Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Desenvolvimento de relações para precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Rio Grande/RS

Dissertação de:
Giulia Maia Vassão

Orientador:
Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

Coorientador
Profa. Dra. Ana Paula Gomes

Maio de 2026

Dissertação - PPGEO – FURG

Giulia Maia Vassão

Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

gov.br Documento assinado digitalmente
CRISTOFER HOOD MARQUES
Data: 13/07/2026 14:55:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Crístofer Hood Marques
Coordenador do PPGEO

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS
Data: 08/06/2026 10:56:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador — FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
ANA PAULA GOMES
Data: 15/06/2026 15:10:03-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Profa. Dra. Ana Paula Gomes
Coorientadora — FURG/EE

gov.br Documento assinado digitalmente
KARINA RETZLAFF CAMARGO
Data: 09/07/2026 10:02:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Profa. Dra. Karina Retzlaff Camargo
Membro Interno – FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA
Data: 07/07/2026 10:10:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Membro Interno – FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
MARIANE KEMPKA
Data: 18/06/2026 10:31:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

.....

Profa. Dra. Mariane Kempka
Membro Externo – UTFPR

Rio Grande, 15 de maio de 2026

N471m Maia Vassão, Giulia.

Desenvolvimento de relações para precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Rio Grande/RS / Giulia Maia Vassão – 2026.

78 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Coorientador: Profa. Dra. Ana Paula Gomes.

1. Chuvas intensas 2. Relações IDF 3. Desagregação
I. dos Santos, Elizaldo Domingues II Gomes, Ana Paula.

CDU 620.91

Catalogação na Fonte: Bibliotecário João da Silva CRB 12/3456

É impossível que o improvável nunca aconteça.

EMIL GUMBEL

Prefácio

A ocorrência de eventos climáticos extremos ao redor do mundo tem crescido significativamente nos últimos anos, despertando a atenção da sociedade, das autoridades competentes e, principalmente, da comunidade científica. Dentre os fenômenos ocorridos, as chuvas intensas se destacam por suas consequências diretas na vida dos cidadãos e no meio em que vivem, podendo causar inundações, deslizamentos de terra e severos prejuízos socioeconômicos. Considerando o atual cenário global de mudanças climáticas, o estudo e o entendimento aprofundado acerca das precipitações torna-se ainda mais relevante, uma vez que projeções futuras indicam um aumento na frequência e intensidade das chuvas em diversas regiões do planeta.

O estado do Rio Grande do Sul, por sua vez, tem em seu histórico as marcas da força da ocorrência de chuvas intensas extremas, que causaram enchentes no ano de 1941 em cidades como Porto Alegre e Rio Grande e em cerca de 417 municípios do estado em 2024. Estima-se que praticamente 90% do estado tenha sido impactado pelos eventos ocorridos em 2024, sendo as consequências de cunho ambiental, econômico e social de grandes proporções, segundo Zuffo *et al.* (2024).

Em vista do cenário apresentado, esta dissertação busca contribuir para o entendimento das relações entre precipitações intensas de diferentes durações e suas implicações para a cidade de Rio Grande. Baseando-se em análises estatísticas e metodologias aplicadas por autores do mundo inteiro, este estudo objetiva fornecer subsídios para a gestão de riscos e planejamento urbano, auxiliando na formulação de estratégias de adaptação frente às mudanças climáticas.

Através dos resultados apresentados em minha dissertação, espero contribuir para o avanço do conhecimento sobre chuvas intensas e traçar uma referência para a tomada de decisões por parte de gestores, pesquisadores e sociedade civil. Afinal de contas, a compreensão e o preparo para os desafios impostos pelo clima são necessidades urgentes para a construção de um futuro mais seguro e sustentável para todos.

Giulia Maia Vassão
Rio Grande
Maio de 2026

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Cris e Guto, pelo amor incondicional, apoio constante e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Vocês são a minha base e minha maior inspiração.

Ao meu noivo, Igor, por estar ao meu lado em todos os momentos, pela paciência, incentivo e por tornar a vida mais leve e colorida ao longo dessa jornada. Seu companheirismo foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos meus orientadores, Elizaldo e Ana Paula, pela dedicação, orientação e compartilhamento de conhecimento. Agradeço a confiança depositada em mim e as valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

À Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), pela formação acadêmica, estrutura oferecida e apoio institucional ao longo desta trajetória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, fundamental para a realização desta pesquisa.

Resumo

Giulia Maia Vassão

Compreender o comportamento das chuvas é de suma importância para o dimensionamento de diversas obras de cunho hidráulico, visto que estas estruturas são concebidas com uma perspectiva futura. Diante disto, parâmetros cruciais para a caracterização da chuva a ser considerada nos cálculos de projeto são a altura pluviométrica máxima, a duração da chuva, a frequência com que ocorrem estes fenômenos e o período de retorno. Isso se deve ao fato de que obras que envolvem drenagem pluvial precisam resistir a eventos críticos desencadeados por precipitações intensas. Por esse motivo, é de extrema relevância conhecer as relações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), que permitem estimar a chuva de projeto e, por consequência, a vazão de projeto. As estações meteorológicas, responsáveis pela medição pluviométrica, registram a chuva diária precipitada. Para suprir a necessidade de informações de precipitações intensas de diferentes durações, foram desenvolvidas metodologias que buscam desagregar a chuva de um dia em chuvas de menores durações. Dentre os métodos de desagregação existentes, destaca-se o Método das Relações de Chuvas de Diferentes Durações, amplamente aplicado no Brasil. Para a utilização deste método, foram propostos coeficientes de desagregação por diferentes autores. Esta dissertação tem como objetivo apresentar relações IDF para diferentes intervalos de durações para o município de Rio Grande – RS, que são desenvolvidas a partir de registros históricos de precipitação disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para a construção dessas relações, utilizou-se as séries anuais de dados de seis estações aptas do município, as quais foram ajustadas as distribuições teóricas de probabilidade Log-Normal e de Gumbel. Foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov–Smirnov, obtida a chuva máxima diária para períodos de retorno que variaram de 2 a 500 anos e, posteriormente, a desagregação da chuva foi realizada por meio dos coeficientes propostos pela literatura para durações que variam entre 5 e 1440 minutos. Foram construídas as novas curvas IDF e comparados os resultados obtidos através das diferentes correlações de desagregação. Foi observado que apesar das duas metodologias aplicadas gerarem curvas IDF representativas quanto à realidade, apenas as curvas propostas a partir dos coeficientes de um autor abrangeram durações menores de chuva, que tendem a ser mais intensas. Por fim, a partir de modelos climáticos futuros, foram utilizados dados simulados para a construção de curvas IDF projetadas, a fim de verificar possíveis aumentos na intensidade da chuva em Rio Grande. Com base nas estimativas, é esperado que haja aumento na intensidade e frequência de fenômenos extremos no município, de tal modo que a chuva prevista para ocorrer em 5 anos, aconteça em 2 anos.

Palavras-chave: Chuvas intensas. Distribuição de Gumbel. Distribuição Log-Normal. Estação pluviométrica. Desagregação de chuvas.

Abstract

Giulia Maia Vassão

Understanding the rainfall behavior is very important for the design of several hydraulic engineering projects, since these structures are conceived with a long-term perspective. In this context, crucial parameters for characterizing the rainfall to be considered in engineering calculations include the maximum rainfall depth, storm duration, event frequency and return period. This is because infrastructure related to stormwater drainage must be capable of withstanding critical events triggered by intense rainfall. Therefore, it is highly relevant to understand the Intensity-Duration-Frequency (IDF) relationships, which enable the estimation of the design rainfall and, consequently, the design discharge. Rainfall data are recorded by meteorological stations, which measure daily precipitation. To meet the need for information on short-duration heavy rainfall events, methodologies have been developed to disaggregate daily rainfall data into shorter-duration events. Among the existing disaggregation methods, the Method of Rainfall Ratios for Different Durations stands out and is widely used in Brazil. For the application of this method, several authors have proposed different disaggregation coefficients. This dissertation aims to present IDF relationships for various durations for the municipality of Rio Grande – RS, developed using historical precipitation records provided by the National Institute of Meteorology (INMET) and the National Water and Sanitation Agency (ANA). For constructing these relationships, the annual time series from six qualified rainfall stations in the municipality were used, and the data were fitted to the Log-Normal and Gumbel theoretical distributions. The Kolmogorov–Smirnov goodness-of-fit test was applied, and the annual maximum daily rainfall was estimated for return periods ranging from 2 to 500 years. Subsequently, rainfall disaggregation was performed using coefficients proposed in the literature for durations ranging from 5 to 1440 minutes. New IDF curves were developed, and the results obtained from different disaggregation approaches were compared. Although both methodologies produced IDF curves consistent with observed conditions, only one set of coefficients adequately represented shorter rainfall durations, which are typically associated with higher intensities. Finally, future climate model projections were incorporated to generate projected IDF curves, aiming to assess potential changes in rainfall intensity in Rio Grande. Based on these estimates, an increase in the intensity and frequency of extreme events is expected in the municipality, such that rainfall previously expected to occur once every 5 years may occur once every 2 years.

Keywords: Intense rainfall. Gumbel distribution. Log-Normal distribution. Rain gauge station. Rainfall disaggregation.

Sumário

Página

Lista de Figuras **XI**

Lista de Tabelas **XIII**

Lista de Símbolos **XV**

Lista de Siglas **XVII**

1| Introdução **1**

2| Fundamentação Teórica **5**
2.1 Chuvas Intensas 5
2.2 Equações de Intensidade-Duração-Frequência 5
2.3 Relações de Chuvas de Diferentes Durações 11
2.4 Análise de Séries de Chuva Máxima Diária 12
2.4.1 Distribuição Log-Normal 13
2.4.2 Distribuição de Gumbel (Máximos) 13
2.4.3 Posição de Plotagem 14
2.4.4 Testes de Hipóteses 14

3| Estado da Arte **18**

4| Objetivos **22**
4.1 Objetivo Geral 22
4.1.1 Objetivos Específicos 22

5| Metodologia **23**

6| Resultados e Discussões **28**
6.1 Dados Observados 28
6.1.1 Dados de Chuva 28
6.1.2 Análise Estatística de Gumbel e Log-Normal 32
6.1.3 Desagregação da Chuva Diária 35
6.1.4 Determinação dos Parâmetros IDF 38
6.1.5 Determinação Alternativa dos Parâmetros IDF 49
6.1.6 Comportamento das Chuvas Intensas no Município e Análise Comparativa com Outros Autores 54
6.2 Dados Projetados 57

7| **Conclusões e Proposta de Continuidade** 61

Referências 64

Apêndice A - Desagregação da precipitação para diferentes períodos de retorno nas estações pluviométricas 68

Apêndice B – Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas para as estações pluviométricas 70

Apêndice C – Ajuste ao Método dos Mínimos Quadrados 79

Lista de Figuras

Página

2 • Fundamentação Teórica

Figura 2.1: Ilustração de curva IDF obtida no distrito de Ananthapuramu, na Índia, entre os anos de 1966 e 2021, adaptado de Kumar *et al.* (2023). _____ 7

Figura 2.2: Interface do *software* Plúvio 2.1._____ 10

Figura 2.3: Interface do *software* GAM-IDF. _____ 10

Figura 2.4: Interface da plataforma Portal Projeções Climáticas no Brasil. _____ 17

5 • Metodologia

Figura 5.1: Localização das estações pluviométricas efetivamente selecionadas para o estudo pertencentes ao município de Rio Grande, adaptado de Vassão (2023).____ 25

Figura 5.2: Fluxograma das etapas metodológicas adotadas para a obtenção das curvas de Intensidade–Duração–Frequência (IDF) a partir de dados pluviométricos históricos e projetados. _____ 27

6 • Resultados e Discussões

Figura 6.1: Registros de precipitações diárias realizados pela Estação Granja Cerrito entre os anos de 1964 e 2024. _____ 29

Figura 6.2: Registros de precipitações diárias realizados pela Estação Granja Cerrito no ano de 2024. _____ 30

Figura 6.3: Registros de máximas precipitações diárias anuais de cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas. _____ 31

Figura 6.4: Ajuste curvas teóricas aos dados observados de cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas. _____ 33

Figura 6.5: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas. _____ 41

Figura 6.6: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG. _____ 43

Figura 6.7: Curvas IDF calculadas conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de

Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas. _____ 47

Figura 6.8: Curva IDF calculada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG. _____ 47

Figura 6.9: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme coeficientes de desagregação apresentados por CETESB (1986) e Beltrame *et al.* (1991) para um período de retorno (T) de 100 anos – Estação Rio Grande e FURG. _____ 48

Figura 6.10: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme intervalos de duração apresentados por CETESB (1986), que correspondem as curvas com linhas contínuas, e curvas IDF calculadas para os intervalos de duração de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos, que correspondem as curvas tracejadas: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas. _____ 51

Figura 6.11: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme intervalos de duração apresentados por CETESB (1986), que correspondem as curvas com linhas contínuas, e curvas IDF calculadas para os intervalos de duração de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos, que correspondem as curvas tracejadas: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas. _____ 53

Figura 6.12: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme coeficientes de desagregação apresentados por CETESB (1986) para um período de retorno (T) de 5 anos para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande. 54

Figura 6.13: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme as relações IDF propostas por diferentes autores para um período de retorno (T) de 5 anos. _____ 56

Figura 6.14: Comparativo entre curvas IDF propostas com base nos dados observados (O), representadas pelas linhas contínuas, e curvas IDF baseadas nos dados projetados (P), representadas pelas linhas tracejadas, para diferentes períodos de retorno (T). _ 58

Lista de Tabelas

Página

2 • Fundamentação Teórica

Tabela 2.1: Relações entre autores, estações e coeficientes de ajustamento específico para Rio Grande/RS. 8

Tabela 2.2: Coeficientes de desagregação de chuvas para diferentes relações de durações apresentados pela CETESB (1986). 11

Tabela 2.3: Coeficientes de desagregação de chuvas para diferentes relações de durações apresentados por Beltrame *et al.* (1991). 12

Tabela 2.4: Valores críticos da estatística D_N do teste KS de acordo com Naghettini e Pinto (2007). 15

5 • Metodologia

Tabela 5.1: Estações pluviométricas na cidade de Rio Grande/RS, de acordo com ANA (2025) e INMET (2025). 24

Tabela 5.2: Coordenadas geográficas das estações pluviométricas na cidade de Rio Grande/RS. 25

6 • Resultados e Discussões

Tabela 6.1: Verificação da consitência dos dados das estações pluviométricas. 32

Tabela 6.2: Diferença máxima do teste KS para cada modelo probabilístico e a respectiva estação. 34

Tabela 6.3: Precipitação diária em milímetros para diferentes períodos de retorno (T) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande. 35

Tabela 6.4: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Rio Grande e FURG. 36

Tabela 6.5: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG. 37

Tabela 6.6: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Rio Grande e FURG. 38

Tabela 6.7: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG. 42

Tabela 6.8: Soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e calculados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Rio Grande e FURG. _____ 44

Tabela 6.9: Soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e calculados, conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG. _____ 45

Tabela 6.10: Coeficientes de correlação entre os valores observados e calculados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) e por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG._____ 46

Tabela 6.11: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para intervalos de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos. _____ 50

Tabela 6.12: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para intervalos de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos. _____ 52

Tabela 6.13: Alteração no Período de Retorno (T) adotado devido a mudança climática para pequenas e grandes bacias de acordo com Paiva *et al.* (2024). _____ 60

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

a	Variável de acordo com a localização da estação.
A	Área de drenagem [km²].
b	Variável de acordo com a localização da estação.
c	Variável de acordo com a localização da estação.
i	Intensidade máxima da chuva [mm/h].
K	Coeficiente de escala – coeficiente de ajustamento específico.
m	Expoente da relação de tempo – coeficiente de ajustamento específico.
n	Expoente do período de retorno – coeficiente de ajustamento específico.
N	Tamanho da amostra.
P	Precipitação máxima [mm].
r	Coeficiente de correlação.
t	Tempo de duração da chuva [minutos ou horas].
T	Período de Retorno [anos].
x	Chuva máxima anual registrada [mm].
w	Variável aleatória contínua dentro do espaço amostral.
y	Chuva máxima anual registrada [mm].

Símbolos Gregos

α	Variável em função da duração da precipitação.
β	Variável em função da duração da precipitação.
γ	Variável de acordo com a localização da estação.
μ	Média aritmética.
σ	Desvio padrão.
ω	Parâmetro de posição.
ε	Parâmetro de escala.
η	Nível de significância.

Subscritos e Superscritos

D_N	Fator estatístico do modelo de Kolmogorov-Smirnov.
F_N	Função de distribuição teórica.
f_x	Frequência de chuva calculada.
F_w	Função de distribuição empírica.
F_y	Frequência de chuva calculada.
q_i	Posição de plotagem.
n_i	Posição na amostra ordenada.
P_T	Probabilidade de ocorrência de um evento hidrológico.

R^2 Coeficiente de determinação.

t_0 Constante de regularização do tempo – coeficiente de ajustamento específico.

Lista de Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo.
CMCC	Centro Euro-Mediterrânico sobre Mudanças Climáticas.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária.
FURG	Universidade Federal do Rio Grande.
GAM-IDF	*Genetic Algorithm Methodoloy for* IDF.
GFDL	*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*.
HEC-SSP	*Hydrologic Engineering Center - Statistical Software Package*.
IDF	Intensidade-Duração-Frequência.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IPAGRO	Instituto de Pesquisa, Serviços e Desenvolvimento Agropecuário de Rondônia.
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
MRI	*Meteorological Research Institute.*
RCP 8.5	*Representative Concentration Pathway* 8.5
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional.
SD-LS	*Stochastic Disaggregation – Log-Square*.
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.
SSP	*Shared Socioeconomic Pathways*.
ProjETA	Modelo Regional ETA (η).
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.
UFPel	Universidade Federal de Pelotas.
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
WMS	*Watershed Modeling System*.
WMO	Organização Mundial de Meteorologia.

1 Introdução

A água é um recurso vital para a preservação de todas as formas de vida do planeta Terra. Embora seja de extrema importância para os seres vivos, a água proveniente da ocorrência de chuvas, quando precipitada em excesso, pode trazer prejuízos econômicos e ameaçar a segurança da população. De acordo com Mesquita *et al.* (2009), o acontecimento de chuvas intensas pode causar inundações, erosão do solo, escorregamentos de terra e assoreamento de rios, provocando impactos na construção civil, na drenagem urbana, em barragens, em estradas e em operações agrícolas. Em vista disso, a realização de medições e quantificações das chuvas é de grande utilidade para a Engenharia, uma vez que os dados medidos de chuva podem ajudar na previsão do tempo, estabelecimento de sistema de alerta, mapeamento de áreas de risco e na construção de obras de infraestrutura, como barragens, pontes, estradas, portos, diques, entre outros (Kobiyama *et al.*, 2006).

A intensificação dos eventos de chuva extrema tem sido uma preocupação crescente em escala global, visto que fenômenos desse tipo vêm ocorrendo com maior frequência e intensidade em diferentes regiões, conforme afirma Marengo (2015). Esse aumento está associado a diversos fatores, incluindo mudanças climáticas e variações nos padrões atmosféricos, que potencializam a ocorrência de precipitações intensas e seus impactos. A exemplo disso, tem-se o caso ocorrido no Rio Grande do sul em maio de 2024, no qual fortes chuvas causaram enchentes e deslizamentos de terra e lama em uma área de aproximadamente 16.126 km^2, atingindo 484 municípios do estado, de acordo com um relatório técnico do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), vide Ipea (2024). Com isso, estima-se que pelo menos 876,2 mil pessoas em 420,1 mil domicílios tenham sido afetadas diretamente pela ocorrência extrema de chuvas no estado (Ipea, 2024). Em paralelo a isso, pesquisas científicas conduzidas pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), considerando projeções de mudanças climáticas, indicam o aumento na magnitude e na frequência de cheias no estado do Rio Grande do Sul (Brêda *et al.*, 2023). Sendo assim, entende-se que a situação vivenciada pelo Rio Grande do Sul evidencia a necessidade e a urgência da proposição de estudos de eventos hidrológicos, para previsão e modelagem de fenômenos adversos no estado.

Através de estudos hidrológicos com enfoque na caracterização da precipitação, é possível representar probabilisticamente a ocorrência e a intensidade da chuva em determinada localidade, na medida que são estabelecidas relações de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) das chuvas, conforme afirmam Naghettini e Pinto (2007). Tais estudos são baseados em dados históricos obtidos junto a estações meteorológicas, que estão espalhadas por todo o território nacional. No Brasil, estas estações são monitoradas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), que é coordenada pela Agência Nacional

de Águas e Saneamento Básico (ANA) e conta com a parceria de outras instituições federais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), além de entidades estaduais para realizar o monitoramento e disponibilizar informações de diferentes parâmetros de interesse hidrológico. As estações são aptas a mensurar o volume de chuvas, a evaporação da água, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas em estações pluviométricas, evaporimétricas, fluviométricas e sedimentométricas. Os registros realizados por estas entidades são disponibilizados para consulta pública e gratuita em seus respectivos *websites*.

A relação de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) da precipitação, também conhecida como equação de chuvas intensas, é determinada através de modelos matemáticos e estatísticos, considerando uma série histórica de dados pluviométricos locais. Segundo Collischonn e Dornelles (2015), o estudo da relação IDF permite associar a intensidade, a duração e a frequência com a qual a precipitação atinge determinada localidade, dada uma probabilidade de ocorrência. Portanto, conhecendo as características das chuvas intensas, como intensidade, duração e frequência, torna-se possível estimar com maior precisão as vazões de projeto de obras hidráulicas, como vertedores de barragens, galerias de águas pluviais, canais, bueiros, desvios de cursos d'águas, entre outras obras de sistemas de drenagem, conforme destacado amplamente na literatura (Villela, 1975; Gribbin, 2013; Stein *et al.,* 2021).

No Brasil, diversas cidades possuem suas próprias equações de chuvas intensas, inclusive o município de Rio Grande/RS. Pfafstetter (1957) publicou o primeiro estudo brasileiro sobre chuvas intensas no país, intitulado "Chuvas Intensas no Brasil", que incluiu o município rio-grandino. Posteriormente, Bazzano (2010) desenvolveu uma nova relação IDF para Rio Grande, com base em uma série histórica de dados referente a estação meteorológica Rio Grande – IPAGRO (código 3252022), localizada na Ilha dos Marinheiros. Em 2013, a Prefeitura Municipal do Rio Grande em conjunto com a empresa Engeplus, Engenharia e Consultoria, realizou um estudo visando o diagnóstico do saneamento básico na cidade. Neste projeto, foi realizada uma caracterização das condições hidrológicas do município e proposta uma nova relação IDF com base nos dados fornecidos pela estação Regatas (código 3252024), localizada na Vila Militar. No entanto, como os dados pluviométricos podem ser influenciados por fatores climáticos ao longo do tempo, é essencial que as relações de Intensidade – Duração – Frequência sejam constantemente atualizadas. Desta forma, Vassão (2023) propôs novas relações IDF para Rio Grande – RS, considerando um banco de dados mais longo e robusto, para seis estações pluviométricas localizadas no município.

Como as estações meteorológicas realizam registros pluviométricos diários, torna-se necessária a utilização de técnicas de desagregação de chuvas para obtenção de estimativas de precipitação em escalas temporais mais curtas. Nesse contexto, destaca-se o Método das Relações de Chuvas de Diferentes Durações, amplamente aplicado no Brasil, o qual possibilita relacionar a chuva máxima de 1 dia a chuvas com menores durações por meio de coeficientes de desagregação, conforme descrito por Abreu (2018). No país, os

coeficientes propostos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), no ano de 1986, ainda tem larga utilização. Enquanto na década de 90, Beltrame *et al.* (1991) propuseram coeficientes de desagregação específicos para o estado do Rio Grande do Sul.

Além da utilização de séries históricas observadas e registradas por estações pluviométricas, a análise de precipitações intensas em cenários futuros tem se tornado cada vez mais relevantes diante do contexto de mudanças climáticas globais. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), vide IPCC (2021), o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera tem intensificado alterações no sistema climático e regime de precipitação em diversas regiões do planeta. Entre os principais impactos observados, destaca-se o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, que tendem a comprometer significativamente a segurança hídrica e a infraestrutura urbana. No Brasil, com o objetivo de disponibilizar informações climáticas futuras de forma acessível e aplicável a estudos técnicos, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu o Portal Projeções Climáticas no Brasil, uma plataforma digital que reúne dados simulados por modelos climáticos globais e regionalizados para diferentes variáveis meteorológicas e cenários de emissão de gases de efeito estufa. Essa ferramenta permite a consulta de projeções de precipitação, temperatura, umidade, radiação e outras variáveis meteorológicas em diferentes horizontes temporais, possibilitando a incorporação de cenários pósteros em estudos hidrológicos e no planejamento de obras de infraestrutura. Dessa forma, a utilização dessas projeções permite a comparação entre os dados pluviométricos futuros simulados e os registros históricos observados, possibilitando verificar se há, de fato, uma tendência de intensificação das chuvas no município. Essa análise contribui para a identificação de possíveis alterações no comportamento das precipitações extremas e reforça a necessidade de atualização das relações IDF frente aos cenários de variabilidade e mudança climática.

Diante do exposto neste capítulo introdutório, evidencia-se a relevância da renovação das relações de Intensidade – Duração – Frequência para o município de Rio Grande – RS, considerando a disponibilidade de séries históricas mais extensas e recentes de dados pluviométricos, que não estavam acessíveis em estudos anteriores, como Pfafstetter (1957), Bazzano (2010) e Prefeitura Municipal do Rio Grande (2013). Nesse sentido, uma das principais contribuições desta dissertação consiste na proposição e atualização das relações IDF para o município, desenvolvidas a partir da análise de aproximadamente cinco décadas de dados observados, incluindo os eventos de chuva extrema ocorridos nos últimos anos em Rio Grande. O conjunto de dados é composto por medições de múltiplas estações pluviométricas, o que permite uma representação mais robusta e espacialmente abrangente do regime de chuvas intensas local. Adicionalmente, o estudo contempla o ajuste das relações IDF para diferentes intervalos de duração, promovendo maior nível de refinamento em comparação a abordagens tradicionalmente empregadas, como utilizado por Vassão (2023). Além disso, tem-se que a desagregação da chuva será realizada através dos coeficientes de Beltrame *et al.* (1991) e CETESB (1986), sendo os

resultados analisados estatisticamente, de maneira a avaliar qual metologia gera relações IDF mais representativas quanto ao observado através dos dados históricos registrados pelas estações meteorológicas. A prática de obter relações IDF com tamanho refinamento não é comum dentro da literatura hidrológica e representa uma forte contribuição para o estado-da-arte e para a cidade de Rio Grande. Por fim, destaca-se a incorporação de dados provenientes de modelos climáticos futuros, permitindo a construção de curvas IDF projetadas e a análise de possíveis tendências nas intensidades de chuva, o que amplia a aplicabilidade dos resultados no contexto de planejamento urbano e dimensionamento de obras hidráulicas.

