs.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), para a regionalização de frequências de uma variável aleatória X , com suas observações em diferentes postos de uma região estatisticamente homogênea sendo $X_{i,j}$, onde $i = 1, 2, \dots, n$ representa a série observada e $j = 1, 2, \dots, k$ representa o posto onde a observação foi realizada, a função de quantis é representada por $X_j(F)$. A hipótese básica do método consiste em utilizar uma região homogênea, que permite que as distribuições de frequência nos k postos sejam idênticas, a menos de um fator de escala local conhecido como *index-flood* ou fator de adimensionalização. O processo pode ser representado pela equação (3.44).

$$X_j(F) = \mu_j x(F) \quad (3.44)$$

onde μ_j é o *index-flood* e $x(F)$ representa a curva regional de fatores adimensionais, comum a todos os postos da região.

O *index-flood* , μ_j , pode ser estimado com qualquer medida de posição ou tendência central da série amostral de observações, podendo-se utilizar a média dos valores máximos anuais. (PINHEIRO, 1998)

Os elementos da curva regional de fatores adimensionais são calculados conforme equação (3.45):

$$x_{i,j} = \frac{X_{i,j}}{\mu_j} \quad (3.45)$$

A curva regional de frequência pode ser paramétrica (modelada via distribuições de probabilidades) ou não paramétrica (modelada via curvas empíricas das estações grafadas em papel de probabilidade).

De posse da curva regional de frequência, é realizada uma regressão do fator *index-flood* com variáveis de caracterização da bacia de modo a tentar explicar a variação do *index-flood* espacialmente e determinar a escala em cada ponto da região.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), as premissas do método *index-flood* são:

- as observações não apresentam dependência estatística serial e são identicamente distribuídas, em qualquer posto,
- as observações em diferentes postos são estatisticamente independentes,
- as observações em diferentes postos são estatisticamente independentes e idênticas a menos um fator de escala, e
- a forma matemática da curva regional de quantis adimensionalizados pode ser corretamente especificada.

Segundo Hosking e Wallis (1997), a primeira premissa é plausível para diversos tipos de variáveis relacionadas a máximos anuais. Entretanto, as demais premissas são improváveis de serem completamente verificadas por dados hidrológicos, visto que a formação da chuva pode

levar ao registro de um mesmo evento por diferentes postos e, assim, as medições terão algum grau de correlação. Além disso, as duas últimas premissas, na prática, são improváveis de se verificar com exatidão.

3.3.1.3 Método da Invariância de Escala Temporal

O método da invariância de escala temporal foi desenvolvido com a premissa de que existe uma relação que pode ser explicada entre a intensidade máxima de duas diferentes durações, o que permitiria estimar o valor de intensidade para uma duração não monitorada. Partindo desta premissa, Koutsoyiannis *et al.* (1998) desenvolveram um estudo para tentar encontrar a relação na estação pluviográfica do Aeroporto Internacional de Ellinikon, localizado na cidade de Atenas, na Grécia. A ideia era construir um método para estimar o numerador de equação IDF genérica, equação (3.40) utilizando funções densidade de probabilidade ao invés de assumir a calibração, técnica utilizada nos métodos mais populares. A equação (3.39) foi obtida empiricamente através de diversos estudos de relações IDF. Estes estudos, em geral, apresentavam simplificações e adotavam restrições nos parâmetros.

Para a realização do equacionamento, Koutsoyiannis *et al.* (1998) realizou uma análise de sensibilidade do erro de modo a mapear o impacto de cada parâmetro no erro geral de estimativa da IDF. Assim, foi possível validar as seguintes premissas em relação à equação (3.39):

- $\nu = 1$, pois a variação do coeficiente representava erros na estimativa da IDF em torno de 0,7% para os casos mais frequentes e a adoção do coeficiente igual a 1 leva a erros inferiores aos cometidos no processo de medição da chuva, por isso, a calibração do coeficiente não apresenta ganhos à modelagem.
- Como as curvas de intensidade e duração não se cruzam para diferentes tempos de retorno, a dependência dos demais parâmetros (ω , θ e η) ao tempo de retorno não pode ser arbitrária.

Considerando dois conjuntos de parâmetros (ω_1, θ_1 e η_1) e (ω_2, θ_2 e η_2) atribuídos à dois tempos de retornos diferentes, T_1 e T_2 , respectivamente, com $T_2 < T_1$, para que as equações de T_1 e T_2 não se cruzem, os parâmetros devem seguir as condições das equações (3.46), (3.47) e (3.48).

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta \geq 0 \quad (3.46)$$

$$0 < \eta_1 = \eta_2 = \eta < 1 \quad (3.47)$$

$$\omega_1 > \omega_2 > 0 \quad (3.48)$$

Com tais restrições impostas pelo não cruzamento das curvas de intensidade para diferentes tempos de retorno, é possível chegar à conclusão que apenas ω é dependente do tempo de retorno, o que representa uma forte simplificação na construção de equações IDF, sendo que as funções $a(T)$ e $b(d)$ assumem os valores das equações (3.49) e (3.50):

$$a(T) = \omega \quad (3.49)$$

$$b(d) = (d + \theta)^\eta \quad (3.50)$$

A função $a(T)$ pode ser modelada de maneira consistente através de uma distribuição de probabilidades da variável aleatória máxima intensidade anual, de modo que a probabilidade de não superação da intensidade é dada por $P(I \leq i)$. Assim, a função acumulada de probabilidades que é dada pela equação (3.51).

$$F(I) = 1 - \frac{1}{T} \quad (3.51)$$

O conceito de escalabilidade simples de senso estrito foi definido por Menabde *et al.* (1999) através da equação (3.52):

$$I_d \stackrel{dist}{=} \left(\frac{d}{D}\right)^{-\varphi} I_D \quad (3.52)$$

onde d e D são diferentes durações de eventos de precipitação, sendo D , em geral, igual a 24 horas e superior a d . A igualdade significa que ambos os lados da equação possuem uma distribuição de probabilidades idêntica. O parâmetro φ é o fator de escala e, se tratando de escalabilidade simples, se apresenta como uma constante e o termo $\left(\frac{d}{D}\right)^{-\varphi}$ pode ser verificado empiricamente, possibilitando a construção de modelos de desagregação temporal de intensidades.

Caso não se verifique o parâmetro φ constante ao se analisar os modelos de regressão em diferentes durações, o termo $\left(\frac{d}{D}\right)^{-\varphi}$ é substituído por uma variável aleatória que depende da razão $\frac{d}{D}$, dando origem a multiescalabilidade temporal.

Apesar de existirem trabalhos que utilizam o conceito de multiescalabilidade, como apresentado em Ghanmi *et al.* (2016), Menabde *et al.* (1999) afirmam que, em geral, o modelo de escalabilidade simples gera um bom resultado, não sendo necessário trabalhar com o modelo de multiescalabilidade.

Considerando que q é a ordem do momento, tomando-se os momentos em relação a origem chega-se à equação (3.53):

$$\langle I_d^q \rangle = \left(\frac{d}{D}\right)^{-\varphi q} \langle I_D^q \rangle \quad (3.53)$$

Que pode ser expressa na forma da equação (3.54):

$$d^{\varphi q} \langle I_d^q \rangle = D^{\varphi q} \langle I_D^q \rangle \quad (3.54)$$

Após analisar as expressões, Menabde *et al.* (1999) concluem que a única forma funcional de $\langle I_d^q \rangle$ que soluciona a equação (3.54) é a expressão da equação (3.55):

$$\langle I_d^q \rangle = G(q)d^{-\varphi q} \quad (3.55)$$

onde $G(q)$ é uma função da ordem do momento q . A expressão é definida por Menabde *et al.* (1999) como escalabilidade simples em senso estrito, pois, o fator de escala φ é assumido como constante. Caso não seja possível verificar, empiricamente, a existência de um fator de escala constante, a modelagem de φ segue uma função não-linear.

A função acumulada de probabilidades da intensidade, desenvolvida através da equação (3.49) é dada pela equação (3.56):

$$F_d(I) = F_d \left(\left(\frac{d}{D} \right)^{-\varphi} I \right) \quad (3.56)$$

Para várias formas paramétricas, algumas propriedades de relações IDF podem ser obtidas através da consideração que a função acumulada de probabilidades pode ser expressa através da variável reduzida da equação (3.57):

$$F_d(I) = F \left(\frac{I - \mu_d}{\sigma_d} \right) \quad (3.57)$$

onde F é uma função independente da duração d . Utilizando esta simplificação, obtém-se as equações (3.58) e (3.59):

$$\mu_d = \left(\frac{d}{D} \right)^{-\varphi} \mu_D \quad (3.58)$$

$$\sigma_d = \left(\frac{d}{D} \right)^{-\varphi} \sigma_D \quad (3.59)$$

Após substituir as equações (3.57), (3.58) e (3.59) na equação (3.52) e invertendo o resultado, Menabde *et al.* (1999) chegaram à equação (3.60):

$$I_{d,T} = \frac{\mu_D D^\varphi - \sigma_D D^\varphi F^{-1}(1 - 1/T)}{d^\varphi} \quad (3.60)$$

Após a dedução das equações (3.60) e considerando a IDF genérica apresentada por Koutsoyiannis *et al.* (1998) nas equações (3.39) e (3.40), Menabde *et al.* (1999) chegaram às seguintes relações das equações (3.61) a (3.64):

$$\theta = 0 \quad (3.61)$$

$$\eta = \varphi \quad (3.62)$$

$$a(T) = \mu + \sigma F^{-1}(1 - 1/T) \quad (3.63)$$

$$b(d) = d^\eta \quad (3.64)$$

onde $\mu = D^\varphi \mu_D$ e $\sigma = D^\varphi \sigma_D$ são constantes e independentes da duração D, conforme equacionamento apresentado nas equações (3.58) e (3.59) e deduzidas para a média, μ , nas equações (3.65) e (3.66). O processo análogo é realizado para o desvio padrão σ .

$$\mu_d = \left(\frac{d}{D}\right)^{-\varphi} \mu_D \Rightarrow \mu_D = \left(\frac{d}{D}\right)^\varphi \mu_d \quad (3.65)$$

$$\mu = D^\varphi \mu_D = d^\varphi \mu_d \quad (3.66)$$

Assim, a propriedade de invariância simples de escala temporal, apresentada na equação (3.55), pode ser verificada experimentalmente ao se substituir os momentos populacionais pelos momentos amostrais.

Além disso, Menabde *et al.* (1999) realizaram duas modelagens em climas diferentes, verificando que a propriedade de escala temporal das intensidades se preserva independente do clima, variando apenas o valor do fator de escala η .

Ao se utilizar a metodologia proposta por Menabde *et al.* (1999) é possível construir curvas IDF de estações pluviométricas apenas definindo o fator de escala da estação e a distribuição de probabilidades, ou seja, o equacionamento permite a estimativa de intensidades subdiárias através de dados diários.

Diversos trabalhos recentes consideram as definições de escalabilidade simples apresentada por Koutsoyiannis *et al.* (1998) e definida em Menabde *et al.* (1999) como escalabilidade em senso restrito, além dos conceitos de multiescalabilidade.

Bairwa *et al.* (2016) realizaram a comparação da propriedade de escalabilidade dos parâmetros da IDF por meio da estimação dos parâmetros das distribuições de probabilidade utilizando o MOM e o LMOM. Constatou-se indícios de que a utilização da estimativa dos parâmetros da IDF por LMOM apresentou a propriedade de multiescalabilidade, que são atribuídas às diferentes formações das precipitações e suas durações.

Hassanzadeh *et al.* (2014) utilizaram as propriedades de invariância de escala temporal da precipitação para atualizar curvas IDF da cidade de Saskatoon, no Canadá. A atualização das curvas foi realizada através da utilização de programação genética, de modo a otimizar o ajuste da distribuição e calcular os parâmetros ótimos, extraíndo-se, assim, a duração dos eventos. Como o método da invariância de escala temporal considera como premissa que as séries são estacionárias, o estudo buscou identificar padrões de variação nas séries. Foi constatado que a IDF de Saskatoon está sujeita a alterações, entretanto a magnitude, o sinal e a variabilidade da estimativa dependem da condição inicial dada ao software de programação genética.

Ghanmi *et al.* (2016) utilizaram 15 estações para a construção da curva IDF do norte da Tunísia, sendo 6 estações com mais de 20 anos de dados e 4 estações com 17 ou 18 anos de dados. Após o tratamento das séries de dados, as precipitações extremas foram modeladas com uma distribuição de Gumbel e a estimação dos parâmetros se deu por LMOM. Foi verificada a propriedade de multiescalabilidade. A multiescalabilidade ocorreu devido a não linearidade do

fator de escala na equação (3.55), onde foi notado um comportamento diferente para durações inferiores a 30 minutos das durações superiores a 30 minutos. Assim, os autores obtiveram 2 fatores de escala por estação e realizaram, na calibração, uma regressão linear utilizando 8 das 15 estações monitoradas subdiariamente com o objetivo de regionalizar a curva para todo o território da Tunísia, que conta com 41 estações com dados diários. Os resultados foram interpolados através do método de krigagem, gerando-se, assim, mapas de intensidade de precipitação para cada tempo de retorno e duração de interesse em todo território da Tunísia.

Kuo *et al.* (2013) utilizaram o Modo de Decomposição de Conjunto Empírico (EEMD), que é uma forma de transformada Hilbert-Huang (HHT). A aplicação deste método permite decompor sinais para Funções de Modo Intrínseco (IMF's), ou seja, as séries de precipitações extremas são convertidas em funções. Além disso, o método é capaz de trabalhar com séries não lineares e não estacionárias. Após a decomposição da série de máximos anuais da cidade de Edmonton, no Canadá, para funções IMF, foi verificada a propriedade de escala das IMF's de alta para baixa frequência. A partir de IMF's selecionadas, as curvas IDF's regionais foram desenvolvidas com base na distribuição GEV com estimação de parâmetros através de LMOM. O fator de escala regional encontrado no estudo foi de 0,658 e sua calibração foi obtida com coeficiente de determinação igual a 0,98, o que determinou a escalabilidade simples dos processos de precipitações no local de estudo.

Innocenti *et al.* (2017) utilizaram 3400 estações, sendo 2200 estações com medições pluviométricas e pluviográficas localizadas em sua maioria nos Estados Unidos da América e na porção Sul do Canadá, para construir relações IDF de escalabilidade simples utilizando a distribuição GEV. Os dados foram divididos em 3 classes de intervalos com resolução de 15 minutos, 1 hora e 6 horas. Os dados com discretização de 15 minutos foram escalados para 6 horas, os de discretização de 1 hora foram escalados para 24 horas e os de 6 horas para 7 dias. Após a divisão, foi verificada para cada duração a matriz de intervalos de escalabilidade possíveis e construída a escalabilidade dos momentos da distribuição GEV. Após a modelagem foi realizada a verificação do erro médio quadrático e das suas respectivas propriedades de escala. Por fim, foi realizado um estudo de regionalização das curvas e elaborou-se regiões de mesma escalabilidade para os Estados Unidos e Canadá.

Basso (2019) utilizou 408 estações pluviométricas, que possuíam menos de 10% de falhas e tamanho mínimo de 10 anos de registro, 42 estações automáticas e o conjunto de dados Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) para gerar a IDF regional e a estimativa da precipitação máxima diária para o Estado do Rio Grande do Sul. Primeiramente, determinou-se as regiões homogêneas de acordo com o critério da conveniência geográfica das precipitações máximas diárias dos postos. Para cada isozona, foi estimada a precipitação máxima diária com o auxílio da variável reduzida de Gumbel e do pacote GAMLSS disponível no *software* R. Definidos os valores de precipitações máximas diárias, foi realizada a utilização do MSWEP para composição da série subdiária, visto que a quantidade de pluviômetros automáticos estava muito abaixo da densidade recomendada para a região. Os dados foram validados e a distribuição GEV foi utilizada para modelar a IDF de cada região homogênea. Os parâmetros θ e η das IDFs regionais foram obtidos por ajuste, obtendo-se as IDFs válidas em cada região homogênea.

3.3.2 Relação IDF da RMBH

Segundo Nunes (2018), o primeiro estudo de relações IDF que abrangiam a RMBH foi desenvolvido por Pfafstetter, em 1957, quando foi desenvolvido o estudo “Chuvas Intensas no Brasil” em que foram ajustadas relações IDF para 98 postos pluviográficos do Brasil seguindo a equação (3.67):

$$P = R[a \cdot t + b \cdot \log(1 + c \cdot d)] \quad (3.67)$$

onde, P é a precipitação total máxima (mm), R é um fator associado ao período de retorno e calculado conforme equação (3.68), d é a duração da chuva (horas), a, b e c são parâmetros locais.

$$R = T \left(\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}} \right) \quad (3.68)$$

sendo, T o tempo de retorno (anos), α um parâmetro que depende da duração da precipitação,

β um parâmetro que depende da duração da precipitação e do local de estudo.

Para Belo Horizonte, os parâmetros locais a , b e c da equação (3.67) equivalem a 0,6; 26,0 e 20,0; respectivamente. Enquanto os valores de α e β são aqueles apresentados nas tabelas Tabela 3.1 e Tabela 3.2:

Tabela 3.1: Valores de β

d	5 min	15 min	30 min	1 h a 6 dias
β	0,12	,0,120	0,12	0,04

Fonte: Pfafstetter (1957) *apud* Nunes (2018)

Tabela 3.2: Valores de α

D	α	d	α	d	A
5 min	0,108	2 horas	0,166	24 horas	0,17
15 min	0,122	4 horas	0,174	48 horas	0,166
30 min	0,138	8 horas	0,176	4 dias	0,156
1 hora	0,156	14 horas	0,174	6 dias	0,152

Fonte: adaptado de Pfafstetter (1957) *apud* Nunes (2018)

Ao longo do tempo, diversas equações foram apresentadas para a RMBH, como Villela e Mattos (1975) *apud* Nunes (2018) e SUDECAP (1982) *apud* Pinheiro (1997). Atualmente, o estudo utilizado para estimar a precipitação de projeto em obras hidráulicas em Belo Horizonte é o estudo de Pinheiro (1997).

Pinheiro realizou uma regionalização de 11 estações pluviográficas, realizando a modelagem da intensidade máxima anual através de uma distribuição de Gumbel ajustada para cada duração. Assim, os quantis adimensionais gerados pela distribuição de Gumbel de Pinheiro (1997) correspondentes às probabilidades anuais estão apresentados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Quantis adimensionais das probabilidades anuais

d (horas)	Tempo de retorno (anos)									
	1,05 ano	1,25 ano	2 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	200 anos	500 anos	1000 anos
10 min	0,691	0,828	1,013	1,428	1,586	1,791	1,945	2,098	2,300	2,452
15 min	0,695	0,830	1,013	1,422	1,578	1,780	1,932	2,083	2,282	2,432
30 min	0,707	0,836	1,013	1,406	1,557	1,751	1,897	2,043	2,235	2,380
45 min	0,690	0,727	1,013	1,430	1,589	1,795	1,949	2,103	2,305	2,459
1 hora	0,679	0,821	1,014	1,445	1,610	1,823	1,983	2,143	2,353	2,512
2 horas	0,683	0,823	1,014	1,439	1,602	1,813	1,970	2,128	2,335	2,492

3 horas	0,679	0,821	1,014	1,445	1,610	1,823	1,983	2,143	2,353	2,512
4 horas	0,688	0,826	1,013	1,432	1,591	1,798	1,953	2,108	2,311	2,465
8 horas	0,674	0,818	1,014	1,451	1,618	1,834	1,996	2,157	2,370	2,531
14 horas	0,636	0,797	1,016	1,503	1,690	1,931	2,112	2,292	2,530	2,710
24 horas	0,603	0,779	1,017	1,550	1,754	2,017	2,215	2,412	2,672	2,868

Fonte: Pinheiro (1997)

Após a regionalização pelo método index-flood, Pinheiro chegou à equação (3.69), que modela as intensidades de precipitação de projeto para a RMBH:

$$I = 0,76542d^{-0,7059}PA^{0,5360}\mu_{T,d} \quad (3.69)$$

onde, i é a estimativa de intensidade média local [mm/h ou mm/min], d é a duração da precipitação [horas ou minutos], PA é a precipitação total anual média [mm], $\mu_{T,d}$ é o fator index-flood, obtido na Tabela 3.3.

Para a aplicação do valor de precipitação total anual média na RMBH, Pinheiro (1997) construiu um mapa de isoietas de precipitações totais anuais médias.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de Estudo

Para o desenvolvimento do trabalho, foi selecionada a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) como local de estudo. Inicialmente, desejava-se realizar o estudo para uma grande área, como o Estado de Minas Gerais, entretanto, devido ao tamanho das séries de dados subsidiárias disponíveis, optou-se pela realização do estudo em um local com estudos de IDF desenvolvidos e com séries de tamanho aceitável.

Atualmente na RMBH a equação desenvolvida por Pinheiro (1997) é utilizada e recomendada pelo manual de instruções técnicas para a elaboração de estudos e projetos de drenagem urbana no município de Belo Horizonte.

As estações pluviográficas disponíveis na região e que serão utilizadas no estudo são as mesmas utilizadas no trabalho de Pinheiro (1997), excetuando-se a estação usina de gás (01944065) devido à pequena quantidade de dados e por ter sido desativada. As estações utilizadas estão apresentadas na Tabela 4.1 e na Figura 4.1:

Tabela 4.1: Estações Pluviográficas utilizadas

Código	Estação	Município	Entidade	Altitude (m)	Precipitação Anual Média (mm)
01943009	Vespasiano	Vespasiano	ANA	699	1270
01943010	Caeté	Caeté	ANA	950	1406
01943022	Caixa de Areia	Belo Horizonte	ANA	1034	1730
01943049	Ponte Raul Soares	Jaboticatubas	ANA	700	1248
01943054	Raja Gabágliã*	Belo Horizonte	INMET	916	1460
01943055	Horto	Belo Horizonte	INMET	915	1570
01944004	Ponte Nova do Paraopeba	Betim	ANA	700	1415
01944009	Pedro Leopoldo	Pedro Leopoldo	ANA	698	1291
02043002	Lagoa Grande	Nova Lima	ANA	1350	1551

OBS: a estação Lourdes foi substituída pela estação Raja Gabáglia e não consta no mapa de localização da

01943054 Lourdes Belo Horizonte INMET 850 1470,1

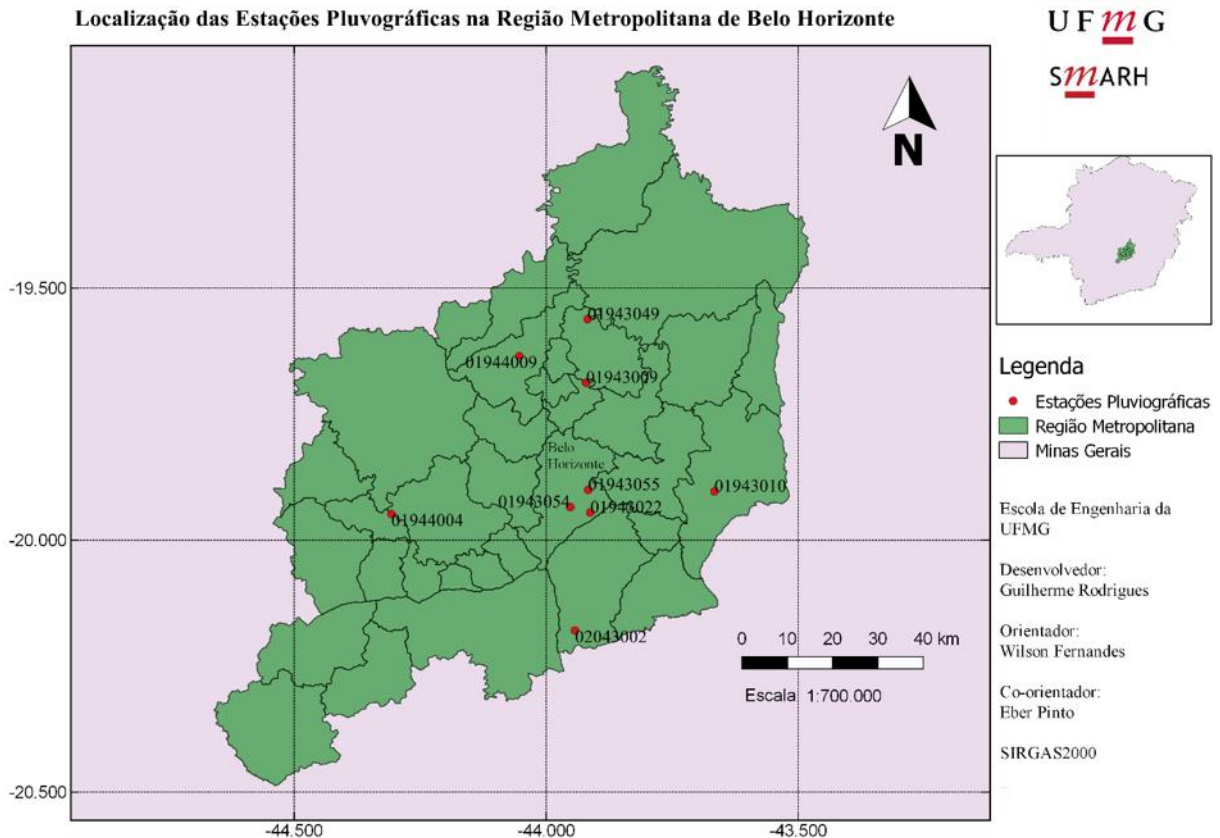


Figura 4.1: Localização das estações pluviográficas

Os valores de precipitação anual média da Tabela 4.1 foram retirados do mapa de isoietas do trabalho de Pinheiro (1997). A RMBH está localizada na porção central do estado de Minas Gerais e é caracterizada por uma grande variação de cotas altimétricas, se inserindo nas bacias hidrográficas dos rios Paraopeba e Velhas. Segundo Reboita *et al.* (2015), a classificação do clima da região é tropical de savana (cerrado) com inverno. Por isso, a região possui duas estações bem definidas, a estação seca, que ocorre no inverno e a chuvosa, ocorrendo no verão. Por isso, pode-se realizar a separação em anos hidrológicos a cada ciclo destas estações. As estações pluviográficas estão distribuídas em diferentes cotas entre 698 m e 1350 m, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2.