2| Fundamentação Teórica

2.1 Chuvas Intensas

A precipitação é o processo pelo qual a água, tanto na forma líquida quanto sólida, cai da atmosfera em direção à superfície terrestre. No Brasil, o tipo mais comum de precipitação é a chuva, mas também existem outras formas, como granizo, saraiva, neve e nevoeiro, conforme afirma Villela (1975). A chuva é caracterizada por sua altura pluviométrica, intensidade, duração e frequência, sendo registrada por aparelhos denominados pluviômetros e pluviógrafos, de acordo com Collischonn e Tassi (2008). A quantidade e o padrão de chuvas variam amplamente de acordo com a região geográfica do país, além de demonstrarem diferenças ao longo do tempo. O estudo da precipitação é de grande importância em várias áreas, como hidrologia, meteorologia, agricultura, gestão de recursos hídricos e planejamento urbano, pois a quantidade e a distribuição da precipitação afetam diretamente a disponibilidade de água, o clima local, os ecossistemas e as atividades humanas.

No campo da hidrologia, tem-se interesse principalmente na ocorrência de chuvas intensas, também conhecidas como precipitações máximas. Estas, de acordo com Silva *et al.* (2003), apresentam grande lâmina precipitada, durante um pequeno intervalo de tempo. Em vista disso, a ocorrência das chuvas intensas gera impactos significativos nos sistemas hídricos de uma localidade e tem grande relevância no estudo hidrológico, à medida que pode provocar altas taxas de escoamento superficial, erosão do solo, assoreamento de rios e deslizamentos de terra, como explicitado por Farias *et al.* (2013). Em áreas urbanas, por exemplo, o acontecimento de grandes volumes de precipitação pode resultar em um rápido aumento do escoamento superficial, devido aos crescentes índices de superfícies impermeabilizadas e diminuição das taxas de infiltração no solo. Com isso, tem-se a possibilidade de inundações e problemas de drenagem, que afetam a infraestrutura das cidades e a segurança dos moradores. Além disso, o estudo das chuvas intensas também é útil para a avaliação de impactos ambientais e para a determinação de medidas de mitigação para diferentes danos ambientais, como alteração de ecossistemas aquáticos, modificação do habitat de espécies marinhas e mobilização de sedimentos, segundo Pimentel (2015).

2.2 Equações de Intensidade-Duração-Frequência

Conforme explicitado no item anterior, a precipitação pode ser caracterizada de acordo com os seguintes conceitos: altura pluviométrica, intensidade, duração e frequência. De acordo com Villela (1975), a altura pluviométrica é medida por meio da altura da lâmina de água de chuva acumulada sobre uma superfície plana, horizontal e

impermeável, sendo geralmente expressa em milímetros. Um milímetro de chuva corresponde a um litro de água distribuído em um metro quadrado. A duração da precipitação, por outro lado, é "[...] o período de tempo durante o qual um evento de chuva ocorre, normalmente é medida em minutos ou horas" (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015, p.57). Já a intensidade, é definida como a altura precipitada dividida pela duração da chuva, sendo expressa em milímetros por hora no Brasil. Em consonância com o afirmado pelos mesmos autores, se considera também o conceito de frequência, que representa a quantidade de vezes que determinado evento crítico ocorre.

De acordo com Pimentel (2015), a série histórica de precipitações pode ser analisada e classificada com base na duração dos eventos, permitindo determinar a frequência com que uma determinada quantidade de chuva se repete em um período específico. Quanto mais frequente for a repetição de um evento, maior será a probabilidade de sua ocorrência. Por outro lado, eventos que se repetem com menor frequência são considerados mais raros e, portanto, apresentam menor probabilidade de ocorrência. Chuvas intensas, caracterizadas por grandes volumes de precipitação em curtos períodos, geralmente possuem menor probabilidade associada. Entretanto, para estudos hidrológicos, a terminologia de "probabilidade associada" é menos utilizada para descrever um evento, sendo comum empregar o termo "período de recorrência" ou "período de retorno". Sobre este tópico, Bertoni e Tucci (2002, p.182) afirmam que:

> O período de recorrência é interpretado como o número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação analisada seja igualada ou superada. O seu inverso é a probabilidade de um fenômeno igual ou superior ao analisado, se apresentar em um ano qualquer (probabilidade anual).

O período de retorno (T) é dado por:

$$T = \frac{1}{P_T} \tag{2.1}$$

onde T representa o período de retorno, em anos, e P_T é a probabilidade de ocorrência de um evento hidrológico. Assim, após apresentar conceitualmente cada um dos termos que caracterizam as precipitações, é possível introduzir a equação de Intensidade – Duração – Frequência (IDF). A relação IDF é expressa por:

$$i = \frac{KT^m}{(t + t_0)^n} \tag{2.2}$$

onde i é a intensidade máxima da chuva, em mm/h; t é o tempo de duração da chuva, em minutos; $m, n, K\ e\ t_0$ são coeficientes de ajustamento específico para cada localidade. A Figura 2.1 apresenta uma curva IDF obtida a partir da análise dos dados da estação de pesquisa agrícola do distrito de Ananthapuramu, localizado na região semiárida

do sul da Índia, com registros feitos entre os anos de 1966 e 2021, totalizando 56 anos de dados.

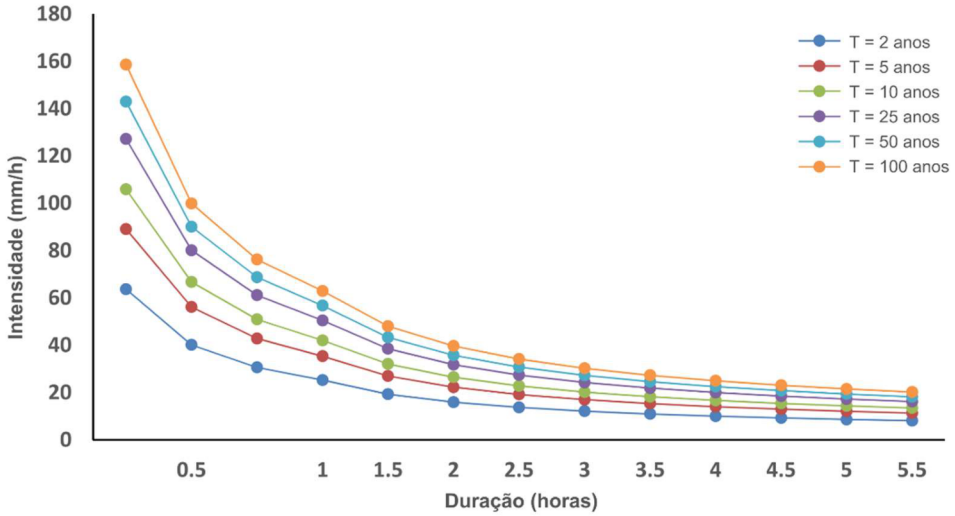


Figura 2.1: Ilustração de curva IDF obtida no distrito de Ananthapuramu, na Índia, entre os anos de 1966 e 2021, adaptado de Kumar *et al.* (2023).

Através da análise destas curvas, conforme Figura 2.1, percebe-se que para qualquer período de retorno determinado, a intensidade da chuva decresce quanto maior for o intervalo de duração considerado.

A obra "Chuvas Intensas no Brasil", de autoria do Engenheiro Otto Pfafstetter (1957), foi o primeiro estudo sobre o fenômeno das precipitações máximas no Brasil. Esta análise foi realizada para 98 (noventa e oito) estações meteorológicas espalhadas pelo país, incluindo estações estabelecidas em cidades da região sul, como no munícipio de Rio Grande – RS. Na época, os dados pluviométricos disponíveis foram compilados e equações de chuvas intensas foram estabelecidas para diferentes áreas e cidades no país. A fórmula empírica apresentada por Pfafstetter (1957) está representada analiticamente por:

$$P = T^{\alpha+\frac{\beta}{T^{\gamma}}}.[at + b.\log(1 + ct)] \qquad (2.3)$$

onde P representa a precipitação máxima, em mm; T o período de retorno, em anos; t a duração da precipitação, em horas; α e β valores que dependem da duração da precipitação; γ, a, b, e c são constantes para cada estação.

Na cidade de Rio Grande, o pluviógrafo cujos dados foram analisados para o estudo está localizado no bairro Centro e pertence à estação pluviométrica denominada

Barra do Rio Grande (código 3252002). Para a cidade de Rio Grande, a relação definida pelo estudo de Pfafstetter (1957) está demonstrada por:

$$P = T^{\alpha+\frac{\beta}{T^{0,25}}}(0{,}3t + 24.log(1 + 20t)\, t) \quad (2.4)$$

Por um longo período as relações propostas por Pfafstetter (1957) foram utilizadas no dimensionamento de obras hidráulicas, bem como no planejamento e na gestão dos recursos hídricos. No entanto, à medida que as séries históricas foram expandidas e novos pluviômetros foram instalados, as relações IDF foram atualizadas, especialmente nas grandes áreas urbanas. A Tabela 2.1 elenca os coeficientes de ajustamento específico (m, n, K e t_0) de relações IDF propostas por diferentes autores e por meio da utilização de *softwares* para a cidade de Rio Grande, bem como as respectivas estações e seus códigos de identificação. Os coeficientes de ajustamento específico dizem respeito à equação (2.2).

Tabela 2.1: Relações entre autores, estações e coeficientes de ajustamento específico para Rio Grande/RS.

Autor/ *software*	Estação	Código	Coeficientes de ajustamento específico			
			m	n	K	t_0
Bazzano (2010)	Rio Grande (IPAGRO)	3252022	0,28	0,81	44,29	0,52
Prefeitura Municipal do Rio Grande (2013)	Regatas	3252024	0,143	0,774	1.368,2	14,16
Vassão (2023)	Barra do Rio Grande	3252002	0,156	0,724	814,268	9,791
Vassão (2023)	Granja Cerrito	3252006	0,149	0,724	935,678	9,789
Vassão (2023)	Granja Santa Maria	3252008	0,153	0,724	947,364	9,787
Vassão (2023)	Regatas	3252024	0,193	0,724	798,136	9,791
Vassão (2023)	Rio Grande e FURG	3252020/ A802	0,169	0,724	822,0	9,784
Plúvio 2.1	Não informado	Não informado	0,23	0,74	774,14	6,9
GAM-IDF	Rio Grande	3252020	0,246	0,707	677,671	9,232

Para o munícipio de Rio Grande, no ano de 2010, foi apresentada uma nova relação de chuvas intensas por Bazzano (2010), que utilizou medições realizadas no intervalo de 1957 a 1981. Para tal, foram analisados dados pluviométricos de uma estação meteorológica localizada na Ilha dos Marinheiros (código 3252022), denominada estação Rio Grande (IPAGRO). As medições pluviométricas foram cedidas pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO). Os coeficientes da equação IDF obtida por Bazzano (2010) estão representados na Tabela 2.1 e, diferentemente das demais equações, a duração da chuva deve ser considerada em horas. No ano de 2013, foi realizado um estudo visando o diagnóstico do saneamento básico na cidade, sendo uma parceria entre a Prefeitura Municipal do Rio Grande e a empresa Engeplus, Engenharia e Consultoria. Neste projeto, foi realizada uma caracterização das condições hidrológicas do município, considerando fatores como o clima e a pluviografia da região. Com isso, foi equacionada uma nova relação IDF e os coeficientes estão mostrados na Tabela 2.1. A estação pluviométrica cujas séries de dados foram utilizadas para o desenvolvimento da equação IDF está localizada na Vila Militar de Rio Grande (código 3252024), sendo denominada como Regatas. Em 2023, Vassão (2023) propôs novas equações IDF para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município rio-grandino, apresentadas na Tabela 2.1. Dentre as estações analisadas, duas estão localizadas na zona rural de Rio Grande e as demais se localizam na zona urbana do município. As estações pluviométricas rurais são denominadas Granja Cerrito (código 3252006) e Granja Santa Maria (3252008) e têm períodos de medições correspondentes aos anos de 1964 a 2022 e 1965 a 2022, respectivamente. Já na zona urbana, estão localizadas as estações Barra do Rio Grande (código 3252002), Regatas (código 3252024) e Rio Grande e FURG (código 3252020/A802). Os intervalos de medições das estações urbanas consideradas no estudo de Vassão (2023) corresponderam aos anos de 1939 a 1970 para a estação Barra do Rio Grande, 1985 a 2022 para a estação Regatas e 1998 a 2022 para a estação Rio Grande e FURG.

As relações IDF podem, alternativamente, ser obtidas por meio da utilização de *softwares* computacionais, como o Plúvio 2.1 e o GAM-IDF. O programa Plúvio 2.1 foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e se baseia na espacialização dos dados de chuvas intensas, conforme afirmam Cecílio e Pruski (2003, apud FIORIO *et al*., 2012). Segundo os autores, o erro médio percentual obtido nos testes foi de 19,37%, um valor considerado aceitável quando se trata de chuvas intensas. Assim, é necessário informar a cidade desejada ao programa e ele fornece os coeficientes de ajustamento (m, n, K, t_0) para o local especificado. Todavia, não é possível que o usuário consulte informações no programa, como as estações de medição utilizadas ou as séries de dados empregados. A Figura 2.2 ilustra a interface do *software* Plúvio 2.1. Os coeficientes da relação IDF gerados através do Plúvio 2.1 estão representados na Tabela 2.1.

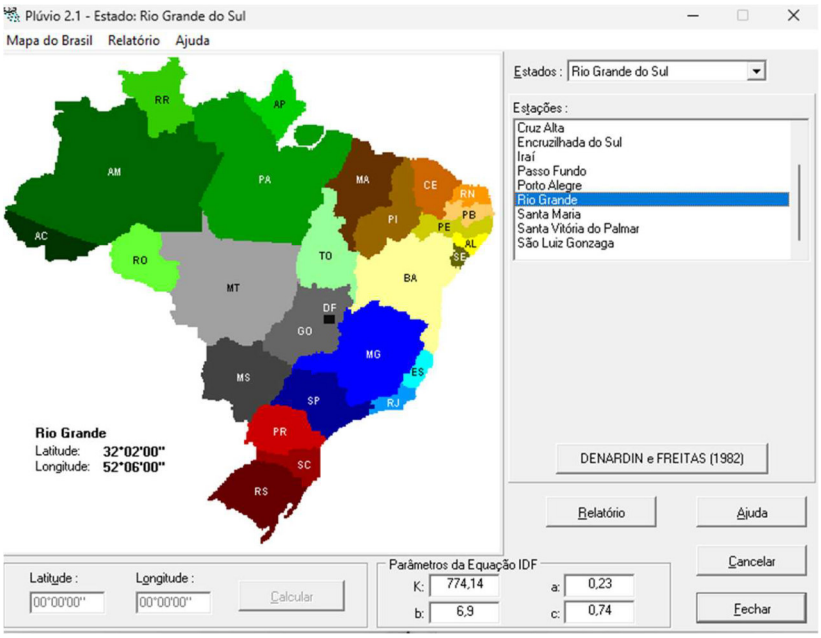


Figura 2.2: Interface do *software* Plúvio 2.1.

Outro recurso existente é o *Genetic Algorithm Methodoloy* for IDF (GAM-IDF), criado pelo Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). O *software* oferece ao usuário a capacidade de importar dados de chuva diretamente da ferramenta HidroWeb, disponível no *site* da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em formato .CSV. Além disso, também permite a importação de séries de precipitação máxima diária anual previamente compiladas pelo usuário, em formatos .CSV, .TXT e .XLS. A interface do GAM-IDF pode ser observada na Figura 4.3. Os coeficientes da relação IDF gerados por meio da aplicação do GAM-IDF para a estação Rio Grande (código 3252020) estão descritos na Tabela 2.1.



Figura 2.3: Interface do *software* GAM-IDF.

2.3 Relações de Chuvas de Diferentes Durações

Para a modelagem da curva de Intensidade – Duração – Frequência, é realizada uma análise probabilística dos dados pluviométricos de precipitação máxima diária anual, registrados em cada estação. Pode-se, contudo, fazer a avaliação das chuvas de menores durações a partir destas precipitações máximas de um dia empregando métodos de desagregação de chuvas, conforme afirma Júnior (2022). Dentre os meios utilizados para esta finalidade, o Método das Relações de Chuvas se destaca por sua simplicidade, sendo amplamente utilizado no Brasil. Sobre o Método da Relação de Chuvas, Bertoni e Tucci (2002, p. 207) afirmam:

> O Método da Relação de Chuvas para diferentes durações consiste na desagregação de chuvas máximas de 1 dia em chuvas para diversas durações menores, variando entre 5 minutos e 24 horas. Baseia-se na hipótese que existe a tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações se manterem paralelas entre si e há similaridade nas relações entre precipitações máximas de diferentes durações em diversos locais.

Dessa forma, são aplicados Coeficientes de Desagregação de chuvas intensas, capazes de relacionar diferentes durações de precipitações. No Brasil, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) desenvolveu, no ano de 1986, uma série de constantes de desagregação. Estas, permanecem em uso até os dias atuais e estão descritas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Coeficientes de desagregação de chuvas para diferentes relações de durações apresentados pela CETESB (1986).

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

No início da década de 1990, foram propostos coeficientes de desagregação por Beltrame *et al.* (1991) específicos para o estado do Rio Grande do Sul. Estes, estão elencados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Coeficientes de desagregação de chuvas para diferentes relações de durações apresentados por Beltrame *et al.* (1991).

Relação entre as alturas pluviométricas	Coeficiente de desagregação
1h / 24h	0,42
2h / 24h	0,52
4h / 24h	0,63
6h / 24h	0,72
24h / 1 dia	1,13

Recentemente, Presotto (2020) realizou uma atualização dos coeficientes de desagregação propostos por Beltrame *et al.* (1991) para diversas cidades Rio Grande do Sul, como Dom Pedrito, Pedro Osório e Camaquã. Diferentemente das constantes apresentadas por Beltrame et al. (1991), o trabalho de Presotto (2020) não abrange todo o estado do Rio Grande do Sul, tampouco inclui a cidade de Rio Grande.

2.4 Análise de Séries de Chuva Máxima Diária

As distribuições de probabilidades descrevem matemática e estatisticamente a probabilidade de ocorrência de diferentes eventos ou valores em um determinado conjunto de dados. Existem várias distribuições de probabilidades comumente utilizadas, que são segmentadas pelo tipo de variável analisada, podendo ser discretas ou contínuas. A diferença fundamental entre variáveis contínuas e discretas está na natureza dos valores possíveis. Variáveis contínuas podem assumir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo, enquanto variáveis discretas são restritas a um conjunto finito ou contável de valores distintos.

Para estudos hidrológicos, têm-se interesse especialmente nas variáveis contínuas e suas distribuições de probabilidade, que foram estudadas no trabalho de Naghettini e Pinto (2007). Dentre os modelos de distribuições de probabilidade de variáveis contínuas existentes, podem ser citados: Distribuição Normal ou de Gauss; Distribuição Log-Normal; Distribuição Exponencial; Distribuição Gama; Distribuição Beta; Distribuição Pearson (Pearson Tipo III e Log-Pearson Tipo III); Distribuição de Extremos (Fréchet, Generalizada de Valores Extremos, Weibull e Gumbel). A seguir serão apresentadas duas distribuições de probabilidades frequentemente utilizadas no estudo de chuvas intensas.

2.4.1 Distribuição Log-Normal

A função densidade da distribuição de uma variável log-normal x, segundo Naghettini e Pinto (2007), é representada por:

$$f_x(x) = \frac{1}{x\sigma_{ln(x)}\sqrt{2\pi}} exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{ln(x) - \mu_{ln(x)}}{\sigma_{ln(x)}}\right)\right]\right\} \quad (2.5)$$
$$para\ x > 0$$

onde $f_x(x)$ representa a frequência de chuva calculada, μ é a média aritmética, σ o desvio padrão e x a chuva máxima anual registrada. As equações a seguir representam, respectivamente, o valor esperado e a variância de uma variável Log-Normal.

$$E[X] = \mu_x = exp\left[\mu_{ln(X)} + \frac{\sigma^2_{ln(X)}}{2}\right] \quad (2.6)$$

$$Var[X] = \sigma_x^2 = \mu_x^2\left[exp\left(\sigma^2_{ln(X)}\right) - 1\right] \quad (2.7)$$

2.4.2 Distribuição de Gumbel (Máximos)

A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel, de acordo com Naghettini e Pinto (2007), é dada por:

$$F_y(y) = exp\left[-exp\left(-\frac{y - \omega}{\varepsilon}\right)\right] \quad (2.8)$$
$$para -\infty < y < \infty, -\infty < \omega < \infty, \varepsilon > 0$$

onde $F_y\ (y)$ representa a frequência de chuva calculada, y a chuva máxima medida, ε o parâmetro de escala e ω o parâmetro de posição. As equações a seguir expressam, respectivamente, o valor esperado e a variância.

$$E[Y] = \omega + 0{,}5772\varepsilon \quad (2.9)$$

$$Var[Y] = \frac{\pi^2\varepsilon^2}{6} \quad (2.10)$$

Conforme Naghettini e Pinto (2007), a função inversa da distribuição de Gumbel, ou função de quantis, é dada por:

$$y(T) = \omega - \varepsilon\, ln\left[-ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.11)$$

onde $y(T)$ representa a função inversa da distribuição de Gumbel e T denota o período de retorno em anos.

2.4.3 Posição de Plotagem

Segundo Naghettini e Pinto (2007), na construção de um diagrama de frequências acumuladas, é necessário estimar a probabilidade de não superação de determinado valor para um conjunto de dados. No entanto, tal suposição é precária, pois implica que a probabilidade de uma variável produzir um valor maior do que o máximo amostral é nula. Em vista disso, para evitar que ocorram erros, foram propostas diversas fórmulas alternativas na literatura, conhecidas como fórmulas de "posição de plotagem". Dentre elas estão as relações de Weibull, Gringorten, Blom, Hazen e Cunnane.

Considerando probabilidades de excedência não enviesadas para todas as distribuições, têm-se interesse principalmente na fórmula de Weibull. Esta, é descrita por:

$$q_i = \frac{n_i}{N + n_i} \tag{2.12}$$

onde q_i é a posição de plotagem, n_i é posição na amostra ordenada e N é o tamanho da amostra.

2.4.4 Testes de Hipóteses

Os testes de hipóteses são procedimentos estatísticos, úteis na tomada de decisões que concernem à afirmação ou suposição feita sobre uma população com base em uma amostra de dados, conforme afirmam Naghettini e Pinto (2007). Existem testes de hipóteses para diferentes finalidades, tais como: testes paramétricos, utilizados para populações normais; testes não paramétricos, aplicados quando as suposições dos testes paramétricos não são atendidas ou quando se deseja maior flexibilidade quanto à distribuição dos dados; testes de aderência, empregados na detecção de pontos amostrais atípicos, sendo amplamente utilizados na análise de frequência de variáveis hidrológicas. Em vista disso, para o estudo aqui proposto, os testes de aderência têm grande relevância. Dentre os existentes, Naghettini e Pinto (2007) destacam os testes do Qui-Quadrado, de Kolmogorov-Smirnov, de Anderson-Darling e de Filliben, que podem ser aplicados à distribuição Gumbel.

O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) é baseado na diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas. Dessa forma, não se aplica a variáveis aleatórias discretas. A estatística do teste KS é dada por:

$$D_N = \sup_{-\infty<x<\infty} |F_N(w) - F_w(w)| \tag{2.13}$$

onde D_N é o fator estatístico KS, w representa uma variável aleatória contínua dentro do espaço amostral, $F_w(w)$ corresponde a distribuição empírica e $F_N(w)$ é a distribuição teórica. Portanto, D_N corresponde à maior diferença entre as probabilidades empírica e teórica. Para amostras de tamanhos superior a 40, têm-se as relações propostas por:

$$D_N = \frac{1{,}3581}{\sqrt{N}} \quad \eta = 0{,}05 \tag{2.14}$$

$$D_N = \frac{1{,}6276}{\sqrt{N}} \quad \eta = 0{,}01 \tag{2.15}$$

onde D_N é o fator estatístico KS, N é o tamanho da amostra e η representa o nível de significância. Para amostras de tamanhos inferiores a 40, D_N deve ser obtido através da Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Valores críticos da estatística D_N do teste KS de acordo com Naghettini e Pinto (2007).

N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$	N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$
10	0,369	0,409	0,457	0,489	26	0,233	0,259	0,29	0,311
11	0,352	0,391	0,437	0,468	27	0,229	0,254	0,284	0,305
12	0,338	0,375	0,419	0,449	28	0,225	0,250	0,279	0,300
13	0,325	0,361	0,404	0,432	29	0,221	0,246	0,275	0,295
14	0,314	0,349	0,390	0,418	30	0,218	0,242	0,270	0,290
15	0,304	0,338	0,377	0,404	31	0,214	0,238	0,266	0,285
16	0,295	0,327	0,366	0,392	32	0,211	0,234	0,262	0,281
17	0,286	0,318	0,355	0,381	33	0,208	0,231	0,258	0,277
18	0,279	0,309	0,346	0,371	34	0,205	0,227	0,254	0,273
19	0,271	0,301	0,337	0,361	35	0,202	0,224	0,251	0,269
20	0,265	0,294	0,329	0,352	36	0,199	0,221	0,247	0,265
21	0,259	0,287	0,321	0,344	37	0,196	0,218	0,244	0,262
22	0,253	0,281	0,314	0,337	38	0,194	0,215	0,241	0,258
23	0,247	0,275	0,307	0,330	39	0,191	0,213	0,238	0,255
24	0,242	0,269	0,301	0,323	40	0,189	0,210	0,235	0,252
25	0,238	0,264	0,295	0,317	>40	$\frac{1{,}22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1{,}36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1{,}52}{\sqrt{N}}$	$\frac{1{,}63}{\sqrt{N}}$

2.5 Projeções Climáticas no Brasil

A análise de precipitações intensas com base em registros históricos observados, quando aplicadas metodologias tradicionais, permite não apenas caracterizar o comportamento atual e passado do regime pluviométrico de uma determinada região, mas também estimar a intensidade das precipitações de eventos futuros por meio das relações IDF, utilizando diferentes períodos de retorno. Essas equações são amplamente empregadas no dimensionamento de obras hidráulicas justamente por possibilitarem a previsão probabilística de chuvas de projeto associadas a horizontes futuros de ocorrência. No entanto, tais estimativas partem do pressuposto de estacionaridade das séries hidrológicas, ou seja, assumem que o comportamento estatístico das precipitações permanece inalterado ao longo do tempo. Diante do contexto atual de variabilidade e mudanças climáticas, essa hipótese pode não representar adequadamente a realidade futura, tornando relevante a incorporação de projeções climáticas nos estudos hidrológicos, de modo a avaliar possíveis alterações na frequência e intensidade das chuvas extremas e seus impactos nos sistemas de drenagem e obras de cunho hidráulico.