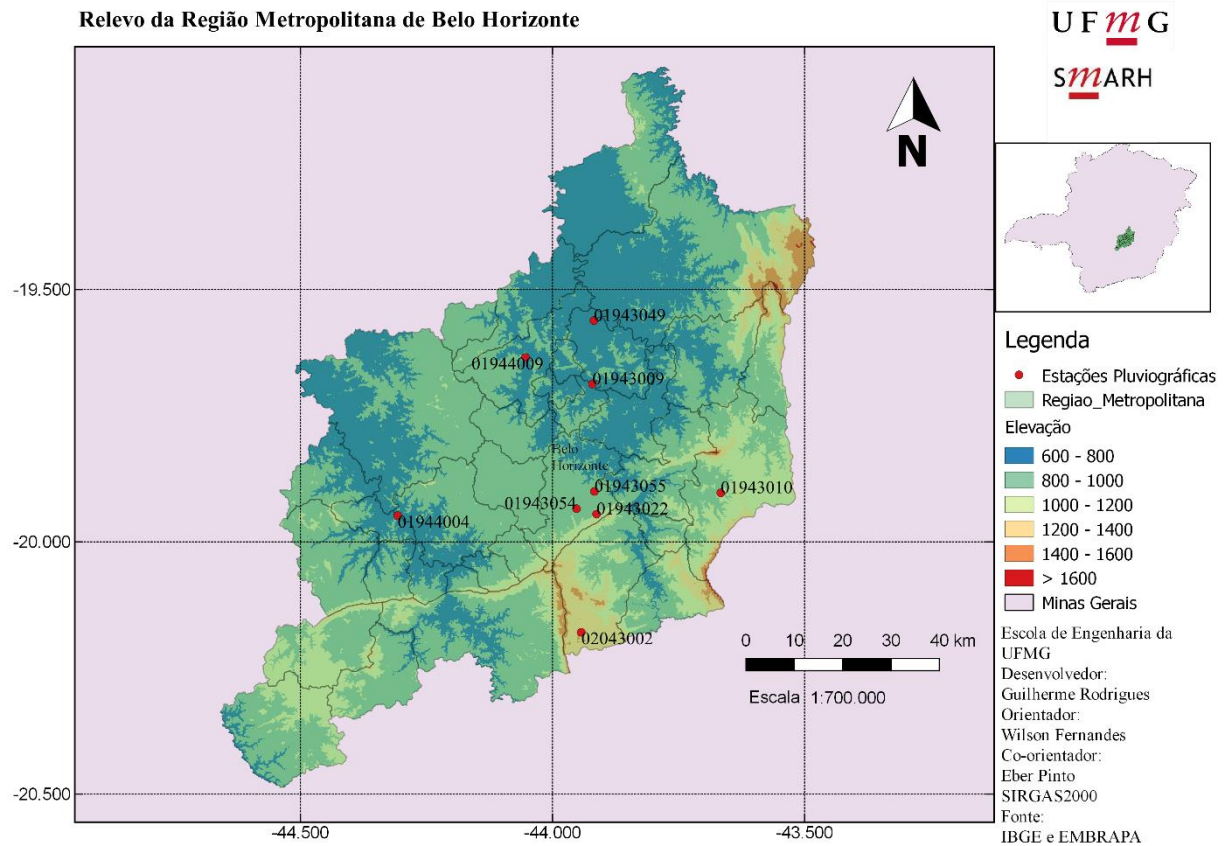


Figura 4.2 : Relevo da RMBH e localização das estações

Para o desenvolvimento do trabalho serão utilizados dados de intensidades máximas anuais em escala temporal subdiária. Os dados apresentados em Pinheiro (1997) serão utilizados em todas as estações do estudo e será realizada uma atualização das séries para anos posteriores aos utilizados por Pinheiro (1997). Para a estação Raja Gabágliã os dados atualizados serão os apresentados no trabalho de Nunes (2018). A estação Horto não terá suas séries atualizadas pelo fato de não possuir arquivos digitalizados dos pluviógrafos.

Optou-se por trabalhar apenas com arquivos digitalizados de gráficos de pluviógrafos. A CPRM realiza o processo de digitalização dos pluviogramas. O processo consiste nas seguintes etapas:

- os pluviógrafos registram os eventos de precipitação em campo nos pluviogramas,
- com uma mesa de digitalização, um técnico em hidrologia realiza o processo de digitalização das curvas com o auxílio do *software* hydrograph 1.02, desenvolvido pela

Universidade Federal de Viçosa para a digitalização de pluviogramas. A mesa de digitalização é um equipamento que possui marcações e um mouse especial que permite o registro de inflexões das curvas registradas com precisão,

- os arquivos digitalizados podem ser visualizados através do *software* hidrograph 1.0.

Para cada pluviograma registrado é gerado um arquivo em formato hidrograph. A CPRM forneceu ao trabalho os arquivos hidrograph de anos civis das estações sob responsabilidade da ANA que estavam digitalizados. Com estes arquivos, foi realizada a expansão das séries de máximos anuais das estações pluviográficas da RMBH.

4.2 Etapas Metodológicas

A realização do estudo segue as etapas metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 4.3:

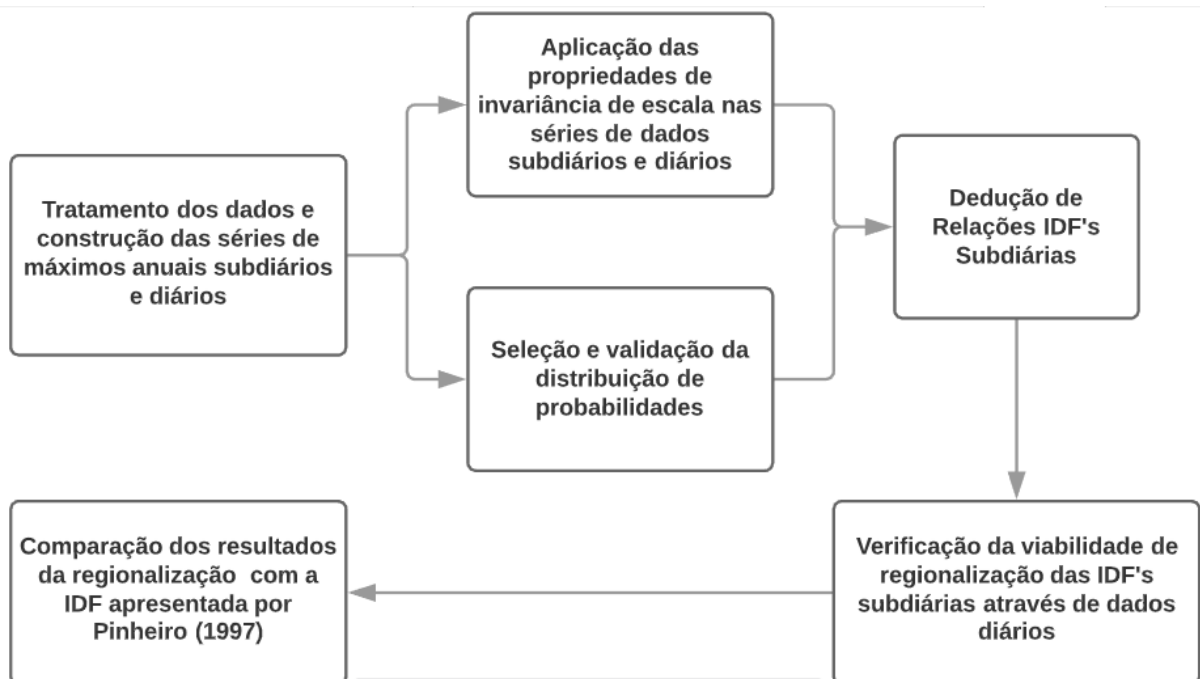


Figura 4.3: Fluxograma das etapas metodológicas

4.2.1 Tratamento dos dados e construção das séries de máximos anuais subsidiários e diários

O tratamento dos dados foi realizado utilizando como premissa o ano hidrológico, que para a região de estudo equivale a anos começando em outubro e finalizando em setembro do ano civil subsequente. A adoção do ano hidrológico visa garantir a independência estatística dos máximos anuais e, assim, considerar que o máximo é a realização de uma variável aleatória.

As séries subsidiárias das estações do INMET foram utilizadas conforme apresentado nos trabalhos de Nunes (2018) e Pinheiro (1997) sem quaisquer alterações. As séries das estações da ANA sofreram acréscimo de acordo com a disponibilidade de dados fornecidos pela CPRM.

A construção das séries de dados da CPRM foi realizada da seguinte maneira:

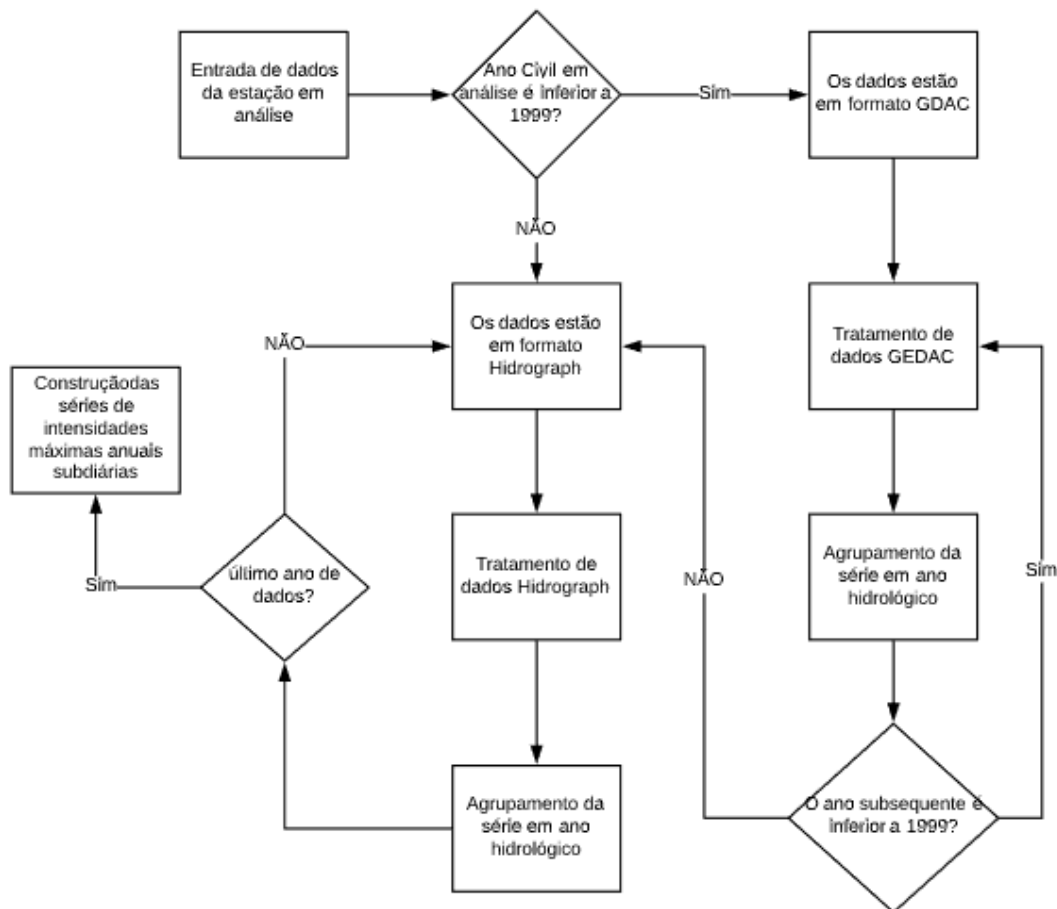


Figura 4.4 Fluxograma da construção das séries

O *software* hidrograph foi implementado a partir do ano 1999 e, por isso, as séries digitalizadas antes desta data estão em outro formato, o GEDAC. O processo de digitalização do GEDAC seguia o mesmo princípio utilizado na construção pelo hidrograph, entretanto, era realizado de modo manual. Em um arquivo de texto eram anotadas todas as inflexões (valor de precipitação) e horários de modo a criar o gráfico digitalmente. Um exemplo da formatação dos dados no arquivo de texto é apresentado na Figura 4.5.

```

&FALHA 01/08/1996 07:00 A 31/08/1996 07:00
&FALHA 01/09/1996 07:00 A 30/09/1996 07:00
&FALHA 01/10/1996 07:00 A 31/10/1996 07:00
&FALHA 01/11/1996 07:00 A 27/11/1996 07:00
&SEM CHUVA 27/11/1996 07:00 A 30/11/1996 07:00
$Pluviograma      mm      PONTE RAUL SOARES      30/11/1996
#0700      0.0 #1149      0.0 #1204      0.0 #1212      0.0 #1223      0.0 #1235      0.0 !
#1242      0.1 #1247      0.0 #1256      0.1 #1307      0.0 #1311      0.0 #1319      0.0 !
#1325      0.0 #1333      0.1 #1336      0.1 #1341      0.1 #1344      0.0 #1351      0.1 !
#1358      0.1 #1403      0.1 #1410      0.2 #1415      0.0 #1420      0.1 #1425      0.1 !
$Pluviograma      mm      PONTE RAUL SOARES      01/12/1996
#0700      0.1 !
&FALHA 03/12/1996 07:00 A 04/12/1996 07:00
&SEM CHUVA 01/12/1996 07:00 A 10/12/1996 07:00
$Pluviograma      mm      PONTE RAUL SOARES      10/12/1996
#1130      0.0 #1635      0.0 #1636      0.0 #1639      0.1 #1642      0.2 #1645      0.1 !
#1647      0.2 #1652      0.1 #1702      0.1 !
$Pluviograma      mm      PONTE RAUL SOARES      11/12/1996
#0700      0.1 !
$Pluviograma      mm      PONTE RUL SOARES      11/12/1996
#0738      0.0 #1622      0.0 #1624      0.3 #1627      1.4 #1631      2.4 #1634      2.2 !
#1639      1.5 #1641      0.7 #1643      0.3 #1644      0.1 #1646      0.3 #1647      0.2 !
#1649      0.1 #1652      2.4 #1655      0.7 #1657      0.4 #1658      0.2 #1659      0.3 !
#1700      0.2 #1702      0.3 #1704      0.2 #1706      0.2 #1707      0.1 #1709      2.4 !
#1711      0.5 #1713      0.0 #1716      5.9 #1718      0.5 #1720      1.7 #1721      0.7 !
#1723      0.1 #1726      0.2 #1728      0.2 #1730      0.1 #2035      0.0 #2036      0.0 !
#2037      0.1 #2038      0.0 #2043      0.1 #2047      0.1 #2049      0.1 #2051      0.2 !
#2053      0.2 #2056      0.2 #2058      5.5 #2104      1.9 #2106      1.3 #2109      0.7 !
#2112      0.4 #2114      0.1 #2116      0.3 #2117      0.1 #2119      0.7 #2121      0.4 !
#2123      0.9 #2127      0.6 #2128      0.2 #2132      0.3 #2136      0.2 #2142      0.2 !
#2147      0.2 #2151      0.3 #2154      0.3 #2159      0.4 #2201      0.4 #2206      0.3 !
#2208      0.3 #2210      0.2 #2214      0.4 #2216      0.3 #2219      0.3 #2224      0.2 !
#2228      0.2 #2233      0.2 #2238      0.1 #2245      0.1 #2248      0.0 #2251      0.0 !
#2258      0.1 #2301      0.1 #2307      0.1 #2314      0.1 #2318      0.2 #2323      0.4 !
#2325      0.2 #2326      0.1 #2331      0.0 #2335      0.1 #2339      0.1 #2345      0.0 !

```

Figura 4.5 Conteúdo do arquivo GEDAC

Devido às diferenças de procedimentos para realizar o tratamento dos anos em arquivos GDAC para anos de arquivos hydrograph, os tratamentos foram realizados conforme itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2. Os dados são agrupados de maneira cronológica, de tal forma que se possa realizar a análise de máximos percorrendo a série temporalmente entre outubro e setembro.

4.2.1.1 Tratamento de dados em formato GEDAC

Para a realização do tratamento de dados em formato GEDAC é necessário transformar o arquivo texto em uma matriz com data e precipitação. Para realizar tal procedimento, utilizou-se o *software* Scilab 6.0.2, que utiliza a linguagem Scilab para programação.

Para realizar a transformação, foi identificado o padrão de anotações:

- linha iniciando com os caracteres “&FALHA” se trata de um período de falhas com data anotada na sequência,
- linha iniciando com caracteres “&SEM” se trata de um período sem ocorrência de precipitações,
- linha iniciando com caracteres “\$Pluviograma” indica a estação, a data do registro e é seguida por linhas que apresentam dados de precipitação,
- linhas com dados de precipitação iniciam com caracteres “#” e são seguidas pela hora, espaço e valor medido, sendo que este padrão se repete até a ocorrência do caractere “!”, indicando o fim da linha.

Identificado o padrão de anotações, verificou-se a ocorrência de falhas no padrão e eventuais correções para que o código desenvolvido em Scilab pudesse ler linha a linha o arquivo texto e extrair as informações de data, hora e precipitação. Foi desenvolvido um código para cada estação, visto que as posições dos caracteres de interesse se alteravam de acordo com o nome da estação. Um exemplo de código utilizado para construir a matriz de data e precipitação está apresentado no Apêndice A. Após a geração do arquivo, realizou-se a verificação da consistência das séries através da análise dos dias de falhas nos registros e se nos dias sem

chuva realmente não ocorreram precipitações. A comparação foi realizada com os dados diários extraídos no portal HidroWeb da ANA, disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>.

O arquivo gerado pelo Scilab é aberto no excel e realizada a formatação para posterior utilização na etapa de construção das séries de intensidades máximas.

4.2.1.2 Tratamento de dados em formato hidrograph

Para o tratamento dos dados em formato hidrograph, a CPRM disponibilizou o *software* ATLASPLU v. Achilles desenvolvido pela própria CPRM com o objetivo de, a partir de pluviogramas digitalizados em formato hidrograph, gerar um arquivo em formato de texto com incrementos de precipitação em diferentes durações entre 5 minutos e 48 horas.

Desta forma, optou-se por agrupar todos os arquivos hidrograph de uma determinada estação e gerar o arquivo texto de toda a série de dados disponíveis com discretização de 5 minutos, ou seja, o arquivo de saída possui data e hora da precipitação e a medição de maneira discreta no intervalo de tempo conveniente para a montagem das séries. A Figura 4.6 mostra um exemplo de arquivo de texto gerado pelo ATLASPLU.

Estacao	DataHora_Prec	Prec_01min	Prec_05min
02043026	19/09/2009 13:36	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:37	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:38	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:39	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:40	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:41	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:42	0,000000000000000	0,000000000000000
02043026	19/09/2009 13:43	0,000000000000000	0,146366206101521
02043026	19/09/2009 13:44	0,000000000000000	0,292732412203042
02043026	19/09/2009 13:45	0,000000000000000	0,439098618304564
02043026	19/09/2009 13:46	0,000000000000000	0,585464824406085
02043026	19/09/2009 13:47	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:48	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:49	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:50	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:51	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:52	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:53	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:54	0,146366206101521	0,731831030507606
02043026	19/09/2009 13:55	0,146366206101521	0,731831030507606

Figura 4.6 Conteúdo gerado pelo ATLASPLU

4.2.1.3 Construção das séries de intensidades máximas anuais subdiárias

Para a construção das séries de intensidades máximas anuais em escala temporal subdiária é preciso discretizar os dados GEDAC na escala temporal de 5 em 5 minutos e agrupar os dados de diversos anos civis em apenas uma matriz de data e precipitação com intervalo de dados de 5 minutos. Após a discretização, os dados provenientes do ATLASPLU são integrados à matriz de modo a obter todo o tempo de registros. Com a série discretizada temporalmente, inicia-se o processo de agrupamento de precipitações em janela móvel de durações de interesse.

As durações a serem adotadas são as mesmas utilizadas no trabalho de Pinheiro (1997) e equivalem a:

- 10 minutos
- 15 minutos
- 30 minutos
- 45 minutos
- 1 hora
- 2 horas
- 3 horas
- 4 horas
- 8 horas
- 14 horas
- 24 horas

Para a realização deste procedimento, desenvolveu-se um script em linguagem R por meio da IDE RStudio, em sua versão 1.1463. O *software* está disponível em <https://rstudio.com/products/rstudio/download/> e um exemplo de código desenvolvido e utilizado está apresentado no Apêndice A.

Após a seleção das máximas precipitações de cada ano e duração, é realizada a conversão da precipitação em intensidade horária e finalizada a montagem das séries expandidas.

4.2.1.4 Dados diários

Para a realização do estudo, os dados diários são de fundamental importância para se deduzir as relações IDF de cada posto, por isso, é utilizada a montagem das séries de máximas intensidades diárias anuais de cada posto, as séries extraídas são convertidas de séries com duração diária para séries com duração de 24 horas, conforme fator apresentado por Torrico (1974). Além disso, são extraídas informações de média e desvio padrão das séries de 24 horas para posterior utilização no presente estudo. Os dados diários foram obtidos no portal HydroWeb da ANA.

4.2.2 Aplicação das propriedades de invariância temporal nas séries de dados diários e subdiários

A aplicação da propriedade de invariância de escala temporal consiste em verificar experimentalmente a existência da invariância e calcular o valor do fator de escala de cada estação através das séries construídas. Para realizar tal procedimento, utilizou-se a metodologia apresentada por Menabde *et al.* (1999).

Primeiramente, deve-se calcular os momentos amostrais, em relação, à origem, das intensidades máximas anuais. Segundo Bairwa *et al.* (2016), o aumento da ordem dos momentos não melhora a estimativa do fator de escala e pode aumentar as incertezas. Assim, será adotado para cálculo apenas os momentos de 1ª, 2ª e 3ª ordens de cada duração.

Após a obtenção dos momentos, utilizando um gráfico em escala bilogárítmica, plota-se momento de ordem “q” *versus* duração. Em seguida, para cada momento de ordem “q” calcula-se uma regressão de potência, conforme exemplo da Figura 4.7:

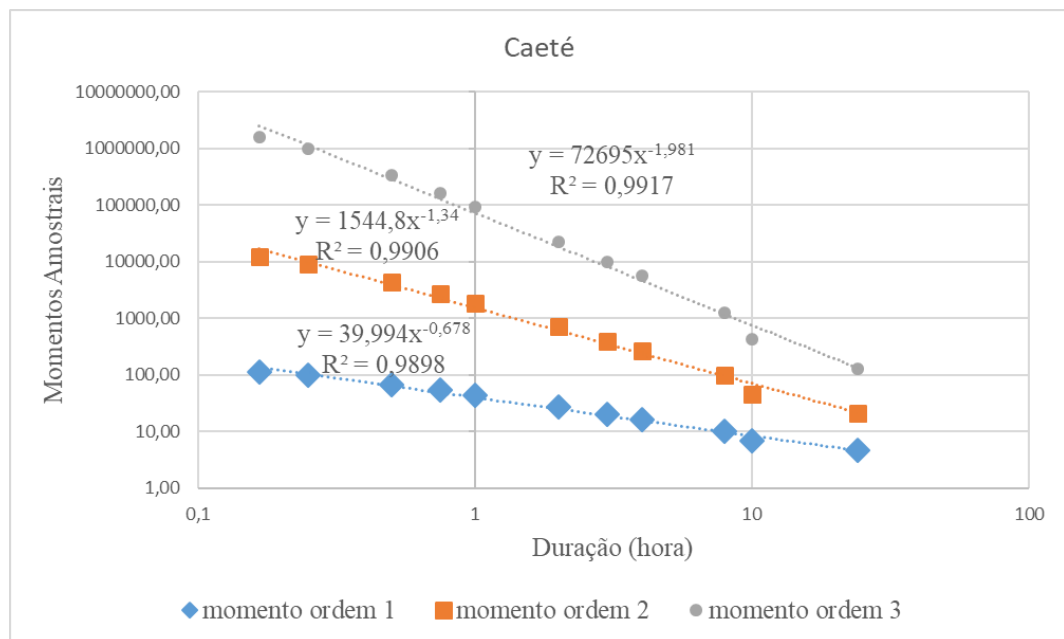


Figura 4.7: Gráfico momento q versus duração com regressão de potência

Com os valores dos expoentes das regressões de potência de cada ordem “q”, plota-se um gráfico de expoente da regressão de potência *versus* a ordem “q” do momento gerador da regressão de potência. O fator de escala, η , é obtido pela inclinação da reta de regressão do gráfico, conforme mostrado na Figura 4.8:

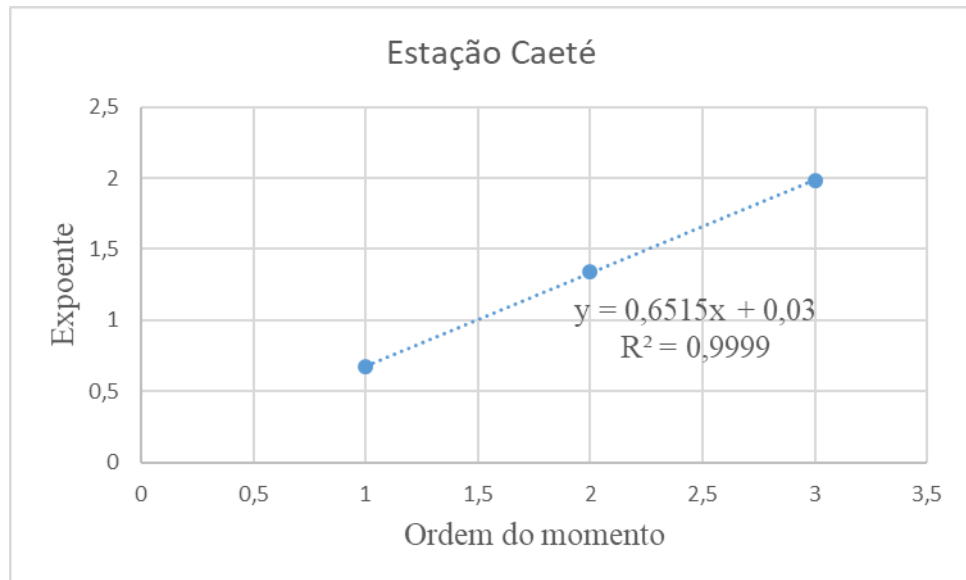


Figura 4.8: Obtenção do fator de escala

Pelo exemplo da Figura 4.7 e Figura 4.8, os expoentes da regressão de potência equivalem a 0,678 , 1,340 e 1,981 para o 1º,2º e 3º momentos, respectivamente. Plotando-se estes expoentes *versus* a ordem de cada momento, obtém-se a reta de regressão com inclinação de 0,6515, que equivale ao fator de escala para a estação em análise.

4.2.3 Seleção e validação da distribuição de probabilidades

A seleção da distribuição de probabilidades foi realizada com o auxílio do *software* SEAF. Para cada série (duração) de cada posto em análise foi realizada a verificação no SEAF a respeito das distribuições recomendadas pelo *software* para a modelagem de máximos anuais. Como são frequentemente empregadas as distribuições de Gumbel, GEV e Log-Normal em trabalhos de chuvas intensas, a análise da distribuição se limitou a verificar qual destas distribuições se adequam melhor aos dados amostrados.

O procedimento para seleção da distribuição consiste em verificar qual o grau de confiança da recomendação de cada uma das distribuições em análise. A distribuição com o maior grau de recomendação recebe o valor 1 para a série analisada e as demais recebem zero. Ao final, a distribuição escolhida será aquela que apresentar a maior quantidade de sucessos considerando todas as séries.

A Tabela 4.2 apresenta as recomendações de cada distribuição por estação para a duração de 10 minutos e a Tabela 4.3 apresenta qual distribuição seria escolhida para cada série em análise, indicando com o número 1 a distribuição escolhida.

Tabela 4.2: Grau de confiança de cada distribuição para duração de 10 minutos
10 minutos

Código da estação	Estação	Ln2	Gumbel	GEV
01943009	Vespasiano	0,5877	0,8463	0,8948
01943010	Caeté	0,9414	0,9704	-
01943022	Caixa de Areia	-	-	-
01943049	Ponte Raul Soares	0,9427	0,946	-
01943054	Raja Gabágliã	0,9168	0,8556	-
01943054	Lourdes	0,9786	0,9586	-
01943055	Horto	0,8603	0,9101	-
01944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9706	0,9845	-
01944009	Pedro Leopoldo	0,7396	0,8297	0,9695
02043002	Lagoa Grande	0,9633	0,9842	-

Tabela 4.3: Distribuição escolhida para cada série
10 minutos

Código da estação	Estação	Ln2	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	-	-	1
1943010	Caeté	-	1	-
1943022	Caixa de Areia	-	-	-
1943049	Ponte Raul Soares	-	1	-
1943054	Raja Gabágliã	1	-	-
1943054	Lourdes	1	-	-
1943055	Horto	-	1	-
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	-	1	-
1944009	Pedro Leopoldo	-	-	1
2043002	Lagoa Grande	-	1	-

De acordo com o exemplo apresentado, a distribuição de Gumbel seria a escolhida para modelar a IDF por apresentar a maior quantidade de sucessos para as séries em análise.

4.2.4 Dedução de relações IDF subsidiárias

Definida a distribuição de probabilidades a ser adotada e o fator de escala de cada estação, para a dedução das equações IDF's foi utilizada a metodologia apresentada por Menabde *et al.* (1999) e constante no item 3.3.1.3 do presente trabalho. A equação generalizada apresentada por Koutsoyiannis *et al.* (1998) está rerepresentada na equação (4.1) e os valores das funções apresentados por Menabde *et al.* (1999) estão rerepresentados nas equações (4.2) e (4.3):

$$I = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (4.1)$$

$$a(T) = \mu + \sigma F^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (4.2)$$

$$b(d) = d^\eta \quad (4.3)$$

A média e desvio padrão utilizados na equação (4.2) são independentes da duração e serão calculadas para cada estação através dos dados diários obtidos pelo portal HidroWeb. Para converter à média e desvio padrão dos dados diários naqueles utilizados na equação é necessário realizar uma transformação conforme equações (4.4) e (4.5):

$$\mu = \mu_D D^\eta \quad (4.4)$$

$$\sigma = \sigma_D D^\eta \quad (4.5)$$

onde:

μ corresponde à média utilizada na dedução da IDF, σ corresponde ao desvio padrão utilizada na dedução da IDF, μ_D corresponde à média da série de máximas intensidades anuais ($d = 24$

horas), σ_D corresponde ao desvio padrão da série de máximas intensidades anuais ($d = 24$ horas), D corresponde à duração utilizada para os cálculos, que neste trabalho corresponde a 24 horas e η corresponde ao fator de escala da estação, obtido no item 4.2.2.

A Figura 4.9 apresenta um fluxograma com as etapas necessárias para a dedução das equações IDF das estações analisadas, o processo é repetido para cada estação.

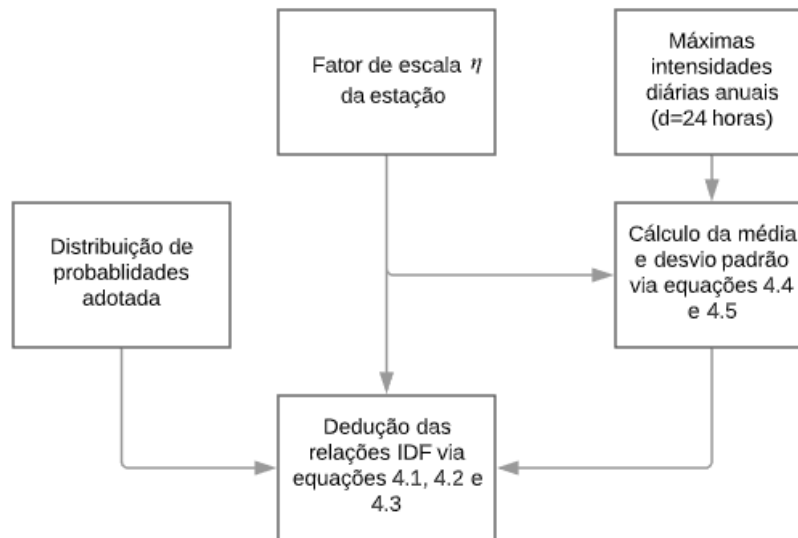


Figura 4.9: Definição das relações IDF's subsidiárias

4.2.5 Verificação da viabilidade de regionalização das IDF's subsidiárias através de dados diários

Com a equação IDF de cada estação, a regionalização das curvas IDF's pode ser realizada através da regionalização do coeficiente de escala η , uma vez que a média, μ , e o desvio padrão, σ , dependem dos dados de precipitação da estação a ser regionalizada. Assim, nesta etapa, será verificada a possibilidade de regionalização do fator de escala através da verificação de correlação do fator de escala.

A primeira tentativa de regionalização pelo fator de escala foi realizada ao se tentar correlacionar essa variável à cota altimétrica das estações, assim, caso exista uma correlação

será possível extrair o fator de escala de um gráfico através da cota altimétrica de estação pluviométrica em que se tenha interesse em construir uma equação IDF.

Caso não exista correlação entre o fator de escala e a altimetria da estação, será realizada a verificação de correlação com a precipitação anual média de cada estação. Se em nenhuma das tentativas for obtido uma relação que viabilize a regionalização do fator de escala, será realizada uma análise do desempenho da relação IDF construída a partir do fator de escala médio da região frente aos dados observados à IDF do posto.

Escolheu-se como possíveis variáveis explicativas do fator de escala a cota altimétrica das estações e a precipitação anual média, que são dados que podem ser obtidos facilmente para todas as estações pluviométricas. Os demais dados medidos em estações meteorológicas como a temperatura média não foram utilizados devido às restrições de obtenção para dos dados ou a complexidade de sua obtenção para futuras aplicações.

Caso nenhuma das hipóteses levantadas sejam válidas, será construído um mapa com interpolação dos valores de fatores de escala na área da RMBH de modo a permitir uma análise gráfica do valor do fator de escala para uma estação de interesse.

4.2.6 Comparação da regionalização com a IDF apresentada por Pinheiro (1997)

Após a regionalização, cada estação terá sua IDF estimada, ou seja, com seu fator de escala proveniente de correlação com cotas altimétricas das estações, precipitação anual média, fator de escala médio ou extraído do mapa interpolado. A comparação da regionalização com a IDF apresentada por Pinheiro (1997) será realizada através da construção de gráficos de intensidade *versus* tempo de retorno para cada duração contendo a IDF de Pinheiro (1997), a IDF da estação, a IDF regional e os dados observados, plotados através da posição de plotagem de Weibull.

Após a plotagem dos gráficos, será realizado o cálculo da raiz do erro relativo quadrático (RRMSE) e do erro absoluto médio de cada IDF frente aos dados observados. Com os valores RRMSE será possível comparar o desempenho de cada metodologia de estimação de IDF regional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 *Construção das séries*

As estações operadas pela CPRM tiveram as séries de máximas intensidades anuais expandidas conforme os dados fornecidos. Para a estação de Vespasiano, foram fornecidos os dados de 1996 a 2005 e 2007 a 2010. Como os dados fornecidos estão em formato de ano civil, na conversão para ano hidrológico perdeu-se os anos 2005/2006 e 2006/2007, assim como o ano 2010/2011. Ao se realizar a análise de dados GEDAC para a estação, notou-se que o ano hidrológico 1997/1998 apresentou falhas entre 19/12/1997 a 28/01/1998 enquanto o monitoramento pluviométrico registrou precipitações nestas datas. Por se tratar da época em que ocorrem fenômenos chuvosos significativos na região o ano foi descartado.

A estação Caeté contou com o maior acréscimo de anos em sua série. A digitalização dos dados desta estação estava mais avançada que as demais com registros até o ano civil de 2018, enquanto as demais tiveram dados digitalizados até 2010. Assim, a série fornecida contém dados de 1996 a 2017, com exceção dos anos 2006 e 2008, o que resultou na perda dos anos hidrológicos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009.

A estação Caixa de Areia contou com dados fornecidos de 1996 a 2009, com exceção do ano de 2006. Como não foram encontradas falhas ou inconsistências que levassem a exclusão de anos com dados, apenas os anos hidrológicos 2005/2006 e 2006/2007 não foram considerados na construção das séries.

As estações Lourdes, Raja Gabágua e Horto não sofreram expansão das séries. A estação Ponte Raul Soares foi a que teve o menor acréscimo, pois, apresentava ausência de digitalização entre os anos de 1996 a 2008, estando disponíveis apenas os anos 2009 e 2010, o que gerou o ano hidrológico 2009/2010.

A estação Ponte Nova do Paraopeba apresentou ausência de digitalização entre os anos 1996 e 2001, além do ano de 2006 e gerou como resultados os anos hidrológicos 2002/2003 a 2004/2005 e 2007/2008 a 2009/2010.

Para a estação Pedro Leopoldo foram disponibilizados dados de 1996 a 2010, com exceção dos anos de 2006 e 2008. Durante a análise de dados GEDAC, foi constatado que o ano hidrológico 1997/1998 apresentava registro de ausência de chuva entre outubro de 1997 e janeiro de 1998. Ao se verificar nos registros do HidroWeb constatou-se que existiram fenômenos de precipitação no período e por este motivo este ano foi descartado. Os anos 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009 também não foram gerados.

Por fim, a estação Lagoa Grande contou com dados de 1996 a 2009, com exceção de 2006, descartando-se, assim, os anos de 2005/2006 e 2006/2007. A Tabela 5.1 apresenta um resumo sobre a expansão das séries:

Tabela 5.1: Expansão das séries de máximos anuais da RMBH

Código da estação	Estação	Tamanho da série base (anos) (Pinheiro, 1997 e Nunes, 2018)	Nº de anos de acrescentados	Tamanho da Série Expandida (anos)
01943009	Vespasiano	18	11	29
01943010	Caeté	16	17	33
01943022	Caixa de Areia	17	10	27
01943049	Ponte Raul Soares	10	1	11
01943054	Raja Gabágua	30	0	30
01943054	Lourdes	33	0	33
01943055	Horto	24	0	24
01944004	Ponte Nova do Paraopeba	17	6	23
01944009	Pedro Leopoldo	6	9	15
02043002	Lagoa Grande	8	11	19

É possível notar que o acréscimo na quantidade de anos das séries foi significativo, com a estação Pedro Leopoldo acrescentando 150% ao tamanho da série, embora a série ainda se apresente pequena para dados hidrológicos. A estação Pedro Leopoldo, a estação Ponte Raul Soares e a estação Lagoa Grande são as estações com a menor quantidade de dados. A média do tamanho das séries passou de 17,9 anos para 24,4 anos, um aumento de 36,3%.

A Figura 5.1 apresenta os anos disponíveis de dados das séries expandidas de modo a facilitar a visualização temporal das séries. É possível notar que algumas estações possuem uma grande

quantidade de registro faltantes ou com falhas, o que deve a falta de monitoramento, falhas no processo de monitoramento ou dados que ainda não se encontram digitalizados.

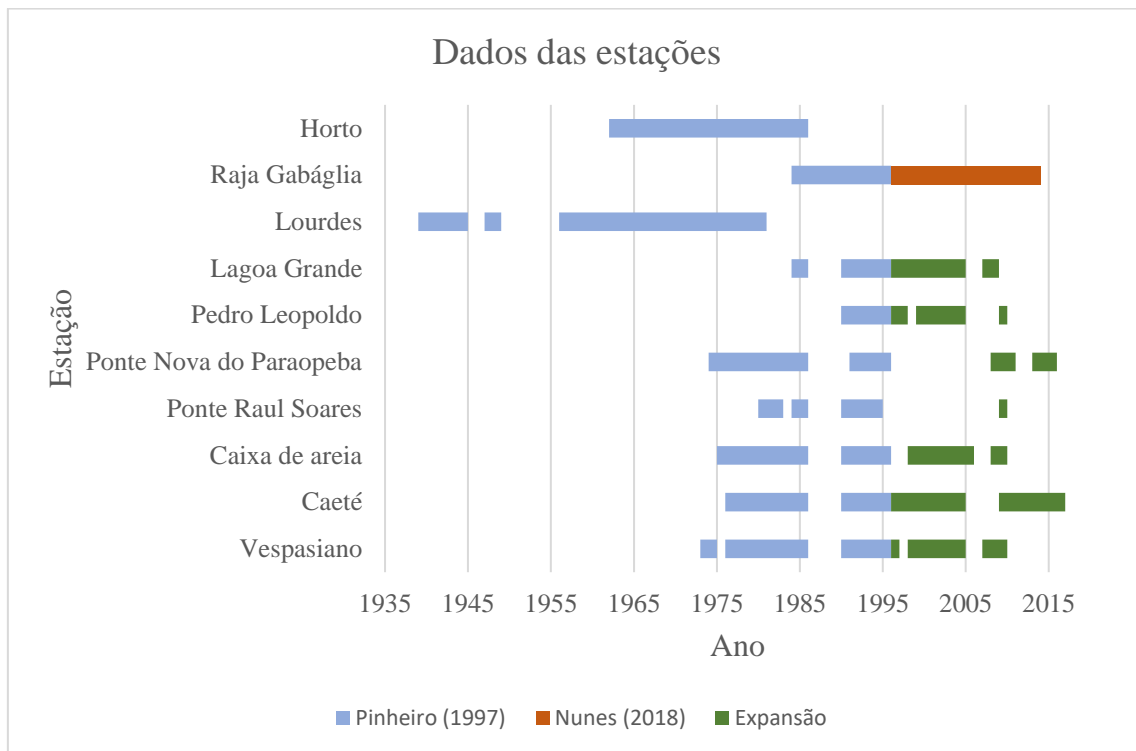


Figura 5.1 Tamanho e distribuição temporal das séries expandidas

As séries geradas estão disponíveis no Apêndice B deste trabalho. Apesar da construção das séries por Pinheiro (1997) e Nunes (2018) diferirem da metodologia utilizada neste trabalho, ambos os métodos tendem a extrair os valores de chuvas extremas das séries. Pinheiro (1997) e Nunes (2018) utilizaram a análise visual dos pluviogramas para determinar aqueles com maior inclinação em um ano hidrológico. Os que possuíam as maiores inclinações foram digitalizados para extração das intensidades para as durações de interesse.

Para os dados diários, as séries obtidas no site do portal HidroWeb foram analisadas e os valores de intensidade máxima diária anual extraídos. Para a construção das IDF dos postos é necessário conhecer os valores de média e desvio padrão das máximas intensidades diárias anuais. A Tabela 5.2 mostra os valores de intensidade máxima diária anual média e seu respectivo desvio padrão para cada uma das estações do trabalho. Os valores apresentados

foram corrigidos pelo fator apresentado por Torrico (1974) de conversão da precipitação de 1 dia em precipitação de 24 horas. O fator utilizado equivale a 1,095, assim, a chuva de 24 horas é definida como a precipitação diária multiplicada pelo fator. As estações Raja Gabágua e Lourdes apresentavam apenas dois anos de dados no sistema HidroWeb. Por isso, para a construção da IDF dos postos será utilizada, excepcionalmente para estas estações, a média e o desvio padrão da série subdiária da estação Raja Gabágua e duração de 24 horas. A utilização da série diária para a construção da IDF se deve ao fato de se ter séries de tamanho relativamente grande para dados hidrológicos.

Tabela 5.2: Média e desvio padrão das intensidades máximas anuais – d = 24 horas

Código	Estação	Intensidade média (mm/h)	Desvio Padrão (mm/h)	Tamanho da série (anos)
1943009	Vespasiano	3,59	1,23	77
1943010	Caeté	4,05	1,23	77
1943022	Caixa de Areia	4,50	1,64	69
1943049	Ponte Raul Soares	3,91	1,71	42
1943054	Lourdes e Raja Gabágua	3,84	1,15	30
1943055	Horto	3,84	1,15	57
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	4,24	1,19	77
1944009	Pedro Leopoldo	3,70	1,01	77
2043002	Lagoa Grande	3,59	1,06	76

5.2 Aplicação da propriedade de invariância temporal

5.2.1 Verificação da existência da invariância de escala temporal

Para a verificação da existência da invariância de escala temporal plotou-se, em escala bilogarítmica, os gráficos de momentos amostrais *versus* duração para momentos de 1^a a 3^a ordens. Os gráficos obtidos estão apresentados da Figura 5.2 a Figura 5.11.