Conforme apontado por um relatório da Organização Mundial de Meteorologia, vide WMO (2023), o aquecimento global provocado pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera tem promovido mudanças significativas no sistema climático terrestre, alterando padrões de temperatura, circulação atmosférica e distribuição espacial e temporal das precipitações. Entre os principais efeitos observados, destaca-se a intensificação de eventos extremos, como longos períodos de seca, ondas de calor e chuvas intensas, fenômenos que tendem a ocorrer com maior frequência e severidade em diversas regiões do planeta. No estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, pesquisas desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) apontam tendência de aumento na magnitude e na frequência de cheias, associadas às alterações no regime de precipitação e aos efeitos das mudanças climáticas (Brêda *et al*., 2023).

Em vista disso, a incorporação de cenários climáticos futuros em estudos hidrológicos tem crescido dentro da literatura e vem sendo viabilizada pelo avanço de ferramentas computacionais e bancos de dados especializados. Entre essas iniciativas, destaca-se o Portal Projeções Climáticas no Brasil, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que disponibiliza séries simuladas de variáveis meteorológicas obtidas a partir de modelos climáticos globais e regionalizados. A plataforma permite a análise de parâmetros como precipitação, temperatura, umidade, intensidade do vento e diversas variáveis meteorológicas sob diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa e distintos horizontes temporais. As projeções disponibilizadas no portal são baseadas em modelos climáticos forçantes amplamente utilizados na literatura, como HadGEM2-ES e CanESM2, os quais simulam o comportamento futuro do clima a partir de diferentes cenários de emissão, conforme mencionado previamente. Dentre esses cenários, evidencia-se o RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway* 8.5), caracterizado por altas emissões de gases de efeito estufa e frequentemente adotado em estudos de engenharia

por representar uma condição mais crítica e conservadora quanto à ocorrência de eventos extemos. A Figura 2.4 ilustra a interface da plataforma Portal Projeções Climáticas no Brasil do INPE, configurada para a cidade de Rio Grande.

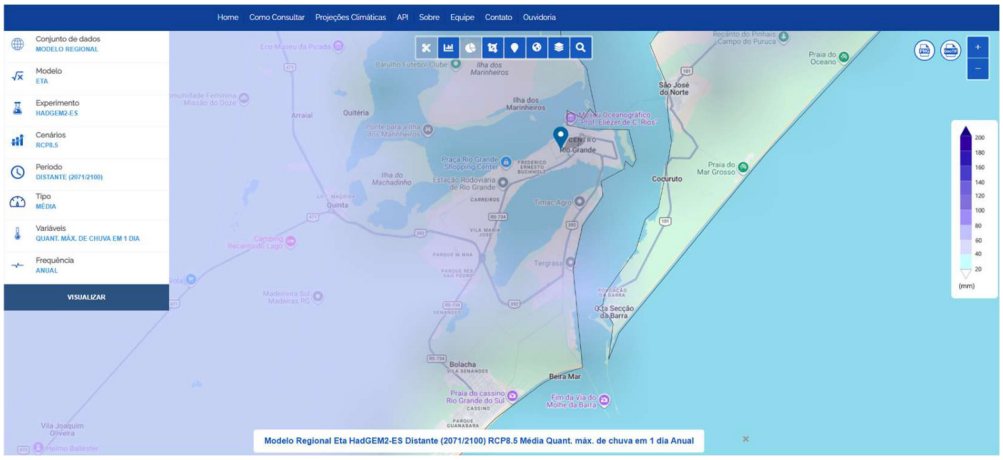


Figura 2.4: Interface da plataforma Portal Projeções Climáticas no Brasil.

3| Estado da Arte

Conforme afirmado previamente, a análise de precipitações, a proposição de curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e o estudo entre precipitações intensas de diferentes durações tem grande relevância para diferentes áreas do conhecimento, como a meteorologia, agricultura, gestão de recursos hídricos, planejamento urbano e, especialmente, a hidrologia. A compreensão das relações IDF auxilia na previsão de eventos extremos de precipitação e no desenvolvimento de medidas de adaptação, em face de cenários climáticos que estão em mudança constante. Em vista disso, nos últimos anos, pesquisadores de diferentes partes do mundo têm desenvolvido estudos e metodologias que objetivam o refinamento da estimativa de precipitações intensas para diferentes intervalos de tempo. O capítulo apresentado a seguir aborda trabalhos propostos nesta área, destacando as metodologias adotadas, as teorias aplicadas e as contribuições resultantes para o avanço do conhecimento sobre o comportamento das chuvas intensas.

Back (2008) ajustou equações IDF que relacionam as precipitações de diferentes durações aos dados de uma estação meteorológica localizada na cidade de Urussanga/SC, comparando os resultados com as estimativas das chuvas obtidas a partir da chuva máxima com duração de 1 dia. Para isso, aplicou a distribuição de Gumbel-Chow para estimar as séries de chuvas máximas anuais, utilizou o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a aderência dos dados ao modelo e adotou a equação de Bell (1969) para estimar a relação entre a chuva de determinada duração (em minutos) e o período de retorno (em anos). O autor concluiu que as relações entre precipitações intensas de duração entre 10 e 120 min obtidas para Urussanga, apresentam diferenças inferiores a 10% das relações obtidas por Bell (1969) e por outros autores comparados.

Back *et al.* (2011) propuseram relações IDF para estações pluviométricas de treze cidades do estado de Santa Catarina, considerando suas respectivas séries de precipitações máximas anuais. Com base nessas séries, utilizando a distribuição Gumbel-Chow, estimaram-se as chuvas máximas para durações entre 5 e 1440 minutos, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos. A aderência dos dados ao modelo Gumbel-Chow foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 5%. Para cada estação pluviométrica, duas equações IDF foram ajustadas: uma para durações de 5 a 120 minutos e outra para durações de 120 a 1440 minutos. Os resultados indicam uma alta variabilidade na intensidade máxima dos eventos de chuva entre as estações estudadas. Os maiores valores dos coeficientes de variação nas séries de chuvas máximas anuais foram observados para durações superiores a 600 minutos nas estações da região litorânea de Santa Catarina.

Abreu *et al.* (2022) investigaram diferentes métodos para realizar a desagregação da precipitação, com o objetivo de obter curvas de Intensidade-Duração-Frequência para 116 pluviômetros em Minas Gerais, Brasil. O método de desagregação de precipitação diária, utilizando coeficientes de desagregação, é o mais utilizado no Brasil, apesar da falta

de avaliação de desempenho. Em vista disso, os autores utilizaram regressão linear e o teste de identidade de modelo para comparar a intensidade da precipitação medida pelas estações pluviométricas com diversos modelos de desagregação. O resultado apontou que as relações IDF desagregadas apresentaram uma tendência de subestimação da intensidade máxima de precipitação, especialmente em períodos de retorno maiores, o que pode ser considerado menos prejudicial, já que os períodos de retorno maiores estão associados a projetos com maior segurança. Como resultado prático, se obteve uma metodologia simples e eficaz para desagregar a precipitação diária em uma resolução subdiária.

Hussein e Kasim (2024) desenvolveram equações empíricas para a intensidade da chuva na cidade de Kirkuk, no Iraque, e produziram as respectivas curvas IDF. Para tal, foram adotados três métodos de análise de frequência, tidos como os mais utilizados dentro do estado da arte, sendo as distribuições de probabilidade Log-Normal, Log-Pearson tipo III e de valores extremos de Gumbel. Os dados analisados foram registrados entre os anos de 1981 e 2023, sendo referentes a uma estação de medições localizada na cidade de Kirkuk, com a finalidade de fornecer um conjunto de dados representativo para períodos de retorno que variaram entre 2 e 100 anos. Os resultados do teste de aderência indicam que a distribuição Log-Normal supera estatisticamente outros modelos de distribuição, apresentando o melhor ajuste para modelar a relação entre a precipitação máxima anual e a duração da chuva na estação pluviométrica de Kirkuk.

Ferraz *et al*. (2024) analisaram uma série temporal de dados, de 2006 a 2019, proveniente de uma estação meteorológica localizada na província de Villa Clara, Cuba, com o objetivo de desenvolver curvas IDF. A série histórica foi ajustada à distribuição de probabilidade Generalizada de Pareto e a uma equação paramétrica do modelo de Montana, sendo então traçadas as curvas para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos. O modelo de Montana obteve coeficientes de correlação superiores a 0,90 em comparação com os outros métodos utilizados.

Kumar *et al*. (2023) propuseram curvas IDF para o distrito de Ananthapuramu, na região semiárida do sul da Índia, analisando as intensidades máximas da precipitação, suas durações correspondentes e a frequência de ocorrência dos eventos usando o método de distribuição de Gumbel. Os autores concluíram que as durações de precipitação mais frequentes na área de estudo são 15, 30 e 45 minutos, representando 22,4%, 28,2% e 32,4%, respectivamente, da precipitação total diária. Enquanto a porcentagem da precipitação diária durante eventos de chuva intensa de 1, 2 e 3 horas foi de 34,9%, 44,5% e 50,9%, respectivamente. Aplicando essas relações, é afirmado que a precipitação de curta duração pode ser rapidamente estimada.

Kawara e Elsebaie (2022) desenvolveram curvas IDF para a área de Yalamlam, na Arábia Saudita. As curvas IDF foram propostas com base em séries de máximas alturas pluviométricas diárias e curtas durações, coletadas em toda a área de estudo ao longo de 30 anos. Foram aplicadas duas distribuições de probabilidade, Log-Pearson tipo III e Gumbel, para estimar a precipitação média para diferentes períodos de retorno. A precipitação diária máxima foi convertida em intervalos subdiários (menores que 24 horas) usando dois métodos e comparada com o valor observado. A curva IDF desenvolvida

para o distrito de Yalamlam foi construída com base nos dados observados diários e sub-diários.

Gnecco *et al.* (2023) estudaram duas formulações distintas para construir curvas IDF, compostas por uma curvatura nos intervalos sub-horários (menores que 1 hora, ou seja, pequenas durações) e uma formulação em lei de potência para os intervalos super-horários (maiores que 1 hora, isto é, durações longas), com o objetivo de maximizar a contribuição geral da informação nos domínios sub-horários e super-horários. As formulações propostas foram comparadas com duas formulações de curvas IDF previamente conhecidas, amplamente aplicadas por outros autores. Os resultados indicaram que as curvas IDF propostas permitem considerar as diferentes extensões das séries de dados sub-horárias e canônicas, e eventualmente o comportamento/tendência diferente dos dados sub-horários e super-horários, proporcionando assim o melhor indicador de confiabilidade, pelo menos no período de retorno investigado.

Mazlan *et al.* (2024) investigaram o impacto das mudanças climáticas nas curvas IDF do distrito de Hulu Terengganu, na Malásia. Foram utilizados os modelos MRI-ESM2-0 do *Meteorological Research Institute* (MRI), CMCC-CM2-SR5 do *Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici* (CMCC) e GFDL-ESM4 do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL). Os modelos foram aplicados considerando projeções climáticas sob três diferentes cenários (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com o intuito de identificar os padrões de mudanças climáticas no futuro. Os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 representam projeções de emissões de gases de efeito estufa e fazem parte dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados ou *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP). O cenário SSP1-2.6 representa baixas emissões, o cenário SSP2-4.5 caracteriza emissões intermediárias e o cenário SSP5-8.5 configura altas emissões, com uso intensivo de combustíveis fósseis. As curvas IDF foram construídas por Mazlan *et al.* (2024) para períodos de retorno entre 2 e 200 anos, com base na intensidade máxima de precipitação projetada pelo modelo SD-LS (*Stochastic Disaggregation – Log-Square*). Os resultados indicam um possível aumento nos padrões anuais e mensais de precipitação projetada para os períodos analisados, em comparação com os dados históricos.

Shah *et al.* (2024) analisaram o efeito da variabilidade climática no desenvolvimento de curvas IDF utilizando análise de wavelets em duas cidades paquistanesas, Abbottabad e Islamabad. As curvas IDF foram geradas utilizando o *Hydrological Engineering Center – Statistical Software Package* (HEC-SSP) e o *Watershed Modeling System* (WMS), com dados meteorológicos diários (precipitação e temperatura aproximada) coletados entre 1960 e 2020 junto ao Departamento Meteorológico do Paquistão. A análise de *wavelets* demonstrou um forte impacto do clima (temperatura) nas curvas IDF, evidenciando mudanças significativas nos períodos e frequências entre as duas cidades.

Diante do exposto neste capítulo, observa-se que, embora a literatura apresente uma ampla variedade de estudos voltados à obtenção e ao aprimoramento de curvas de Intensidade-Duração-Frequência em diferentes contextos climáticos e geográficos, ainda há carência de trabalhos que abordem de forma específica as particularidades locais de

municípios localizados no sul do Brasil, como Rio Grande – RS. A maior parte dos estudos nacionais concentra-se em regiões com ampla disponibilidade de dados, como capitais ou grandes centros urbanos, o que evidencia a necessidade de análises regionalizadas que considerem as especificidades pluviométricas e hidrológicas de cada local. Tal demanda torna-se ainda mais evidente diante dos eventos extremos recentes, como a catástrofe climática ocorrida no Rio Grande do Sul em 2024, bem como por evidências técnicas quem indicam um aumento na magnitude e na frequência de cheias e chuvas extremas no estado (Brêda *et al.*, 2023; Zuffo *et al.*, 2024). Em vista disso, através do presente trabalho, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento aplicado à hidrologia urbana, propondo novos coeficientes de ajustamento para as relações IDF do município de Rio Grande, com base em séries de dados históricos de precipitação diária registrados por seis estações pluviométricas, permitindo uma avaliação da variabilidade espacial das chuvas intensas no município. Adicionalmente, o trabalho se diferencia ao incorporar dados simulados através projeções climáticas futuras, para cenários de altas emissões de gases de efeito estufa, possibilitando a estimativa de curvas IDF em cenários futuros extremos e a avaliação de possíveis alterações no comportamento das precipitações intensas. No entanto, ressalta-se que a forma tradicional das equações IDF já permite a extrapolação de cenários futuros, através dos diferentes períodos de retorno, o que garante sua aplicabilidade em estudos prospectivos e no planejamento de obras, ainda que não considere efeitos de mudanças climáticas. Por fim, espera-se que a abordagem adotada e os resultados obtidos forneçam não apenas subsídios técnicos representativos e atualizados para o dimensionamento de obras hidráulicas e de drenagem realizadas no município rio-grandino, como também para a formulação de estratégias e políticas públicas voltadas à mitigação de riscos associados a eventos extremos de precipitação. O capítulo a seguir apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos que orientam o desenvolvimento deste estudo.

4 Objetivos

4.1 Objetivo Geral

Gerar novos coeficientes de ajustamento específicos para as relações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) do município de Rio Grande – RS, a partir da análise de dados pluviométricos de seis estações do município, considerando ajustes refinados para diferentes intervalos de durações de chuvas. Tal objetivo visa a obtenção de relações IDF mais representativas e fidedignas quanto aos dados pluviométricos históricos registrados, visto que serão utilizados extensos períodos de medições, contribuindo para a redução de incertezas em projetos hidráulicos.

4.1.1 Objetivos Específicos

a) Equacionar as relações IDF para diferentes durações adotando os coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986);

b) Equacionar as relações IDF para diferentes durações adotando os coeficientes de desagregação propostos por Beltrame *et al*. (1991);

c) Comparar, analisar e discutir os resultados obtidos aplicando os coeficientes de desagregação da CETESB (1986) e de Beltrame *et al*. (1991);

d) Comparar as curvas IDF em diferentes regiões do município do Rio Grande buscando identificar se há influência de alguma possível ilha de calor na região mais urbanizada do município;

e) Comparar as curvas IDF obtidas através dos dados históricos e dados simulados por meio de projeções climáticas futuras, analisar e discutir os resultados obtidos.

5| Metodologia

Nesta seção será descrito o conjunto de procedimentos e técnicas utilizados para a realização do estudo proposto, aplicados na coleta de dados, análise de informações e na obtenção de resultados. Assim, será definida a abordagem adotada, os instrumentos aplicados para a obtenção de dados, os critérios utilizados para tomadas de decisão, os métodos de análise estatística e outras etapas relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

As séries de máximas alturas diárias de chuva utilizadas neste estudo foram obtidas através do banco de dados coletados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgãos responsáveis pelo monitoramento e armazenamento de informações hidrometeorológicas em escala nacional. O *site* da ANA disponibiliza o Portal *HidroWeb*, uma importante ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), fornecendo acesso ao banco de dados que abrange informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Esses dados incluem registros de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos, consolidando uma ampla gama de informações relacionadas aos recursos hídricos. É relevante salientar que as estações pluviométricas monitoradas pela ANA na cidade de Rio Grande são do tipo convencionais, ou seja, a medição da chuva é realizada uma vez por dia por um observador, sendo posteriormente registrada no sistema.

De forma complementar, o *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) também dispõe de um amplo banco de dados meteorológicos, disponíveis para consulta pública e gratuita. Nesta plataforma, o usuário tem acesso ao mapa de estações pluviométricas monitoradas pelo INMET em todo o território brasileiro e solicita o acesso aos registros de máximas precipitações diárias de acordo com o período desejado. Diferentemente das estações convencionais da ANA, a única estação pluviométrica monitorada pelo INMET no município de Rio Grande é do tipo automática, o que significa que a medição de chuva é feita diariamente, em intervalos de 1 hora, de forma automatizada. Através da análise conjunta realizada nas plataformas digitais da ANA e do INMET, foi possível identificar a existência de doze estações pluviométricas, entre ativas e desativadas, pertencentes ao município de Rio Grande/RS, conforme apresentado na Tabela 5.1. . Essas estações constituem a base inicial de investigação deste trabalho, permitindo a seleção das séries históricas mais adequadas para a análise proposta. Cabe destacar que, embora a cidade rio-grandina possua vinte e duas estações pluviométricas cadastradas nos sistemas da ANA e do INMET, apenas doze delas apresentaram disponibilidade de dados acessíveis para download nas plataformas digitais, como apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Estações pluviométricas na cidade de Rio Grande/RS, de acordo com ANA (2025) e INMET (2025).

Estação	Código	Responsável	Início da operação	Fim da operação	Status	Período de medições
Barra do Rio Grande	3252001	ANA	01/01/1942	01/01/1954	Desativada	12 anos
Barra do Rio Grande	3252002	ANA	01/01/1939	01/11/1970	Desativada	31 anos e 10 meses
Estância do Curtume	3252003	ANA	01/01/1964	01/06/1976	Desativada	12 anos e 5 meses
Granja Cerrito	3252006	ANA	01/08/1964	01/12/2024	Ativa	61 anos e 4 meses
Granja 4 Irmãos	3252007	ANA	01/08/1966	01/05/1981	Desativada	14 anos e 9 meses
Granja Santa Maria	3252008	ANA	01/09/1965	01/12/2024	Ativa	58 anos e 11 meses
Taim	3252012	ANA	01/08/1964	01/06/1976	Desativada	11 anos e 10 meses
Domingos Petroline	3252016	ANA	01/01/1971	01/05/1981	Desativada	10 anos e 4 meses
Olimpo	3252019	ANA	01/01/1943	01/04/1944	Desativada	1 ano e 3 meses
Rio Grande	3252020	ANA	01/01/1961	01/12/1998	Desativada	26 anos e 11 meses
Regatas	3252024	ANA	01/03/1985	01/12/2024	Ativa	40 anos e 8 meses
Rio Grande - FURG	A802	INMET	15/11/2001	01/12/2024	Ativa	23 anos e 9 meses

A Tabela 5.1 mostra os períodos de início e fim de operação, bem como o tempo de funcionamento de cada estação pluviométrica. O conhecimento do período de medições é de extrema importância, uma vez que, conforme afirmam Collischonn e Dornelles (2015), "a curva IDF é obtida a partir da análise estatística de séries longas de dados de um pluviógrafo, com mais de 15 anos pelo menos". Com base nesta afirmação, foram descartadas as estações com períodos de medição menores do que 15 anos, isto é, as estações Barra do Rio Grande (código 3252001), Estância do Curtume (código 3252003), Granja 4 Irmãos (código 3252007), Taim (código 3252012), Domingos Petroline (3252016) e Olimpo (código 3252019). Salienta-se que as estações "ativas" seguem em funcionamento, medindo dados pluviométricos no munícipio até o período atual. No entanto, para o presente estudo, foram utilizados dados até o final de 2024. A Tabela 5.2 contém as coordenadas geográficas das estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande.

Tabela 5.2: Coordenadas geográficas das estações pluviométricas na cidade de Rio Grande/RS.

Estação	Latitude	Longitude
Barra do Rio Grande	32°02′00″S	52°06′00″W
Barra do Rio Grande	32°02′00″S	52°06′00″W
Estância do Curtume	32°26′00″S	52°36′00″W
Granja Cerrito	32°21′02″S	52°32′24″W
Granja 4 Irmãos	32°12′00″S	52°28′00″W
Granja Santa Maria	32°32′17″S	52°32′19″W
Taim	32°34′23″S	52°34′34″W
Domingos Petroline	32°02′00″S	52°18′00″W
Olimpo	32°14′00″S	52°14′00″W
Rio Grande	32°04′44″S	52°10′00″W
Regatas	32°01′48″S	52°04′45″W
Rio Grande - FURG	32°04′48″S	52°10′00″W

A Figura 5.1 ilustra a disposição das estações pluviométricas selecionadas efetivamente para o presente estudo e pertencentes ao município de Rio Grande. Como mostrado na Figura 5.1, as estações 3252020 e A802 estão localizadas na Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e se distanciam em cerca de 120 metros. Considerando a proximidade entre as estações e os períodos de medições não coincidentes, optou-se por unir os dados pluviométricos das estações, gerando a denominada “Estação Rio Grande e FURG”, mencionada nos resultados posteriormente.



Figura 5.1: Localização das estações pluviométricas efetivamente selecionadas para o estudo pertencentes ao município de Rio Grande, adaptado de Vassão (2023).

Foram organizadas as precipitações máximas registradas em cada ano, dispondo-as em ordem de magnitude decrescente e definida a posição de plotagem, também denominada como frequência observada, através da Equação de Weibull. As verificações aos ajustes de distribuições teóricas de probabilidade foram realizadas aplicando o método Log-Normal e de Gumbel, conforme descrito nos itens 2.4.1 e 2.4.2, respectivamente. O teste de aderência de Kolmogorov – Smirnov, descrito no item 2.4.4, foi empregado de maneira a verificar o melhor ajuste da série histórica. Na determinação dos valores críticos de testes D_N, foram considerados níveis de significância iguais a 10%, 5%, 2% e 1%, para amostras menores que 40 anos, e iguais a 5% e 1% para amostras maiores que 40 anos.

A chuva máxima diária foi obtida para períodos de retorno que variaram de 2 a 500 anos, através da função inversa de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel, conforme descrito no item 2.4.2. A desagregação da chuva de 1 dia para durações menores, foi realizada através do Método das Relações das Durações, descrito no item 2.3, por meio dos coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986) e por Beltrame *et al.* (1991). Através da aplicação do Método de Mínimos Quadrados, baseando-se nos valores de intensidade de precipitação máxima, correspondentes aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos, foram obtidos os parâmetros das equações IDF para as estações pluviométricas com mais de 15 anos de medições, de acordo com a Tabela 5.1, localizadas no município de Rio Grande. Foram adotados os seguintes intervalo de durações: de 5 a 15 minutos, 20 a 30 minutos, 60 a 480 minutos e 600 a 1440 minutos, de acordo com CETESB (1986); de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos, de acordo com Back et al. (2011); de 5 a 60 minutos a 60 a 1440 minutos, de acordo com Vassão (2023). Os coeficientes das relações IDF foram propostos para diferentes faixas de durações de chuva com o intuito de obter-se melhores ajustes através do Método de Mínimos Quadrados. Isso porque, diminuindo os intervalos de tempo considerados, o ajuste do método se torna mais preciso e representativo quanto aos dados observados.

A fim de avaliar possíveis alterações nas relações IDF ao longo do tempo por conta dos efeitos das mudanças climáticas, este estudo incorporou dados de projeções climáticas futuras, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A plataforma "Portal Projeções Climáticas no Brasil" fornece dados simulados através de diferentes modelos climáticos globais e regionais, como o ProjETA – Modelo Regional ETA do INPE. Adotando o Modelo Regional ETA, foram aplicados dois modelos climáticos globais forçantes: HadGEM2-ES e CANESM2. Conforme proposto no estudo de Silva *et al.* (2021), foi adotado um cenário de altas emissões de gases causadores do efeito estufa, do tipo RCP 8.5, que representa uma trajetória de aquecimento global acentuado. As projeções foram realizadas para o período de 2071 a 2099 e descrevem séries anuais de precipitação máxima diária para o horizonte futuro considerado. Assim, aplicou-se o mesmo procedimento adotado para os dados observados/históricos, que consistiu no ajuste das distribuições probabilísticas, verificação de aderência, determinação da chuva máxima diária, desagregação em durações menores e proposição de uma

equação IDF futura. Por fim, foram realizadas comparações entre as curvas IDF históricas e futuras, permitindo identificar potenciais modificações nos padrões de chuvas intensas. A Figura 5.2 ilustra visualmente, através de um fluxograma, a sequência de ações descritas neste capítulo, que caracterizam a metodologia do estudo.