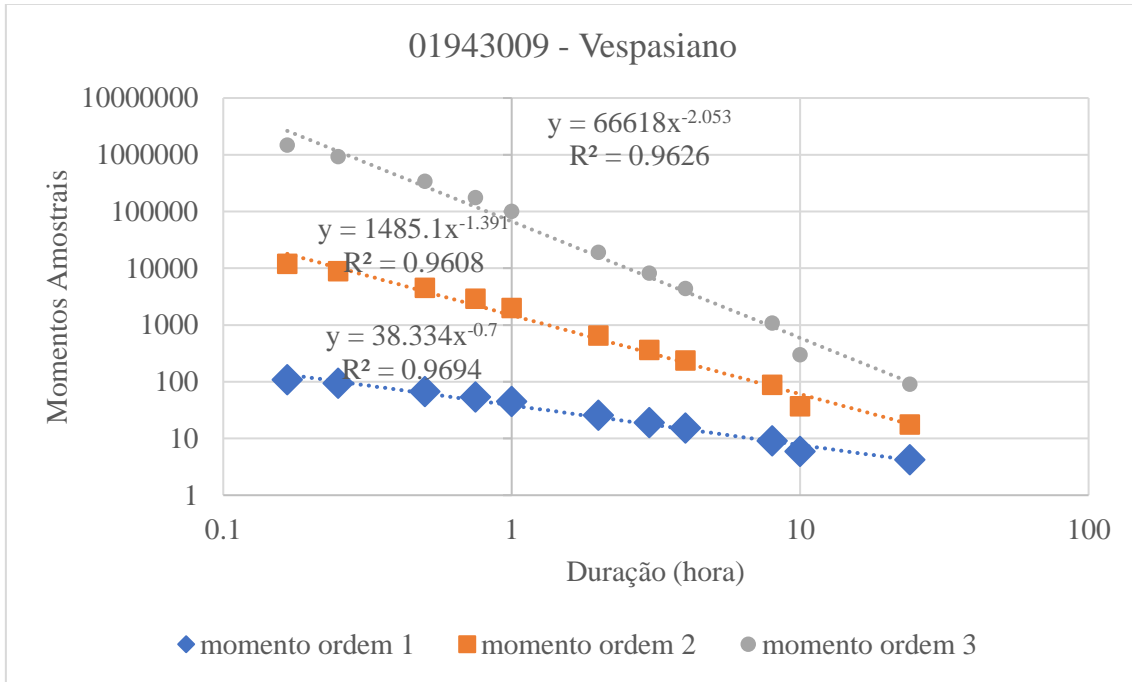


Figura 5.2: Verificação empírica da invariância de escala - Vespasiano

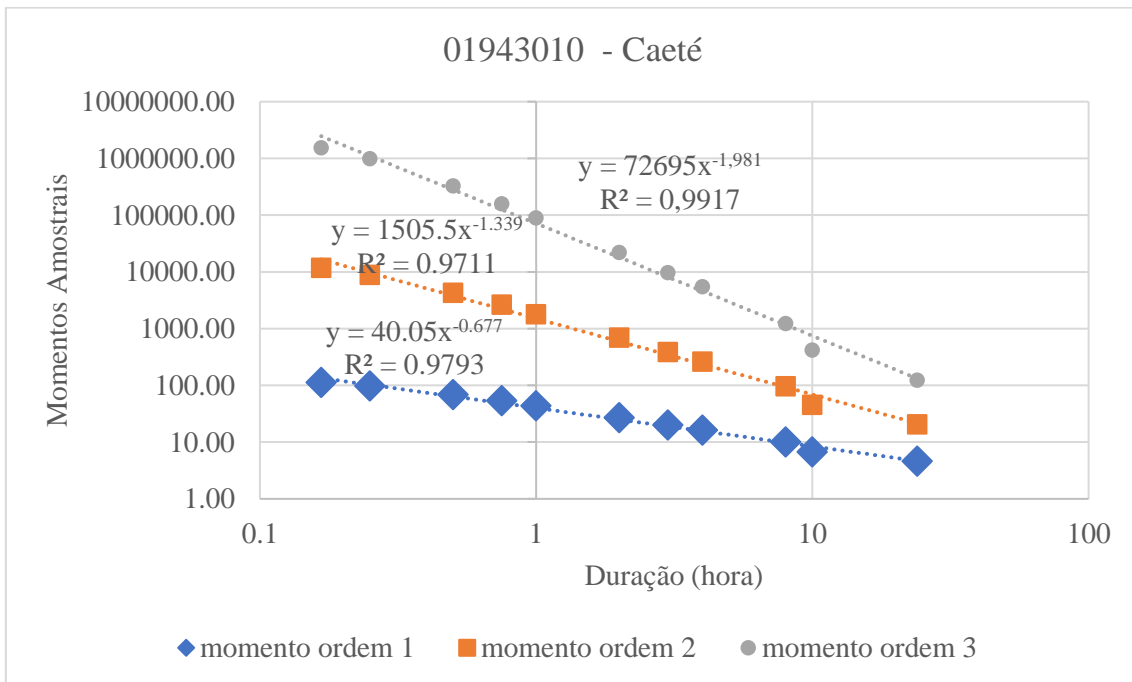


Figura 5.3: Verificação empírica da invariância de escala - Caeté

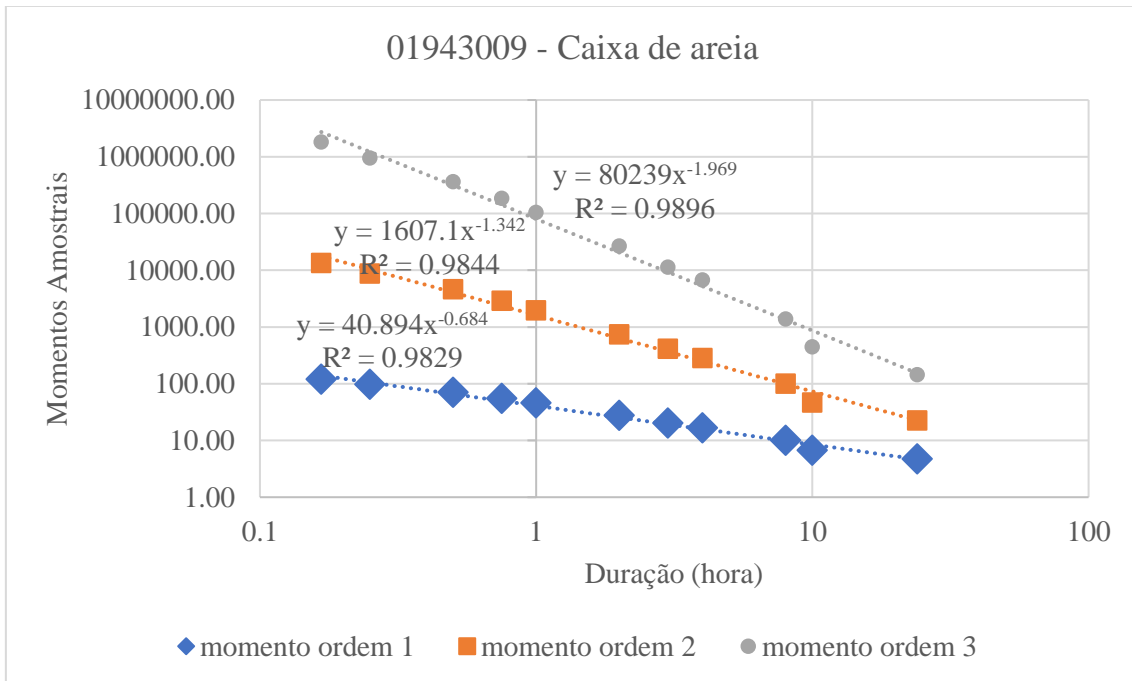


Figura 5.4: Verificação empírica da invariância de escala – Caixa de Areia

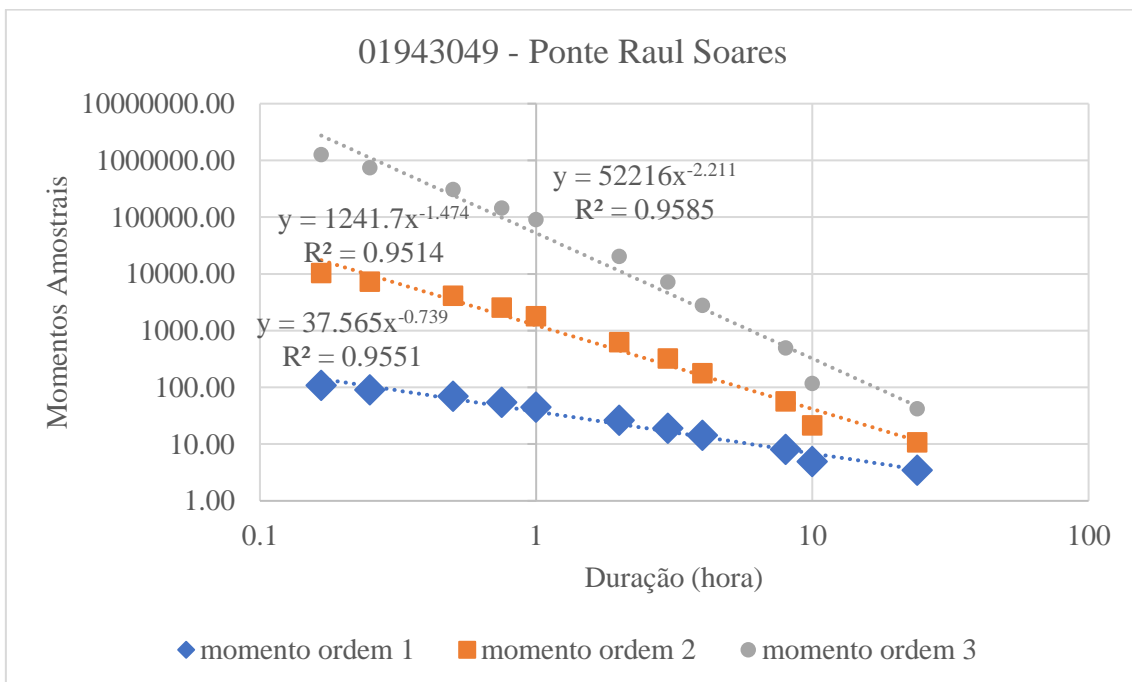


Figura 5.5: Verificação empírica da invariância de escala – Ponte Raul Soares

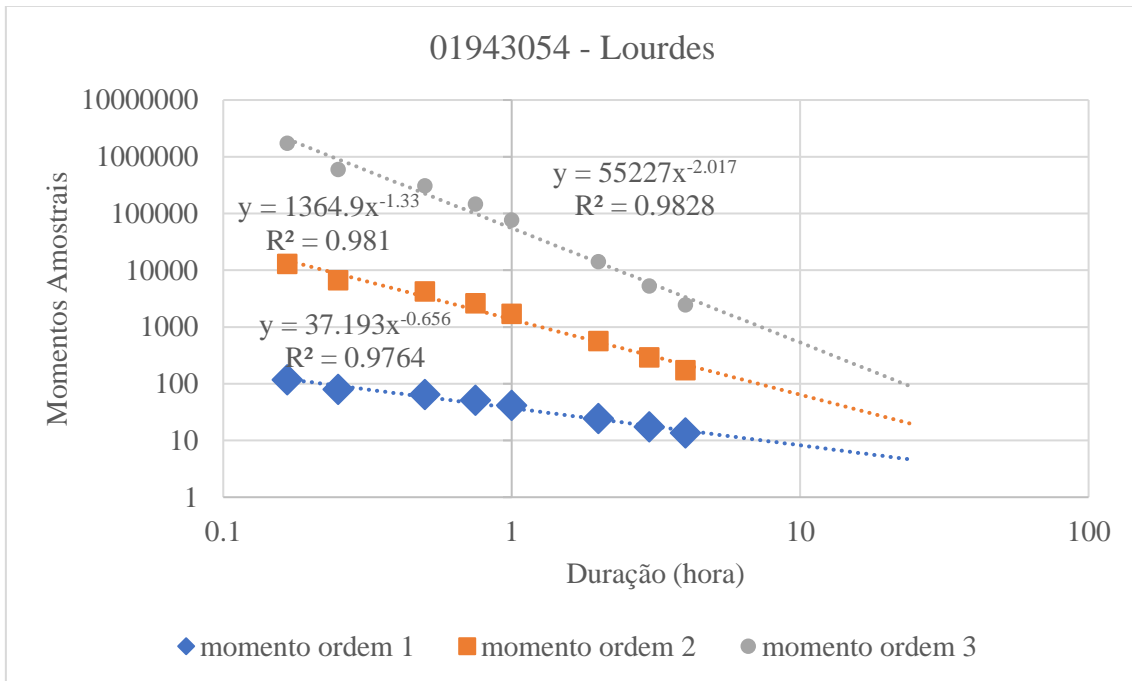


Figura 5.6: Verificação empírica da invariância de escala - Lourdes

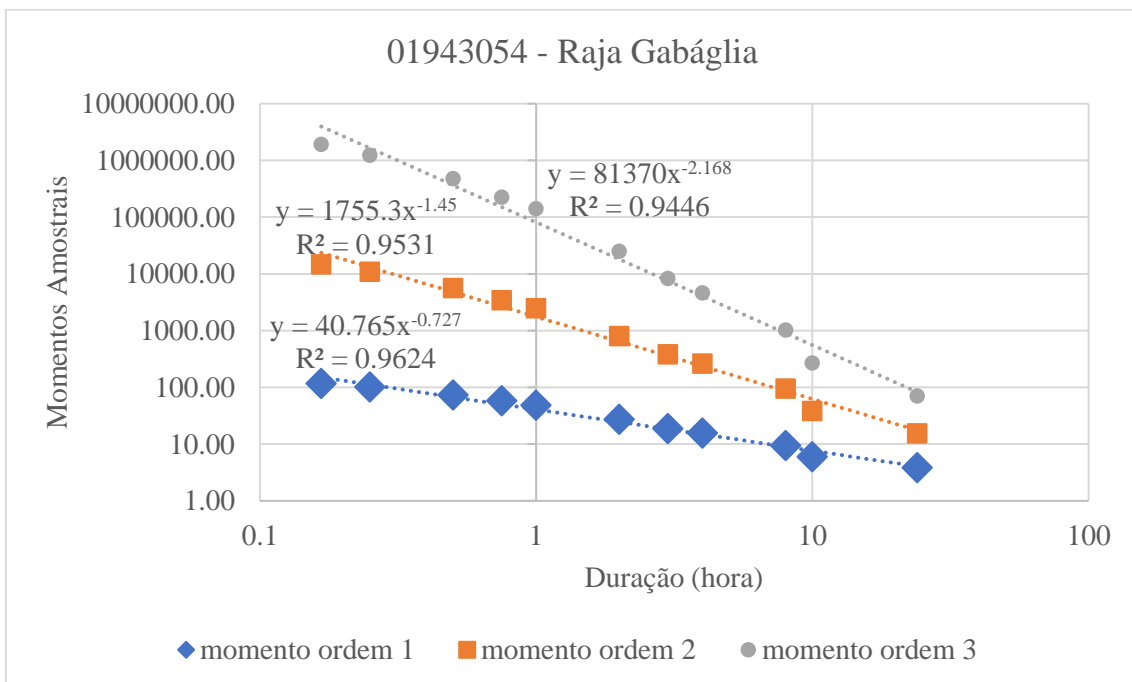


Figura 5.7: Verificação empírica da invariância de escala – Raja Gabágua

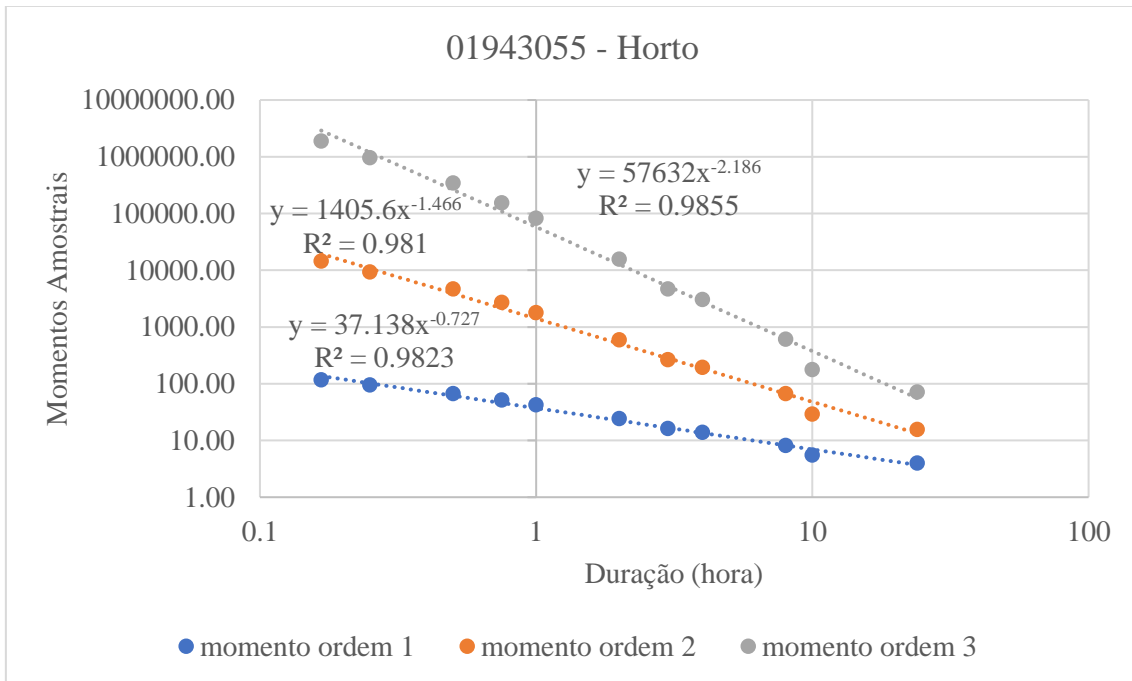


Figura 5.8: Verificação empírica da invariância de escala - Horto

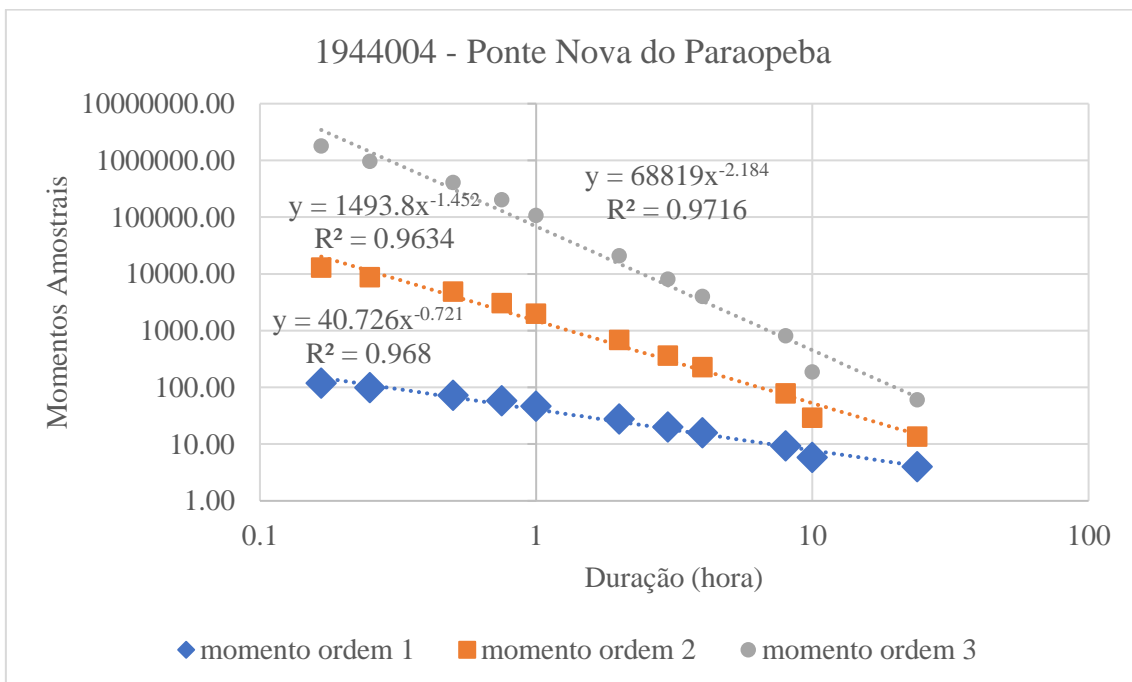


Figura 5.9: Verificação empírica da invariância de escala – Ponte Nova do Paraopeba

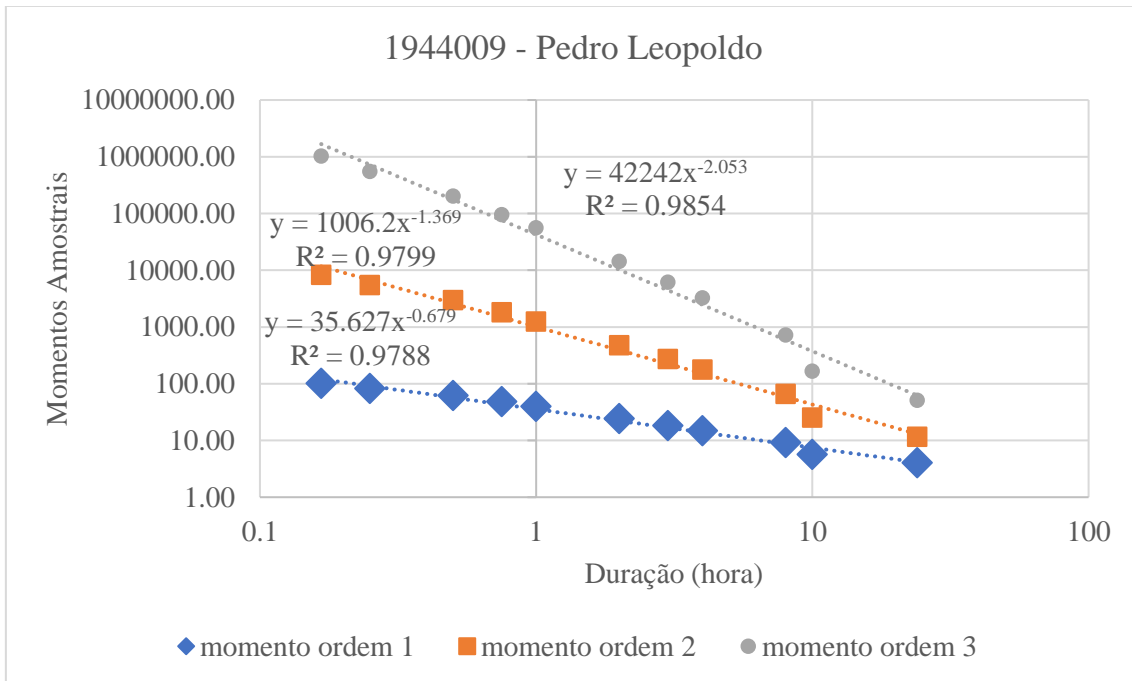


Figura 5.10: Verificação empírica da invariância de escala – Pedro Leopoldo

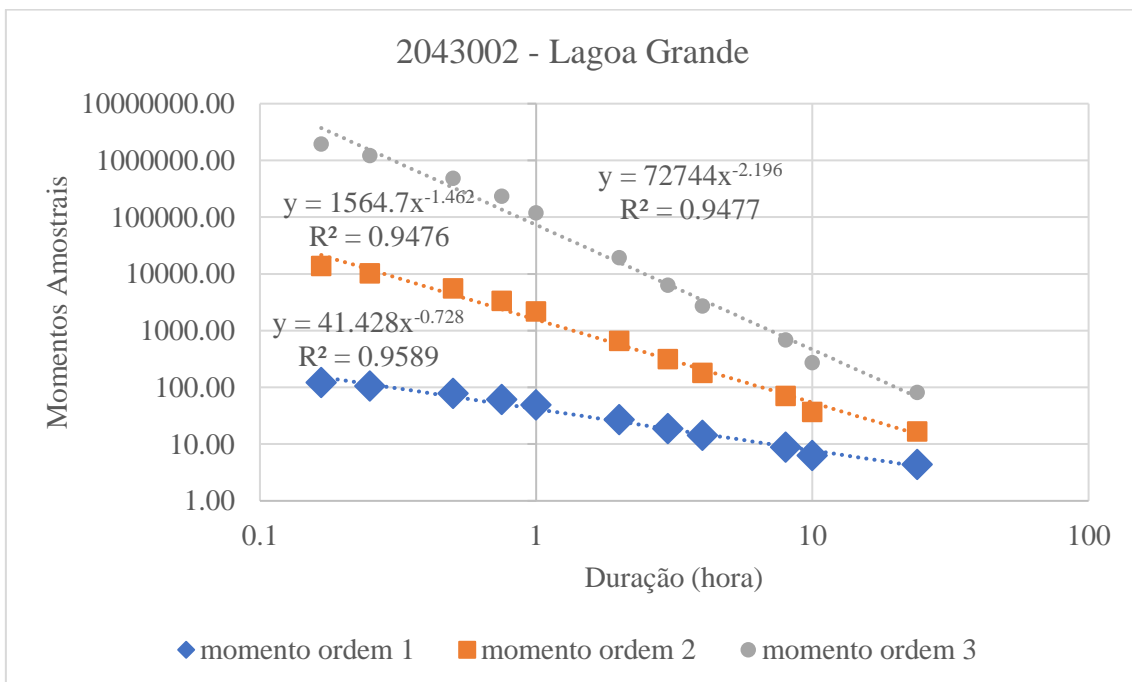


Figura 5.11: Verificação empírica da invariância de escala – Lagoa Grande

É possível notar que para todas as estações, o gráfico resultou em regressões de potência que são retas para a escala adotada e com um coeficiente de determinação R^2 alto. Os momentos foram calculados em relação à origem.

Foi constatada empiricamente a invariância de escala temporal nas séries das estações analisadas, visto que foi possível modelar a relação momento da intensidade *versus* duração através de uma regressão de potência. Ghanmi *et al.* (2016) fizeram uma comparação entre a verificação da invariância de escala temporal utilizando o cálculo dos momentos via LMOM e MOM e concluíram que ao se utilizar LMOM era possível verificar casos de multiescalabilidade e que estes fenômenos ocorriam devido ao tipo de formação de chuvas, sejam elas frontais ou convectivas. A formação da chuva pode influenciar em sua duração e intensidade e, por isso, pode-se esperar que exista uma diferença no comportamento das curvas. No presente trabalho, tentou-se calcular os momentos via LMOM, entretanto, foi obtido um comportamento não esperado para a regressão devido à existência de momentos negativos em algumas estações, o que inviabilizou a regressão de potência. O resultado não esperado para os momentos estimados via LMOM podem ter ocorrido devido ao processo de formação das precipitações, entretanto, a modelagem considerando a escalabilidade simples em senso estrito definida por Menabde *et al.* (1999) pode ser aplicada sem maiores complicações, visto que existe comprovação experimental.

5.2.2 Cálculo do fator de escala das estações

O fator de escala foi calculado seguindo a propriedade de escalabilidade simples em senso estrito, ou seja, o fator de escala é linear e apenas um fator representa de forma satisfatória todas as durações. Foi realizada a regressão linear entre os expoentes e sua respectiva ordem dos gráficos apresentados entre a Figura 5.2 a Figura 5.11. Os expoentes das equações e os fatores de escala obtidos estão apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3: Expoentes dos momentos e fatores de escala das estações

Código	Estação	Expoente do Momento de ordem			η
		1	2	3	
1943009	Vespasiano	0,700	1,391	2,053	0,677
1943010	Caeté	0,677	1,339	1,981	0,652
1943022	Caixa de Areia	0,684	1,342	1,969	0,643
1943049	Ponte Raul Soares	0,739	1,474	2,211	0,736
1943054	Raja Gabaglia	0,727	1,450	2,168	0,721
1943054	Lourdes	0,656	1,330	2,017	0,681
1943055	Horto	0,727	1,466	2,186	0,730
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,721	1,452	2,184	0,732

1944009	Pedro Leopoldo	0,679	1,369	2,053	0,687
2043002	Lagoa Grande	0,728	1,462	2,195	0,734

Pode-se notar que os fatores de escala das estações analisadas variam entre 0,643, registrado na estação Caixa de Areia, e 0,736, fator de escala da estação Ponte Raul Soares. O fator de escala médio da região, $\bar{\eta}$, equivale a 0,699.

Como as hipóteses assumidas para regionalização consistem em verificar a existência de correlação entre os fatores de escala das estações e suas respectivas altimetrias e precipitação anual média, foi realizada a construção dos gráficos conforme Tabela 5.4, Figura 5.12 e Figura 5.13:

Tabela 5.4: Fatores de escala, altimetria e precipitação anual média anual

Código da estação	Estação	η	Altimetria (m)	Precipitação Anual Média (mm)
01943009	Vespasiano	0,677	699	1270,3
01943010	Caeté	0,652	950	1405,6
01943022	Caixa de Areia	0,643	1034	1729,7
01943049	Ponte Raul Soares	0,736	700	1247,8
01943054	Raja Gabágua	0,721	916	1460
01943054	Lourdes	0,681	850	1470,1
01943055	Horto	0,730	915	1570,1
01944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,732	700	1415
01944009	Pedro Leopoldo	0,687	698	1290,8
02043002	Lagoa Grande	0,734	1350	1551,4

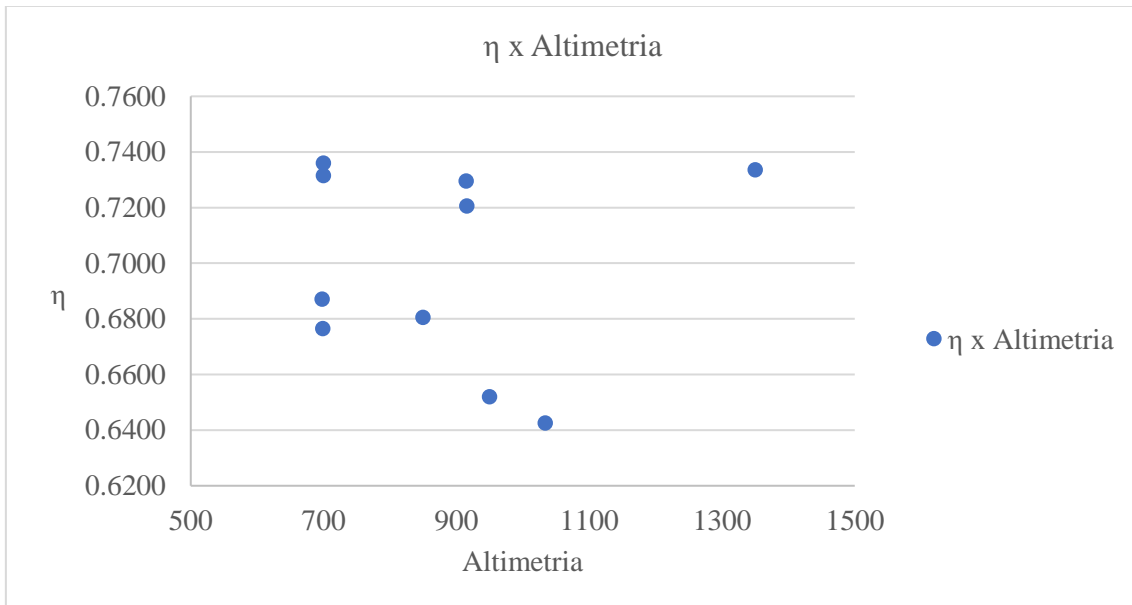


Figura 5.12 Gráfico fator de escala *versus* altimetria

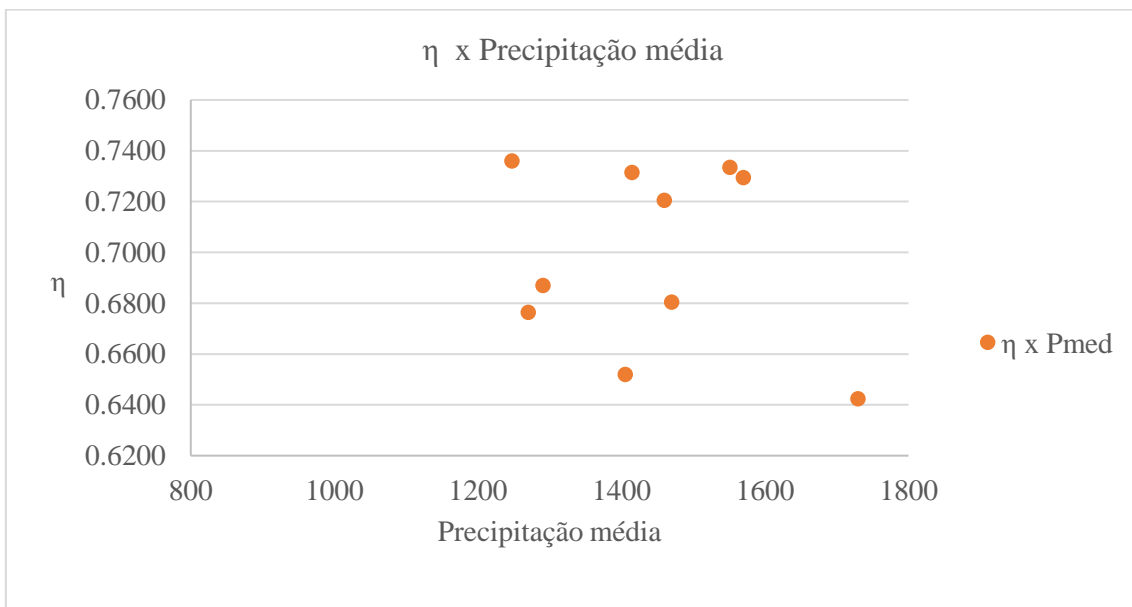


Figura 5.13: Gráfico fator de escala *versus* precipitação anual média

Observou-se que não existe correlação entre o fator de escala e a altimetria ou a precipitação média anual dos postos, o que inviabiliza as duas primeiras hipóteses de regionalização levantadas no item 4.2.3. Será realizada a análise de desempenho do fator de escala médio, para a construção das relações IDFs regionais. Caso o resultado não seja satisfatório, será realizada uma interpolação dos fatores de escala na RMBH.

5.3 Escolha da Distribuição de probabilidades

A escolha da distribuição de probabilidades a ser utilizada na construção das equações IDF foi realizada com o auxílio do *software* SEAF. Como o trabalho conta com 10 estações e 11 durações, o total de séries a serem analisadas seria igual a 110 séries, entretanto, as séries de 8, 14 e 24 horas da estação Lourdes não se encontram disponíveis, levando o total de séries para 107 séries de máximas intensidades anuais. As séries foram analisadas no SEAF uma a uma, e dentre as 107 analisadas apenas três séries não reportaram uma melhor distribuição dentre as distribuições analisadas no presente trabalho. Nestes casos, que ocorreram na estação Caixa de Areia nas durações de 10, 15 e 30 minutos, as distribuições Gumbel e LogNormal foram rejeitadas através do intervalo de confiança da variância nas três séries, a distribuição GEV foi rejeitada por duas vezes no critério do intervalo de confiança da variância e uma vez por apresentar o fator de forma positivo, o que impede a aplicação em máximos.

Com isso, o SEAF retornou distribuições indicadas para 104 séries de dados. As recomendações de cada série estão apresentadas no Apêndice C do trabalho. As rejeições das distribuições de Gumbel e LogNormal ocorreram devido ao intervalo de confiança da variância e totalizaram 11 e 17 rejeições, respectivamente. A distribuição GEV foi rejeitada 2 vezes devido ao critério do intervalo de confiança da variância, 42 vezes por apresentar fator de forma positivo e 22 vezes pelo critério da parcimônia em relação à distribuição de Gumbel.

Aplicando o critério de selecionar uma distribuição por série de acordo com o grau de recomendação do SEAF, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 5.5:

Tabela 5.5: Número de vezes em que a distribuição foi recomendada pelo SEAF em 1º lugar na análise

Duração	LogNormal	Gumbel	GEV
10 minutos	2	5	2
15 minutos	2	6	1
30 minutos	1	7	1
45 minutos	3	7	0
1 hora	4	4	2
2 horas	4	1	5
3 horas	3	2	5
4 horas	3	3	4
8 horas	3	2	4
14 horas	2	4	3

24 horas	2	3	4
Total	29	44	31

Pode-se notar que a distribuição de Gumbel obteve o maior número de recomendações e, por isso, será a distribuição adotada na construção das equações IDF dos postos e da IDF regional. As distribuições LogNormal e GEV apresentaram desempenho similar, com a LogNormal apresentando desempenhos melhores em durações até 1 hora e a GEV acima de 1 hora. Este fenômeno também ocorreu para a comparação entre a distribuição de Gumbel e GEV, a GEV se adequou melhor aos dados em durações superiores a 1 hora em comparação com a distribuição de Gumbel, exceto na duração de 14 horas. Entretanto, a distribuição de Gumbel foi a mais recomendada para a maioria dos postos nas pequenas durações, o que levou à sua escolha.

5.4 Construção das IDFs das estações e IDF Regional

Definida a distribuição de Gumbel como a distribuição a ser utilizada na RMBH e os fatores de escala de cada estação, foi realizado o equacionamento da IDF de cada estação conforme dedução das equações (4.1), (4.2) e (4.3) para a distribuição de Gumbel, apresentado nas equações (5.1), (5.2) e (5.3):

$$I = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (5.1)$$

$$a(T) = \mu_D D^\eta - \sigma_D D^\eta \ln(-\ln(1 - 1/T)) \quad (5.2)$$

$$b(d) = d^\eta \quad (5.3)$$

onde, μ_D e σ_D são a média e o desvio padrão dos dados de máximas intensidades obtidas no portal HidroWeb e descritas no item 5.1. D é a duração dos dados diários e igual a 24 horas.

Assim, as equações das IDFs dos postos seguem a equação (5.4), com os coeficientes de média e desvio padrão apresentados na Tabela 5.2 e os fatores de escala das estações na Tabela 5.3:

$$I = \frac{\mu_{\text{diário}} 24^{\eta_{\text{estação}}} - \sigma_{\text{diário}} 24^{\eta_{\text{estação}}} \ln(-\ln(1 - 1/T))}{d^{\eta_{\text{estação}}}} \quad (5.4)$$

Como a intensidade tem unidade de comprimento por tempo, será adotada a unidade mm/hora nos valores deduzidos e, por isso, os valores de média e desvio padrão devem ser utilizados na unidade de intensidade enquanto a duração será considerada em horas.

Para cada estação utilizou-se o fator de escala da estação e o fator de escala médio para gerar as IDF's da estação e a IDF média. Além disso, utilizou-se a equação (5.4) e os dados apresentados por Pinheiro (1997) para construir as curvas de frequência apresentadas no Apêndice D e exemplificadas entre a Figura 5.14 e a Figura 5.16. As curvas apresentam a IDF da estação, a IDF média, a IDF de Pinheiro (1997) e os dados observados da série expandida. Para plotar os dados observados nas curvas de frequência, utilizou-se a posição de plotagem de Weibull.

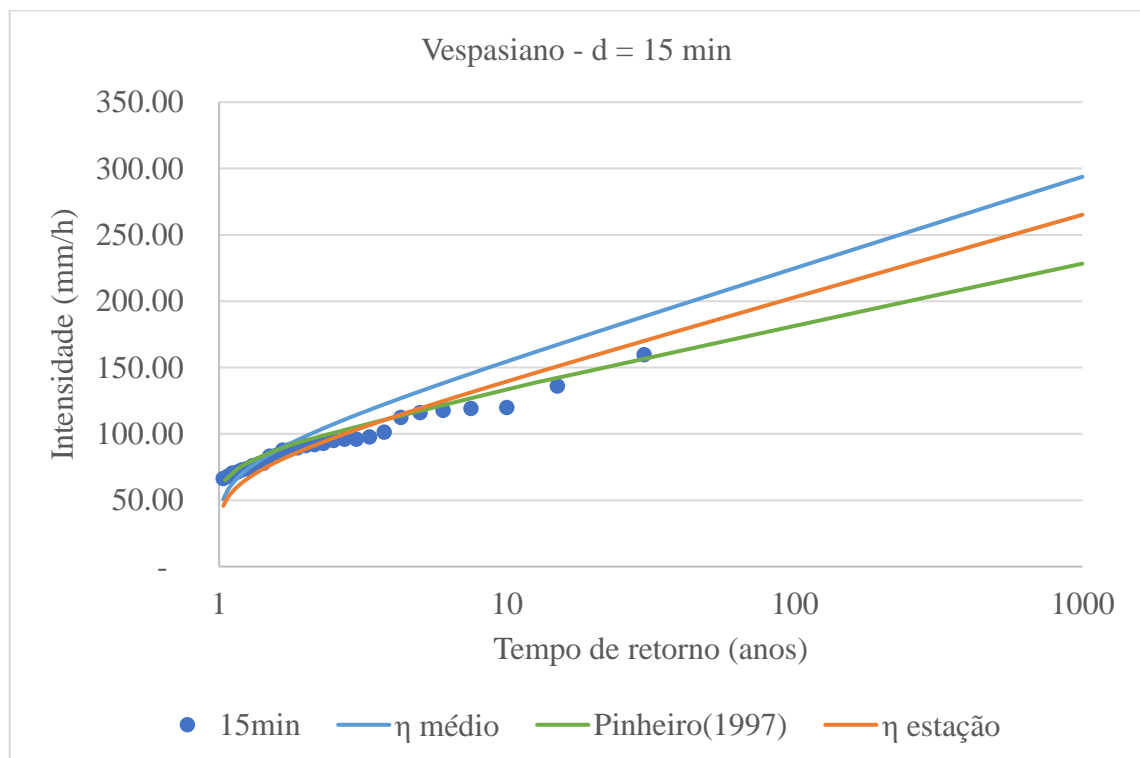


Figura 5.14: Curva de frequência – Vespasiano – 15 minutos

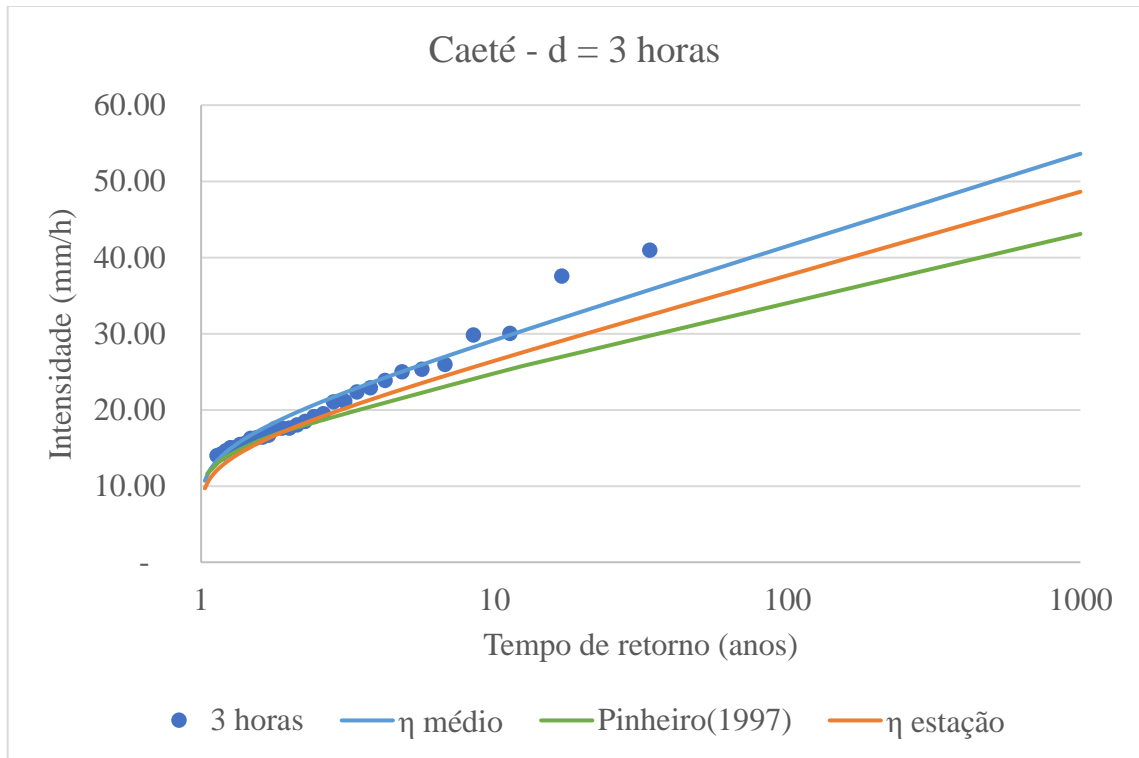


Figura 5.15: Curva de frequência – Caeté – 3 horas

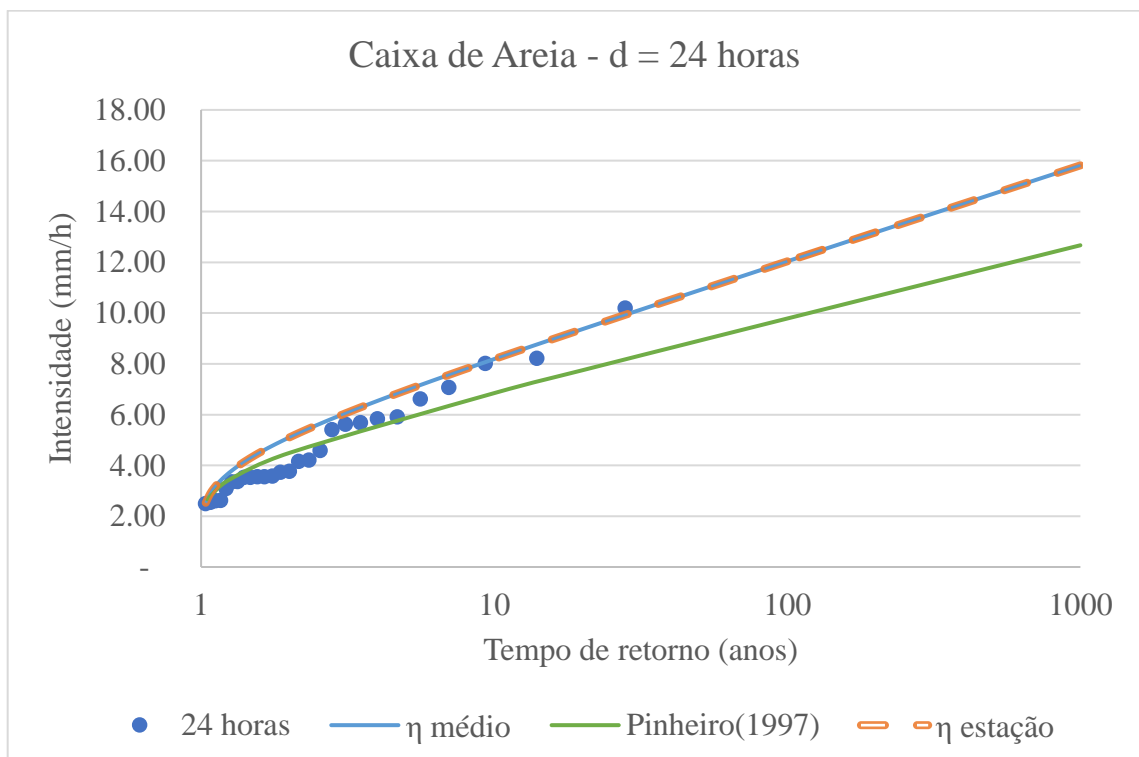


Figura 5.16: Curva de frequência – Caixa de Areia – 24 horas

Pode-se observar que para as durações de 24 horas os quantis são gerados apenas pela distribuição de Gumbel e média e desvio padrão da amostra de dados de 24 horas obtidos pela

série diária. Este fato ocorre devido à propriedade de invariância de escala do método, ou seja, não é necessário reescalar os dados diários convertidos para a duração de 24 horas visando obter a duração de 24 horas, conforme pode ser verificado nas equações (5.1) a (5.3).

Ao se adotar o fator de escala médio para a construção da IDF regional, os valores de intensidade gerados pela IDF são da mesma ordem de grandeza aos valores gerados a partir do fator de escala da estação e pela equação de Pinheiro (1997), apresentada na equação (3.69). Como a série de dados é pequena frente aos tempos de retorno de interesse para projetos, como 50, 100 ou 1000 anos, a comparação com dados observados permite verificar através do RRMSE apenas tempos de retorno baixos.

Considerando que o princípio do método é gerar IDFs para locais com monitoramento apenas em escala temporal diária, pode-se notar que as IDFs médias apresentam um resultado satisfatório quando se comparam às IDFs geradas com os dados das estações, tanto no presente trabalho quanto as de Pinheiro (1997), então, é possível gerar IDFs de estações pluviométricas da RMBH através da equação (5.5):

$$I = \frac{\mu_{diário} 24^{0,699} - \sigma_{diário} 24^{0,699} \ln(-\ln(1 - 1/T))}{d^{0,699}} \quad (5.5)$$

onde,

I [mm/h] é a intensidade máxima da duração de tempo de retorno T ,

$\mu_{diário}$ [mm/h] é a média de dados de máximas intensidades anuais da estação em que se deseja estimar a IDF,

$\sigma_{diário}$ [mm/h] é o desvio padrão amostral da série de máximas intensidades anuais da estação em que se deseja estimar a IDF,

T [anos] é o tempo de retorno utilizado no projeto, e

d [horas] é a duração de projeto.

5.5 Validação da IDF regional através da análise do erro de estimativa

Após a geração das IDFs dos postos foi possível calcular o erro RRMSE da IDF de Pinheiro (1997) e da IDF regional com fator de escala médio frente aos dados observados. Para o cálculo dos erros foi necessário aplicar as equações IDF regional da equação (5.5) e da IDF de Pinheiro (1997) apresentada na equação (3.69), considerando como tempo de retorno aqueles calculados pela posição de plotagem de Weibull para cada série de dados. Como o objetivo do método é estimar IDFs em locais desprovidos de monitoramento subsidiário, as estações Raja Gabáglia e Lourdes foram excluídas da análise de erros por terem sua IDF construída a partir de dados subsidiários, o que poderia enviesar a análise.

Após obter os quantis, de cada duração e tempo de retorno de interesse, para cada estação, calculou-se o RRMSE para cada duração e estação utilizando ambas as equações IDF em análise. Os RRMSE calculados estão apresentados na Tabela 5.6 e os erros absolutos médios apresentados na Tabela 5.7.

É possível notar que para a maioria das estações e durações, o erro é inferior ou igual a 5%, com destaque para as estações Horto, Caeté e Vespasiano, que apresentaram erros inferiores ou iguais a 5% em todas as durações em ambos os métodos. A estação Ponte Raul Soares foi a que apresentou os maiores erros para a equação regional proposta no trabalho, porém os maiores erros foram de 12% e 11% para as durações de 10 minutos e 14 horas, respectivamente. Apesar de serem valores superiores aos encontrados nas demais estações e durações, o erro de estimativa ainda se mostra um erro pequeno tendo em vista que a metodologia é utilizada comparando-se dados subsidiários medidos a dados estimados a partir de um coeficiente regional e monitoramento diário. De modo a facilitar a comparação, foi calculada a média por IDF e duração, obtendo-se a Figura 5.17.

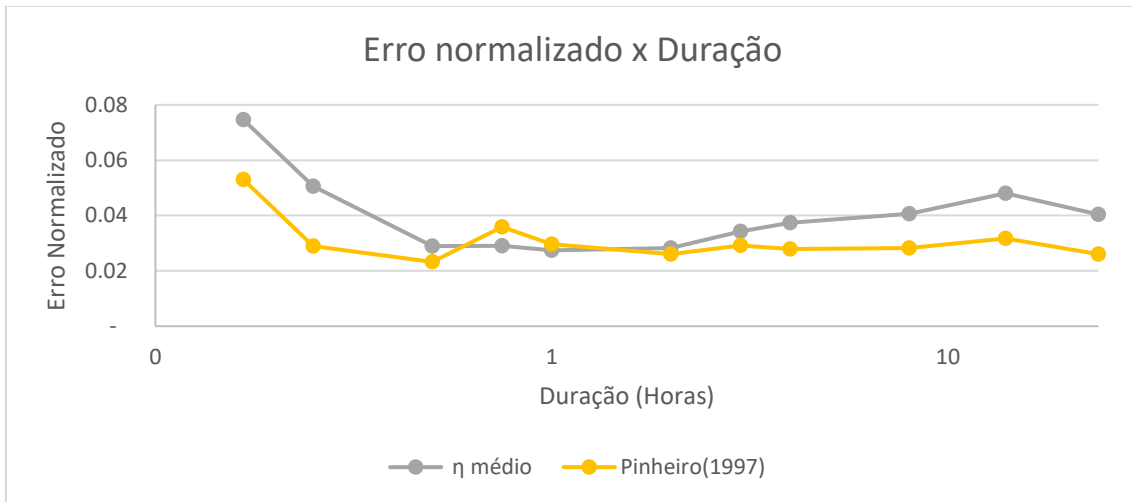


Figura 5.17: Erro relativo médio por duração

Tabela 5.6: RRMSE das IDF's por duração e posto

Estação	IDF calculada	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
Vespasiano	η médio	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	Pinheiro(1997)	0,04	0,01	0,02	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Caeté	η médio	0,07	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	Pinheiro(1997)	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Caixa de Areia	η médio	0,09	0,07	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Pinheiro(1997)	0,06	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
Ponte Raul Soares	η médio	0,16	0,11	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11	0,15	0,12
	Pinheiro(1997)	0,07	0,03	0,05	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02	0,05	0,03
Horto	η médio	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,06	0,05	0,07	0,07	0,06
	Pinheiro(1997)	0,05	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03
Ponte Nova do Paraopeba	η médio	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04
	Pinheiro(1997)	0,01	0,01	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Pedro Leopoldo	η médio	0,09	0,07	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
	Pinheiro(1997)	0,08	0,05	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Lagoa Grande	η médio	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02
	Pinheiro(1997)	0,07	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03

Tabela 5.7: Erro absoluto médio das IDF's por duração e posto

Estação	IDF calculada	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
Vespasiano	η médio	30,12	12,02	5,02	5,71	5,26	1,43	0,86	0,90	0,82	0,58	0,28
	Pinheiro(1997)	19,25	3,40	8,77	10,90	8,64	3,39	2,42	1,66	0,79	0,59	0,36
Caeté	η médio	42,61	22,88	4,96	2,85	1,70	1,10	1,19	1,23	0,65	0,57	0,35
	Pinheiro(1997)	23,07	8,49	6,25	7,94	5,85	3,95	2,66	2,19	1,32	0,87	0,57
Caixa de Areia	η médio	53,73	33,89	11,15	6,98	5,44	3,72	3,39	2,87	1,85	1,26	0,69
	Pinheiro(1997)	30,43	15,88	5,05	6,32	4,17	2,24	1,92	1,98	1,24	0,98	0,67
Ponte Raul Soares	η médio	55,08	33,10	13,07	9,33	6,22	4,32	3,73	3,79	2,94	2,46	1,31
	Pinheiro(1997)	26,51	12,98	13,04	12,90	10,11	4,90	3,04	1,55	0,97	1,01	0,30
Horto	η médio	41,22	23,99	7,28	4,45	3,67	3,78	4,95	3,45	2,56	1,97	1,16
	Pinheiro(1997)	25,87	12,07	2,40	2,89	1,48	0,81	2,56	1,44	1,29	1,11	0,57
Ponte Nova do Paraopeba	η médio	11,73	8,08	12,06	11,10	9,34	5,17	3,45	2,96	1,48	1,03	0,85
	Pinheiro(1997)	10,79	8,22	15,36	14,81	11,45	6,59	4,55	3,91	2,09	1,43	1,13
Pedro Leopoldo	η médio	31,70	18,77	2,24	3,30	2,38	2,30	1,83	1,27	0,58	0,40	0,17
	Pinheiro(1997)	25,97	16,08	3,26	5,44	3,67	2,10	1,71	1,41	0,95	0,40	0,25
Lagoa Grande	η médio	26,06	8,82	10,00	9,28	6,60	2,03	1,66	2,06	1,11	0,42	0,30
	Pinheiro(1997)	36,14	12,94	6,26	7,99	4,23	1,30	1,83	2,39	1,46	0,65	0,45

Pode-se notar que, com exceção da duração de 10 minutos, o erro médio de ambas as equações é inferior ou igual a 5%, com a IDF regional proposta pela metodologia do fator de escala médio apresenta a mesma faixa de erro para as diferentes durações do trabalho, não se verificando uma tendência. O comportamento do erro segue um padrão aproximado ao erro de Pinheiro (1997).

De modo a investigar o comportamento dos erros à medida que o tempo de retorno cresce, foi calculado o RRSME para cada IDF e tempo de retorno por estação. Os resultados foram plotados em um gráfico de modo a facilitar a análise. Os gráficos estão apresentados na Figura 5.18 e Figura 5.19:

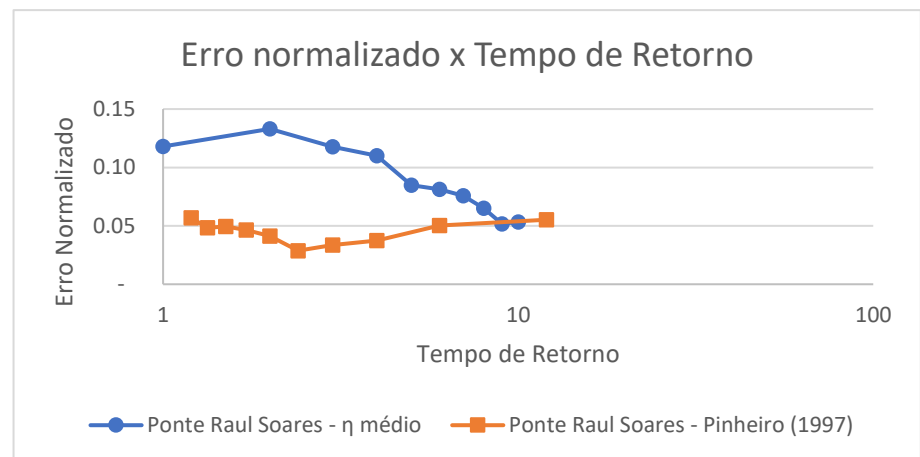
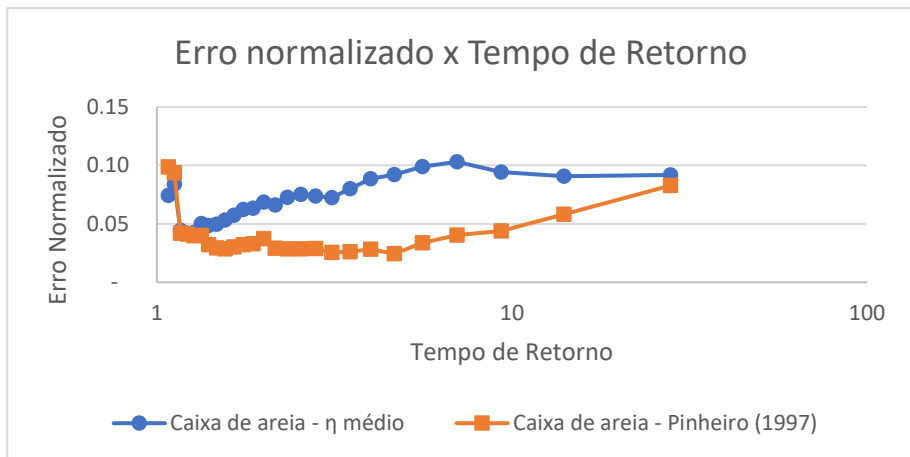
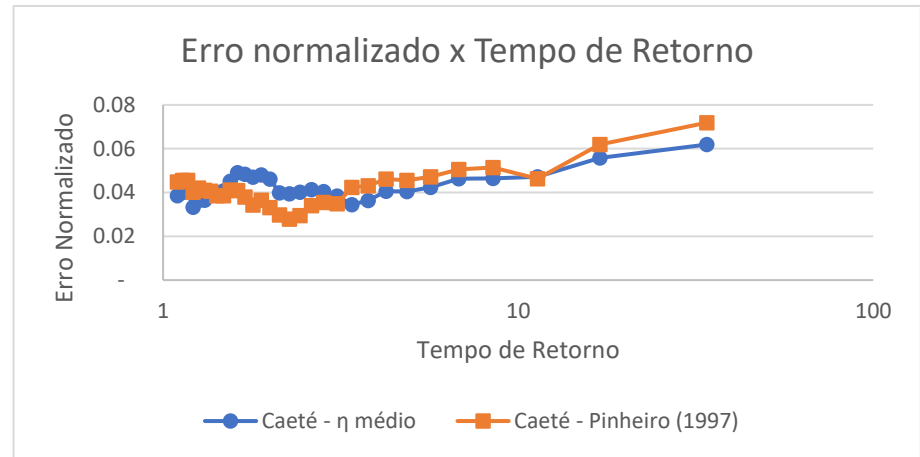
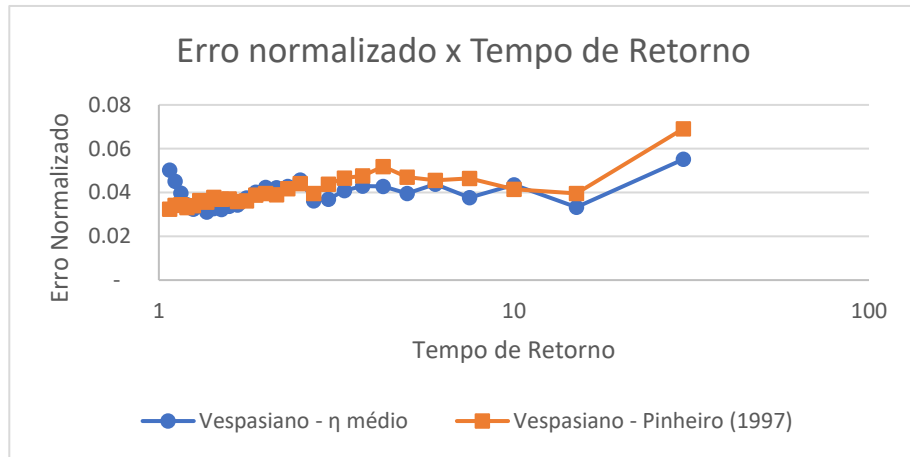