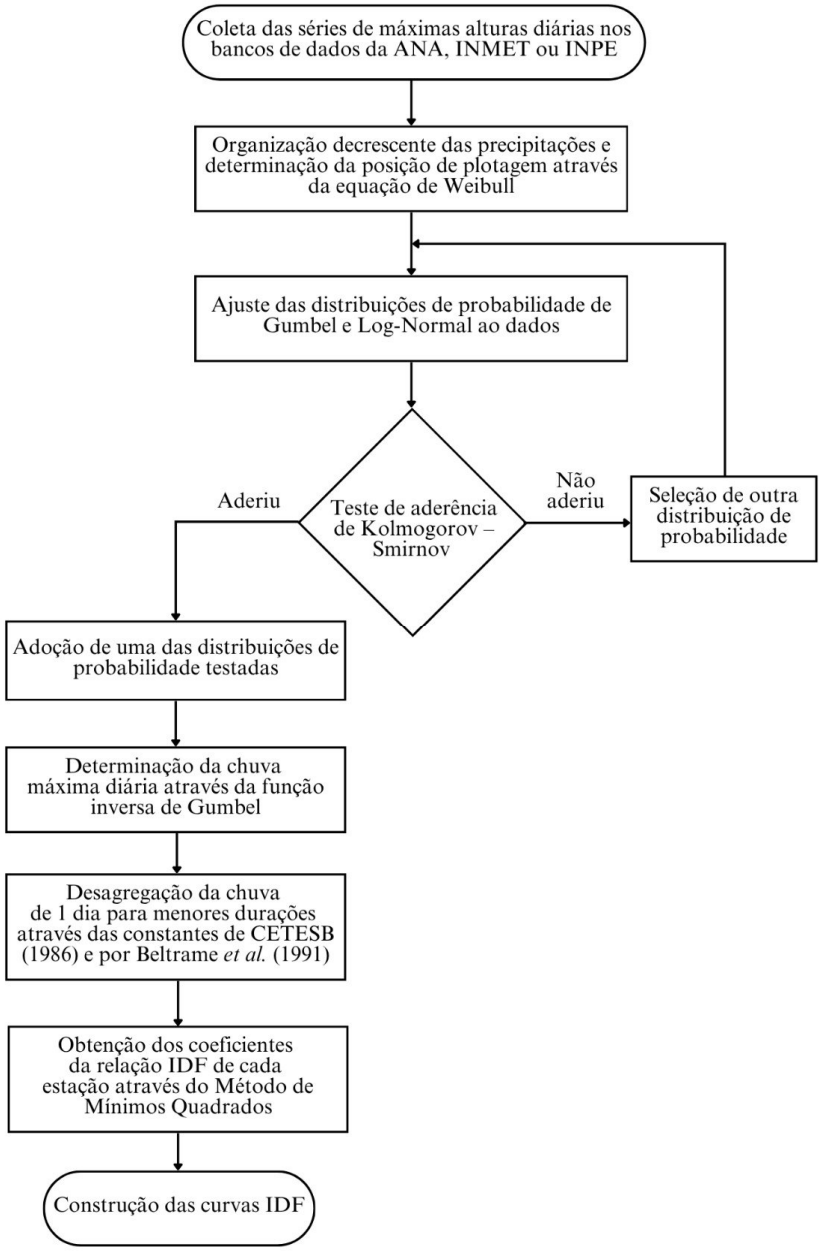


Figura 5.2: Fluxograma das etapas metodológicas adotadas para a obtenção das curvas de Intensidade–Duração–Frequência (IDF) a partir de dados pluviométricos históricos e projetados.

6 Resultados e Discussões

O presente capítulo tem como objetivo discutir e apresentar os resultados obtidos no estudo a partir da aplicação da metodologia proposta no item anterior. Para fins de organização e melhor compreensão, os resultados foram estruturados em duas etapas distintas: resultados derivados dos dados observados de precipitação, provenientes das cinco estações pluviométricas analisadas, vide item 6.1, e os resultados obtidos a partir de dados simulados através de projeções climáticas, vide item 6.2.

6.1 Dados Observados

Neste item, serão discutidos os resultados associados aos dados observados, contemplando a aquisição das séries históricas de chuva, a análise estatística destes conjuntos de dados pluviométricos, o ajuste das distribuições de probabilidade, a verificação da aderência dos modelos probabilísticos e a desagregação da chuva para diferentes períodos de retorno e durações. A partir destes resultados, foram propostas equações e curvas IDF históricas, que servirão também como base de referência para as análises comparativas desenvolvidas na etapa seguinte, dedicada aos cenários futuros de precipitação.

6.1.1 Dados de Chuva

Após consultar o banco de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e do Instituto Nacional de Meteorologia, foram acessados os dados de doze estações pluviométricas, listadas na Tabela 5.1. Ao filtrar as séries de dados para obter períodos de medições iguais ou maiores a quinze anos, foram selecionadas seis estações no município: estação Barra do Rio Grande (código 3252002), estação Granja Cerrito (código 3252006), estação Granja Santa Maria (código 3252008), estação Rio Grande (código 3252020), estação Regatas (código 3252024) e estação Rio Grande – FURG (código A802). No entanto, conforme mencionado no item 5, devido a união dos dados das estações Rio Grande e FURG, foram consideradas cinco séries de dados pluviométricos.

De modo a analisar o comportamento temporal da chuva no município de Rio Grande, apresenta-se na Figura 6.1 a série histórica de precipitações diárias registradas pela Estação Granja Cerrito, no período de 1964 a 2024, correspondente ao maior intervalo de dados disponível entre as estações analisadas no estudo. A utilização desta extensa série pluviométrica permite uma caracterização mais robusta da variabilidade da chuva ao logo das últimas décadas no município, bem como a identificação de eventos extremos de precipitação diária.

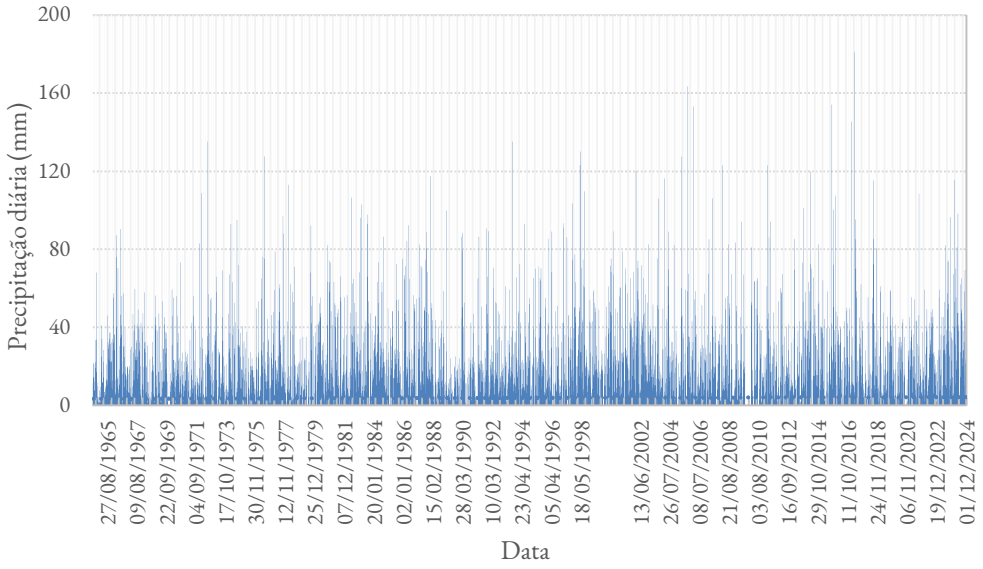


Figura 6.1: Registros de precipitações diárias realizados pela Estação Granja Cerrito entre os anos de 1964 e 2024.

A inspeção visual dos registros ilustrados na Figura 6.1 evidencia elevada variabilidade diária e interanual, além da ocorrência de eventos extremos ao longo de toda a série. Em adição a isso, é possível inferir visualmente que a intensidade e a frequência dos eventos extremos de chuva apresentaram crescimento ao longo das décadas. No entanto, a identificação de possíveis tendências de aumento ou diminuição na intensidade de eventos extremos não pode ser realizada apenas com base na série diária bruta/consistida, conforme destacado por Chow *et al.* (1988) e Coles (2001). Salienta-se que dados hidrológicos podem ser classificados quanto ao seu nível de tratamento, sendo categorizados em dados brutos ou dados consistidos. O dados brutos correspondem aos registros originais obtidos diretamente pelos instrumentos de medição em campo, sem qualquer tipo de verificação ou correção, podendo conter falhas, inconsistências, valores ausentes ou erros decorrentes de problemas operacionais, de acordo com Collischonn e Dornelles (2015). Por sua vez, os dados consistidos são aqueles que passaram por processos de controle de qualidade, incluindo a identificação e correção de inconsistências, preenchimento de falhas e remoção de valores atípicos. Neste processo, técnicos e especialistas avaliam a homogeneidade da série para garantir que ela reflita a realidade observada.

A fim de ilustrar de forma mais detalhada a variabilidade intra-anual da precipitação, é apresentada na Figura 6.2 a série de precipitações diárias registrada pela estação Granja Cerrito no ano de 2024. A escolha deste período justifica-se por se tratar de um ano marcado por eventos extremos de chuva no estado do Rio Grande do Sul. Destaca-se que, embora o presente estudo se baseie nas séries históricas de máximas precipitações diárias, isto é, considerando apenas o maior valor registrado em cada ano, a análise de um ano específico permite evidenciar a dinâmica temporal das chuvas e a ocorrência de eventos intensos ao longo do período.

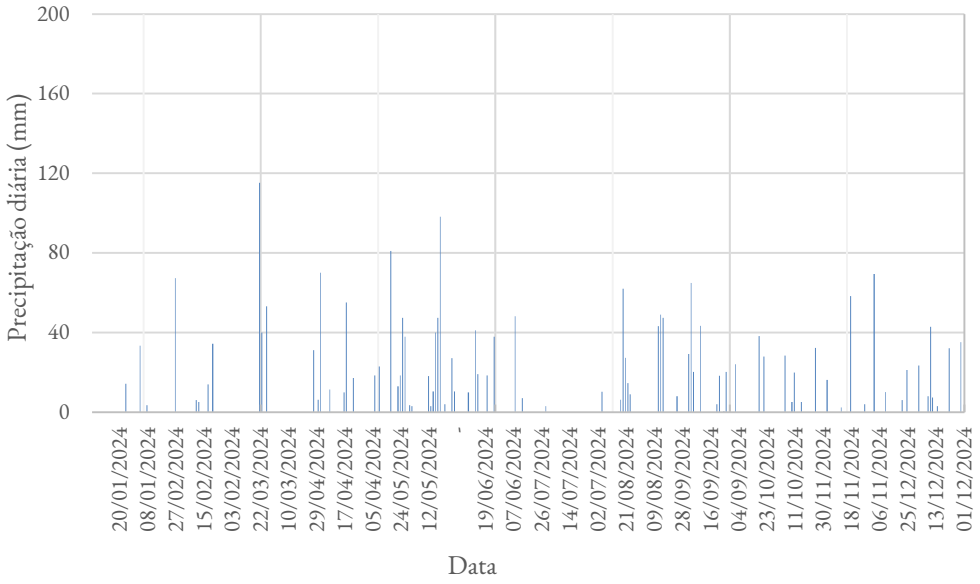


Figura 6.2: Registros de precipitações diárias realizados pela Estação Granja Cerrito no ano de 2024.

Os dados apresentados na Figura 6.2 evidenciam a elevada variabilidade temporal da precipitação ao longo do ano de 2024, caracterizada por períodos de baixa ocorrência de chuva intercalados com eventos pontuais de alta intensidade. Observa-se que os maiores acumulados diários concentram-se em alguns episódios, que se destacam significativamente em relação aos demais registros. O dia 22/03/2026, por exemplo, registrou aproximadamente 115 mm, sendo o dia mais chuvoso do ano. Este valor, posteriormente, foi considerado no presente estudo como a máxima precipitação diária anual de 2024. Reforça-se que, para fins de análise hidrológica, apenas os valores máximos diários anuais são considerados, uma vez que, de forma geral, estes eventos intensos governam o dimensionamento de obras de drenagem e estruturas hidráulicas.

As cinco séries de máximas precipitações diárias anuais utilizadas neste estudo foram registradas pelas estações pluviométricas mencionadas anteriormente, conforme ilustra a Figura 6.3. Três destas estações pluviométricas estão localizadas na área urbana de Rio Grande, sendo as estações Barra do Rio Grande, Regatas e Rio Grande e FURG, enquanto as estações Granja Cerrito e Granja Santa Maria se encontram em áreas rurais do município, conforme mostrado na Figura 5.1. A Figura 6.3(a) – (e) ilustra as máximas precipitações diárias anuais registradas, em milímetros, por cada estação de acordo com os referentes períodos de medição. Mais precisamente, são apresentadas as séries para as estações: Rio Grande e FURG, Barra do Rio Grande, Granja Cerrito, Granja Santa Maria, e Regatas, ilustradas respectivamente nas Figuras 6.3(a) – (e). Salienta-se que os anos sem doze meses completos de medições ou em que não foram realizadas medições não foram utilizados na análise.

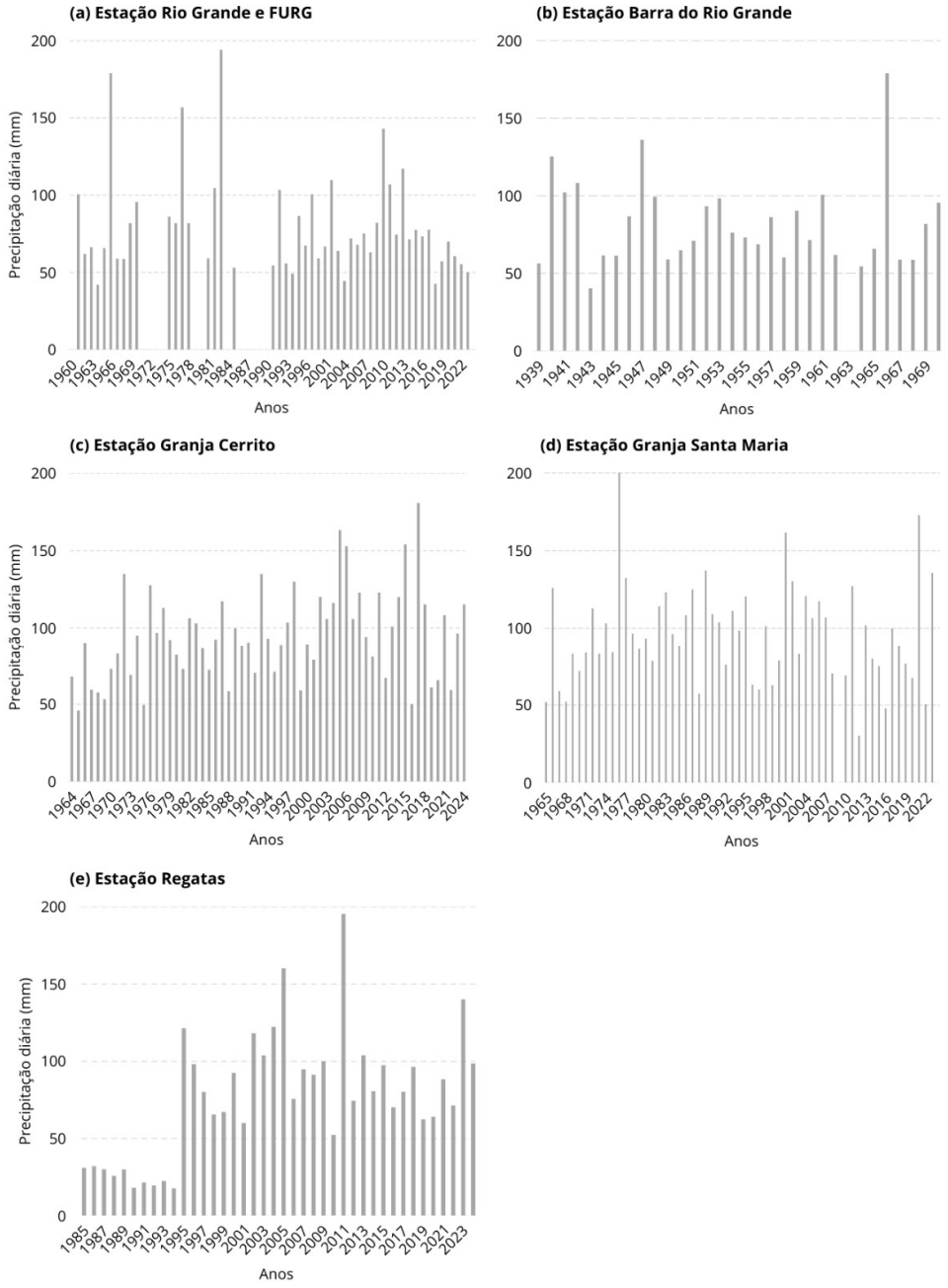


Figura 6.3: Registros de máximas precipitações diárias anuais de cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

Por meio de uma análise visual da Figura 6.3, é possível inferir a existência de uma variabilidade significativa entre os eventos de chuva registrados pelas estações, sem uma tendência temporal clara de aumento ou diminuição. Além disso, as alturas pluviométricas máximas medidas apresentaram uma forte variação de um ano para outro, indicando que eventos extremos são pontuais e irregulares, conforme observado pelo estudo

de Seneviratne *et al.* (2021). Para cada estação, anos diferentes destacaram-se pelo registro das maiores precipitações observadas em um único dia. Para a Estação Granja Santa Maria, por exemplo, o dia mais chuvoso de 1976 registrou-se 200 mm de chuva, sendo também o máximo registrado em todas as estações.

Para além das análises propostas, foi realizada a verificação da consistência dos dados utilizados no estudo. Na Tabela 6.1 estão apresentadas as estações, os respectivos códigos e os resultados obtidos na análise da consistência das séries pluviométricas.

Tabela 6.1: Verificação da consitência dos dados das estações pluviométricas.

Estação	Código	Dados
Barra do Rio Grande	3252002	Dados brutos entre 1939 e 1970
Granja Cerrito	3252006	Dados consistidos entre 1964 e 2006 Dados brutos entre 2007 e 2024
Granja Santa Maria	3252008	Dados consistidos entre 1965 e 2006 Dados brutos entre 2007 e 2024
Rio Grande	3252020	Dados brutos entre 1961 e 1998
Regatas	3252024	Dados consistidos entre 1985 e 2006 Dados brutos entre 2007 e 2024
Rio Grande - FURG	A802	Tipo de dado não informado pela agência de monitoramento

Através da verificação da consistência dos dados pluviométricos medidos pelas estações, apresentada na Tabela 6.1, observa-se que parte das séries é composta por dados previamente consistidos, enquanto o restante abrange períodos com dados brutos. No escopo de um estudo hidrológico, a análise da consistência dos dados de chuva é uma etapa de grande importância, visto que séries brutas podem conter falhas e inconsistências que influenciam estimativas de extremos e suas aplicações em projetos de drenagem (TUCCI, 2009; DNAEE, 1982). A heterogeneidade observada nos dados, com períodos brutos e consistidos, reforça a relevância da aplicação de procedimentos estatísticos e da análise individualizada de cada estação. Destaca-se, neste contexto, que a falta de uma série totalmente consistida, servindo como parâmetro, impede a aplicação de metodologias para a homogeneização das demais séries de dados. Por este motivo, este estudo e as análises apresentadas a seguir foram construídas a partir de dados pluviométricos brutos e consistidos.

6.1.2 Análise Estatística de Gumbel e Log-Normal

O ajuste das curvas obtidas aplicando as distribuições teóricas de probabilidade de Gumbel e Log-Normal aos dados observados está ilustrado na Figura 6.4(a) – (e). Nela, os pontos azuis representam a frequência observada das precipitações máximas, obtida

através da equação de Weibull, descrita no item 2.4.3. Enquanto as curvas teóricas, vermelha representando a distribuição de Gumbel e verde a distribuição Log-Normal, descrevem o comportamento dos modelos de distribuição ajustados.

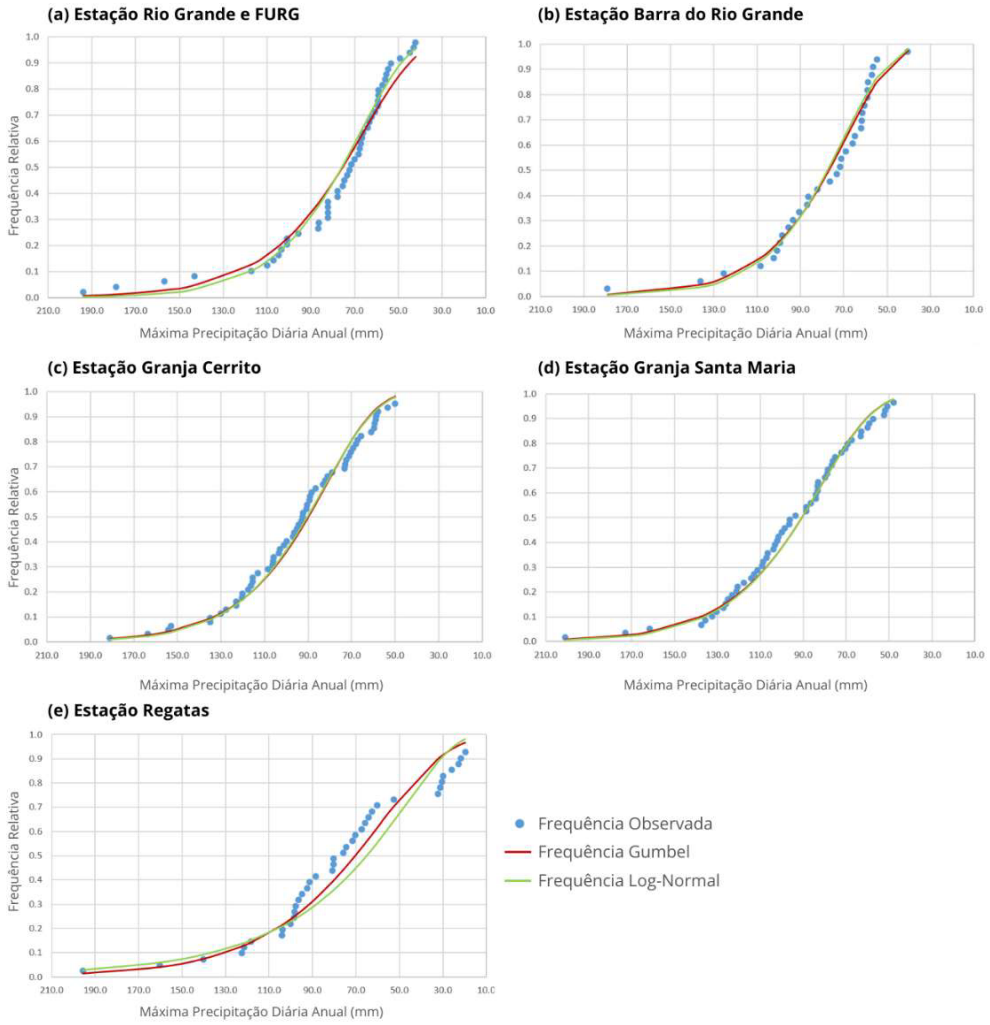


Figura 6.4: Ajuste curvas teóricas aos dados observados de cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

A Figura 6.4(a) – (e) apresenta o ajuste das distribuições teóricas de probabilidade de Gumbel e Log-Normal aos dados observados de precipitações diárias máximas anuais medidos por cinco estações pluviométricas analisadas no município de Rio Grande. Observa-se boa concordância entre as frequências empíricas e as curvas teóricas, especialmente na região central das distribuições, entre 70 e 110 mm, indicando que ambas as funções probabilísticas são adequadas para representar o comportamento estatístico das chuvas intensas na área de estudo. As diferenças entre os ajustes tornam-se mais evidentes nas extremidades das curvas, particularmente nas áreas com baixas probabilidades de

ocorrência, onde a quantidade de observações é naturalmente reduzida, resultando em maior incerteza estatística. Destaca-se que as estações Granja Cerrito e Granja Santa Maria, por apresentarem séries históricas mais longas, exibem curvas empíricas mais contínuas e suaves, proporcionando um ajuste mais preciso das distribuições teóricas aos dados observados. Em contraste, nas estações com séries mais curtas, como as estações Barra do Rio Grande e Regatas, verifica-se maior dispersão dos pontos observados em relação ao ajuste das curvas teóricas.

Para além de uma análise visual, foi aplicado um teste de aderência dos modelos de distribuição aos dados observados, o teste de Kolmogorov-Smirnov. Como explicitado anteriormente, o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (KS) se baseia na diferença máxima entre a frequência observada e a frequência teórica, sendo esta diferença máxima inferior aos valores críticos de testes D_N. Os valores encontrados para as diferenças máximas do teste KS para cada modelo probabilístico considerando os conjuntos de dados medidos pelas estações estão descritos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Diferença máxima do teste KS para cada modelo probabilístico e a respectiva estação.

Estação / Modelo	Rio Grande e FURG	Barra do Rio Grande	Granja Cerrito	Granja Santa Maria	Regatas
Log-Normal	0,102	0,096	0,068	0,069	0,157
Gumbel	0,107	0,088	0,074	0,069	0,145

A Tabela 6.2 contém os valores da diferença máxima obtida através do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para os métodos probabilísticos Log-Normal e Gumbel, aplicados às séries de máximas precipitações diárias anuais das estações pluviométricas analisadas. Concluiu-se que ambos os modelos aderiram aos dados de precipitação das estações estudadas, visto que em todos os casos a diferença máxima foi inferior aos valores críticos de testes D_N, o que sugere que as duas funções probabilísticas são adequadas para a representação dos dados. As diferenças entre os modelos variam conforme a estação, não havendo um desempenho claramente superior de uma única distribuição em todos os casos. Ressalta-se que as estações Granja Cerrito e Granja Santa Maria, que apresentam séries históricas mais extensas, exibem os menores valores para a diferença máxima considerando ambos os modelos, evidenciando a influência positiva do tamanho das séries pluviométricas na qualidade do ajuste estatístico. Apesar de a distribuição Log-Normal apresentar melhor desempenho em algumas estações, optou-se pela adoção da distribuição de Gumbel neste estudo, em razão do seu uso consolidado na literatura hidrológica para determinação de relações IDF e estudo de vazões de enchentes, conforme afirmam Naghettini e Pinto (2007). Desta forma, foi possível obter a chuva máxima diária para períodos de retorno que variaram de 2 a 500 anos.

6.1.3 Desagregação da Chuva Diária

Por meio da distribuição estatística de Gumbel, definida no item 2.4.2, foram estimados os valores de precipitações diárias para diferentes períodos de retorno (T) para as estações analisadas, conforme Tabela 6.3. Os períodos de retorno variaram de 2 a 500 anos, abrangendo uma ampla gama de cenários hidrológicos, que englobam desde eventos mais frequentes até eventos extremos de baixa probabilidade de ocorrência.

Tabela 6.3: Precipitação diária em milímetros para diferentes períodos de retorno (T) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande.

Estação / T	Rio Grande e FURG	Barra do Rio Grande	Granja Cerrito	Granja Santa Maria	Regatas
2 anos	75,5	76,8	89,9	90,6	70,3
5 anos	104,4	101,8	116,1	118,9	106,2
10 anos	123,6	118,4	133,4	137,7	130,0
20 anos	141,9	134,3	150,1	155,7	152,8
50 anos	165,7	154,8	171,6	178,9	182,3
100 anos	183,5	170,2	187,8	196,4	204,4
500 anos	224,7	205,8	225,1	236,7	255,5

De acordo com o observado na Tabela 6.3, de forma geral, a precipitação diária tende a aumentar quanto maior for o período de retorno adotado. Na estação Rio Grande e FURG, por exemplo, a precipitação diária estimada para um período de retorno de 2 anos é igual a 75,5 mm, enquanto para um período de retorno de 500 anos a precipitação diária equivale a 224,7 mm. Este comportamento foi observado em outros estudos na literatura, vide Souza *et al.* (2019) e Rodrigues *et al.* (2023). O aumento da precipitação diária de acordo com o crescimento do período de retorno está associado às características estatísticas das distribuições de extremos, como Gumbel, que foi previamente ajustada aos dados observados. Nota-se, portanto, que eventos de grande magnitude se tornam progressivamente mais intensos, ainda que menos frequentes.

Os valores estimados na Tabela 6.3 são importantes também para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e obras de infraestrutura urbana, como redes de drenagem pluvial, reservatórios de controle de cheias, barragens e canais. A escolha do período de retorno a ser adotado no projeto está diretamente relacionada ao tipo de obra, ao nível de risco aceitável e ao estudo de custos de execução e manutenção da obra. Isso porque quanto maior o período de retorno, maiores serão os custos envolvidos na obra, já que a intensidade de chuva estimada no projeto será maior e, por consequência, a vazão de projeto também. Em contrapartida, menor será o custo de manutenção da infraestrutura de drenagem, pois haverá uma maior segurança e menor necessidade de intervenção. Para obras de microdrenagem, por exemplo, o período de retorno recomendável é de 5 a 10 anos, enquanto para obras de macrodrenagem recomenda-se utilizar o período de retorno de 50 ou 100 anos, de acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico que

trata sobre a drenagem e o manejo das águas pluviais urbanas publicado pelo Governo Federal, vide Brasil (2016).

Em vista do apresentado, através dos coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986), estabelecidos no item 2.3, foi possível desagregar a chuva máxima diária para durações que variaram de 5 a 1440 minutos. Este artifício foi aplicado para as séries de dados das estações analisadas no presente estudo e os resultados para a Estação Rio Grande e FURG podem ser observados na Tabela 6.4. As tabelas correspondentes às demais estações encontram-se apresentadas no Apêndice A (Tabelas A1 a A4).

Tabela 6.4: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG							
Relação entre as alturas pluviométricas	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
5min/30min	9,09	12,58	14,88	17,10	19,96	22,11	27,07
10min/30min	14,44	19,98	23,64	27,15	31,70	35,11	42,99
15min/30min	18,72	25,90	30,65	35,20	41,10	45,51	55,72
20min/30min	21,67	29,97	35,46	40,73	47,55	52,67	64,48
25min/30min	24,34	33,67	39,84	45,76	53,43	59,17	72,44
30min/1h	26,75	37,00	43,78	50,29	58,71	65,02	79,61
1h/24h	36,15	49,99	59,16	67,95	79,34	87,87	107,58
6h/24h	61,97	85,70	101,42	116,49	136,01	150,63	184,42
8h/24h	67,13	92,84	109,87	126,20	147,34	163,18	199,79
10h/24h	70,57	97,61	115,50	132,67	154,90	171,55	210,03
12h/24h	73,15	101,18	119,73	137,53	160,56	177,82	217,72
24h/1 dia	86,06	119,03	140,86	161,80	188,90	209,21	256,14

Em conformidade com o observado na Tabela 6.4 e no Apêndice A, os valores de precipitação tendem a aumentar conforme os períodos de retorno também crescem, para todas as durações consideradas. Valendo-se da teoria de distribuições de extremos, é possível afirmar que este comportamento é esperado e coerente, uma vez que eventos mais raros tendem a apresentar maiores intensidades. A exemplo disso, para a relação de 1h/24h tem-se que a precipitação aumenta de 36,15 mm (com um período de retorno de 2 anos) para 107,58 mm (com um período de retorno de 500 anos), o que representa um crescimento significativo de chuva precipitada.

Além dos coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986), foram aplicados também os coeficientes apresentados por Beltrame *et al.* (1991), específicos para o estado do Rio Grande do Sul, descritos no item 2.3. Dessa forma, a chuva máxima diária foi desagregada para diferentes durações, assim como realizado anteriormente. A Tabela 6.5 apresenta a precipitação desagregada através dos coeficientes de Beltrame *et al.* (1991)

para períodos de retorno distintos e relações temporais que variaram entre 60 e 1440 minutos, com base nos dados da estação Rio Grande e FURG. Ressalta-se que, no presente estudo, os coeficientes da CETESB (1986) foram aplicados a todas as estações pluviométricas analisadas, enquanto os coeficientes de Beltrame *et al.* (1991), a título de comparação, foram aplicados em uma única estação. As discussões e resultados apresentados nos itens subsequentes embasam esta decisão.

Tabela 6.5: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG							
Relação entre as alturas pluviométricas	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
1h/24h	35,83	49,55	58,64	67,36	78,64	87,10	106,63
2h/24h	44,36	61,35	72,60	83,40	97,36	107,83	132,02
4h/24h	53,75	74,33	87,96	101,04	117,96	130,64	159,95
6h/24h	61,42	84,95	100,53	115,47	134,81	149,31	182,80
24h/1 dia	85,31	117,99	139,62	160,38	187,24	207,37	253,89

Assim como observado na Tabela 6.4, fruto da desagregação da chuva máxima diária através dos coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986), o comportamento da chuva desagregada na Tabela 6.5, construída aplicando-se os coeficientes de Beltrame *et al.* (1991), segue fidedigno ao esperado pela teoria das distribuições de extremos. Isto é, conforme o período de retorno aumenta, os valores de precipitação também se elevam para todas as durações de chuva adotadas. Além disso, é perceptível que a precipitação tende a aumentar conforme as relações entre as alturas pluviométricas se aproximam de um dia. Por exemplo, para um período de retorno de 2 anos, ao se considerar uma relação de 1h/24h a precipitação equivalente é de 35,83 mm, enquanto para uma relação de 24h/1 dia a precipitação é de 85,31 mm.

A importância da desagregação da precipitação ao longo do tempo reside também no fato de haver a possibilidade de realização de análises mais refinadas acerca da distribuição da chuva dentro de um intervalo de 24 horas. Na Tabela 6.4, por exemplo, as primeiras linhas indicam valores acumulados de chuva em períodos curtos, 5 a 30 minutos, enquanto as últimas linhas se aproximam da totalidade da chuva diária. Essa informação é de particular relevância para a avaliação da capacidade de resposta dos sistemas urbanos de drenagem pluvial frente a chuvas intensas de curta duração, as quais são correntemente responsáveis por gerar alagamentos súbitos nas cidades, mesmo quando o volume total diário não seja elevado.

6.1.4 Determinação dos Parâmetros IDF

Com base nos resultados obtidos pela desagregação da chuva máxima diária, foram estabelecidos os parâmetros das equações IDF que representam as chuvas intensas nas estações analisadas para diferentes faixas de durações. Para tal, foi aplicado o Método de Mínimos Quadrados, tanto para os valores obtidos através da desagregação com os coeficientes da CETESB (1986), quanto para Beltrame *et al.* (1991). A Tabela 6.6 contém as variáveis de ajustamento específico K, m, t_0 e n para a estação Rio Grande e FURG, que foram determinadas com base na desagregação da chuva máxima diária realizada através dos coeficientes propostos pela CETESB (1986), para períodos de retorno que variaram entre 2 e 500 anos e diferentes intervalos de tempo. As tabelas correspondentes às demais estações encontram-se apresentadas no Apêndice B (Tabelas B1 a B4). A definição dos coeficientes de ajustamento K, m, t_0 e n permite o cálculo da intensidade da chuva por meio da equação (2.2), definida no item 2.2.

Tabela 6.6: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG					
Relações IDF geradas a partir da chuva desagregada com coeficientes da CETESB (1986)					
T (anos)	Tempo (min)	K	m	t_0	n
2	5 10 15	226,35	0,04	1,50	0,40
2	20 25 30	319,96	0,00	1,85	0,52
2	60 360 480	702,87	0,15	6,25	0,73
2	600 720 1440	939,21	0,17	9,66	0,78
5	5 10 15	321,87	0,00	1,51	0,40
5	20 25 30	176,12	0,53	1,03	0,50

5	60 360 480	237,22	0,84	1,01	0,71
5	600 720 1440	250,43	1,06	1,00	0,77
10	5 10 15	198,22	0,28	1,49	0,40
10	20 25 30	227,38	0,33	1,07	0,50
10	60 360 480	369,61	0,47	1,09	0,71
10	600 720 1440	431,34	0,58	1,06	0,77
20	5 10 15	239,50	0,20	1,47	0,40
20	20 25 30	293,86	0,22	1,08	0,50
20	60 360 480	433,91	0,35	1,19	0,71
20	600 720 1440	587,56	0,39	1,13	0,77
50	5 10 15	275,97	0,16	1,50	0,40
50	20 25 30	382,91	0,14	1,20	0,50
50	60 360 480	484,45	0,28	1,30	0,71

50	600 720 1440	844,19	0,24	1,21	0,77
100	5 10 15	319,19	0,12	1,51	0,40
100	20 25 30	516,34	0,08	1,35	0,51
100	60 360 480	560,25	0,23	1,48	0,71
100	600 720 1440	1317,87	0,13	1,33	0,77
500	5 10 15	361,08	0,10	1,50	0,40
500	20 25 30	769,09	0,03	1,35	0,51
500	60 360 480	602,28	0,19	1,64	0,71
500	600 720 1440	2257,83	0,04	1,54	0,77

Na Tabela 6.6 estão representados os parâmetros das relações IDF obtidos a partir da chuva desagregada segundo os coeficientes propostos pela CETESB (1986) para a estação Rio Grande e FURG. De modo geral, para todas as estações analisadas, pode-se observar que, na maior parte dos intervalos, o parâmetro K tende a aumentar progressivamente com o período de retorno, refletindo o comportamento esperado de intensidades máximas associadas a eventos cada vez mais raros. Os valores do parâmetro n evidenciam a redução da intensidade da chuva conforme a duração do evento cresce, comportamento amplamente reportado na literatura hidrológica. As demais variáveis de ajustamento específico, m e t_0, apresentaram variações entre as diferentes faixas de duração, sem indicar uma tendência clara de comportamento. A divisão das relações IDF por intervalos de tempo de duração da precipitação permite a representação mais precisa tanto das chuvas intensas de curta duração, quanto de eventos mais longos. O ajuste realizado ao Método dos Mínimos Quadrados está ilustrado na Figura 6.5(a) – (e), a qual apresenta

gráficos de dispersão entre os valores de intensidade da precipitação observada pelas estações analisadas no estudo e os valores estimados por meio das relações IDF ajustadas e apresentadas na Tabela 6.6, para a estação Rio Grande e FURG, e no Apêndice B (Tabelas B.1 a B.4), para as demais estações.

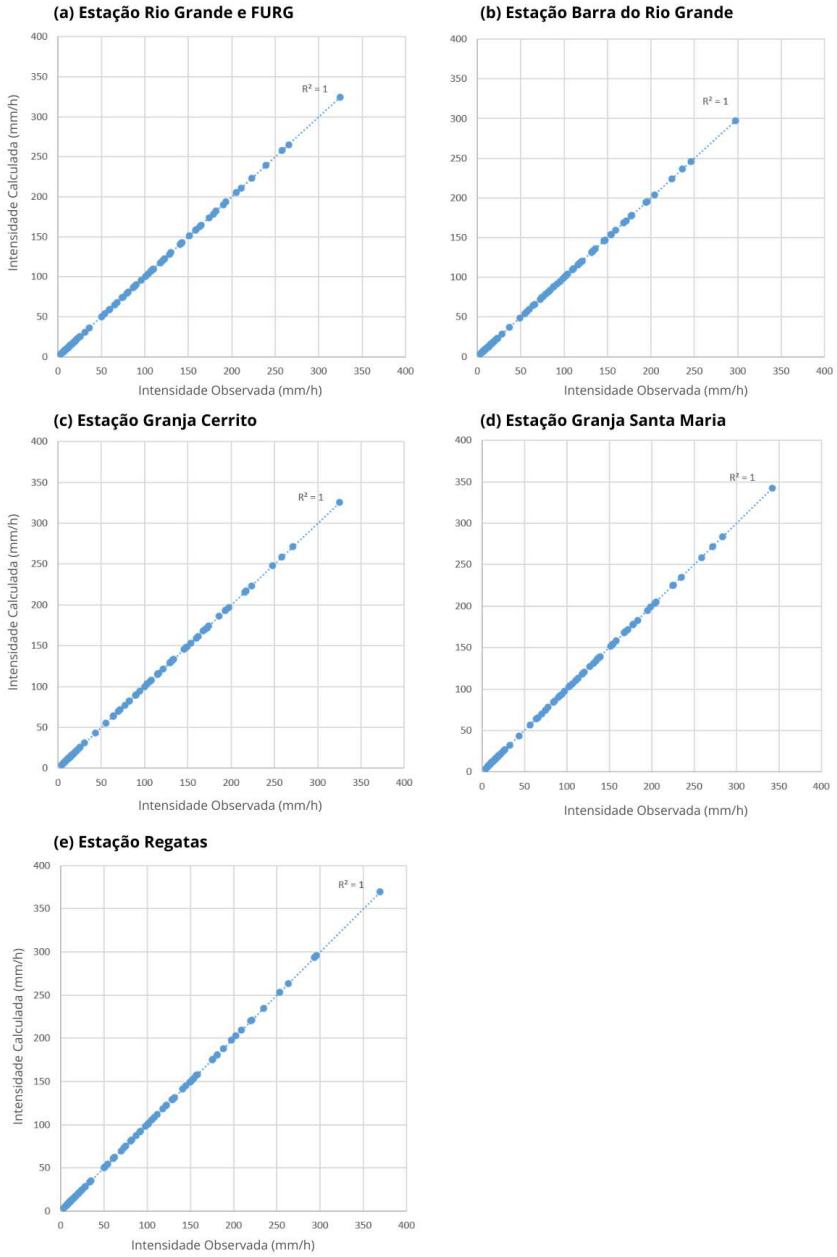


Figura 6.5: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

Ao analisar a Figura 6.5(a) – (e), nota-se uma excelente aderência dos dados à linha de tendência, o que indica que o modelo apresenta um comportamento praticamente ideal na estimativa de intensidades. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi igual a 1 para todas as estações pluviométricas, o que sugere um ajuste estatístico perfeito entre os valores observados e calculados. Este resultado evidencia que o modelo proposto reproduz com exatidão os dados históricos de chuva utilizados na calibração.

Conforme mencionado anteriormente, a chuva diária máxima também foi desagregada através dos coeficientes propostos por Beltrame *et al.* (1991). Com o intuito de realizar comparações entre os modelos de desagregação, foram aplicadas as constantes apresentadas por Beltrame *et al.* (1991) aos dados da Estação Rio Grande e FURG e os respectivos resultados e discussões estão explicitados a seguir. A Tabela 6.7 foi construída da mesma forma que a Tabela 6.6, apresentando as variáveis de ajustamento específico K, m, t_0 e n para a estação Rio Grande e FURG. Os parâmetros das relações IDF foram determinados com base na desagregação da chuva máxima diária realizada através dos coeficientes propostos por Beltrame *et al.* (1991), para períodos de retorno que variaram entre 2 e 500 anos e diferentes intervalos de tempo.

Tabela 6.7: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG					
Relações IDF geradas a partir da chuva desagregada com coeficientes de Beltrame *et al.* (1991)					
T (anos)	Tempo (min)	K	m	t_0	n
2	60 120 240	375,26	1,19	7,44	0,75
2	360 1440	859,09	0,19	8,11	0,77
5	60 120 240	351,10	0,76	7,38	0,75
5	360 1440	710,91	0,39	5,59	0,77
10	60 120 240	321,90	0,64	7,56	0,76
10	360 1440	681,67	0,36	5,61	0,77
20	60 120 240	303,17	0,56	7,69	0,76

20	360 1440	655,44	0,34	5,63	0,77
50	60 120 240	285,47	0,49	7,83	0,76
50	360 1440	624,05	0,31	5,64	0,77
100	60 120 240	278,01	0,44	7,92	0,76
100	360 1440	610,57	0,29	5,65	0,77
500	60 120 240	2539,21	0,00	7,31	0,75
500	360 1440	572,87	0,26	5,67	0,77

O ajuste realizado ao Método dos Mínimos Quadrados está apresentado na Figura 6.6, ilustrado através de um gráfico de dispersão entre os valores de intensidade da precipitação observada pela estação Rio Grande e FURG e os valores estimados por meio das relações IDF ajustadas na Tabela 6.7.

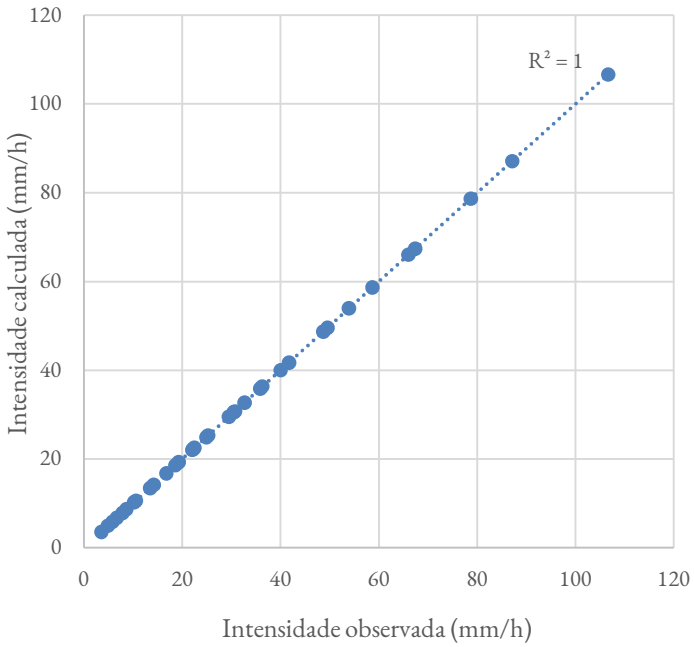


Figura 6.6: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG.

Assim como ocorreu no caso anterior, observando-se a Figura 6.6, é perceptível que há uma boa aderência dos dados à linha de tendência, novamente indicando que o modelo apresenta um comportamento quase ideal na estimativa da intensidade de chuva. Da mesma forma, o coeficiente de determinação (R^2) apresentou seu valor igual a 1, revelando a existência de um ajuste estatístico perfeito entre os valores observados e observa-se calculados.

Diante dos resultados apresentados, é possível concluir que os ajustes realizados a partir dos coeficientes de desagregação propostos pelos autores, CETESB (1986) e Beltrame *et al.* (1991), foram capazes de representar de forma satisfatória o comportamento da precipitação histórica observada na estação analisada. Ambos os conjuntos de coeficientes de desagregação produziram estimativas coerentes, especialmente no que se refere à reprodução de precipitações intensas associadas a diferentes durações e períodos de retorno, indicando a adequação metodológica das abordagens adotadas. Por esse motivo, optou-se por realizar uma análise estatística dos resultados de forma mais aprofundada, de modo a comparar e discutir os modelos, além de avaliar eventuais diferenças no desempenho dos métodos de desagregação. Para este fim, foi inicialmente aplicado o conceito da Soma dos Quadrados das Diferenças, uma medida estatística amplamente utilizada na literatura para avaliar a variabilidade dos dados em torno de sua média. Este método permite identificar o quanto os valores individuais se afastam do comportamento médio do conjunto, fornecendo subsídios para a comparação objetiva entre os modelos analisados. As Tabelas 6.8 e 6.9 apresentam os resultados obtidos através da aplicação deste método, no qual se calcula a soma dos quadrados das diferenças entre cada valor estimado e a média correspondente do grupo de dados, possibilitando uma análise quantitativa da dispersão associada a cada abordagem de desagregação.

Tabela 6.8: Soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e calculados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG – Soma dos quadrados das diferenças entre valores observados e calculados conforme coeficientes de desagregação da CETESB (1986)							
Períodos de Retorno (T)	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
Chuva Calculada	14648,66	28019,89	39238,32	51769,89	70565,35	86554,03	129742,34
Chuva Observada	14648,58	28020,31	39238,83	51770,61	70566,36	86555,22	129743,38
Diferença Absoluta	0,08	0,42	0,51	0,77	0,89	1,19	1,03
Diferença Percentual	0,0005%	0,0015%	0,0013%	0,0015%	0,0013%	0,0014%	0,0008%

Tabela 6.9: Soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e calculados, conforme coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG – Soma dos quadrados das diferenças entre valores observados e calculados conforme coeficientes de desagregação de Beltrame *et al.* (1991)							
Períodos de Retorno (T)	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
Chuva Calculada	620,54	1186,96	1662,32	2193,26	2989,32	3666,78	5496,04
Chuva Observada	620,61	1187,13	1662,42	2193,35	2989,67	3667,07	5496,81
Diferença Absoluta	0,07	0,17	0,10	0,09	0,35	0,29	0,77
Diferença Percentual	0,011%	0,015%	0,006%	0,004%	0,012%	0,008%	0,014%

Nas Tabelas 6.8 e 6.9 observa-se que os valores obtidos para chuvas calculadas através das relações IDF propostas foram bastante próximos aos valores observados, demonstrando um elevado grau de aderência dos modelos aos dados empíricos. Para resultados obtidos com base nos coeficientes da CETESB (1986), a maior diferença entre a chuva calculada e a observada ocorreu para um período de retorno de 100 anos, sendo igual a 1,19 mm/h. A menor diferença, por outro lado, aconteceu para um período de retorno de 2 anos, no qual a diferença foi igual a 0,08 mm/h, o que representou uma diferença percentual entre o valor observado e calculado de 0,0005%. Já para os resultados obtidos através dos coeficientes de Beltrame *et al.* (1991), a maior diferença foi de 0,77 mm/h para um período de retorno de 500 anos, enquanto a menor diferença foi de 0,07 mm/h para um período de retorno de 2 anos, correspondendo a uma diferença percentual de 0,011%. A diferença entre as magnitudes dos valores apresentados nas tabelas reflete as diferentes abordagens na definição dos parâmetros, como por exemplo o uso de diferentes intervalos de tempo. Isto é, CETESB (1986) define parâmetros ente 5 e 1440 minutos, enquanto os coeficientes de Beltrame *et al.* (1991) englobam uma faixa de tempo que varia entre 60 e 1440 minutos.

Os resultados obtidos nas Tabelas 6.6 e 6.7, que apresentam os coeficientes de ajustamento, foram analisados também sob a perspectiva do coeficiente de correlação (r), o qual avalia a direção e a força de uma relação linear entre duas variáveis, variando ente -1 a 1. A Tabela 6.10 apresenta a correlação entre a chuva observada e a chuva calculada com base nos coeficientes de desagregação de CETESB (1986) e Beltrame *et al.* (1991) para períodos de retorno que variaram entre 2 e 500 anos.

Tabela 6.10: Coeficientes de correlação entre os valores observados e calculados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) e por Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG.

Estação Rio Grande e FURG							
Coeficiente de Correlação (r)	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
CETESB (1986)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Beltrame *et al.* (1991)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.10, constata-se que, para todos os períodos de retorno considerados, os coeficientes de correlação entre os valores de precipitação observados e aqueles calculados através dos modelos de desagregação são iguais a 1, tanto para as constantes propostas pela CETESB (1986) quanto para aquelas apresentadas por Beltrame *et al.* (1991). Esse resultado evidencia a existência de uma correlação linear perfeita e positiva entre as variáveis analisadas, indicando que as estimativas geradas pelos modelos acompanham de forma consistente o comportamento dos dados observados. A obtenção de coeficientes de correlação unitários demonstra haver uma relação direta e proporcional entre as chuvas observadas e as chuvas calculadas, independente do período de retorno adotado para a análise. Novamente, tal comportamento sugere que os métodos de desagregação empregados preservam adequadamente a estrutura dos dados originais, refletindo com grande fidelidade as variações associadas às diferentes durações e a ocorrência de eventos extremos. Estes resultados corroboram com as análises estatísticas realizadas previamente, baseadas na Soma dos Quadrados das Diferenças e no Coeficiente de Determinação (R^2), as quais também revelaram um desempenho satisfatório dos modelos avaliados.

Considerando este contexto, os elevados valores de correlação reforçam a robustez das metodologias adotadas no estudo e confirmam a consistência dos coeficientes de desagregação aplicados. Com base nisto, procedeu-se à obtenção das curvas IDF, apresentadas nas Figuras 6.7(a) – (e) e 6.8, para as cinco estações pluviométricas, a partir das relações IDF propostas com base nos coeficientes da CETESB (1986), e para a Estação Rio Grande e FURG, de acordo com as relações IDF construídas a partir das constantes de Beltrame *et al.* (1991), respectivamente. Para a elaboração das curvas, foram considerados períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, englobando desde eventos mais frequentes até eventos extremos mais raros. As curvas IDF são ferramentas fundamentais para a caracterização das chuvas intensas na área de estudo, fornecendo um recurso técnico de extrema relevância para o dimensionamento de projetos de drenagem urbana, planejamento hidrológico e avaliação de riscos.