Figura 5.18: RRMSE x Tempo de Retorno

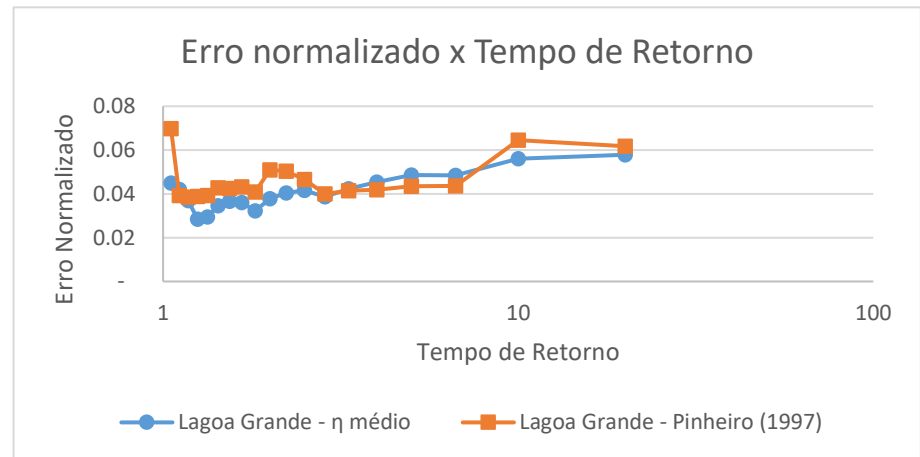
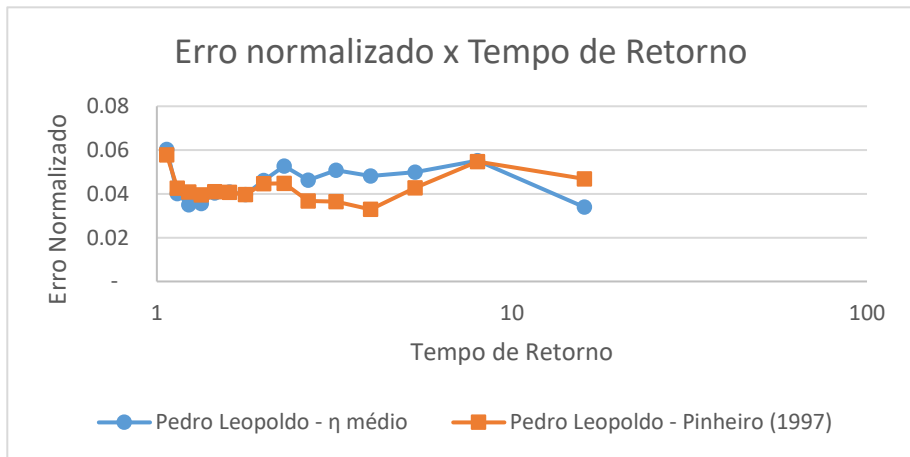
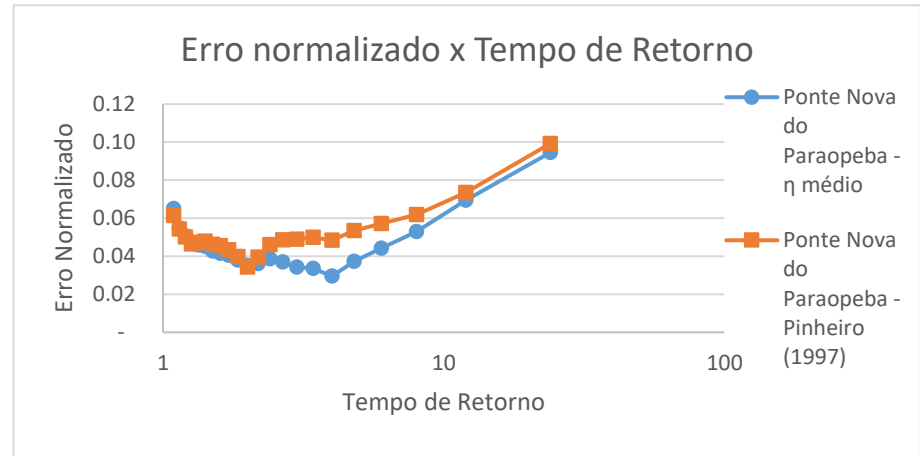
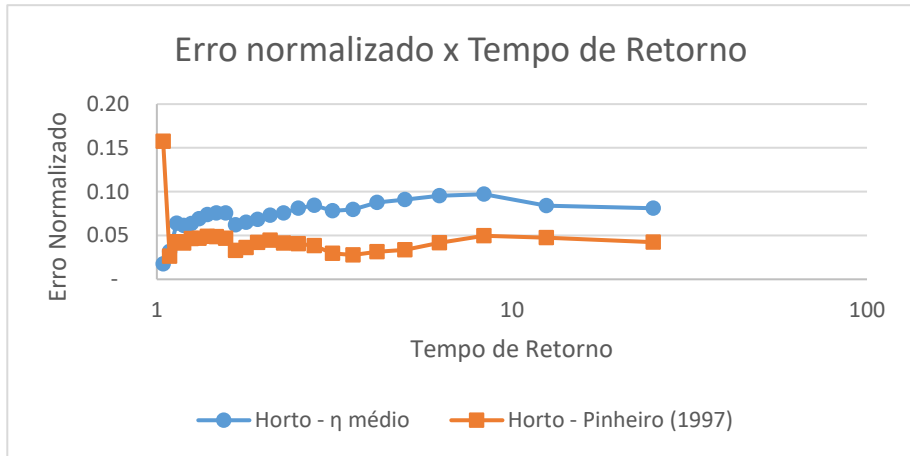


Figura 5.19: RRMSE x Tempo de Retorno

É possível verificar que o erro de estimativa da IDF construída a partir do fator de escala médio tende a ser constante e, em geral, pequeno. Entretanto, em alguns casos, o erro médio calculado cresce à medida que o tempo de retorno cresce. Este fenômeno ocorre nas estações nas estações Vespasiano, Caeté, Caixa de Areia e Ponte Nova do Paraopeba. Para a estação Vespasiano, é possível notar que existe uma quebra no padrão de crescimento das intensidades em função do tempo de retorno, conforme Figura 5.20. Este ponto fora das curvas IDF média, da estação e de Pinheiro é um forte indício de que o tempo de retorno associado ao evento é superior ao atribuído pela posição de plotagem da análise de frequência.

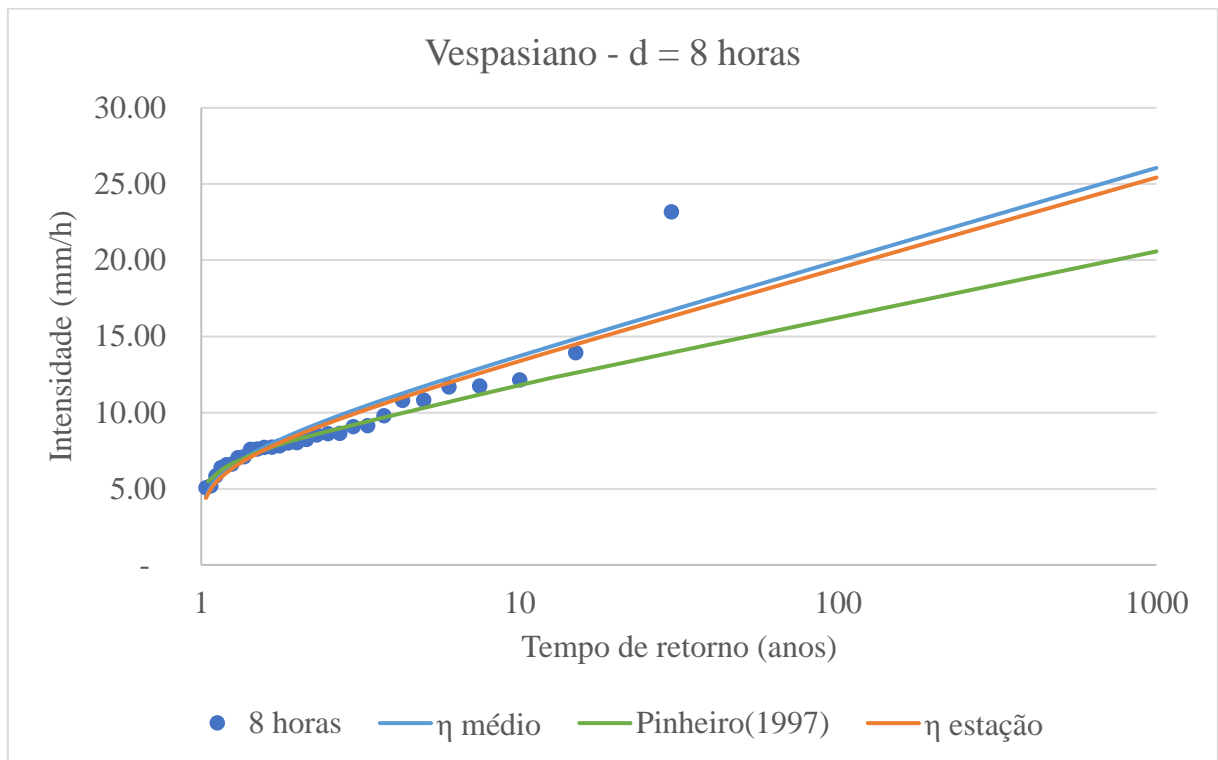


Figura 5.20: Curva de frequência – Vespasiano – 8 horas

Para a estação Caeté, ocorre o descolamento dos dados reais observados das curvas IDF's gerados a partir de 10 anos de tempo de retorno, conforme Figura 5.21. Como IDF do fator de escala médio gera intensidades superiores à de Pinheiro (1997), o erro cometido na IDF proposta é inferior à obtida pela equação de Pinheiro.

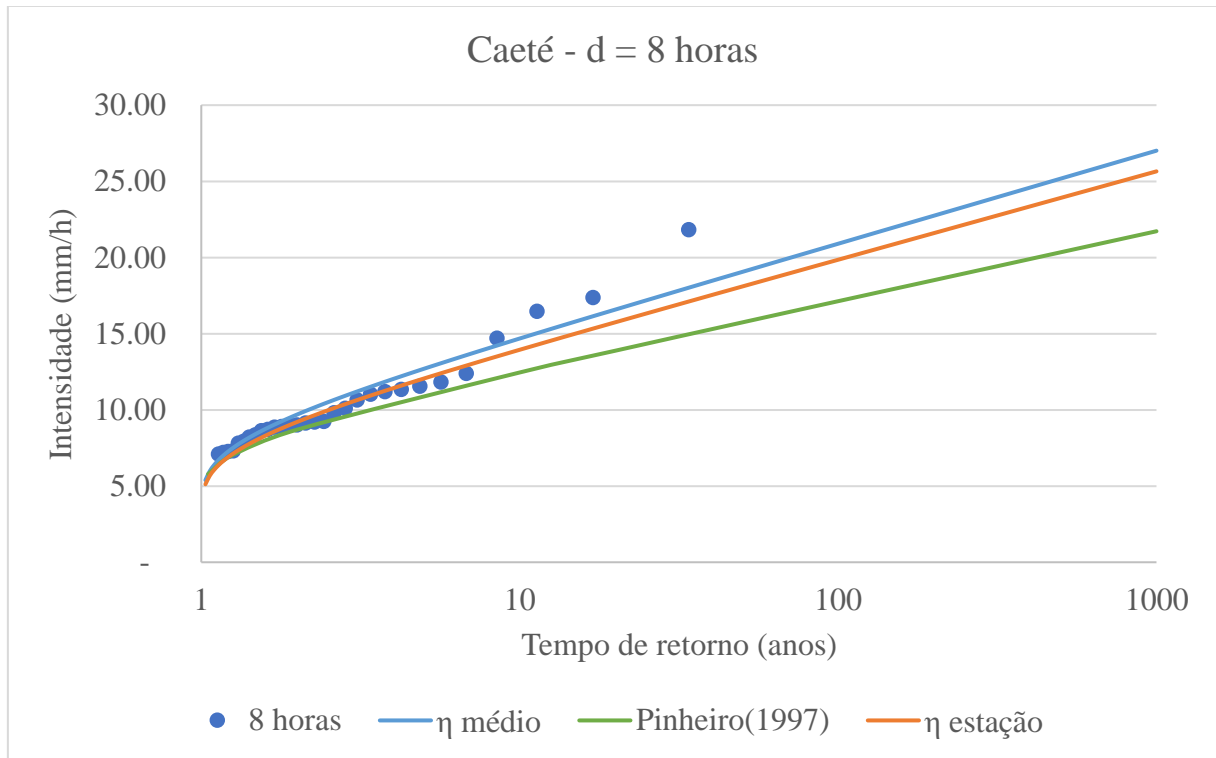


Figura 5.21: Curva de frequência – Caeté – 8 horas

Os erros relativos da estação Caixa de Areia aumentaram com o tempo de retorno e depois se estabilizaram na faixa de 8 a 10% para a IDF proposta, enquanto a IDF de Pinheiro (1997) registrou uma tendência de aumento dos erros de estimativa. A Figura 5.22 mostra que a IDF regional proposta se ajusta bem aos dados observados e retorna valores superiores de intensidade para um mesmo tempo de retorno ao se comparar com a IDF atualmente em uso na RMBH.

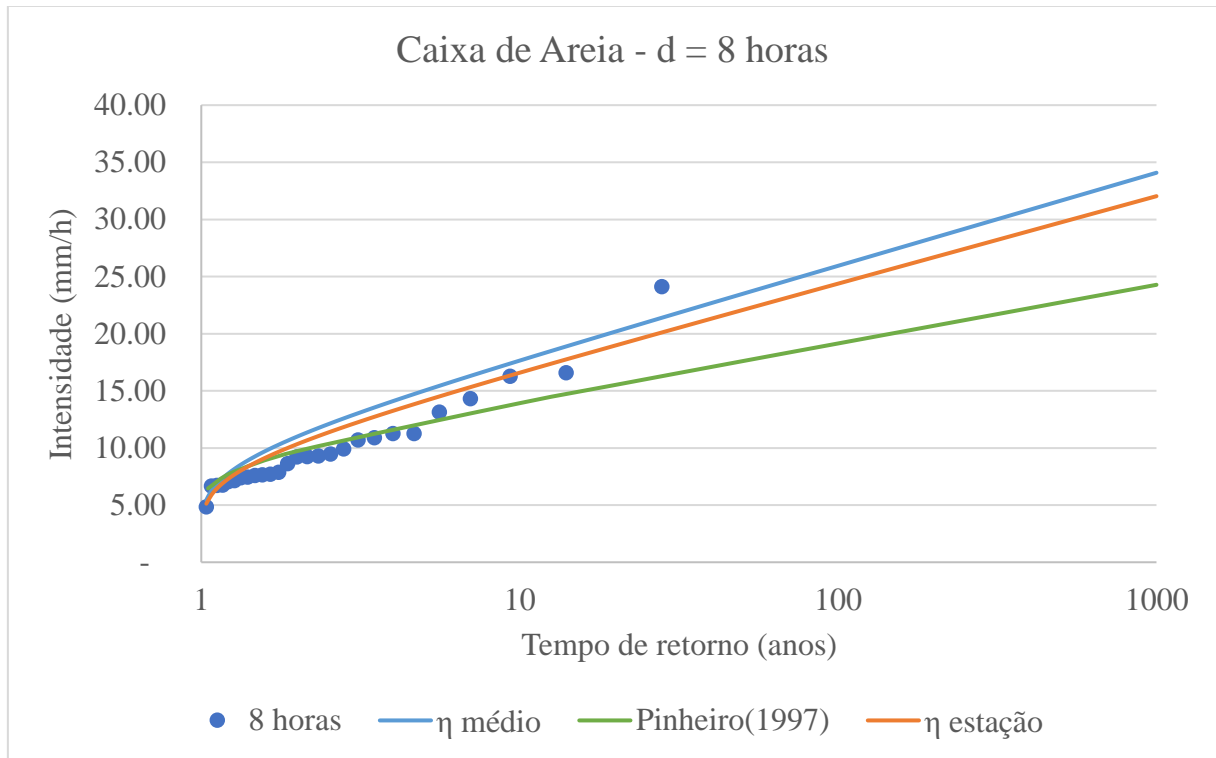


Figura 5.22: Curva de frequência – Caixa de Areia – 8 horas

Para a estação Ponte Nova do Paraopeba verificou-se uma tendência de aumento do erro de estimativa à medida que o tempo de retorno aumenta. Esta tendência foi verificada tanto para a IDF regional proposta neste trabalho, quanto para a IDF de Pinheiro (1997). A Figura 5.23 mostra a curva de frequências das IDFs e dos dados observados. Nota-se que existe um descolamento dos dados em relação às IDFs, que subestimam os valores de intensidades. A equação proposta apresenta um erro superior à adotada na RMBH pelo fato de, para esta estação, subestimar os valores de intensidade. É possível notar que a estação Ponte Nova do Paraopeba se encontra mais a oeste das estações utilizadas no trabalho e, talvez, o microclima da região a que está inserida pode ser diferente das demais estações, o que justificaria a ausência de ajuste tanto da IDF gerada neste trabalho quando da IDF regional de Pinheiro (1997). Como não existem estações pluviográficas mais próximas à Ponte Nova do Paraopeba, a análise de variação nas condições de precipitação não pode ser verificada.

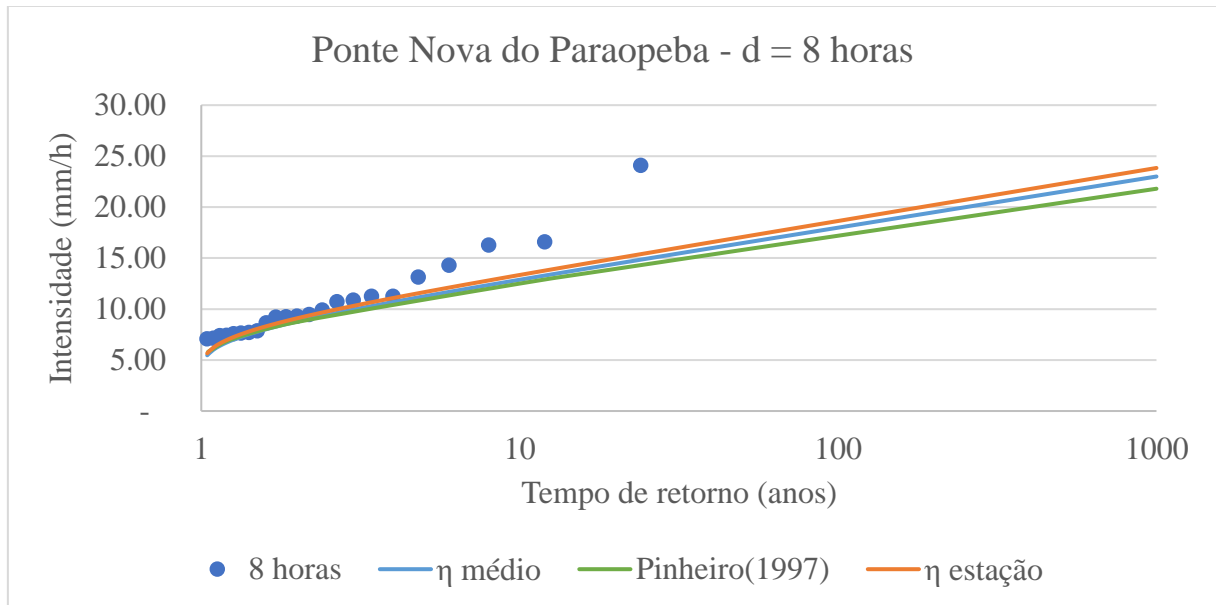


Figura 5.23: Curva de frequência – Ponte Nova do Paraopeba – 8 horas

As demais estações apresentaram resultados satisfatórios e, em geral, os erros da IDF proposta se mantiveram abaixo de 10%, além de serem menores ou iguais aos erros obtidos na estimação das intensidades pela IDF de Pinheiro (1997) a medida em que o tempo de retorno cresce, com exceção da estação Horto.

Os resultados mostram que o método da invariância de escala temporal das equações IDF para a RMBH pode ser aplicado de maneira satisfatória utilizando o fator de escala médio como medida de regionalização. Os erros cometidos na estimação da intensidade através do equacionamento proposto são pequenos e não apresentam tendência em função da duração adotada, sendo a duração de 10 minutos a que apresenta o maior erro relativo. Em termos numéricos pode-se admitir que os dois métodos apresentam erros similares, uma vez que a diferença entre as duas curvas é inferior a 1%. Resultados semelhantes foram encontrados para cada posto a medida em que o tempo de retorno cresce, sendo que a diferença entre as duas curvas é inferior a 2% para as estações Vespasiano, Caeté, Ponte Nova do Paraopeba, Pedro Leopoldo e Lagoa Grande. A estação Caixa de Areia apresenta uma diferença de 6 a 7% entre o tempo de retorno de 4 a 7 anos, se reduzindo à medida que o tempo cresce acima de 7 anos. Um comportamento semelhante pode ser visualizado nas estações Ponte Raul Soares e Horto, em que as diferenças entre os erros decaem à medida que o tempo de recorrência aumenta,

tendo um pico de 8% para tempos entre 4 e 6 anos para a estação Ponte Raul Soares e 5,5% entre 3 e 6 anos para a estação Horto.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho se propôs a desenvolver modelos matemáticos para realizar a estimativa de curvas IDFs a partir de dados pluviométricos diários utilizando a propriedade de invariância de escala temporal, além de verificar a propriedade de escala temporal nas estações e na RMBH. Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada a atualização das séries de máximas intensidades anuais das durações utilizadas em trabalhos de estimação de IDFs da RMBH.

O aumento do tamanho das séries foi significativo e embora não se tenha conseguido gerar os dados de intensidades máximas até anos próximos à publicação do trabalho por ausência de dados digitalizados, as séries passaram de uma média de 17,9 anos para 24,4 anos de dados, um aumento de 36%.

Com as séries atualizadas, realizou-se a verificação da propriedade de invariância de escala temporal nas estações. Os resultados obtidos mostram a existência de escalabilidade simples em todas as séries, o que possibilitou a estimativa do fator de escala da estação e do fator de escala médio da região. Como não foi encontrada uma correlação entre o fator de escala e variáveis de fácil acesso em locais de monitoramento pluviométrico, as cotas altimétricas e a precipitação anual média, utilizou-se o fator de escala médio para a construção da IDF regional.

A escolha da distribuição de probabilidades foi realizada com o auxílio do *software* SEAF, que retornou a distribuição de Gumbel como a que mais vezes foi recomendada em 1º lugar na análise das distribuições comumente utilizadas para geração de curvas IDF. Apesar da distribuição de Gumbel apresentar rejeições no critério do intervalo de confiança da variância, a distribuição GEV foi rejeitada por diversas vezes por apresentar fator de forma positivo, o que inviabiliza o uso da GEV para a modelagem de máximos. Assim, além da Gumbel ter recebido o maior número de recomendações pelo SEAF, a distribuição GEV não seria uma boa distribuição para modelar todas as estações e durações da RMBH, mesmo que o número de indicações em 1º lugar superasse a Gumbel.

A fim de verificar o ajuste da IDF gerada através do método de invariância de escala, utilizou-se a raiz do erro relativo quadrático para analisar se os erros cometidos na estimação de intensidades são aceitáveis ou se o ajuste do método não seria adequado. Ao se calcular os erros médios das estações por duração, foi possível verificar que o erro não tem um comportamento definido, o que mostra a robustez do método, e apresentou valores médios na faixa de 3 a 5% para durações superiores a 10 minutos. As durações de 10 minutos foram as que apresentam o maior erro médio, retornando um erro médio de 7%.

A análise do erro em relação tempo de retorno por estação mostrou que, em geral, o método apresenta erros baixos e em algumas estações o erro aumentava com o tempo de retorno. Na estação Ponte Nova do Paraopeba foi verificado que os quantis estimados subestimavam os quantis reais, o que pode ter acontecido devido ao tamanho da série e as intensidades registradas possuírem um tempo de retorno superior ao estabelecido pela posição de plotagem ou a estação apresenta um padrão diferente de formação e intensidade de chuvas do que as demais estações do trabalho.

A comparação com a IDF apresentada por Pinheiro (1998) mostra que o método de invariância de escala temporal apresenta bons resultados para a estimativa de IDF de locais não monitorados. Este fato se deve ao fato de que os valores utilizados no cálculo da curva de Pinheiro foram os mesmos apresentados em seu trabalho para as estações, ou seja, a IDF de Pinheiro foi construída utilizando dados subsidiários. Além disso, o desempenho da IDF regional proposta foi similar ao de Pinheiro, apresentando, em geral, menores erros ou próximos quando o tempo de retorno aumenta.

A regionalização proposta por Pinheiro (1997) utiliza apenas a informação de precipitação anual média para estimar as intensidades, enquanto a IDF regional da invariância de escala considera a informação de máxima intensidade diária anual média e seu desvio padrão para construir as relações. Para a utilização deste trabalho na RMBH, recomenda-se que a obtenção da série de máximas intensidades diárias anuais e seu desvio padrão sejam realizadas por ano hidrológico.

Para replicar o trabalho em outros locais é recomendado que se realize a análise do fator de escala local ou regional, de modo a se obter um novo fator de escala que estejam de acordo com

os dados de precipitação da região e não se utilize indiscriminadamente o valor de fator de escala médio obtido para a RMBH em outros locais que a metodologia não foi verificada, pois, os fatores de escala das estações e o regional médio possuem validade apenas para a região em que o estudo foi desenvolvido. Diversos estudos pelo mundo encontraram diferentes valores de fatores de escala, como em Herath *et al.* (2015) em que os fatores de escala da região estudada na Austrália equivaliam a 0,35. No Canadá, na cidade de Edmonton, Kuo *et al.* (2013) encontraram um fator de escala médio da região igual a 0,658 e Agbazo *et al.* (2016) encontrou uma grande variação do fator de escala para Benin, no oeste da África. Os fatores variavam entre 0,245 e 0,587.

As conclusões apresentadas permitem afirmar que, de maneira geral, os objetivos do trabalho foram alcançados. Entretanto, alguns aspectos podem ser melhor investigados em pesquisas futuras. As principais recomendações para o desenvolvimento desses trabalhos são:

- Expandir o trabalho de estimação de fatores de escala para regiões maiores, como o Estado de Minas Gerais, sudeste brasileiro ou território nacional.
- Analisar a variação do fator de escala ao longo de uma grande bacia hidrográfica, como a do Rio São Francisco, que atravessa diferentes tipos de relevo, vegetação e clima.
- Aumentar a resolução espacial das IDFs da RMBH através do uso de estações pluviométricas que não foram alvo de análise do trabalho, mas que se encontram dentro da região do estudo.
- Estudar a existência de um padrão diferente de precipitações na região oeste da RMBH, uma vez que os resultados da estação Ponte Nova do Paraopeba se descolaram dos resultados obtidos das demais estações pluviográficas do trabalho.

REFERÊNCIAS

AGBAZO, M., GOBI, G.K., AMALOU, E., AFOUDA, A. Estimation of IDF Curves of Extreme Rainfall by Simple Scaling in Northern Oueme Valley, Benin Republic. *Earth Science*, Vol 20, 2016.

Atlas Pluviométrico do Brasil; Equações Intensidade-Duração-Frequência. Município: Juiz de Fora. Estação Pluviográfica: Juiz de Fora Códigos 02143056 (ANA) e 83692 (INMET). Karine Pickbrenner e Eber José de Andrade Pinto – Porto Alegre: CPRM, 2014.

BACK, Á. J. Chapecó, Estado de Santa Catarina. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2006.

BAIRWA, A. K.; KHOSA, R.; MAHESWARAN, R. Developing intensity duration frequency curves based on scaling theory using linear probability weighted moments: A case study from India. *Journal of Hydrology*, v. 542, p. 850–859, 2016.

BASSO, R.E. Estimativa de Chuvas Intensas em Locais Sem Dados no Rio Grande do Sul. Tese – UFSM. Santa Maria, 2019.

Carta de Produtos INMET. < <http://www.inmet.gov.br/portal/> > Acesso em 25/11/2019.

CAMPOS, A.R, SANTOS, G.G, SILVA, J.B.L, FILHO, J.I, LOURA, D.S. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, n. 3, 2014.

CÂNDIDO, M. O. SEAF Um Protótipo de um Sistema Especialista para Análise de Frequência Local de Eventos Hidrológicos Máximos Anuais. Dissertação. Escola de Engenharia. UFMG, 2003.

CÂNDIDO, M. NAGHETTINI, M. SEAF – A Prototype of an Expert System for at side Frequency Analysis of Hydrological Annual Maxima. In *Avances en Recursos Hidráulicos*, n 18, Medellín, Colombia. 2008.

CHAI, T. DRAXLER R.R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci. Model Dev.*, 7, 2014.

CHOW, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. *Applied Hydrology*. New York. McGraw-Hill.1988.

COPPETEC. Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas. v. 1, n. 61. Rio de Janeiro, 2014.

COSTA, K. T. Avaliação de distribuições de probabilidades das vazões médias diárias máximas anuais do Brasil. Dissertação. Escola de Engenharia. UFMG, 2014.