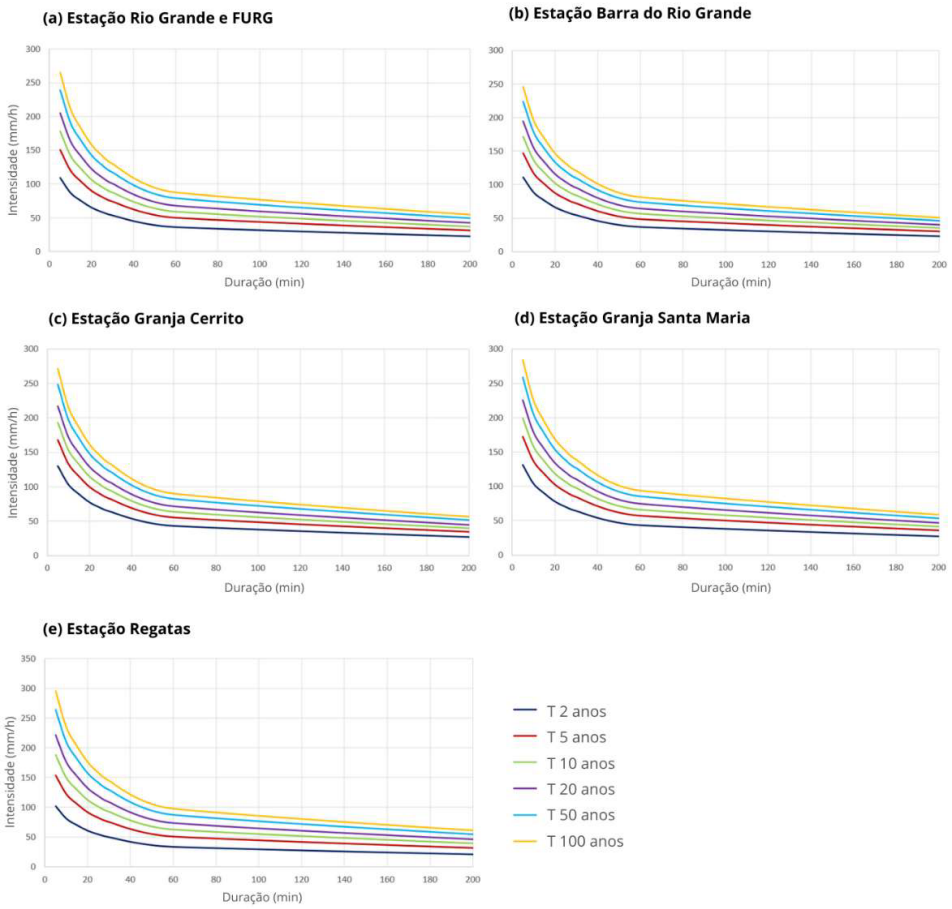


Figura 6.7: Curvas IDF calculadas conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

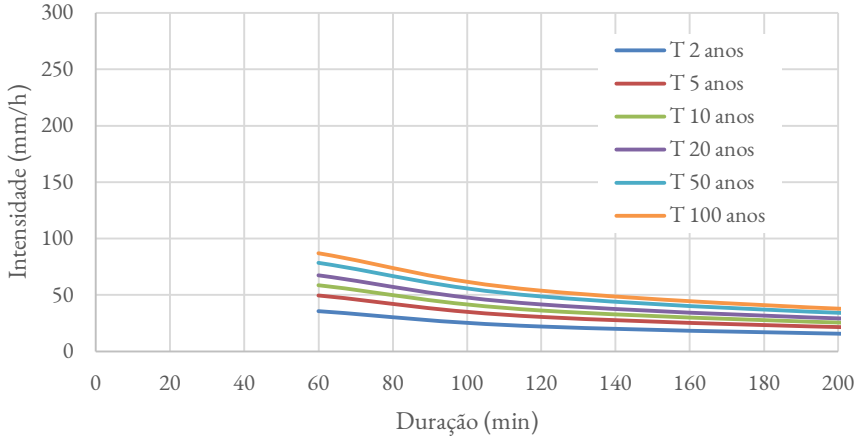


Figura 6.8: Curva IDF calculada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela Beltrame *et al.* (1991) – Estação Rio Grande e FURG.

As Figuras 6.7(a) – (e) e 6.8 apresentam as curvas IDF construídas a partir dos coeficientes propostos por CETESB (1986) e Beltrame *et al.* (1991), respectivamente, para as estações investigadas. Conforme amplamente exemplificado na literatura, as curvas IDF mostram que a intensidade da precipitação tende a diminuir à medida que a duração do evento aumenta. Isso reflete o comportamento físico esperado da precipitação: chuvas de curta duração tendem a ser mais intensas, enquanto chuvas mais longas têm menor intensidade. Por outro lado, a intensidade da precipitação aumenta conforme maiores forem os períodos de retorno (T) considerados. Para a Estação Rio Grande e FURG, por exemplo, observa-se que as curvas IDF obtidas por meio dos coeficientes da CETESB (1986), Figura 6.7(a), indicam intensidades significativamente elevadas entre 5 e 60 minutos, isso se dá pelo fato do método abranger durações de chuvas menores, que propendem a ser mais intensas. Além disso, como as correlações de desagregações de Beltrame *et al.* (1991) iniciam em 60 minutos, as curvas IDF da Figura 6.8 também iniciam a partir desta duração. Adotando uma duração de 60 minutos e um período de retorno de 2 anos, a título de comparação, analisa-se que a curva IDF proposta através das correlações da CETESB (1986), vide Figura 6.7(a), apresenta uma intensidade de chuva de 36,1 mm/h. Enquanto na curva obtida por meio dos coeficientes de desagregação apresentados por Beltrame *et al.* (1991), conforme Figura 6.8, tem-se que a intensidade é de 35,8 mm/h, o que representa resultados bastante próximos. Da mesma forma, considerando os mesmos 60 minutos, mas um período de retorno de 20 anos, na curva IDF construída através dos coeficientes da CETESB (1986), a intensidade da chuva é igual a 68 mm/h, já na curva composta com as correlações de Beltrame *et al.* (1991), a intensidade é igual a 67,4 mm/h. Para melhor ilustrar o comportamento e as relações entre os métodos de ambos os autores, a Figura 6.9 apresenta um comparativo entre as curvas IDF obtidas a partir dos coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986), curva azul, e por Beltrame *et al.* (1991), curva laranja, para um período de retorno de 100 anos.

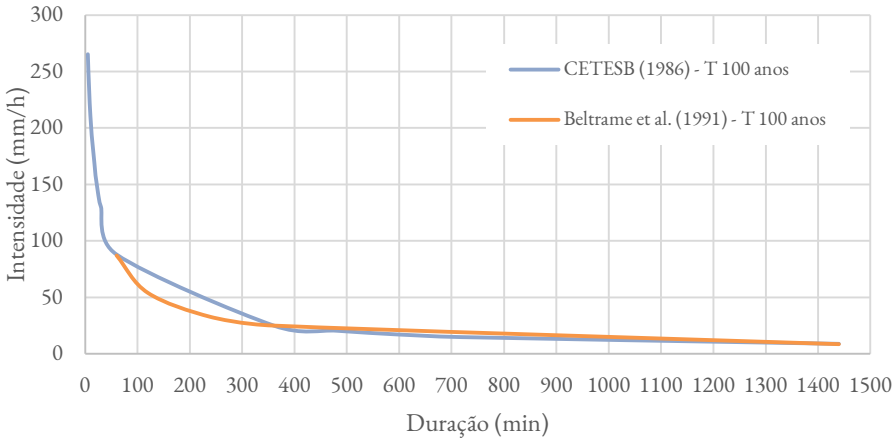


Figura 6.9: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme coeficientes de desagregação apresentados por CETESB (1986) e Beltrame *et al.* (1991) para um período de retorno (T) de 100 anos – Estação Rio Grande e FURG.

Na Figura 6.9, observa-se que ambas as curvas apresentam a tendência esperada de decaimento da intensidade à medida que a duração da chuva aumenta. Conforme mencionado anteriormente, a curva IDF construída com as correlações da CETESB (1986) compreende durações entre 5 e 1440, enquanto Beltrame *et al.* (1991) abrange durações entre 60 e 1440 minutos. Entre as durações de 60 e 360 minutos, é notável que a curva obtida através dos coeficientes da CETESB (1986) apresenta valores de intensidade de chuva maiores do que a curva proposta por meio dos coeficientes de Beltrame *et al.* (1991). Esta análise sugere que dentro do intervalo de tempo analisado, em termos de aplicação prática das curvas, o uso da curva obtida com os coeficientes da CETESB (1986) em projetos hidráulicos pode levar a dimensionamentos mais conservadores. A partir de 360 minutos, as curvas tendem a convergir e apresentar comportamentos similares, com intensidades de chuva próximas, o que reforça que as diferenças entre os métodos de desagregação têm maior impacto para chuvas de menores durações. Além disso, o comportamento semelhante entre as curvas pode ser explicado com base no ajuste realizado através do método de mínimos quadrados, visto que a duração da chuva é maior e existem menos pontos a serem ajustados.

6.1.5 Determinação Alternativa dos Parâmetros IDF

De forma alternativa à metodologia proposta no item 6.1.4, na qual as durações da precipitação foram determinadas de acordo com os intervalos propostos nos estudos de CETESB (1986) e Beltrame *et al.* (1991) para as constantes de desagregação, este item por objetivo propor relações IDF baseadas em intervalos temporais mais abrangentes. Assim, busca-se a obtenção de equações aplicáveis a qualquer duração (dentro de 24 horas), conferindo maior universalidade às relações propostas, ainda que, em contrapartida, apresentem ligeira redução na representatividade em relação aos dados observados. Nesse contexto, com base nos resultados oriundos da desagregação da chuva máxima diária, conforme descrito no item 6.1.3, foram estabelecidos os parâmetros das equações IDF que representam as chuvas intensas nas estações analisadas para diferentes faixas de durações, de acordo com os intervalos propostos por Vassão (2023) e Back *et al.* (2011).

No trabalho de Vassão (2023), foi constatado que para as cinco estações cujos dados foram analisados (Estação Rio Grande e FURG, Barra do Rio Grande, Granja Cerrito, Granja Santa Maria e Regatas), a variância entre os valores de intensidade de chuva observados e os valores estimados pelas equações ajustadas apresentou maiores discrepâncias no intervalo de durações compreendido entre 5 e 60 minutos, reduzindo-se a zero para o intervalo entre 60 e 1440 minutos. Em vista disso, estes intervalos foram adotados no presente estudo para a definição de novas relações IDF para as cinco estações consideradas. Para tal, foi aplicado o Método de Mínimos Quadrado aos valores obtidos através da desagregação com os coeficientes da CETESB (1986), para períodos de retorno que variaram entre 2 e 500 anos. A Tabela 6.11 apresenta as relações IDF resultantes para as cinco estações pluviométricas analisadas, considerando os intervalos de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos.

Tabela 6.11: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para intervalos de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos.

Estação	Para $\mathbf{5 < t < 60\ min}$	Para $\mathbf{60 < t < 1440\ min}$
Rio Grande e FURG	$i = \frac{593{,}18\ T^{0{,}17}}{(t+7{,}31)^{0{,}65}}\ R^2 = 0{,}9831$	$i = \frac{1147{,}72\ T^{0{,}17}}{(t+15{,}95)^{0{,}78}}\ R^2 = 0{,}9942$
Barra do Rio Grande	$i = \frac{589{,}02\ T^{0{,}16}}{(t+7{,}34)^{0{,}65}}\ R^2 = 0{,}9862$	$i = \frac{1142{,}78\ T^{0{,}16}}{(t+16{,}15)^{0{,}78}}\ R^2 = 0{,}9955$
Granja Cerrito	$i = \frac{676\ T^{0{,}15}}{(t+7{,}30)^{0{,}65}}\ R^2 = 0{,}9882$	$i = \frac{1301{,}74\ T^{0{,}15}}{(t+15{,}76)^{0{,}78}}\ R^2 = 0{,}9963$
Granja Santa Maria	$i = \frac{690{,}11\ T^{0{,}15}}{(t+7{,}33)^{0{,}65}}\ R^2 = 0{,}9870$	$i = \frac{1318{,}35\ T^{0{,}15}}{(t+15{,}60)^{0{,}78}}\ R^2 = 0{,}9958$
Regatas	$i = \frac{592{,}25\ T^{0{,}19}}{(t+7{,}33)^{0{,}65}}\ R^2 = 0{,}9769$	$i = \frac{1160{,}80\ T^{0{,}19}}{(t+16{,}52)^{0{,}78}}\ R^2 = 0{,}9911$

A análise da Tabela 6.11 evidencia que as relações de Intensidade-Duração-Frequência ajustadas para as cinco estações pluviométricas consideradas no estudo apresentam um comportamento consistente e homogêneo. Observa-se que os expoentes m, associados ao período de retorno, situam-se em faixas bastante próximas, entre 0,15 e 0,19, para os intervalos de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos, indicando a existência de respostas/comportamentos semelhantes entre as estações para o aumento da intensidade da precipitação devido ao crescimento da raridade do evento (aumento do período de retorno). Além disso, os expoentes m são iguais nas equações de uma mesma estação, independente dos intervalos adotados. O expoente n é constante em todas as estações, igual a 0,65 para o intervalo de 5 a 60 minutos e equivalente a 0,78 entre 60 e 1440 minutos. O parâmetro t_0 apresenta baixa variabilidade entre as estações, situando-se entre 7,30 e 7,34 para o intervalo de 5 a 60 minutos e entre 15,60 e 16,52 para o intervalo de 60 a 1440 minutos. As diferenças observadas concentram-se principalmente no coeficiente K, que tem influencia direta na escala de intensidade da precipitação. Estações como Granja Cerrito e Granja Santa Maria apresentam valores de K mais elevados, refletindo maiores intensidades estimadas para um mesmo período de retorno e duração, o que é coerente com as características pluviométricas locais, conforme observado por Vassão (2023). Os elevados coeficientes de determinação (R^2), especialmente para o intervalo de maiores durações, confirmam o desempenho adequado dos ajustes realizados e reforçam a robustez das relações IDF propostas.

A Figura 6.10(a) – (e) ilustra a comparação entre as curvas IDF obtidas para as cinco estações pluviométricas, considerando dois procedimentos de ajuste: as relações calculadas de acordo com os intervalos de duração propostos pela CETESB (1986), representadas pelas linhas contínuas, e as relações apresentadas a partir da segmentação dos

intervalos de duração de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos, retratadas pelas linhas tracejadas.

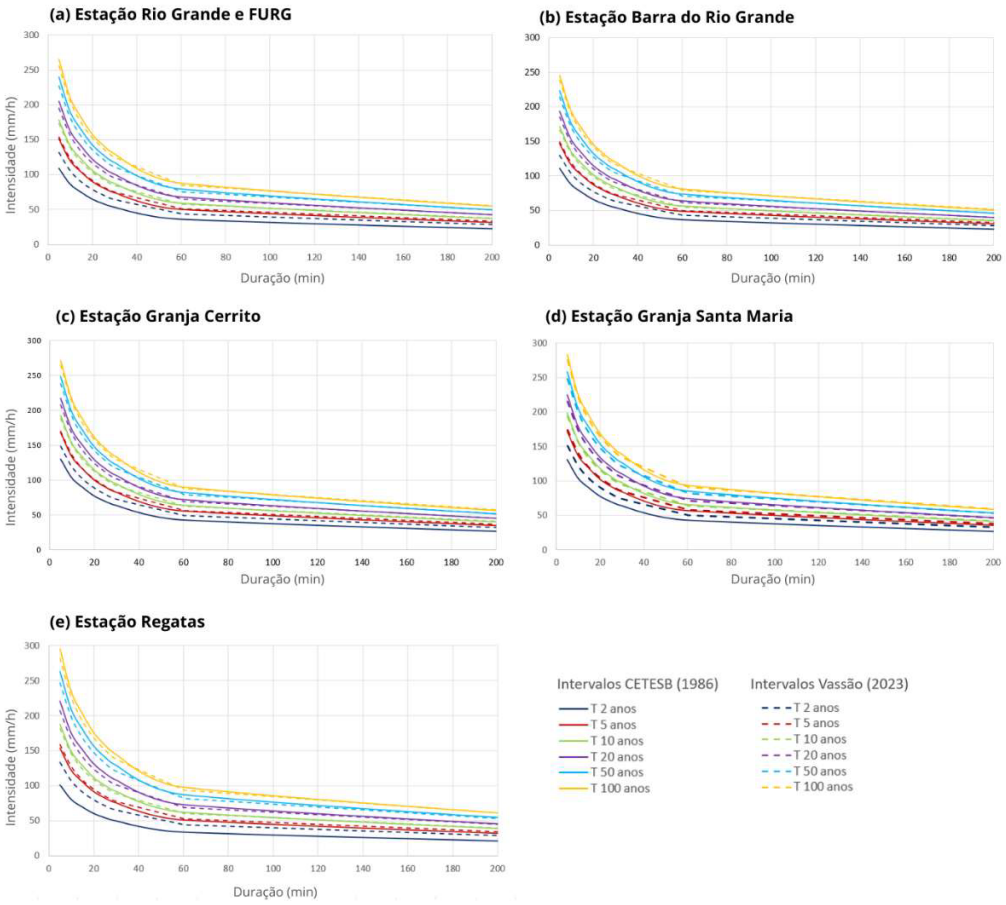


Figura 6.10: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme intervalos de duração apresentados por CETESB (1986), que correspondem as curvas com linhas contínuas, e curvas IDF calculadas para os intervalos de duração de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos, que correspondem as curvas tracejadas: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

Por meio de uma análise comparativa das curvas IDF apresentadas na Figura 6.10, observa-se que: a curva correspondente ao período de retorno (T) igual a 2 anos, construída com base nos intervalos de 5 a 60 minutos e 60 a 1440 minutos, apresenta intensidades de chuva mais elevadas do que a curva proposta através dos intervalos da CETESB (1986) para qualquer duração adotada; para períodos de retorno iguais a 5 e 10 anos, as curvas concebidas por meio dos dois procedimentos de ajuste apresentam intensidades aproximadas para a todas as durações; para períodos de retorno iguais a 20, 50 e 100 anos, no intervalo de 5 a 40 minutos, têm-se as curvas ajustadas utilizando os intervalos da CETESB (1986) apresentando intensidades ligeiramente superiores e, a partir

de 40 minutos em diante, as curvas se sobrepõe, apresentando intensidades de chuva praticamente iguais.

O estudo de Back *et al.* (2011), por sua vez, foi proposto considerando o intervalo de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos para estações pluviométricas localizadas em treze cidades do estado de Santa Catarina. Neste contexto, estes intervalos também foram adotados no presente estudo para a definição de novas relações IDF para as cinco estações consideradas. Foi aplicado o Método de Mínimos Quadrados aos valores obtidos através da desagregação com os coeficientes da CETESB (1986), para períodos de retorno que variaram entre 2 e 500 anos. A Tabela 6.12 apresenta as relações IDF resultantes para as cinco estações pluviométricas analisadas, considerando os intervalos de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos.

Tabela 6.12: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para intervalos de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos.

Estação	Para $\mathbf{5 < t < 120\ min}$	Para $\mathbf{120 < t < 1440\ min}$
Rio Grande e FURG	$i = \frac{886{,}18\ T^{0{,}17}}{(t+10{,}28)^{0{,}74}}\ R^2 = 0{,}9862$	$i = \frac{1889{,}27\ T^{0{,}17}}{(t+68{,}87)^{0{,}85}}\ R^2 = 0{,}9908$
Barra do Rio Grande	$i = \frac{878{,}28\ T^{0{,}16}}{(t+10{,}29)^{0{,}74}}\ R^2 = 0{,}9888$	$i = \frac{1891{,}16\ T^{0{,}16}}{(t+69{,}53)^{0{,}85}}\ R^2 = 0{,}9928$
Granja Cerrito	$i = \frac{1009{,}09\ T^{0{,}15}}{(t+10{,}27)^{0{,}74}}\ R^2 = 0{,}9904$	$i = \frac{2139{,}13\ T^{0{,}15}}{(t+68{,}57)^{0{,}85}}\ R^2 = 0{,}9940$
Granja Santa Maria	$i = \frac{1025{,}94\ T^{0{,}15}}{(t+10{,}26)^{0{,}74}}\ R^2 = 0{,}9894$	$i = \frac{2181\ T^{0{,}15}}{(t+68{,}56)^{0{,}85}}\ R^2 = 0{,}9933$
Regatas	$i = \frac{883{,}11\ T^{0{,}19}}{(t+10{,}29)^{0{,}74}}\ R^2 = 0{,}9808$	$i = \frac{1901{,}71\ T^{0{,}19}}{(t+69{,}51)^{0{,}85}}\ R^2 = 0{,}9864$

As relações IDF apresentadas na Tabela 6.12 evidenciam, novamente, a presença de um comportamento homogêneo entre as cinco estações. Todas as equações ajustadas mantêm as características destacadas anteriormente para as relações IDF apresentadas na Tabela 6.11, com elevados coeficientes de determinação, superiores a 0,98 em todos os casos, indicando bom desempenho dos ajustes. Observa-se que, para o intervalo de 5 a 120 minutos, todas as equações apresentam o expoente n igual a 0,74, enquanto para o intervalo de 120 a 1440 minutos o expoente assume valor constante de 0,85. O parâmetro m, por sua vez, coincidiu com valores obtidos na Tabela 6.11. De forma reiterada, as diferenças observadas entre os parâmetros t_0 em cada estação são mínimas, variando de 10,27 a 10,29 no intervalo de 5 a 120 minutos e 68,57 a 69,53 para o intervalo de 120 a 1440 minutos. Conforme observado anteriormente, as maiores diferenças estão centralizadas no parâmetro K das equações, os quais retratam as particularidades da região. O

Apêndice C (Tabelas C1 a C4) apresenta o ajuste ao Método de Mínimos Quadrados realizado para os casos discutidos neste item.

A Figura 6.11(a) – (e) apresenta a comparação entre as curvas IDF obtidas para as cinco estações pluviométricas, considerando dois procedimentos de ajuste: as relações calculadas de acordo com os intervalos de duração propostos pela CETESB (1986), representadas pelas linhas contínuas, e as relações apresentadas a partir da segmentação dos intervalos de duração de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos, retratadas pelas linhas no estilo traço e ponto.

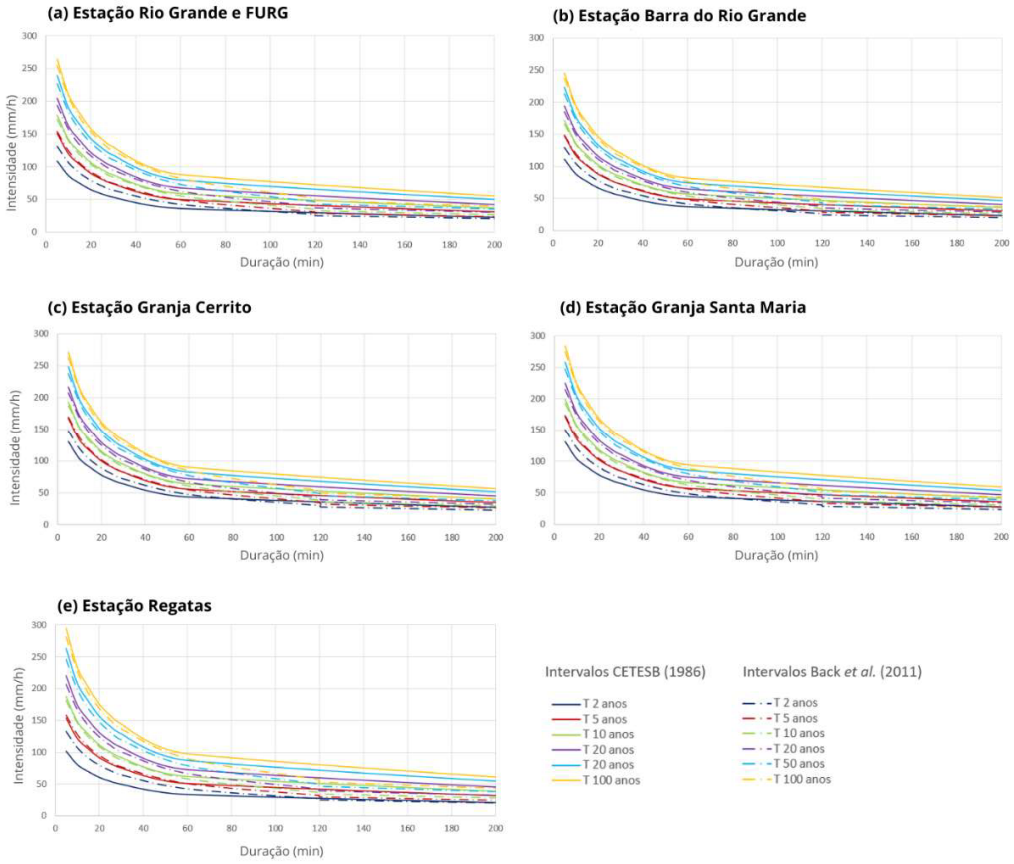


Figura 6.11: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme intervalos de duração apresentados por CETESB (1986), que correspondem as curvas com linhas contínuas, e curvas IDF calculadas para os intervalos de duração de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos, que correspondem as curvas tracejadas: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

A Figura 6.11 permite observar-se que: para T = 2 anos, a curva ajustada considerando o intervalo de 5 a 120 minutos e 120 a 1440 minutos, apresenta intensidade mais elevada no intervalo de 5 a 100 minutos e tende a convergir com a curva ajustada com base nos intervalos da CETESB (1986) a partir de 100 minutos; para T = 5 e 10 anos, no

intervalo entre 5 e 60 minutos, as curvas de mesmo período de retorno tendem a convergir e, a partir de 60 minutos, a curvas propostas com base na segmentação de proposta por Back *et al.* (2011) tendem a apresentar menores intensidades; para T = 20, 50 e 100 anos, percebe-se que entre 5 e 60 minutos, as curvas ajustadas através dos intervalos de Back *et al.* (2011), mostram intensidades bastante próximas as curvas ajustadas com os intervalos da CETESB (1986), porém, a partir de 60 minutos, as intensidades apresentam tendência de diminuição, acentuada pelo crescimento dos períodos de retorno.

6.1.6 Comportamento das Chuvas Intensas no Município e Análise Comparativa com Outros Autores

Conforme observado por Vassão (2023), para curtas durações, entre 5 e 30 minutos, o período de retorno que melhor representa a semelhança entre os valores observados e estimados através das equações ajustadas é o período de 5 anos. Neste contexto, o período de retorno de 5 anos foi adotado para a comparação entre as relações IDF apresentadas no item 6.1.4, a partir dos coeficientes de desagregação da CETESB (1986). A Figura 6.12 ilustra o comparativo entre as curvas IDF das cinco estações analisadas no estudo considerando um período de retorno de 5 anos.

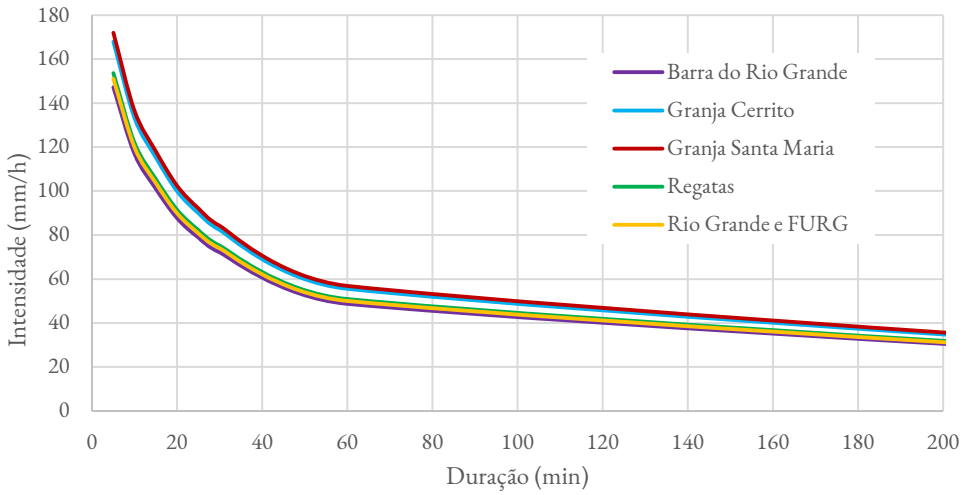


Figura 6.12: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme coeficientes de desagregação apresentados por CETESB (1986) para um período de retorno (T) de 5 anos para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande.

Ao estabelecer uma comparação entre curvas IDF apresentadas na Figura 6.12, evidencia-se uma elevada similaridade entre os valores de intensidade estimados para as cinco estações pluviométricas analisadas, visto que estão localizadas geograficamente em uma mesma região climatológica, sugerindo que o comportamento pluviométrico do município é relativamente homogêneo. Ainda assim, observa-se que as curvas correspondentes às estações Granja Cerrito e Granja Santa Maria apresentam maior proximidade

entre si ao longo de todo o intervalo de durações analisado e exibem valores de intensidade de precipitação ligeiramente superiores às demais estações. Conforme a localização espacial das estações, apresentada no item 5, Figura 5.1, verifica-se que as estações Barra do Rio Grande, Regatas e Rio Grande e FURG situam-se relativamente próximas, concentradas na região urbana no município de Rio Grande, enquanto as estações Granja Cerrito e Granja Santa Maria encontram-se mais afastadas do núcleo urbano, próximas ao Taim. Dessa forma, é possível constatar que estações geograficamente próximas tendem a apresentar curvas IDF sobrepostas, refletindo padrões de intensidade de chuva compatíveis e semelhantes, ao passo que estações localizadas em setores distintos do município exibem variações nos valores estimados, associadas às particularidades do regime pluviométrico local. Esse comportamento evidencia que a influência de fatores locais e condições microclimáticas podem favorecer a ocorrência de eventos mais intensos de chuva na zona rural de Rio Grande. Estas constatações também foram discutidas e observadas por Vassão (2023).

Conforme destacado por Silveira (1997), em sua análise comparativa sobre as intensidades pluviométricas nas zonas rural e urbana de Porto Alegre, o processo de urbanização pode influenciar significativamente as relações IDF, promovendo a amplificação das intensidades de precipitação em áreas urbanas. Esse comportamento está associado, entre outros fatores, ao fenômeno conhecido como ilha de calor urbana, caracterizado pelo aumento da temperatura em centros densamente urbanizados em relação às áreas periféricas e rurais, em função da impermeabilização do solo, da redução da cobertura vegetal e da concentração de edificações e atividades antrópicas. Apesar da relevância dessa hipótese, sua aplicação e discussão ainda são relativamente limitadas na literatura hidrológica do Rio Grande do Sul, especialmente quando se trata da influência direta sobre o comportamento das curvas IDF. Dessa forma, permanecem incertezas quanto à magnitude real dessas alterações e aos mecanismos responsáveis por tais variações. Ainda assim, Silveira (1997) ressalta a importância de considerar a existência de diferenças entre os regimes pluviométricos de zonas rurais e urbanas, bem como a necessidade de avaliar os respectivos intervalos de confiança das curvas IDF associadas a cada contexto. Em seu estudo realizado para Porto Alegre, o autor verificou que a IDF urbana apresentou maior intervalo de confiança em comparação à IDF rural, indicando maior variabilidade e incerteza associadas aos eventos extremos em áreas urbanizadas. Segundo o autor, essas faixas de variação devem ser incorporadas às precipitações de projeto utilizadas no dimensionamento de obras hidráulicas, de forma a aumentar a confiabilidade e a segurança dos projetos. Entretanto, os resultados obtidos para o município de Rio Grande apresentaram comportamento distinto daquele observado por Silveira (1997). No presente estudo, verificou-se que as estações localizadas em áreas rurais, Granja Santa Maria e Granja Cerrito, apresentaram intensidades pluviométricas superiores às observadas nas estações situadas no núcleo urbano. Esse resultado indica que, para a realidade local de Rio Grande, não é possível afirmar que o fenômeno da ilha de calor urbana esteja atuando de forma significativa sobre o regime de precipitações intensas, ou que ele seja determinante

para a configuração das curvas IDF do município. Tal comportamento pode estar relacionado a outros fatores de caráter regional e microclimático, como a influência da proximidade com áreas alagadiças, a dinâmica atmosférica costeira e a própria configuração espacial das estações pluviométricas analisadas.

A Figura 6.13 apresenta uma comparação entre as curvas IDF obtidas para as cinco estações pluviométricas consideradas neste estudo e aquelas propostas por diferentes autores para o município de Rio Grande, adotando um período de retorno de 5 anos.

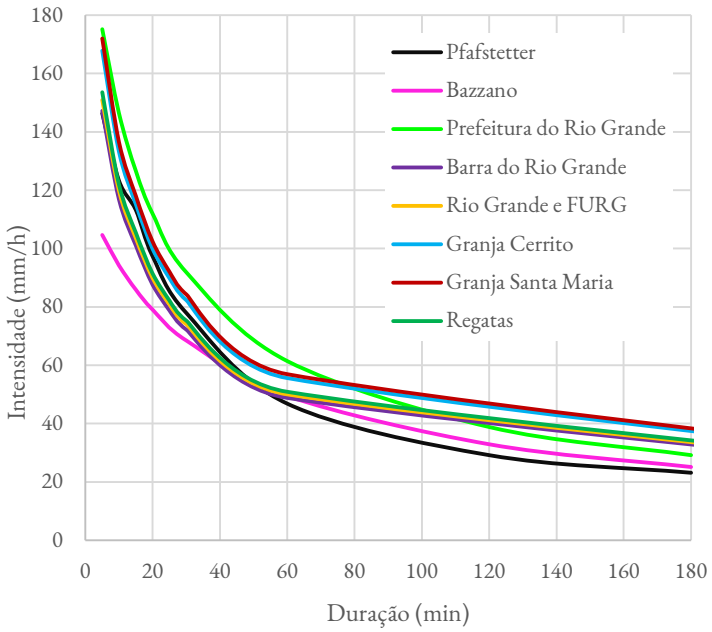


Figura 6.13: Comparativo entre curvas IDF calculadas conforme as relações IDF propostas por diferentes autores para um período de retorno (T) de 5 anos.

Ao examinar o comportamento das curvas ilustradas na Figura 6.13 tem-se, de modo geral, uma tendência em comum de redução da intensidade da precipitação com o aumento da duração do evento, característica típica de curvas IDF. Conforme também observado por Vassão (2023), é possível constatar que: para curtas durações, menores que 20 minutos, as estações rurais do município (Granja Cerrito e Granja Santa Maria) apresentam um ajuste mais aproximado à equação proposta pela Prefeitura Municipal do Rio Grande (2013); para durações intermediárias, entre 20 e 50 minutos, tanto as estações urbanas quanto as rurais de Rio Grande apresentam maior semelhança à equação proposta por Pfafstetter (1957); para longas durações, entre 50 e 100 minutos, as estações urbanas exibem um comportamento mais próximo à equação de Bazzano (2010); para durações maiores que 100 minutos, as estações urbanas e rurais apresentam maior proximidade à equação proposta pela Prefeitura Municipal do Rio Grande (2013).

Entretanto, para além da análise comparativa, destaca-se que as equações neste trabalho apresentam contribuições importantes em relação às formulações anteriormente

disponíveis. Primeiramente, trata-se de relações IDF ajustadas com base em séries históricas mais recentes e, em alguns casos, mais extensas, incorporando eventos extremos ocorridos nas últimas décadas, os quais não estão contemplados em estudos mais antigos. Essa atualização confere maior representatividade às condições climáticas atuais, aspecto particularmente relevante diante do aumento da frequência e intensidade de eventos de chuvas intensas no últimos anos, conforme amplamente evidenciado na literatura. Além disso, o presente estudo adota os registros pluviométricos de múltiplas estações distribuídas no município de Rio Grande, permitindo capturar variações espaciais do regime de chuvas, ao contrário de abordagens baseadas em dados pontuais. Este aspecto contribui para a representação mais fidedigna das condições locais, reduzindo incertezas associadas ao uso de modelos generalizados.

Sob a perspectiva da aplicação prática, a adoção das equações aqui propostas pode resultar em estimativas mais realistas das intensidades de precipitação, o que se traduz diretamente em projetos de drenagem mais seguros e confiáveis. A utilização de relações IDF desatualizadas ou pouco representativas pode levar ao subdimensionamento de estruturas hidráulicas, aumentando o risco de falhas, alagamentos e prejuízos econômicos, ou, por outro lado, ao superdimensionamento, implicando em custos desnecessários. Dessa forma, o emprego de equações IDF atualizadas, calibradas com base em registros pluviométricos extensos, mas também englobando eventos recentes, constitui uma ferramenta fundamental para subsidiar a tomada de decisão em projetos de engenharia e no planejamento urbano, contribuindo para a mitigação de riscos associados a eventos hidrológicos extremos.

6.2 Dados Projetados

Neste item, tem-se como objetivo a apresentação e discussão dos resultados obtidos com base em projeções climáticas futuras, disponibilizadas pelo INPE por meio da plataforma digital “Portal Projeções Climáticas no Brasil”. Enquanto o item 6.1 concentrou-se na caracterização do regime pluviométrico local observado e na definição de relações IDF representativas quanto as condições atuais/históricas, a presente etapa busca avaliar possíveis alterações nesse comportamento em função de cenários futuros, considerando a influência de processos de variabilidade e mudanças do clima. Tal abordagem permite não apenas compreender tendências potenciais, mas também fornecer subsídios para a avaliação dos possíveis impactos dessas mudanças no dimensionamento de obras hidráulicas e sistemas de drenagem urbana. Para tanto, foram utilizados dados simulados por dois modelos climáticos forçantes, HadGEM2-ES e CANESM2, os quais permitem estimar variáveis hidrometeorológicas, como a precipitação máxima diária ou a precipitação total, sob diferentes cenários futuros. Para este caso, foi adotado o cenário de altas emissões de gases causadores do efeito estufa, do tipo RCP 8.5, considerando o horizonte temporal de 2071 a 2099. A escolha desse cenário e do intervalo de tempo justifica-se pela disponibilidade dos dados na plataforma do INPE, sendo o período de 2071 a 2099 aquele que representa o intervalo mais distante no futuro contemplado pelas projeções.

A partir destes dados projetados, procedeu-se à aplicação da mesma metodologia adotada para os dados históricos, de modo a garantir a comparabilidade entre os resultados. Dessa forma, foram realizadas as etapas de ajuste probabilístico pela distribuição de Gumbel, verificação de aderência, determinação da chuva máxima diária, desagregação em durações menores e, por fim, a obtenção de equações IDF futuras, considerando os intervalos de durações propostos pela CETESB (1986), conforme item 6.1.4. Com base nestas relações IDF futuras, foram construídas curvas IDF para períodos de retorno variando entre 2 e 100 anos. A limitação superior de 100 anos decorre de aspectos metodológicos e práticos: do ponto de vista estatístico, a extrapolação para períodos de retorno muito elevados, como 500 ou 1000 anos, implica em um aumento significativo das incertezas associadas à estimativa dos parâmetros das distribuições probabilísticas, especialmente quando baseadas em séries de dados limitadas. Além disso, sob a ótica da engenharia, o intervalo de até 100 anos é amplamente adotado em manuais técnicos e normas de projeto para o dimensionamento de obras de macrodrenagem e infraestruturas críticas em áreas urbanas, sendo, portanto, adequado para aplicações práticas. Assim, a adoção desse limite busca equilibrar rigor técnico e aplicabilidade dos resultados.

A Figura 6.14 apresenta um comparativo entre as curvas IDF obtidas a partir dos dados observados/históricos da estação Granja Cerrito, representadas por curvas com traços contínuos, e aquelas derivadas de dados projetados/simulados pelos modelos climáticos citados, representadas por curvas tracejadas, para períodos de retorno variando entre 2 e 100 anos. Optou-se pela utilização da estação Granja Cerrito como referência para esta análise em função da maior extensão de sua série histórica, o que a torna mais representativa em relação ao regime pluviométrico do município de Rio Grande.

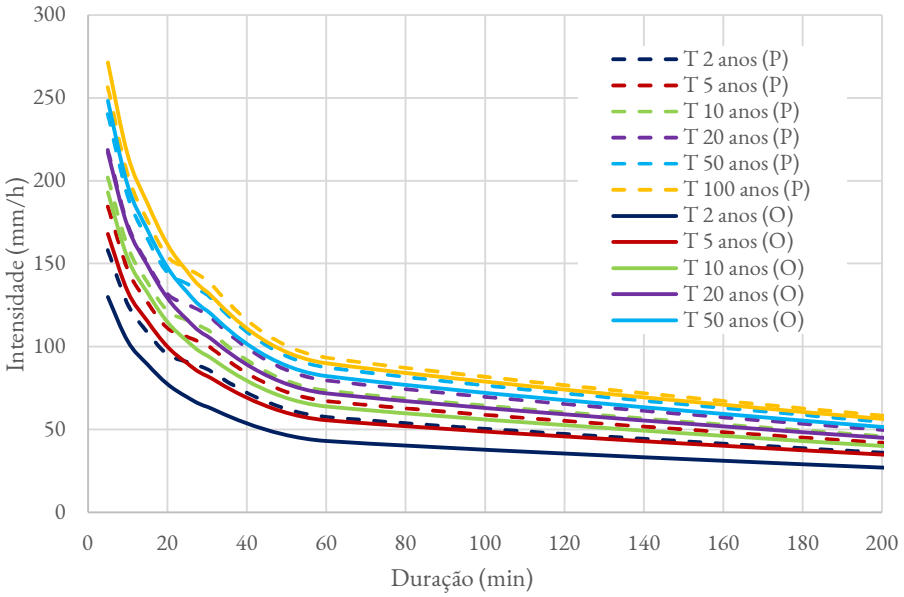


Figura 6.14: Comparativo entre curvas IDF propostas com base nos dados observados (O), representadas pelas linhas contínuas, e curvas IDF baseadas nos dados projetados (P), representadas pelas linhas tracejadas, para diferentes períodos de retorno (T).

A partir da interpretação da Figura 6.14, se comparadas as curvas para o mesmo período de retorno, observa-se que a maior parte das curvas projetadas apresentam intensidades superiores às observadas ao longo de praticamente todo o intervalo de durações analisado. Para durações menores, esta diferença de intensidades entre curvas observadas e projetadas, para um mesmo período de retorno, é menos acentuada e tende a aumentar após 25 minutos. Para um período de retorno igual a 2 anos (linha contínua na cor azul escuro), por exemplo, nota-se que entre 5 e 25 minutos, a curva projetada apresenta intensidades ligeiramente menores do que a curva observada referente ao período de retorno de 5 anos (linha tracejada na cor vermelho). Após 25 minutos, a curva projetada para T = 2 anos demonstra um comportamento similar a curva observada para T = 5 anos, sugerindo que os modelos climáticos preveem que a intensidade de chuva que antes seria prevista para acontecer em 5 anos, ocorrerá em 2 anos. Já para um período de retorno de 10 anos, no intervalo de 5 a 25 minutos, percebe-se que curva projetada apresenta intensidades ligeiramente maiores do que a curva observada. Porém, a partir de 25 minutos, a intensidade da curva projetada altera sua tendência inicial e passa a se comportar de maneira similar a curva observada para T = 20 anos. Por outro lado, para um período de retorno igual a 100 anos, tem-se a curva simulada e a histórica apresentando comportamentos bastante similares, o que sugere menores discrepâncias entre os cenários projetados e observados. Além disso, verifica-se que o afastamento entre as curvas projetadas e observadas decresce com o aumento do período de retorno.

Em adição à discussão sobre efeitos das mudanças climáticas nas relações IDF, o trabalho de Paiva *et al.* (2024) sugeriu novos critérios hidrológicos para adaptação às alterações no sistema climático global. Paiva *et al.* (2024) indicaram que as séries temporais utilizadas para análises estatísticas de eventos hidrológicos extremos necessitam ser longas, devendo considerar também os extremos hidrológicos recentes ocorridos no Rio Grande do Sul nos anos de 2023 e 2024. Além disso, os autores definem fatores de aumento da magnitude da precipitação. Isto é, para um período de retorno de 10 anos, o fator corresponde a 15%, enquanto para períodos de retorno maiores que 10 anos, este fator cresce para 20%. Os autores também discutem sobre o aumento da frequência de eventos extremos, indicando que os períodos de retorno estimados com base em dados históricos devem ser majorados em relação ao pretendido para o futuro no estudo/projeto conforme a Tabela 6.13.

Tabela 6.13: Alteração no Período de Retorno (T) adotado devido a mudança climática para pequenas e grandes bacias de acordo com Paiva *et al.* (2024).

T de projeto (anos)	**T a ser adotado (anos)**	
	$A < 1000\ km^2$	$A > 1000\ km^2$
2	3	3
5	12	10
10	25	20
25	75	60
50	200	150
100	450	350
200	1000	800
500	3500	2500
1000	8000	6000

*A é a área de drenagem.

7| Conclusões e Proposta de Continuidade

A presente dissertação teve como objetivo central o ajuste de novos coeficientes para as relações de Intensidade-Duração-Frequência para a cidade de Rio Grande – RS, com base na análise de registros pluviométricos de seis estações pertencentes ao município, considerando diferentes intervalos de durações de chuva. A partir dos resultados obtidos ao longo do estudo, foi possível estabelecer as conclusões descritas a seguir, destacando-se não apenas os aspectos técnicos do estudo, mas também suas contribuições para o avanço do conhecimento aplicado à engenharia hidráulica.

Inicialmente, através da análise da mais longa e representativa base de registros diários de chuva disponível no município, proveniente da estação Granja Cerrito entre os anos de 1964 e 2024, foi verificado que a intensidade e a frequência dos eventos extremos de chuva apresentaram crescimento ao longo das décadas. Contudo, não foi possível identificar possíveis padrões de comportamento ou tendências de aumento ou diminuição da intensidade dos eventos extremos de chuva a partir desta série de dados. Além disso, a partir da verificação da consistência dos dados pluviométricos, se observou que apenas uma parte destas séries é composta por dados previamente consistidos, enquanto a parcela restante abrange períodos com dados brutos. Com isso, não foi viável a aplicação de metodologias para a homogeneização dos conjuntos de dados pluviométricos.

No que se refere à modelagem probabilística, ambas as distribuições de Gumbel e Log-Normal apresentaram bom desempenho no ajuste aos dados observados, conforme evidenciado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Devido a ampla aplicação na literatura da distribuição de probabilidades de Gumbel para a análise de eventos extremos, ela foi adotada para o presente estudo. Por meio da análise dos ajustes entre curvas observadas e teóricas, foi observado que séries mais longas, como as das estações Granja Cerrito e Granja Santa Maria, proporcionaram ajustes probabilísticos mais robustos e representativos, evidenciando a importância da disponibilidade de dados de longo prazo para a obtenção de resultados mais confiáveis.

A aplicação dos coeficientes de desagregação propostos pela CETESB (1986) e por Beltrame *et al.* (1991) resultou em estimativas coerentes e similares de precipitação para diferentes durações. Entre durações de 60 a 360 minutos, as constantes da CETESB (1986) proporcionaram curvas IDF com valores de intensidade de chuva mais elevados do que a curva proposta por meio dos coeficientes de Beltrame *et al.* (1991). Esta constatação sugere que dentro do intervalo de tempo analisado, em termos de aplicação prática das curvas, o uso da curva obtida com os coeficientes da CETESB (1986) em projetos hidráulicos pode levar a dimensionamentos mais conservadores. A partir de 360 minutos, as curvas tendem a convergir e apresentar comportamentos similares, com intensidades de chuva próximas, o que reforça que as diferenças entre os métodos de desagregação têm maior impacto para chuvas de curta duração. No entanto, os coeficientes da CETESB (1986) mostraram-se mais adequados ao objetivo deste

trabalho, especialmente por contemplarem intervalos de curta duração, fundamentais na análise de chuvas intensas e no dimensionamento de sistemas de drenagem urbana.

As equações IDF propostas para as diferentes estações pluviométricas apresentaram elevados coeficientes de determinação, indicando excelente ajuste dos dados observados. A análise conjunta das estações permitiu identificar a variabilidade espacial do regime de precipitações no município, representando uma das principais contribuições deste trabalho, uma vez que estudos anteriores, em geral, baseiam-se em apenas um posto pluviométrico. Verificou-se uma notável semelhança entre os parâmetros das equações ajustadas, o que sugere um comportamento pluviométrico relativamente homogêneo na região de estudo, com variações possivelmente associadas a condições microclimáticas e à localização das estações, na zona rural e urbana no município. A comparação entre as curvas IDF das diferentes estações evidenciou que as intensidades de precipitação tendem a ser semelhantes dentro do município, embora estações localizadas em áreas rurais tenham apresentado intensidades ligeiramente superiores. Diferentemente do observado por Silveira (1997) para a cidade de Porto Alegre, em que a urbanização e o fenômeno da ilha de calor urbana contribuíram para maiores intensidades pluviométricas em áreas urbanas, no município de Rio Grande verificou-se que as maiores intensidades ocorreram nas estações situadas na zona rural, especialmente em Granja Santa Maria e Granja Cerrito. Esse comportamento sugere que, para a realidade local, outros fatores regionais, como a dinâmica atmosférica costeira e a influência de áreas alagadiças, podem exercer maior influência sobre o regime de chuvas intensas do que o processo de urbanização propriamente dito.

Neste contexto, destaca-se como contribuição relevante desta dissertação a atualização dos coeficientes das relações IDF a partir das séries históricas mais extensas e recentes, o que permite uma representação mais fiel do comportamento atual das precipitações intensas na região. Considerando que a confiabilidade das equações IDF está diretamente relacionada à extensão e qualidade das séries de dados utilizados, a incorporação de registros mais recentes contribui para reduzir incertezas e aumentar a segurança no dimensionamento de obras hidráulicas. Além disso, o ajuste das relações IDF para diferentes intervalos de duração da chuva representa um avanço em relação a abordagens mais simplificadas, possibilitando estimativas mais precisas dos volumes precipitados e, consequentemente, maior confiabilidade nos projetos de engenharia.

No que diz respeito às projeções climáticas futuras, foi observado que as curvas IDF derivadas dos dados simulados mantêm um comportamento similar as curvas históricas, porém com tendência de aumento das intensidades. Esse resultado indica uma possível intensificação de chuvas intensas no futuro, o que pode implicar em maiores riscos associados a alagamentos e sobrecarga de sistemas de drenagem, reforçando a importância da consideração de cenários futuros e das mudanças climáticas no planejamento urbano.

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas ao longo do desenvolvimento deste estudo, são apresentadas algumas recomendações para trabalhos e projetos futuros: recomenda-se a ampliação e a atualização contínua das séries

pluviométricas históricas, visando melhorar a confiabilidade das análises probabilísticas e diminuir incertezas, especialmente se houverem novos eventos extremos no município; sugere-se a realização de estudos complementares utilizando outras distribuições de probabilidade e metodologias de ajuste, de modo a avaliar possíveis melhorias na representação das curvas IDF; no contexto das projeções climáticas, recomenda-se a aplicação de múltiplos cenários de emissão de gases de efeito estufa e um maior conjunto de modelos climáticos, a fim de obter estimativas mais representativas do comportamento futuro das precipitações extremas; indica-se a utilização das equações IDF desenvolvidas neste estudo em projetos de engenharia hidráulica no município de Rio Grande; sugere-se o desenvolvimento de estudos que integrem a análise de chuvas intensas com a modelagem hidráulica, permitindo avaliar de forma técnica os impactos das alterações no regime de chuva sobre o sistema de drenagem urbana e os riscos de inundação em Rio Grande.

Por fim, conclui-se que as relações IDF propostas neste trabalho representam de forma consistente, técnica e atualizada o comportamento das chuvas intensas no município de Rio Grande. As equações geradas constituem uma ferramenta relevante para o planejamento e dimensionamento de obras hidráulicas, principalmente no contexto de sistemas de drenagem urbana, nos quais a estimativa consciente de chuvas intensas de curta duração é fundamental. Ademais, ao incorporar tanto dados históricos longos quanto a análise de cenários futuros a partir de projeções climáticas, o estudo amplia sua aplicabilidade, permitindo não apenas a representação das condições atuais, mas também a antecipação de possíveis alterações no regime de precipitação, fornecendo subsídios importantes para a tomada de decisão em um contexto de crescente variabilidade climática.

Referências

Abreu, M. C. (2018). "Desempenho de Métodos de Desagregação de Chuvas Intensas". Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

Abreu, M. C., R. A. Cecílio, F. F. Pruski, L. T. de Almeida, G. R. dos Santos, S. S. Zanetti, S. B. Pereira e D. D. da Silva (2022). "Daily Rainfall Disaggregation to Estimate the Intensity-Duration-Frequency Relationship in Minas Gerais State, Brazil". Em: Brazilian Archives of Biology and Technology.

Back, A. J. (2008). "Relationships between heavy precipitations of different durations in the municipality of Urussanga, SC". Em: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.

Back, A. J., A. Henn e J. L. R. Oliveira (2011). "Heavy rainfall equations for Santa Catarina, Brazil". Em: Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Bazzano, M. (2010). "Erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS)". Em: Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Bell, F. G. (1969). "Generalized rainfall-duration-frequency relationships". Em: Journal of Hydraulics Division, pp. 311-327.

Beltrame, L. F. S., A. E. L. Lanna e J. A. S. Louzada (1991). Chuvas Intensas, 69p.

Bertoni, J. e C. Tucci (2002). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. HidroWeb. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas. Acesso em: maio de 2025.

Brasil. Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Banco de Dados Meteorológicos. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/. Acesso em: maio de 2025.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Projeções Climáticas no Brasil. ProjETA. Disponível em: http://pclima.inpe.br. Acesso em: Dezembro de 2025.

Brasil. Ministério de Minas e Energia – MME. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Sistemática para Análise de Consistência de Dados Pluviométricos Mensais. Brasília. 1982.

Brasil. Ministério da Saúde. Plano Municipal de Saneamento Básico: Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas. Brasília. 2016.

Brêda, J. P. L. F., R. C. D. de Paiva, V. A. Siqueira e W. Collischonn (2023). "Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers". Em: Journal of Hydrology. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129284. url: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169423002263.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1986). Drenagem urbana: manual de projeto. Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer.