EHR-UFMG. Estudo do Sistema de Macrodrenagem da Cidade de Uberaba: Bacia Hidrográfica do Córrego das Lajes – Relatório parcial 1/2005: Equação Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas para a cidade de Uberaba (MG), Belo Horizonte, 2005

GHANMI, H.; BARGAOUI, Z.; MALLET, C. Estimation of intensity-duration-frequency relationships according to the property of scale invariance and regionalization analysis in a Mediterranean coastal area. *Journal of Hydrology*, v. 541, p. 38–49, 2016.

GUIMARÃES, S.; FONSECA, T. B.; LIMA, F. N. Determinação Da Equação De Intensidade-Duração- Frequência (Idf) Das Chuvas Na Região Do Médio Piracicaba / Mg. I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco .p. 1–8, 2009.

HASSANZADEH, E.; NAZEMI, A.; ELSHORBAGY, A. Quantile-Based Downscaling of Precipitation Using Genetic Programming: Application to IDF Curves in Saskatoon. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014.

HERATH, H. M. S. M., SARUKKALIGE, P. R., NGUYEN, V.T.V. Downscaling approach to develop future sub-daily IDF relations for Canberra Airport Region, Australia, *Proc. IAHS*, 2015.

HOSKING, J., R., M. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1990.

HOSKING, J., R., M. e WALLIS, J., R. *Regional Frequency Analysis – An Approach Based on L-Moments*, 224 p. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1997.

INNOCENTI, S.; MAILHOT, A.; FRIGON, A. Simple scaling of extreme precipitation in North America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 2017.

JESUS, L.F.L., *Comparação de Técnicas de Extensão de Séries Hidrológicas*. Dissertação. Escola de Engenharia. UFMG, 2016.

KOUTSOYIANNIS, D.; KOZONIS, D.; MANETAS, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 1998.

KUO, C.-C.; GAN, T. Y.; CHAN, S. Regional Intensity-Duration-Frequency Curves Derived from Ensemble Empirical Mode Decomposition and Scaling Property. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013.

LANGOUSIS, A.; VENEZIANO, D. Intensity-duration-frequency curves from scaling representations of rainfall. *Water Resources Research*, VOL. 43, 2007.

MENABDE, M.; SEED, A.; PEGRAM, G. A simple scaling model for extreme rainfall. *Water Resources Research*, v. 35, n. 1, p. 335–339, 1999.

MILANESI, M.A., ALVES, R.R., GALVANI, E. Comparativo entre instrumentos pluviométricos experimentais e automáticos. In. XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. 2017, Campinas, São Paulo.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

NOGUEIRA, K.N., Análise de séries de duração parcial de chuvas extremas na Região Metropolitana de Belo Horizonte sob condições de não estacionariedade utilizando covariável climática – UFMG. Belo Horizonte, 2019.

NTPC. Design Flood Analyses for Hydropower Projects REGIONAL RAINFALL INTENSITY-DURATION-FREQUENCY RELATIONSHIPS Shibayn Sarkar. 2007.

NUNES, A.A. Tendências em eventos extremos de precipitação na região metropolitana de Belo Horizonte: detecção, impactos e Adaptabilidade. Tese – UFMG. Belo Horizonte, 2018.

OLIVEIRA, F.H.P. Caracterização das diferenças entre precipitações estimadas por satélite e obtidas por pluviômetros. Dissertação – UFMG. Belo Horizonte, 2019.

ORCHARD, R.A. FuzzyCLIPS Version 6.04A, User's Guide. National Research Council Canada, 1998.

PFAFSTETTER, O. Chuvas intensas no Brasil. Rio de Janeiro: Ministério da Viação e Obras Públicas; DNOS, 1957. 420p.

PINHEIRO, M.M.G. Estudo de Chuvas Intensas na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. Dissertação. Escola de Engenharia. UFMG, 1997.

Pluviômetros Automáticos <<https://www.cemaden.gov.br/pluviometros-automatico/>> Acesso em 25/11/2019

PUNLUM,P. CHALEERAKTRAKOON, C. NGUYEN, V.T.V, Development of IDF Relations for Thailand in Consideration of the ScaleInvariance Properties of Extreme Rainfall Processes. In. World Environmental and Water Resources Congress, 2017.

REBOITA,M.S, RODRIGUES, M. SILVA, L.F, ALVES, M.A. Aspectos Climáticos Do Estado De Minas Gerais. Revista Brasileira de Climatologia, Ano 11 – Vol. 17, 2015.

SOUZA, R. O. R. D. M. *et al.* Equações de chuvas intensas para o Estado do Pará Intense rainfall equations for the State of Pará , Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 19, p. 999–1005, 2012. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>.

STRANGWAYS, I. A history of rain gauges. Weather, Vol.65(5), p. 133-138. Maio 2010.

TORRICO, J. J. T. Práticas hidrológicas. Rio de Janeiro, TRANSCON, 1974.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: UFRGS, 952p. 1993.

VYVER, H.V. Bayesian estimation of rainfall intensity–duration–frequency relationships. Journal of Hydrology, n 529, 2015.

WMO, Guide to meteorological instruments and methods of observation. World Meteorological Organization. 7.ed., n.8, Genebra, Suíça. 2008. Disponível em: <<https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf> > acesso em 26/11/2019.

APÊNDICE A – Exemplos de códigos em Scilab e R utilizados

- Scilab: Tratamento de dados GEDAC

```

k = 0;
l=1
m=2
n=3
j = 1
f = 1
s = 1
estacao = "01943022"
d_arq = mopen("C:\Users\gui-s\Desktop\Mestrado\Dissertação\Dados\Dados Brutos utilizados\01943022-Caixa
de Areia\01943022.P96","r");
while ~meof(d_arq)
    linha = mgetl(d_arq,1);
    printf("\n%s",linha);
    k = k + 1;
    tks = tokens(linha,[" "]);
    if (tks(1)=="$Pluviograma") then
        dia = tks(6)
    else
        if (tks(1)=="&SEM") then
            dados(j,l)=tks(3)
            dados(j,m) = tks(4)//hora
            dados(j,n)= "0"//precipitação
            dados((j+1),l)=tks(6)
            dados((j+1),m) = tks(7)//hora
            dados((j+1),n)= "0"//precipitação
            semchuva(s,l:m) = dados(j,l:m)
            semchuva(s+1,l:m) = dados(j+1,l:m)
            s = s+2
            j=j+2
        else
            if (tks(1)=="&FALHA") then
                dados(j,l)=tks(2)
                dados(j,m) = tks(3)//hora
                dados(j,n)= "0"//precipitação
                dados((j+1),l)=tks(5)
                dados((j+1),m) = tks(6)//hora
                dados((j+1),n)= "0"//precipitação
                falha(f,l:m) = dados(j,l:m)
                falha(f+1,l:m) = dados(j+1,l:m)
                f = f+2
                j=j+2
            else
                i = 1
                while tks(i)~="!"
                    dados(j,l)=dia
                    dados(j,m) = tks(i)//hora
                    dados(j,n)= tks(i+1)//precipitação
                    i = i+2
                    j=j+1
                end
            end
        end
    end
end
end
mclose(d_arq);
dirr = "C:\Users\gui-s\Desktop\Mestrado\Dissertação\Dados\Dados Brutos utilizados\Arquivos tratados\"
csvWrite(dados, strcat([dirr,estacao,"-completo.csv"],"",";",";",";"))
csvWrite(semchuva, strcat([dirr,estacao,"-semchuva.csv"],"",";",";",";"))
csvWrite(falha, strcat([dirr,estacao,"-falha.csv"],"",";",";",";"))

```

- R: Construção das séries de máximos anuais

```

library(dplyr)
library(tibble)
library(lubridate)
library(readxl)
library(RcppRoll)
library(data.table)

plu <- read_excel(path = './Dados Brutos utilizados/Arquivos tratados/Caeté
GEDAC.xlsx',
  sheet = '01943010-P96completo',
  range = "A1:I11599",
  col_names = TRUE,
  col_types =
c("date","text","text","numeric","text","numeric",rep("numeric",3)))

plu<- plu %>%
  select(data = DIA,HORA2,MINUTO2,MINACUMULADO,PRECACUMULADO)

plu <- plu %>%
  mutate(dth = make_datetime(year = year(data), month = month(data), day =
day(data),
  hour = HORA2 , min = MINUTO2 , sec = 0 ))

plu<- plu %>%
  select(dth,PRECACUMULADO)

nl<- length(plu$dth)
ss<-(seq(plu$dth[1],plu$dth[nl], by = '5 min'))

ss <- as.data.frame(ss)

plu3<- NULL
plu3$prec <- approx(x = plu$dth, y = plu$PRECACUMULADO, xout = ss$ss)$y
plu3$data<- ss
plu3<- as.data.frame(plu3)
plu3<- plu3 %>%
  select(ss,prec)
ll <- length(plu3$ss)

plu<- NULL
plu$prec[1] = plu3$prec[1]

```

```

for (i in 2:ll) {
  if (abs((plu3$prec[i]-plu3$prec[i-1]))>10) {
    plu$prec[i] = 0
  }else if ((plu3$prec[i]-plu3$prec[i-1])<0) {
    plu$prec[i] = 0
  }else{
    plu$prec[i] = plu3$prec[i]-plu3$prec[i-1]
  }
}

plu$data <- plu3$ss
plu <- as.data.frame(plu)

plu<- plu %>%
  select(data,prec)
plu2 <- plu

plu <- NULL
plu3 <- NULL
ss <- NULL

plu<- fread('./Pluviogramas CPRM/Estações utilizadas em txt/01943010- Caete - 1999
a 2009.txt',header = TRUE)

#cria um vetor de datas extraindo os dados do dataframe plu
newdate <- as.POSIXlt(strptime(as.character(plu$DataHora_Prec), format =
"%d/%m/%Y %H:%M"))
newdate<- as.data.frame(newdate)

#adiciona ao plu o vetor de datas convertidas e cria uma nova coluna com dados como
double (5 min)
plu$newdate <- newdate
plu$p05min <- as.double(type.convert(plu$Prec_05min, na.strings = "NA", as.is =
FALSE, dec = ",",
                                numerals = c("allow.loss", "warn.loss", "no.loss")))
#ignora as demais colunas e controí um dataframe com 2 colunas contendo data e
precipitação
plu <- plu %>%
  select(data = newdate,p05min)
newdate<- NULL

```

```

plu3<- NULL
plu3$data<-plu2$data
plu3$p05min<-plu2$prec
plu2<-NULL
plu3<-as.data.frame(plu3)
plu3 <- rbind(plu3,plu)
plu<- NULL
plu <- plu3
plu3<- NULL

#cria demais durações
plu <- plu %>%
  mutate(p10min = roll_sum(x = p05min, n = 2 , align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p15min = roll_sum(x = p05min, n = 3 , align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p30min = roll_sum(x = p05min, n = 6 , align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p45min = roll_sum(x = p05min, n = 9 , align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p01h = roll_sum(x = p05min, n = 12, align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p02h = roll_sum(x = p05min, n = 24, align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p03h = roll_sum(x = p05min, n = 36, align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p04h = roll_sum(x = p05min, n = 48, align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p08h = roll_sum(x = p05min, n = 96, align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p14h = roll_sum(x = p05min, n = 168, align = 'right', fill = NA)) %>%
  mutate(p24h = roll_sum(x = p05min, n = 288, align = 'right', fill = NA))

#loop para pegar o máximo anual de cada duração
##definição das variáveis
i<-1
j<-1
ano <- NA
ma<-as.data.frame(ano,roll.names= NULL)
mb<-as.data.frame(ano,roll.names= NULL)
ma$max5 <- NA
ma$max10 <- NA
ma$max15 <- NA
ma$max30 <- NA
ma$max45 <- NA
ma$max01h <- NA
ma$max02h <- NA
ma$max03h <- NA
ma$max04h <- NA
ma$max08h <- NA
ma$max14h <- NA
ma$max24h <- NA
ma$ini <-NA
ma$fim <-NA

```

```

ma$max08h <- NA
ma$max14h <- NA
ma$max24h <- NA
ma$ini <-NA
ma$fim <-NA

mb$max5 <- NA
mb$max10 <- NA
mb$max15 <- NA
mb$max30 <- NA
mb$max45 <- NA
mb$max01h <- NA
mb$max02h <- NA
mb$max03h <- NA
mb$max04h <- NA
mb$max08h <- NA
mb$max14h <- NA
mb$max24h <- NA
mb$ini <-NA
mb$fim <-NA

#data inicial
a <- make_datetime(year = (year(plu$data[1])), month = 1, day = 1,
                    hour = 0, min = 0 , sec = 1)

##definição inicial do limite b para segundo loop
if ((month(plu$data[1]))== 10){

  b = make_datetime(year = (year(plu$data[i])+1), month = 9, day = 30,
                    hour = 23, min = 55 , sec = 0)

  ma$ano[j] <- year(plu$data[i])
} else{
  b = make_datetime(year = (year(plu$data[i])), month = 9, day = 30,
                    hour = 23, min = 55 , sec = 0)
  ma$ano[j] <- year(a)
}

nn <- NROW(plu$data)

```



```

##loop para percorrer toda a série
while (i <= NROW(na.omit(plu$data))) {
  k=i
  ma$max5[j] = 0
  ma$max10[j] = 0
  ma$max15[j] = 0
  ma$max30[j] = 0
  ma$max45[j] = 0
  ma$max01h[j] = 0
  ma$max02h[j] = 0
  ma$max03h[j] = 0
  ma$max04h[j] = 0
  ma$max08h[j] = 0
  ma$max14h[j] = 0
  ma$max24h[j] = 0
  ma$ini[1] <- as.POSIXct(plu$data[1])

  while (plu$data[k] <= b) {
    #pega o máximo de 5 min
    if (is.na(plu$p05min[k])){

      }else if(ma$max5[j] < plu$p05min[k]) {
        ma$max5[j]=plu$p05min[k]
      }
    #pega o máximo de 10 min
    if (is.na(plu$p10min [k])){

      }else if(ma$max10[j] < plu$p10min[k]) {
        ma$max10[j]=plu$p10min[k]
      }
    #pega o máximo de 15 min
    If (is.na(plu$p15min [k])){

      }else if(ma$max15[j] < plu$p15min[k]) {
        ma$max15[j]=plu$p15min[k]
      }
    #pega o máximo de 30 min
    if (is.na(plu$p30min [k])){

      }else if(ma$max30[j] < plu$p30min[k]) {
        ma$max30[j]=plu$p30min[k]
      }
    #pega o máximo de 45 min
    if (is.na(plu$p45min [k])){

      }else if(ma$max45[j] < plu$p45min[k]) {
        ma$max45[j]=plu$p45min[k] }
  }
}

```

```

#pega o máximo de 1h
  if (is.na(plu$p01h [k])){

    }else if(ma$max01h[j] < plu$p01h[k]) {
    ma$max01h[j]=plu$p01h[k]
    }

#pega o máximo de 2h
  if (is.na(plu$p02h [k])){

    }else if(ma$max02h[j] < plu$p02h[k]) {
    ma$max02h[j]=plu$p02h[k]
    }

#pega o máximo de 3h
  if (is.na(plu$p03h [k])){

    }else if(ma$max03h[j] < plu$p03h[k]) {
    ma$max03h[j]=plu$p03h[k]
    }

#pega o máximo de 4h
  if (is.na(plu$p04h [k])){

    }else if(ma$max04h[j] < plu$p04h[k]) {
    ma$max04h[j]=plu$p04h[k]
    }

#pega o máximo de 8h
  if (is.na(plu$p08h [k])){

    }else if(ma$max08h[j] < plu$p08h[k]) {
    ma$max08h[j]=plu$p08h[k]
    }

#pega o máximo de 14h
  if (is.na(plu$p14h [k])){

    }else if(ma$max14h[j] < plu$p14h[k]) {
    ma$max14h[j]=plu$p14h[k]
    }

#pega o máximo de 24h
  if (is.na(plu$p24h [k])){

    }else if(ma$max24h[j] < plu$p24h[k]) {
    ma$max24h[j]=plu$p24h[k] }

```

```

    k = k+1
    if (k>nn) {

        ma$fim[j]<- as.POSIXct(plu$data[k-1])

        break
    }
}

if (k>i) {
    i=k
    if (k<=nn) {
        ma$fim[j]<- as.POSIXct(plu$data[i])
    }
    j=j+1
    ma <- rbind(ma,mb)
    b = make_datetime(year = (year(plu$data[i])+1), month = 9, day = 30,
        hour = 23, min = 55 , sec = 0)

    ma$ano[j] <- year(plu$data[i])+1
    ma$ini[j] <- as.POSIXct(plu$data[i])

} else {
    i=i+1

}

}

ma$ini <-as.Date.POSIXct(ma$ini)
ma$fim<-as.Date.POSIXct(ma$fim)

library(MASS)
write.matrix(ma, file = "./Dados Brutos utilizados/Arquivos tratados/01943010- Caete -
1996 a 2009.csv", sep = "@")

```

APÊNDICE B – Séries de Máxima Intensidade Anual

Tabela B.1 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: VESPASIANO código 01943009

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min i (mm/h)	15min i (mm/h)	30min i (mm/h)	45min i (mm/h)	1 hora i (mm/h)	2 horas i (mm/h)	3 horas i (mm/h)	4 horas i (mm/h)	8 horas i (mm/h)	14 horas i (mm/h)	24 horas i (mm/h)
1	73/74	179,40	159,60	97,40	72,27	58,20	36,60	28,60	21,65	10,83	6,19	3,61
2	74/75	120,00	96,00	56,00	42,40	31,00	16,70	12,00	9,38	5,08	3,33	5,63
3	76/77	86,40	92,80	70,80	52,00	52,40	29,50	21,47	16,55	9,15	6,66	3,99
4	77/78	82,80	89,60	69,20	59,73	56,60	32,80	33,73	31,20	23,18	14,57	9,10
5	78/79	94,80	97,60	72,00	56,27	51,40	26,70	20,87	17,05	9,08	7,21	5,24
6	79/80	74,40	70,40	55,60	41,60	31,80	18,70	13,70	11,08	5,85	4,39	2,97
7	80/81	96,00	68,00	40,00	36,13	31,20	20,40	14,60	11,10	6,58	4,01	3,31
8	81/82	128,40	116,00	76,00	60,27	45,70	22,90	17,60	14,75	12,15	7,41	4,45
9	82/83	120,00	101,20	60,00	42,27	34,00	21,10	16,27	14,00	8,53	5,32	3,60
10	83/84	120,00	92,00	60,00	40,00	34,00	21,20	17,00	14,63	7,83	6,31	3,69
11	84/85	132,00	96,00	79,20	66,67	51,00	30,50	26,60	23,20	13,93	10,19	6,35
12	85/86	96,00	83,20	50,00	36,80	29,00	16,40	11,87	10,25	6,63	3,79	3,29
13	90/91	153,00	117,60	86,80	62,13	46,70	23,35	16,23	12,17	6,40	3,66	3,56
14	91/92	148,80	119,20	82,40	66,40	51,90	28,10	18,97	14,23	7,11	4,06	2,78
15	92/93	93,60	71,20	51,00	38,40	30,10	20,05	16,10	12,33	7,73	4,41	3,45
16	93/94	120,00	120,00	80,00	80,00	70,00	45,00	30,67	23,40	11,70	6,69	3,90
17	94/95	90,00	88,40	60,00	53,33	50,00	26,95	18,33	14,10	7,05	4,03	2,65
18	95/96	180,00	136,00	97,80	65,33	49,00	20,30	16,33	13,50	11,75	8,92	5,88
19	96/97	84,00	76,00	55,59	46,49	38,92	26,66	19,26	15,51	8,25	7,82	6,19
20	98/99	79,92	72,82	60,36	47,86	41,29	20,82	13,88	10,41	5,21	3,49	2,75
21	99/00	99,94	91,25	59,18	44,65	35,94	18,32	13,78	12,52	8,02	5,44	3,45
22	00/01	90,09	83,71	60,27	53,58	46,50	30,87	22,66	17,36	10,80	6,45	4,52

Tabela B.1 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: VESPASIANO código **01943009**

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
		i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)
23	01/02	117,15	112,42	103,64	84,94	66,55	34,38	22,97	17,23	8,63	6,57	5,36
24	02/03	77,41	66,37	52,13	49,95	45,07	25,00	16,68	12,91	7,74	4,65	3,59
25	03/04	93,46	77,07	62,61	54,46	46,67	29,69	20,61	15,51	8,05	4,61	4,02
26	04/05	94,14	77,86	59,22	47,53	37,85	21,80	16,41	12,34	9,80	6,69	4,37
27	07/08	92,41	73,78	43,96	34,13	29,50	18,86	16,28	13,32	7,63	4,43	3,38
28	08/09	99,89	95,16	81,21	72,42	62,33	34,40	22,96	17,23	8,64	4,95	2,95
29	09/10	99,86	87,91	62,45	47,73	36,36	18,51	12,85	9,90	7,59	4,52	2,98

Tabela B.2 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: CAETÉ código **01943010**

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
1	76/77	89,40	80,00	59,60	46,13	38,60	26,90	18,00	13,50	7,26	4,51	2,67
2	77/78	196,80	158,40	80,20	68,13	59,50	40,50	40,97	33,68	21,81	17,31	11,12
3	78/79	139,20	104,00	65,20	45,87	36,00	23,40	16,43	12,63	9,01	6,20	4,75
4	79/80	128,40	109,60	92,40	73,33	60,90	34,15	23,83	19,43	10,64	6,08	3,55
5	80/81	115,20	105,60	63,20	51,20	42,40	26,00	19,50	17,00	9,13	5,21	3,95
6	81/82	139,80	133,20	84,20	61,33	56,00	40,00	29,80	24,60	14,70	9,27	5,41
7	82/83	115,80	83,60	72,00	74,13	61,60	37,40	24,97	18,73	11,03	6,30	3,74
8	83/84	150,00	102,40	60,00	40,27	30,70	18,65	15,60	12,83	7,09	6,13	3,60
9	84/85	90,00	72,40	45,60	42,13	33,10	16,55	13,13	11,98	8,86	5,64	4,55
10	85/86	162,00	116,00	80,20	58,40	45,00	25,60	17,60	13,20	8,90	5,26	3,07
11	90/91	100,80	80,00	58,00	39,33	30,30	20,70	15,43	12,45	9,80	6,72	4,94
12	91/92	138,00	132,00	83,60	56,27	45,00	32,10	22,87	17,90	11,33	7,36	4,90
13	92/93					30,00	20,00	14,17	9,63	8,20	6,70	4,88
14	93/94	90,00	80,00	80,00	60,80	47,00	24,90	17,53	15,75	8,35	4,81	3,23
15	94/95	120,00	112,00	60,00	43,20	34,60	20,95	13,97	10,70	8,63	5,60	4,37
16	95/96	98,40		72,00	61,33	56,00	34,30	25,33	19,70	11,55	11,91	8,20
17	96/97	88,20	69,20	57,30	49,07	37,78	23,55	16,24	12,33	7,20	5,16	4,83
18	97/98	88,80	64,58	46,80	37,91	29,84	18,55	13,66	10,83	5,74	3,82	2,93
19	98/99	115,92	83,12	70,16	59,61	51,27	43,07	30,04	22,90	12,39	7,18	4,30
20	99/00	73,03	68,48	49,46	38,00	34,87	25,61	21,05	17,38	11,19	7,90	5,27
21	00/01	84,67	76,77	56,25	46,28	38,00	21,51	15,01	13,38	11,83	7,12	5,58
22	01/02	75,76	70,68	56,52	41,59	40,05	27,30	19,12	14,91	7,93	4,79	3,71

Tabela B.2 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: CAETÉ código **01943010**

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
23	02/03	160,82	151,98	111,54	84,39	67,71	35,53	25,95	25,64	17,36	10,72	6,60
24	03/04	141,47	132,24	89,65	77,99	71,91	47,17	37,56	32,91	16,46	9,91	5,79
25	04/05	109,55	94,56	66,99	54,44	43,22	22,70	16,33	13,08	9,00	5,24	3,95
26	09/10	134,35	129,52	103,43	75,29	59,71	31,77	22,34	17,30	8,70	5,39	3,93
27	10/11	142,02	132,83	79,66	53,50	40,14	20,45	14,59	11,22	7,81	6,41	3,90
28	11/12	85,77	82,95	69,21	55,47	46,54	26,06	18,46	14,09	7,30	5,92	4,57
29	12/13	76,94	60,45	46,31	43,03	32,79	17,76	13,73	11,57	6,55	4,03	2,92
30	13/14	94,34	94,40	61,73	44,83	34,26	21,66	17,61	15,23	9,23	5,92	3,81
31	14/15	107,07	99,83	67,17	51,91	41,65	22,23	15,05	12,50	9,20	6,67	4,67
32	15/16	64,73	59,84	50,25	43,38	38,15	24,70	16,65	12,72	6,44	4,37	3,98
33	16/17	90,50	81,02	57,78	40,60	30,84	22,84	21,13	17,47	10,11	7,12	4,61

Tabela B.3 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: CAIXA DE AREIA código 01943022

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
1	75/76	138,00	120,00	86,80	66,67	51,20	27,80	19,67	17,00	9,30	5,31	3,54
2	76/77	90,00	80,80	59,20	48,00	45,30	30,30	21,80	17,25	8,63	5,42	3,77
3	77/78	122,40	108,00	76,40	63,20	48,70	26,10	19,27	17,00	14,30	12,32	8,02
4	78/79	138,00	108,00	78,40	53,33	41,40	33,95	24,10	18,93	9,46	5,97	5,41
5	79/80	182,40	125,60	71,60	50,67	38,70	21,00	16,27	14,95	9,20	6,91	4,60
6	80/81	144,00	99,20	65,20	47,87	36,20	19,05	14,17	11,25	7,70	4,65	3,36
7	81/82	163,20	117,20	92,80	64,53	48,70	26,05	19,73	18,30	10,70	8,34	7,08
8	82/83	126,00	94,40	61,60	45,07	34,30	20,70	14,23	11,18	9,90	6,36	4,17
9	83/84	123,60	86,40	72,00	49,60	39,40	22,40	14,93	12,10	7,63	5,45	3,54
10	84/85	120,00	96,00	82,80	86,20	59,20	37,50	29,67	26,55	13,13	10,55	8,23
11	85/86	144,00	108,00	78,80	62,40	55,30	31,15	22,57	17,33	9,24	6,11	3,56
12	90/91	114,00	86,00	62,40	42,40	43,60	24,70	16,73	15,48	10,88	7,13	5,84
13	91/92	138,00	100,00	82,40	56,80	43,20	22,10	14,73	11,05	6,75	5,21	4,22
14	92/93	126,00	117,60	80,00	56,00	51,00	29,65	19,80	16,05	11,25	7,56	5,92
15	93/94	120,00	84,00	66,40	58,53	44,80	22,90	15,43	11,58	6,70	4,11	2,63
16	94/95	120,00	96,00	60,00	46,80	37,30	19,40	13,27	10,23	6,66	5,07	3,56
17	95/96	177,60	154,40	68,00	57,33	48,70	25,20	20,17	15,13	7,85	4,49	2,62
18	97/98	60,20	52,29	49,54	46,47	42,66	29,79	21,83	17,50	11,24	7,86	5,62
19	98/99	96,60	83,60	72,80	59,51	49,11	27,93	18,83	14,13	7,06	4,04	2,55
20	99/00	97,37	93,05	73,17	59,85	51,10	30,34	20,23	15,17	7,59	4,34	3,09
21	00/01	49,56	36,02	26,31	20,89	16,62	11,95	9,90	8,21	7,14	4,59	3,37
22	01/02	56,55	49,62	40,38	31,73	29,22	26,73	22,99	20,26	16,27	10,65	6,62

Tabela B .3 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: CAIXA DE AREIA código 01943022

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
		i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)
23	02/03	88,25	72,94	55,12	43,77	37,02	19,35	18,28	14,75	7,38	5,11	3,73
24	03/04	125,14	109,60	86,78	69,53	62,34	49,74	45,93	41,91	24,10	16,18	10,21
25	04/05	145,62	135,51	120,04	104,06	92,13	62,47	42,30	32,23	16,58	9,49	5,69
26	07/08	111,57	100,66	69,83	47,06	35,79	17,94	12,61	9,47	4,84	3,12	2,51
27	08/09	112,42	96,09	68,14	54,17	45,99	24,38	16,55	12,84	7,43	4,64	3,59

Tabela B.4 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: PONTE RAUL SOARES código 01943049

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
1	80/81	120,00	100,00	70,00	56,00	45,00	23,70	16,40	12,85	6,50	3,71	1,67
2	81/82	120,00	92,00	86,80	59,47	44,60	22,30	14,87	11,15	5,85	3,84	3,72
3	82/83											2,75
4	84/85	117,60	92,00	60,40	49,33	40,20	20,60	15,13	11,45	9,15	5,59	4,25
5	85/86	81,60	68,80	64,80	66,67	71,60	48,60	32,93	20,05	11,10	7,31	5,27
6	90/91	90,00	80,00	60,00	44,00	33,60	18,00	16,27	13,00	6,73	3,84	2,86
7	91/92	92,40	77,60	64,00	49,60	42,00	30,80	22,27	19,25	10,55	6,43	3,75
8	92/93	172,00	144,40	99,00	70,67	57,00	30,80	20,53	15,40	7,70	4,40	3,10
9	93/94	72,00	60,00	56,00	44,00	33,20	21,00	18,00	13,95	6,98	5,00	3,67
10	94/95	116,40	104,00	60,00	52,27	41,10	23,40	17,80	14,05	7,23	4,13	2,80
11	09/10	100,84	89,09	71,52	53,18	41,63	22,21	15,21	12,32	8,76	5,00	4,16

Tabela B.5 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: LOURDES código **01943054**

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
		i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)
1	39/40	127,20	99,60	74,40	50,27	38,90	24,45	17,20				
2	40/41	72,00	71,40	51,60	37,07	28,30	20,70	14,53	11,33			
3	41/42	147,60	74,70	54,80	45,20	40,90	24,40	17,83	14,35			
4	42/43		60,00	60,00	51,07	45,30	22,65	15,10	11,33			
5	43/44	120,00	72,00	52,00	40,80	30,60	16,05	12,37	10,13			
6	44/45		60,00	58,00	42,13	32,00	21,15	14,10	10,58			
7	45/46		59,10									
8	47/48	171,00	114,00	92,80	69,20	53,20	27,60	19,00	15,10			
9	48/49	99,60	76,80	54,00	45,73	34,30	26,85	17,90	14,20			
10	56/57	93,00	63,90	58,60	43,47	42,40	24,85	18,57	14,10			
11	57/58	78,00	60,60	48,00	35,60	25,50	16,80	13,03	10,03			
12	58/59		48,00	40,00	33,60	29,90	17,55	16,20	14,33			
13	59/60	113,40	80,70	54,80	37,47	35,70	26,35	18,17	14,00			
14	60/61	96,00	66,00	64,00	47,73	42,30	21,60	14,40	10,80			
15	61/62	111,00	67,50	48,00	42,00	36,60	27,90	19,77	15,48			
16	62/63	140,40	70,20	55,20	43,33	35,20	25,55	17,17	13,30			
17	63/64	121,20	90,60	80,00	67,33	55,80	29,50	20,43	15,33			
18	64/65	138,60	111,60	84,60	69,20	52,00	26,10	17,87	13,40			
19	65/66	84,00	62,10	45,00	34,27	35,60	28,35	19,40	17,18			
20	66/67	129,00	97,50	85,00	68,67	53,10	29,95	21,73	17,10			
21	67/68	112,80	77,70	68,00	58,00	43,50	21,75	14,50	10,88			
22	68/69	72,60	69,00	53,60	50,40	39,40	23,55	16,87	14,45			

Tabela B .5 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: LOURDES código 01943054

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
23	69/70	115,20	54,60	57,20	51,47	44,60	22,30	15,00	12,50			
24	70/71	91,20	78,90	54,00	48,27	40,50	24,80	16,53	12,40			
25	71/72	90,00	94,50	75,00	67,33	51,30	26,90	19,27	14,70			
26	72/73	160,80	128,40	114,00	80,27	66,90	36,40	24,83	18,65			
27	73/74	90,00	70,50	70,00	54,67	44,30	22,15	15,03	11,28			
28	74/75	121,80	91,50	64,80	47,47	37,70	22,10	15,83	12,15			
29	75/76	192,00	96,00	69,00	55,33	41,50	22,50	25,67	21,25			
30	76/77	73,20	55,50	44,00	34,67	29,00	21,50	14,33	11,75			
31	77/78	102,60	90,00	75,40	61,07	47,30	23,65	15,77	12,70			
32	78/79	142,20	103,50	82,00	63,07	47,60	24,00	16,83	13,00			
33	79/80	168,00	99,90	67,60	45,07	34,00	23,10	16,03	12,88			
34	80/81	120,00	99,00	67,20	57,33	48,90	29,80	19,87	14,90			

Tabela B.6 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação:RAJA GABAGLIA código 01943054

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
1	84/85	127,20	104,40	124,40	69,60	88,50	32,55	21,70	21,45	11,33	6,69	4,75
2	85/86	120,00	119,20	80,00	69,47	53,20	30,00	20,00	18,78	9,86	6,63	3,87
3	86/87	180,00	149,80	72,20	63,87	53,60	32,90	21,93	17,23	8,66	5,34	4,45
4	87/88	120,00	102,40	66,00	54,93	55,70	29,85	19,90	18,90	10,29	5,89	3,64
5	88/89	120,00	120,00	80,00	66,40	52,30	27,25	18,17	17,13	10,94	7,80	4,55
6	89/90	93,60	80,00	59,40	47,47	37,50	26,85	17,90	13,93	8,66	5,71	3,33
7	90/91	91,20	76,40	49,60	40,40	30,80	17,70	11,80	10,90	8,73	6,22	3,88
8	91/92	120,00	80,00	45,00	34,13	27,80	15,60	10,40	9,88	6,56	3,75	2,69
9	92/93	78,00	64,40				17,45	11,63	13,73	10,98	7,09	5,45
10	93/94	144,00	112,00	81,80	56,67	43,50	23,45	15,63	12,13	6,06	3,47	3,38
11	94/95	90,00	65,20	51,20	39,73	30,80	15,85	10,90	10,10	6,34	3,62	
12	95/96	138,00	100,00	82,00	72,00	57,30	29,50	25,17	18,88	14,35	11,19	6,67
13	96/97	105,00	102,00	78,00	69,33	58,50	33,70	22,67	17,50	11,69	7,79	5,67
14	97/98	111,00	96,00	77,00	59,10	44,30	22,20	15,30	12,00	6,30	3,60	2,10
15	98/99	90,00	98,00	80,00	72,00	66,00	41,75	28,80	21,60	10,80	6,17	3,60
16	99/00	90,00	80,00	55,00	48,00	32,00	28,00	19,67	15,83	9,60	5,64	3,40
17	00/01	66,00	68,00	49,00	30,00	26,50	22,65	20,67	18,13	15,26	9,11	6,14
18	01/02	102,00	80,00	48,00	40,67	40,00	20,65	13,77	11,38	6,29	4,31	2,58
19	02/03	162,00	120,00	95,20	77,33	66,00	33,65	22,43	17,00	9,93	5,39	3,28
20	03/04	132,00	104,00	70,00	52,70	42,00	25,80	18,70	16,30	9,40	5,40	3,10
21	04/05	150,00	144,00	92,80	62,00	52,00	26,45	17,77	13,43	8,31	4,89	3,01
22	05/06	120,00	100,00	60,00	42,80	32,60	16,50	11,33	10,63	8,03	5,57	3,25

Tabela B .6 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação:RAJA GABAGLIA código 01943054

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
		i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
		(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
23	06/07	120	100	77	55,46667	48,5	32,1	20,86667	20,4	13,825	9,4	6,108333
23	07/08	90,00	88,00	80,00	57,47	43,10	21,75	14,50	11,13	5,78	4,70	3,04
24	08/09	168,00	152,00	112,80	96,67	76,70	49,40	33,00	24,75	12,38	7,07	4,13
25	09/10	120,00	108,00	100,00	70,93	57,00	32,00	21,33	16,15	8,13	4,79	3,17
26	10/11	91,80	72,00	50,00	40,67	42,80	23,30	15,67	15,00	8,80	5,17	3,02
27	11/12	111,00	92,00	64,00	64,00	54,40	31,00	20,67	15,50	9,88	5,99	3,49
28	12/13	150,00	148,00	104,00	72,00	55,80	35,50	23,93	17,95	9,58	5,49	3,20
29	13/14	129,00	102,00	68,80	70,00	53,60	28,50	23,67	19,45	9,75	5,64	3,43
30	14/15	120,00	104,80	62,00	48,53	37,40	19,50	13,03	10,75	7,15	4,94	2,92

Tabela B.7 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação:HORTO código **01943055**

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min i (mm/h)	15min i (mm/h)	30min i (mm/h)	45min i (mm/h)	1 hora i (mm/h)	2 horas i (mm/h)	3 horas i (mm/h)	4 horas i (mm/h)	8 horas i (mm/h)	14 horas i (mm/h)	24 horas i (mm/h)
1	62/63	96,00	88,00	56,00	38,67	32,00	18,00	12,00	13,33	8,60	5,99	3,93
2	63/64	120,00	119,20	79,40	66,00	51,90	27,10	18,07	14,80	10,03	6,37	4,50
3	64/65	120,00	89,20	59,40	44,13	45,70	23,00	15,33	11,93	7,40	5,62	4,54
4	65/66	122,40	82,80	59,00	40,93	31,00	17,85	11,90	10,48	5,68	3,47	3,14
5	66/67	135,60	104,40	73,80	52,80	39,70	19,90	13,27	10,25	6,06	5,80	3,59
6	67/68	97,20	84,00	64,60	49,60	37,50	18,75	12,50	10,98	6,06	4,40	2,64
7	68/69	94,20	72,40	53,60	41,07	39,10	23,45	15,63	13,33	7,85	4,84	3,45
8	69/70	94,80	76,40	55,20	44,80	41,80	25,20	16,80	12,60	11,23	7,55	5,35
9	70/71	127,20	95,60	76,80	59,20	44,70	24,55	16,37	12,33	6,40	3,74	2,53
10	71/72	117,00	94,40	80,00	64,40	50,00	26,25	17,50	14,38	7,19	4,11	2,75
11	72/73	160,80	146,80	113,60	79,07	67,20	36,40	24,27	18,65	9,59	7,36	5,34
12	73/74	78,00	80,00	70,00	53,33	41,20	22,30	14,87	11,30	5,68		
13	74/75	120,00	106,40	65,00	44,80	37,60	21,40	14,27	11,63	6,60	4,13	4,29
14	75/76	135,00	94,80	66,20	53,47	41,50	21,20	14,13	21,15	11,01	6,29	3,67
15	76/77	84,00	65,60	46,80	33,87	30,20	21,40	14,27	11,80	8,05	5,06	2,96
16	77/78	132,00	95,20	74,00	58,80	46,20	23,60	15,73	12,60	8,06	6,20	6,84
17	78/79	120,00	89,20	60,00	50,27	40,00	22,95	15,30	12,95	7,53	5,27	4,87
18	79/80	199,20	134,80	67,40	45,20	33,90	22,95	15,30	12,30	9,21	5,26	3,54
19	80/81	114,00	108,40	67,20	55,60	48,60	29,55	19,70	14,85	7,43	4,24	2,79
20	81/82	133,80	105,60	60,60	40,53	31,40	29,95	19,97	15,98	8,05	6,18	4,57
21	82/83	90,60	83,20	60,00	51,73	41,10	28,00	18,67	17,35	9,04	6,40	3,73
22	83/84	81,60	72,80	41,00								
23	84/85	138,00	108,40	88,00	73,07	61,40	36,40	24,27	22,68	13,66	8,33	5,53

24	85/86	93,00	84,00	59,00	44,13	35,10	20,00	13,33	11,63	6,19	4,09	2,63
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------

Tabela B.8 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Estação: PONTE NOVA DO PARAPEBA código 01944004

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
		i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)
1	74/75	88,80	84,80	57,20	46,93	42,00	22,15	14,77	11,08	6,68	3,81	2,39
2	75/76	96,00	85,60	65,20	54,80	46,20	25,60	19,13	14,90	8,08	4,61	2,69
3	76/77	96,60	88,80	71,60	49,47	38,70	31,30	27,27	20,55	11,00	6,53	5,99
4	77/78	94,80	102,40	56,20	41,60	31,80	20,00	13,33	10,00	5,00		
5	78/79	162,00	120,00	77,40	51,60	38,80	23,00	17,17	13,30	10,00	6,76	4,39
6	79/80	120,00	88,00	60,40		38,60	27,70	25,50	19,93	9,96	5,69	4,10
7	80/81	120,00	80,00	60,00	54,00	50,80	26,65	17,87	13,43	6,71	4,23	3,29
8	81/82	152,40	148,80	120,00	91,33	68,80	34,50	23,00	17,28	8,64	5,54	3,66
9	82/83	72,00	79,20	50,40		26,90	20,00	16,07	14,45	9,18	7,19	4,43
10	83/84			60,00	42,13	31,80	24,15	16,43	16,10	11,44	6,54	3,81
11	84/85	162,00	144,00	108,00	77,07	62,20	36,10	26,67	23,65	14,41	8,75	5,13
12	85/86	120,00	120,00	108,00	87,20	68,70	34,60	23,07	17,35	11,93	4,44	3,98
13	91/92	152,40	97,60	73,60	55,73	42,40	23,60	16,63	12,90	8,45	4,96	2,89
14	92/93	212,40	148,80	89,60	69,87	58,60	32,60	22,13	16,60	8,30	4,74	3,70
15	93/94	132,00	80,00	60,00	45,60	38,60	23,10	20,00	15,68	7,84	4,48	3,28
16	94/95	97,20	80,80	100,00	80,00	68,40	39,60	26,47	20,45	10,78	6,16	3,92
17	95/96	132,00	102,40	54,80	38,67	29,00	26,25	18,77	14,88	11,43	7,93	5,38
18	02/03	83,27	70,54	61,22	52,76	42,94	24,05	16,04	12,35	8,09	6,41	4,08
19	03/04	92,24	73,00	58,01	47,18	36,50	18,32	12,22	9,66	5,53	4,26	2,76
20	04/05	105,90	95,00	83,38	73,79	69,16	37,11	28,31	23,01	12,67	7,46	5,50
21	07/08	136,36	113,20	74,64	59,46	47,99	28,13	19,50	16,27	8,61	6,15	4,23

22	08/09	113,95	103,91	75,24	60,88	52,74	35,00	25,07	18,89	9,61	5,50	3,23
23	09/10	68,68	62,81	51,09	47,85	40,09	24,25	16,57	12,50	10,56	6,14	4,70

Tabela B.9 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação: PEDRO LEOPOLDO código **01944009**

Nº	DURAÇÕES ANO HIDROLÓGICO	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
		i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)	i (mm/h)
1	90/91	88,80	62,80	50,00	37,87	29,40	19,25	16,33	13,13	6,56	4,07	2,92
2	91/92	108,00	80,00	65,60	44,80	34,20	20,00	13,53	10,33	5,55	2,63	2,13
3	92/93	130,80	94,40	68,20	50,13	39,00	19,25	14,03	10,78	6,84	4,35	2,54
4	93/94	132,00	90,80	78,00	56,80	48,60	27,30	30,90	24,70	13,93	7,96	5,84
5	94/95	84,00	63,60	51,80	47,87	36,10	18,05	13,53	11,40	6,90	4,03	3,01
6	95/96	90,00	68,00	58,00	47,20	42,10	23,70	17,00	15,85	14,19	8,98	5,27
7	96/97	104,40	83,00	62,60	48,67	38,00	23,70	16,93	15,44	10,04	7,05	6,88
8	97/98	93,20	76,64	68,50	49,42	37,57	19,12	16,83	12,78	6,79	5,04	3,14
9	99/00	189,36	161,07	85,15	70,05	66,18	48,70	32,68	26,70	14,00	8,36	4,92
10	00/01	71,07	63,96	51,07	42,36	35,41	22,87	15,99	12,06	9,47	6,40	3,81
11	01/02	91,43	77,17	59,69	52,35	42,73	24,99	17,16	13,04	9,05	5,17	4,40
12	02/03	77,41	76,58	46,22	39,62	31,09	25,70	19,96	15,90	9,27	5,38	4,42
13	03/04	114,81	106,14	89,67	66,18	52,19	28,65	19,34	15,88	8,84	5,18	3,93
14	04/05	64,10	57,74	41,96	37,55	35,93	19,87	13,26	11,18	8,66	5,96	3,81
15	09/10	85,44	69,60	50,00	35,89	27,39	20,94	15,79	12,76	6,54	4,37	3,52

Tabela B.10 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais
Estação:LAGOA GRANDE código 02043002

Nº	DURAÇÕES	10 min	15min	30min	45min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	8 horas	14 horas	24 horas
	ANO	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
	HIDROLÓGICO	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
1	84/85	180,00	180,00	126,00	96,80	75,00	38,90	26,20	16,10	11,93	6,81	3,98
2	85/86	132,00	120,00	86,00	66,67	53,10	26,60	18,27	14,10	7,05	4,03	2,89
3	90/91	120,00	120,00	78,80	67,73	50,90	25,45	17,80	14,35	9,44	5,76	3,97
4	91/92	120,00	92,00	60,80	51,20	41,00	21,60	14,40	10,80	5,40	3,57	3,33
5	92/93	126,00	92,00	62,40	45,33	43,00	24,25	17,57	14,20	9,40	6,38	5,24
6	93/94	120,00	96,00	82,80	57,33	44,40	24,50	17,17	13,00	7,38	9,49	5,53
7	94/95	162,00	136,00	84,20	61,07	49,40	32,60	22,00	15,55	12,50	10,49	6,78
8	95/96	199,90	125,60	64,40	42,93	32,20	22,35	15,20	11,40	7,68	8,07	5,55
9	96/97	102,60	88,67	59,40	42,53	32,00	16,00	13,51	12,23	8,43	6,84	5,77
10	97/98	88,80	88,05	88,05	78,53	59,14	31,05	20,90	15,71	8,98	5,61	4,16
11	98/99	139,15	117,98	72,78	55,27	42,49	21,57	15,13	12,32	6,85	5,14	3,95
12	99/00	106,17	98,68	83,60	59,97	48,15	26,56	18,11	13,59	6,81	5,61	5,47
13	00/01	102,67	96,73	86,61	67,33	57,13	32,00	22,05	16,97	10,56	8,09	5,20
14	01/02	67,84	61,74	48,46	34,40	35,44	21,37	14,30	11,83	9,16	5,79	4,00
15	02/03	83,51	80,16	54,34	42,37	36,02	23,15	17,25	14,15	7,45	5,18	3,07
16	03/04	97,85	89,08	74,52	57,22	44,52	27,92	21,94	18,58	11,23	6,67	4,04
17	04/05	123,00	113,99	93,70	80,64	62,52	31,43	21,10	15,85	8,52	5,16	3,22
18	07/08	107,61	102,51	95,58	78,50	65,02	33,07	22,05	16,54	8,27	4,73	3,13
19	08/09	128,22	103,15	80,40	70,01	55,00	29,63	19,86	15,00	10,07	5,86	3,43

APÊNDICE C – Grau De Recomendação Das Distribuições Pelo Seaf

Tabela D.1 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		10 minutos		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,5877	0,8463	0,8948
1943010	Caeté	0,9414	0,9704	FP
1943022	Caixa de Areia	IC	IC	FP
1943049	Ponte Raul Soares	0,9427	0,9460	FP
1943054	Raja Gabaglia	0,9168	0,8556	FP
1943054	Lourdes	0,9786	0,9586	FP
1943055	Horto	0,8603	0,9101	FP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9706	0,9845	FP
1944009	Pedro Leopoldo	0,7396	0,8297	0,9695
2043002	Lagoa Grande	0,9633	0,9842	CP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D.2 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		15 minutos		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,9129	0,9755	FP
1943010	Caeté	0,8918	0,9436	FP
1943022	Caixa de Areia	IC	IC	IC
1943049	Ponte Raul Soares	0,9518	0,9591	CP
1943054	Raja Gabaglia	0,9062	0,8468	FP
1943054	Lourdes	0,9430	0,9381	FP
1943055	Horto	0,8493	0,9793	CP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,7954	0,9187	CP
1944009	Pedro Leopoldo	IC	IC	0,9632
2043002	Lagoa Grande	0,8263	0,9250	CP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D.3 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		30 minutos		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,6944	0,8301	FP
1943010	Caeté	0,9132	0,9906	FP
1943022	Caixa de Areia	IC	IC	IC
1943049	Ponte Raul Soares	0,5063	0,7704	0,9663
1943054	Raja Gabaglia	0,9536	0,9548	FP
1943054	Lourdes	0,8860	0,9820	CP
1943055	Horto	0,8312	0,9314	CP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	IC	0,8117	CP
1944009	Pedro Leopoldo	0,9411	0,9867	CP
2043002	Lagoa Grande	0,8886	0,8123	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D.4 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		45 minutos		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,6261	0,8133	FP
1943010	Caeté	0,6769	0,9461	CP
1943022	Caixa de Areia	0,6902	0,8361	IC
1943049	Ponte Raul Soares	0,9206	0,9841	CP
1943054	Raja Gabaglia	0,5964	IC	FP
1943054	Lourdes	0,9398	0,9349	FP
1943055	Horto	0,9063	0,9872	CP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,7288	0,9161	CP
1944009	Pedro Leopoldo	0,8874	0,9762	CP
2043002	Lagoa Grande	0,9609	0,9146	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D.5 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		1 hora		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,5995	0,7103	FP
1943010	Caeté	0,6001	0,9164	CP
1943022	Caixa de Areia	0,6741	0,7344	IC
1943049	Ponte Raul Soares	0,6101	0,8055	0,9080
1943054	Raja Gabaglia	0,9056	0,8844	FP
1943054	Lourdes	0,9833	0,9073	FP
1943055	Horto	0,8293	0,9727	CP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9015	0,8179	FP
1944009	Pedro Leopoldo	0,7527	0,8986	0,9578
2043002	Lagoa Grande	0,9882	0,9580	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D.6 - Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		2 horas		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,7116	0,9205	FP
1943010	Caeté	0,5600	0,8423	0,8477
1943022	Caixa de Areia	0,6785	0,6216	0,7686
1943049	Ponte Raul Soares	IC	0,5303	0,9583
1943054	Raja Gabaglia	0,8795	0,8346	FP
1943054	Lourdes	0,8492	0,7668	FP
1943055	Horto	0,7179	0,9322	0,9481
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9296	0,8967	FP
1944009	Pedro Leopoldo	IC	IC	0,9097
2043002	Lagoa Grande	0,9347	0,8634	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D .7- Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		3 horas		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,9224	0,9759	CP
1943010	Caeté	IC	0,6473	0,9558
1943022	Caixa de Areia	0,5496	IC	0,8010
1943049	Ponte Raul Soares	IC	0,5248	0,9841
1943054	Raja Gabaglia	0,7848	0,7392	FP
1943054	Lourdes	0,8473	0,9854	FP
1943055	Horto	0,7176	0,9320	0,9481
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9423	0,8013	FP
1944009	Pedro Leopoldo	IC	IC	0,7813
2043002	Lagoa Grande	0,9407	0,8179	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D .8- Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		4 horas		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,8614	0,8871	CP
1943010	Caeté	IC	0,5625	0,9287
1943022	Caixa de Areia	0,5835	IC	0,8799
1943049	Ponte Raul Soares	0,7152	0,8917	CP
1943054	Raja Gabaglia	0,8244	0,6562	FP
1943054	Lourdes	0,8700	0,9818	FP
1943055	Horto	IC	0,6775	0,9579
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9806	0,9198	FP
1944009	Pedro Leopoldo	IC	IC	0,8518
2043002	Lagoa Grande	0,9582	0,7716	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D .9- Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		8 horas		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,5597	0,5199	0,7564
1943010	Caeté	IC	0,5750	0,9734
1943022	Caixa de Areia	0,5000	0,5712	0,9861
1943049	Ponte Raul Soares	0,9254	0,9780	CP
1943054	Raja Gabaglia	0,9345	0,9058	FP
1943054	Lourdes	-	-	-
1943055	Horto	0,8292	0,9717	0,9816
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,8354	0,7662	FP
1944009	Pedro Leopoldo	0,7432	0,8132	CP
2043002	Lagoa Grande	0,9873	0,9466	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D .10- Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		14 horas		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	IC	0,5526	0,9584
1943010	Caeté	IC	IC	0,9451
1943022	Caixa de Areia	0,6232	0,6766	0,9787
1943049	Ponte Raul Soares	0,8055	0,9430	CP
1943054	Raja Gabaglia	0,9028	0,9678	CP
1943054	Lourdes	-	-	-
1943055	Horto	0,9581	0,8814	FP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9701	0,9115	FP
1944009	Pedro Leopoldo	0,9514	0,9646	FP
2043002	Lagoa Grande	0,9409	0,9764	CP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

Tabela D .11- Intensidades das precipitações - Série de Máximos Anuais

Duração		24 horas		
Código	Estação	LogNormal	Gumbel	GEV
1943009	Vespasiano	0,5816	0,6912	0,9786
1943010	Caeté	IC	0,5056	0,7971
1943022	Caixa de Areia	0,6767	0,8280	0,9046
1943049	Ponte Raul Soares	0,8011	0,8768	FP
1943054	Raja Gabaglia	0,5074	0,7344	0,8070
1943054	Lourdes	-	-	-
1943055	Horto	0,9227	0,9841	FP
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	0,9756	0,9053	FP
1944009	Pedro Leopoldo	0,9960	0,9936	FP
2043002	Lagoa Grande	0,8705	0,9068	FP
FP	Fator de forma Positivo			
CP	Rejeitada pelo critério da parcimônia			
IC	Rejeitada pelo critério do intervalo de confiança da variância			

APÊNDICE D – Curvas Regionais De Frequência