Collischonn, W. e F. Dornelles (2015). Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Collischonn, W. e R. Tassi (2008). Introduzindo Hidrologia. 5 ed, 149 p. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

Farias, J. A. M., J. F. R. Silva e L. da S. Coelho (2013). "Determinação de equação IDF, utilizando regressão linear em base logarítmica". Em: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).

Ferraz, R. L. L., C. L. C. Garcia, I. M. Dominguez-Hurtado e L. Gonzalez (2024). "Intensity-Duration-Frequency Curves for Manicaragua city, Cuba". Em: Enfoque UTE, pp. 49-58.

Fiorio, P., S. Duarte, G. Rodrigues, J. Miranda, Jarbas e R. Cooke (2012). "Comparação de equações de chuvas intensas para localidades do estado de São Paulo". Revista Engenharia Agrícola Jaboticabal, pp.1080-1088.

Júnior, A. R. B. (2022). Elementos de hidrologia aplicada. Editora Blucher.

Gnecco, I., A. Palla, P. La Barbera, G. Roth e F. Giannoni (2023). "Defining intensity–duration–frequency curves at short durations: a methodological framework". Em: Hydrological Sciences Journal.

Gribbin, J. E. (2013). Introduction to Hydraulics & Hydrology: With Applications for Stormwater Management. 4 ed, 560 p. Editora Cengage Learning.

Hussein, A. H. e M. N. Kasim (2024). "Utilizing statistical distribution tests to develop rainfall intensity–duration–frequency curves for enhanced hydrological analysis in Kirkuk city, Iraq". Em: Water Practice and Technology.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2024). Nota Técnica n°02, "Uma estimativa da população atingida pelas enchentes do Rio Grande do Sul em 2024". Governo Federal, Ministério do Planejamento Orçamentário.

Kawara A. Q. e I. H. Elsebaie (2022). "Development of Rainfall Intensity, Duration and Frequency Relationship on a Daily and Sub-Daily Basis (Case Study: Yalamlam Area, Saudi Arabia)". Em: Water.

Kobiyama, M., M. Mendonça, D. Moreno, I. Marcelino, E. Marcelino, E. Gonçalves, L. Brazetti, R. Goerl, G. Molleri e F. Rudorff (2006). Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos. Organic Trading. pp. 89.

Kumar, K. A., K. V. S. Sudheer, K. Pavani, G. D. Umadevi, C. V. C. M. Reddy e B. S. Reddy (2023). "Extreme Rainfall Analysis for Development of Rainfall Intensity Duration Frequency Curves for Semiarid Region of Andhra Pradesh in India". Em: National Academy Science Letters.

Marengo, J. A (2015). Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável.

Mazlan, A. S. W., N. N. A. Tukimat, S. N. Rahmat, H. Kasmin e S. S. Sah (2024). "Investigation the Impact of the Climate Change on Intensity Duration Frequency (IDF) Curve Development: Case Study at Hulu Terengganu, Malaysia". Em: International Journal of Integrated Engineering.

Mesquita, W. O., N. P. Griebeler, e F. L. C. Oliveira (2009). "Precipitações máximas diárias esperadas para as regiões central e sudeste de Goiás". Em: Periódico Pesquisa Agropecuária Tropical, pp. 73-81.

Naghettini, M. e E. Pinto (2007). Hidrologia Estatística. Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Paiva, R., W. Collischonn, P. Miranda, I. Petry, F. Dornelles, J. Goldenfum, F. Fan, A. Ruhof e H. Fagundes (2024). Nota Técnica. "Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil". Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Pfafstetter, O. (1957). Chuvas intensas no Brasil: relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos. Departamento Nacional de Obras e Saneamento.

Pimentel, L. (2015). Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente. Editora GEN.

Prefeitura Municipal de Rio Grande (2013). Elaboração do plano municipal de saneamento básico (PMSB) do município do Rio Grande. Prefeitura Municipal de Rio Grande.

Presotto, M. A. (2020). Determinação de coeficientes de desagregação e relações IDF para o estado do Rio Grande do Sul por meio de séries de duração parcial. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria.

Rodrigues, A. A., T. M. Siqueira, T. L. C. Beskow, S. Beskow e C. R. de Mello (2023). "Intensity-Duration-Frequency equations for Rio Grande do Sul - Brazil, based on stationary rainfall series". Em: Ambiente e Água.

Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi: 10.1017/9781009157896.013.

Silva, D. D., S. B. Pereira, F. F. Pruski, R. R. Gomes Filho, A. M. Q. Lana e L. G. N. Baena (2003). "Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial para o estado de Tocantins". Em: Engenharia na Agricultura, pp. 7-14.

Silva, D. F., B. E. O. Monte, J. A. Goldenfum e F. Dornelles. "Impactos das Mudanças Climáticas no Município de São Leopoldo/RS: Parte 1 – Relações IDF". Em: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Silveira, A. L. L. “Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre”. Em: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, p. 93-107, 1997.

Shah, S. A., H. F. Gabriel, M. W. Saleem, N. Ejaz, S. Shang, D. Mao e K. U. Rahman (2024). “Analyzing the Role of Changing Climate on the Variability of Intensity-Duration-Frequency Curve Using Wavelet Analysis”. Em: Water Resources Management.

Souza, G. R., I. P. Bello, L. F. C. de Oliveira e F. V. Corrêa (2019). “Heavy rainfall maps in Brazil to 5 year return period”. Em: Ambiente e Água. Editora SAGAH.

Stein, R. T., E. K. Schoenel, F. M. dos Santos, L. A. Botelho, N. S. Pelinson e V. S. Machado (2021). Hidrologia e Drenagem.

Tucci, C. E. M. (2009). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4ª ed. Editora da UFRGS.

Universidade Federal de Pelotas. Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq da Universidade Federal de Pelotas. GAM-IDF. Disponível em: https://gphidro.shinyapps.io/gam-idf/. Acesso em: julho de 2023.

Universidade Federal de Viçosa. Grupo de pesquisas em recursos hídricos – GPRH. Plúvio 2.1. Disponível em: https://www.gprh.ufv.br/?area=softwares. Acesso em: junho de 2023.

Vassão, G. M. (2023). Estudo das chuvas intensas no município de Rio Grande/RS sob a ótima da equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF). Orientador: Ana Paula Gomes. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

Villela, S. (1975). Hidrologia Aplicada. McGraw-Hill do Brasil.

WMO – World Meteorological Organization (2023). State of the Global Climate. WMO-No. 1347. 53 pp. Geneva.

Zuffo, A. C., C. Poleto, L. Turatti, M. A. Jacomazzi e M. C. de A. Silva (2024). Nota Técnica do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Apêndice A - Desagregação da precipitação para diferentes períodos de retorno nas estações pluviométricas

Tabela A.1: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Barra do Rio Grande.

Estação Barra do Rio Grande							
Relação entre as alturas pluviométricas	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
5min/30min	9,26	12,27	14,26	16,17	18,65	20,50	24,79
10min/30min	14,70	19,48	22,65	25,69	29,62	32,57	39,37
15min/30min	19,06	25,26	29,36	33,30	38,40	42,21	51,04
20min/30min	22,05	29,22	33,97	38,53	44,43	48,85	59,06
25min/30min	24,77	32,83	38,17	43,29	49,91	54,88	66,35
30min/1h	27,22	36,08	41,94	47,57	54,85	60,31	72,92
1h/24h	36,79	48,76	56,68	64,28	74,12	81,50	98,53
6h/24h	63,06	83,58	97,17	110,20	127,07	139,71	168,92
8h/24h	68,32	90,55	105,26	119,38	137,65	151,35	182,99
10h/24h	71,82	95,19	110,66	125,50	144,71	159,11	192,38
12h/24h	74,45	98,67	114,71	130,10	150,01	164,93	199,41
24h/1 dia	87,59	116,09	134,95	153,05	176,48	194,04	234,60

Tabela A.2: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Granja Cerrito.

Estação Granja Cerrito							
Relação entre as alturas pluviométricas	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
5min/30min	10,83	13,99	16,08	18,08	20,68	22,62	27,12
10min/30min	17,20	22,21	25,53	28,72	32,84	35,93	43,07
15min/30min	22,30	28,79	33,10	37,23	42,57	46,57	55,83
20min/30min	25,80	33,32	38,30	43,08	49,26	53,89	64,60
25min/30min	28,98	37,43	43,03	48,39	55,34	60,54	72,57
30min/1h	31,85	41,14	47,28	53,18	60,81	66,53	79,75
1h/24h	43,04	55,59	63,90	71,86	82,18	89,91	107,77
6h/24h	73,78	95,29	109,54	123,20	140,88	154,13	184,75
8h/24h	79,93	103,24	118,66	133,46	152,62	166,97	200,15
10h/24h	84,03	108,53	124,75	140,31	160,45	175,54	210,41
12h/24h	87,11	112,50	129,31	145,44	166,32	181,96	218,11
24h/1 dia	102,48	132,35	152,13	171,11	195,67	214,07	256,60

Tabela A.3: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Granja Santa Maria.

Estação Granja Santa Maria							
Relação entre as alturas pluviométricas	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
5min/30min	10,92	14,33	16,59	18,75	21,56	23,66	28,51
10min/30min	17,34	22,76	26,34	29,78	34,24	37,57	45,29
15min/30min	22,47	29,50	34,15	38,61	44,38	48,71	58,70
20min/30min	26,01	34,13	39,51	44,67	51,35	56,36	67,93
25min/30min	29,22	38,35	44,39	50,19	57,69	63,32	76,31
30min/1h	32,11	42,14	48,78	55,15	63,40	69,58	83,86
1h/24h	43,39	56,94	65,92	74,53	85,68	94,03	113,33
6h/24h	74,38	97,62	113,01	127,77	146,87	161,19	194,27
8h/24h	80,58	105,75	122,42	138,41	159,11	174,62	210,46
10h/24h	84,71	111,18	128,70	145,51	167,27	183,58	221,26
12h/24h	87,81	115,25	133,41	150,84	173,39	190,29	229,35
24h/1 dia	103,30	135,58	156,95	177,45	203,99	223,87	269,82

Tabela A.4: Precipitação desagregada em milímetros para diferentes períodos de retorno, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Regatas.

Estação Regatas							
Relação entre as alturas pluviométricas	Períodos de Retorno (T)						
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos	500 anos
5min/30min	8,47	12,80	15,66	18,41	21,96	24,62	30,78
10min/30min	13,46	20,32	24,87	29,23	34,88	39,11	48,88
15min/30min	17,44	26,35	32,24	37,89	45,21	50,69	63,37
20min/30min	20,19	30,49	37,31	43,85	52,31	58,66	73,32
25min/30min	22,68	34,25	41,91	49,26	58,77	65,90	82,37
30min/1h	24,92	37,64	46,06	54,13	64,59	72,42	90,52
1h/24h	33,68	50,86	62,24	73,15	87,28	97,86	122,33
6h/24h	57,73	87,19	106,69	125,40	149,62	167,77	209,70
8h/24h	62,54	94,46	115,59	135,85	162,09	181,75	227,18
10h/24h	65,75	99,30	121,51	142,82	170,40	191,07	238,83
12h/24h	68,16	102,93	125,96	148,05	176,64	198,06	247,57
24h/1 dia	80,18	121,10	148,19	174,17	207,81	233,01	291,25

Apêndice B – Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas para as estações pluviométricas

Tabela B.1: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Barra do Rio Grande.

Estação Barra do Rio Grande					
Relações IDF geradas a partir da chuva desagregada com coeficientes da CETESB (1986)					
T (anos)	Tempo (min)	K	m	t_0	n
2	5 10 15	226,35	0,07	1,51	0,40
2	20 25 30	308,37	0,00	1,20	0,50
2	60 360 480	702,87	0,18	6,25	0,73
2	600 720 1440	939,21	0,10	0,00	0,77
5	5 10 15	306,39	0,02	1,51	0,40
5	20 25 30	176,12	0,52	1,15	0,50
5	60 360 480	237,22	0,93	6,30	0,73
5	600 720 1440	250,43	1,04	0,00	0,77
10	5 10 15	198,22	0,27	1,51	0,40
10	20 25 30	227,38	0,32	1,14	0,50
10	60 360 480	369,61	0,52	6,27	0,73

10	600 720 1440	431,34	0,56	0,00	0,77
20	5 10 15	239,50	0,18	1,51	0,40
20	20 25 30	293,86	0,20	1,14	0,50
20	60 360 480	433,91	0,39	6,22	0,73
20	600 720 1440	587,56	0,37	0,00	0,77
50	5 10 15	275,97	0,14	1,51	0,40
50	20 25 30	382,91	0,12	1,19	0,50
50	60 360 480	484,45	0,31	6,21	0,73
50	600 720 1440	844,19	0,22	0,00	0,77
100	5 10 15	319,19	0,11	1,51	0,40
100	20 25 30	516,34	0,06	1,19	0,50
100	60 360 480	560,25	0,25	6,27	0,73
100	600 720 1440	1317,87	0,11	0,00	0,77
500	5 10 15	361,08	0,09	1,51	0,40

500	20 25 30	769,09	0,01	1,18	0,50
500	60 360 480	602,28	0,20	6,23	0,73
500	600 720 1440	2257,83	0,03	0,00	0,77

Tabela B.2: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Granja Cerrito.

Estação Granja Cerrito					
Relações IDF geradas a partir da chuva desagregada com coeficientes da CETESB (1986)					
T (anos)	Tempo (min)	K	m	t_0	n
2	5 10 15	261,98	0,07	1,44	0,40
2	20 25 30	337,45	0,11	1,27	0,51
2	60 360 480	810,20	0,18	5,91	0,73
2	600 720 1440	1093,78	0,11	0,00	0,77
5	5 10 15	346,26	0,02	1,45	0,40
5	20 25 30	188,97	0,56	1,14	0,50
5	60 360 480	241,23	1,00	6,25	0,73
5	600 720 1440	258,04	1,10	0,00	0,77

10	5 10 15	212,43	0,29	1,48	0,40
10	20 25 30	242,07	0,34	1,13	0,50
10	60 360 480	378,78	0,56	6,19	0,73
10	600 720 1440	449,21	0,59	0,00	0,77
20	5 10 15	256,44	0,20	1,48	0,40
20	20 25 30	314,77	0,21	1,13	0,50
20	60 360 480	444,93	0,42	6,15	0,73
20	600 720 1440	614,68	0,39	0,00	0,77
50	5 10 15	298,35	0,15	1,49	0,40
50	20 25 30	411,61	0,13	1,18	0,50
50	60 360 480	499,88	0,32	6,15	0,73
50	600 720 1440	889,54	0,24	0,00	0,77
100	5 10 15	339,59	0,11	1,48	0,40
100	20 25 30	561,51	0,06	1,17	0,50

100	60 360 480	585,64	0,26	6,21	0,73
100	600 720 1440	1413,92	0,12	0,00	0,77
500	5 10 15	379,61	0,10	1,48	0,40
500	20 25 30	838,84	0,01	1,16	0,50
500	60 360 480	610,37	0,21	6,18	0,73
500	600 720 1440	2459,36	0,03	0,00	0,77

Tabela B.3: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Granja Santa Maria.

Estação Granja Santa Maria					
Relações IDF geradas a partir da chuva desagregada com coeficientes da CETESB (1986)					
T (anos)	Tempo (min)	K	m	t_0	n
2	5 10 15	264,51	0,07	1,46	0,40
2	20 25 30	339,29	0,11	1,26	0,50
2	60 360 480	813,56	0,18	5,82	0,73
2	600 720 1440	1102,97	0,11	0,00	0,77
5	5 10 15	353,90	0,02	1,44	0,40

5	20 25 30	189,72	0,57	1,13	0,50
5	60 360 480	239,57	1,02	6,21	0,73
5	600 720 1440	257,29	1,12	0,00	0,77
10	5 10 15	215,45	0,29	1,47	0,40
10	20 25 30	245,03	0,35	1,13	0,50
10	60 360 480	376,42	0,58	6,15	0,73
10	600 720 1440	447,40	0,61	0,00	0,77
20	5 10 15	261,03	0,20	1,46	0,40
20	20 25 30	320,40	0,22	1,13	0,50
20	60 360 480	443,75	0,43	6,11	0,73
20	600 720 1440	615,84	0,40	0,00	0,77
50	5 10 15	304,76	0,15	1,47	0,40
50	20 25 30	422,27	0,13	1,17	0,50
50	60 360 480	500,30	0,33	6,12	0,73

50	600 720 1440	899,48	0,25	0,00	0,77
100	5 10 15	348,26	0,12	1,46	0,40
100	20 25 30	583,13	0,06	1,16	0,50
100	60 360 480	588,16	0,27	6,18	0,73
100	600 720 1440	1452,22	0,12	0,00	0,77
500	5 10 15	389,70	0,10	1,46	0,40
500	20 25 30	881,47	0,01	1,15	0,50
500	60 360 480	613,92	0,22	6,14	0,73
500	600 720 1440	2576,52	0,03	0,00	0,77

Tabela B.4: Relações de Intensidade-Duração-Frequência obtidas através da chuva desagregada conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) – Estação Regatas.

Estação Regatas					
Relações IDF geradas a partir da chuva desagregada com coeficientes da CETESB (1986)					
T (anos)	Tempo (min)	K	m	t_0	n
2	5 10 15	208,25	0,07	1,56	0,41
2	20 25 30	265,12	0,10	1,31	0,51

2	60 360 480	642,33	0,18	6,18	0,73
2	600 720 1440	857,86	0,10	0,00	0,77
5	5 10 15	318,36	0,02	1,49	0,40
5	20 25 30	181,71	0,53	1,14	0,50
5	60 360 480	239,19	0,95	6,26	0,73
5	600 720 1440	251,81	1,06	0,00	0,77
10	5 10 15	209,67	0,28	1,49	0,40
10	20 25 30	238,61	0,34	1,13	0,50
10	60 360 480	375,89	0,55	6,18	0,73
10	600 720 1440	444,16	0,58	0,00	0,77
20	5 10 15	259,11	0,20	1,47	0,40
20	20 25 30	314,97	0,22	1,10	0,50
20	60 360 480	449,98	0,42	6,05	0,73
20	600 720 1440	615,40	0,39	0,00	0,77

50	5 10 15	306,80	0,15	1,46	0,40
50	20 25 30	425,33	0,14	1,17	0,50
50	60 360 480	497,04	0,34	6,06	0,73
50	600 720 1440	902,37	0,25	0,00	0,77
100	5 10 15	355,75	0,12	1,44	0,40
100	20 25 30	602,24	0,07	1,15	0,50
100	60 360 480	588,22	0,28	6,14	0,73
100	600 720 1440	1480,97	0,13	0,00	0,77
500	5 10 15	404,70	0,11	1,44	0,40
500	20 25 30	948,16	0,01	1,14	0,50
500	60 360 480	617,58	0,23	6,10	0,73
500	600 720 1440	2773,25	0,03	0,00	0,77

Apêndice C – Ajuste ao Método dos Mínimos Quadrados

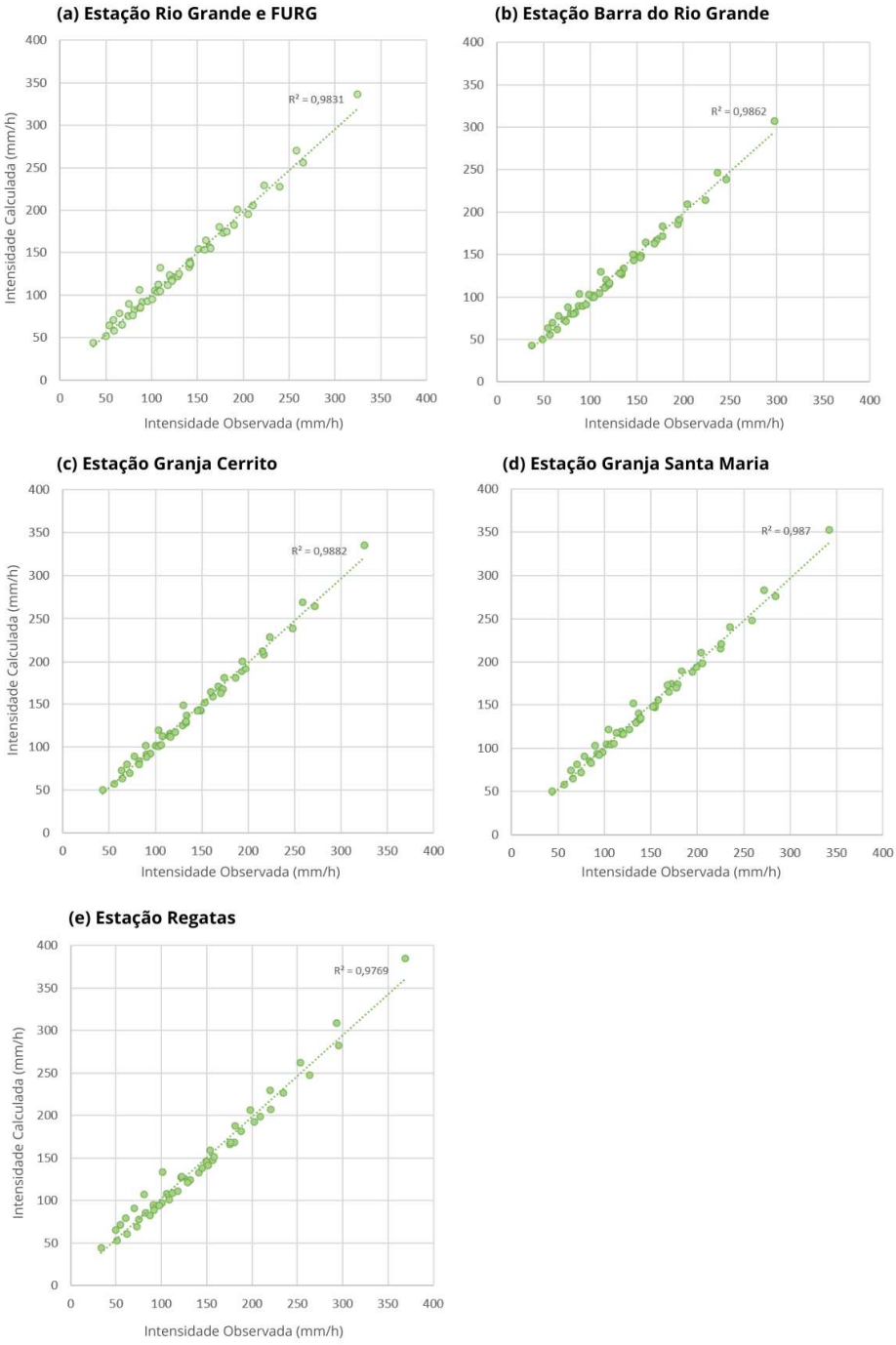


Figura C.1: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande, intervalo de 5 a 60 minutos: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

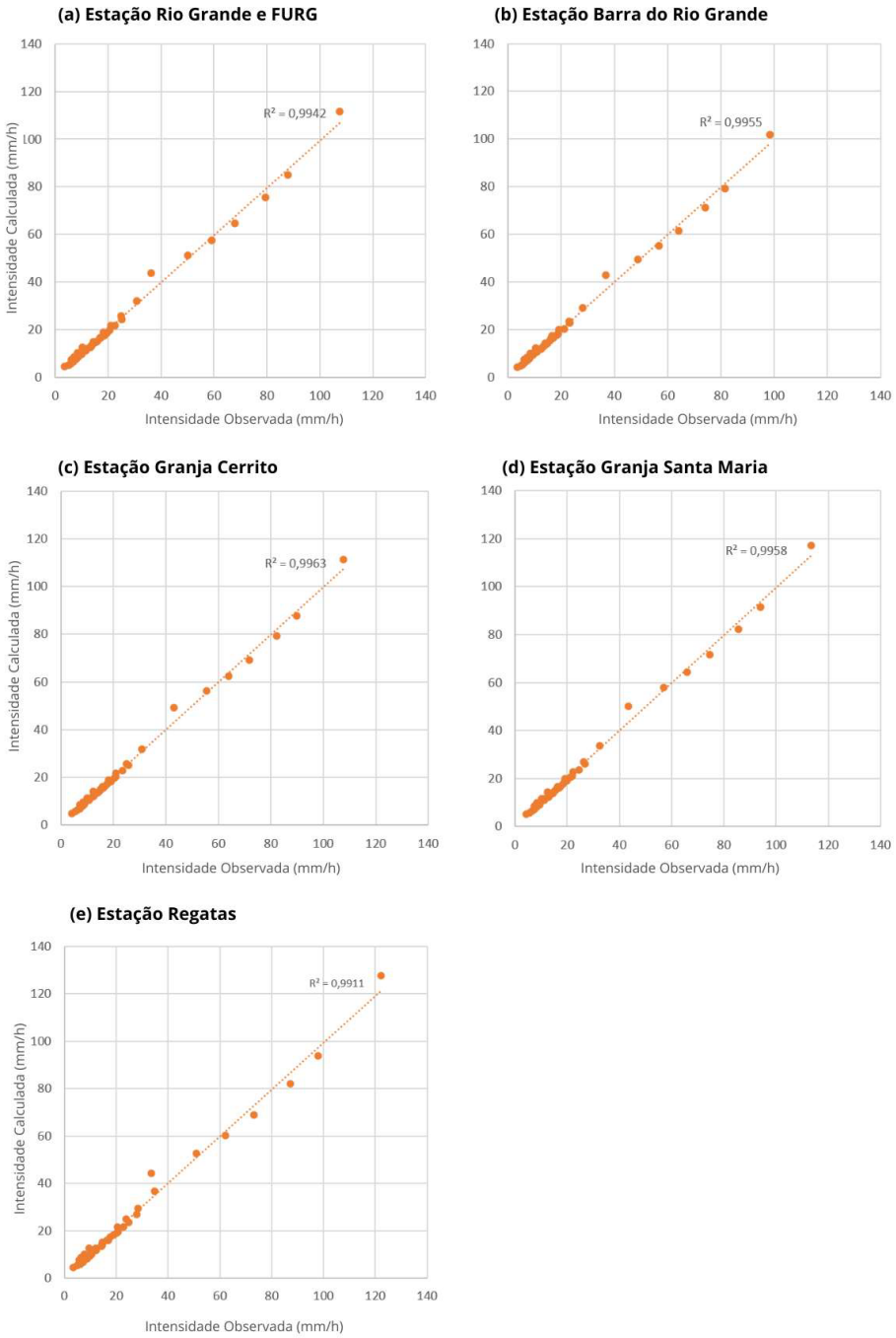


Figura C.2: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande, intervalo de 60 a 1440 minutos: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

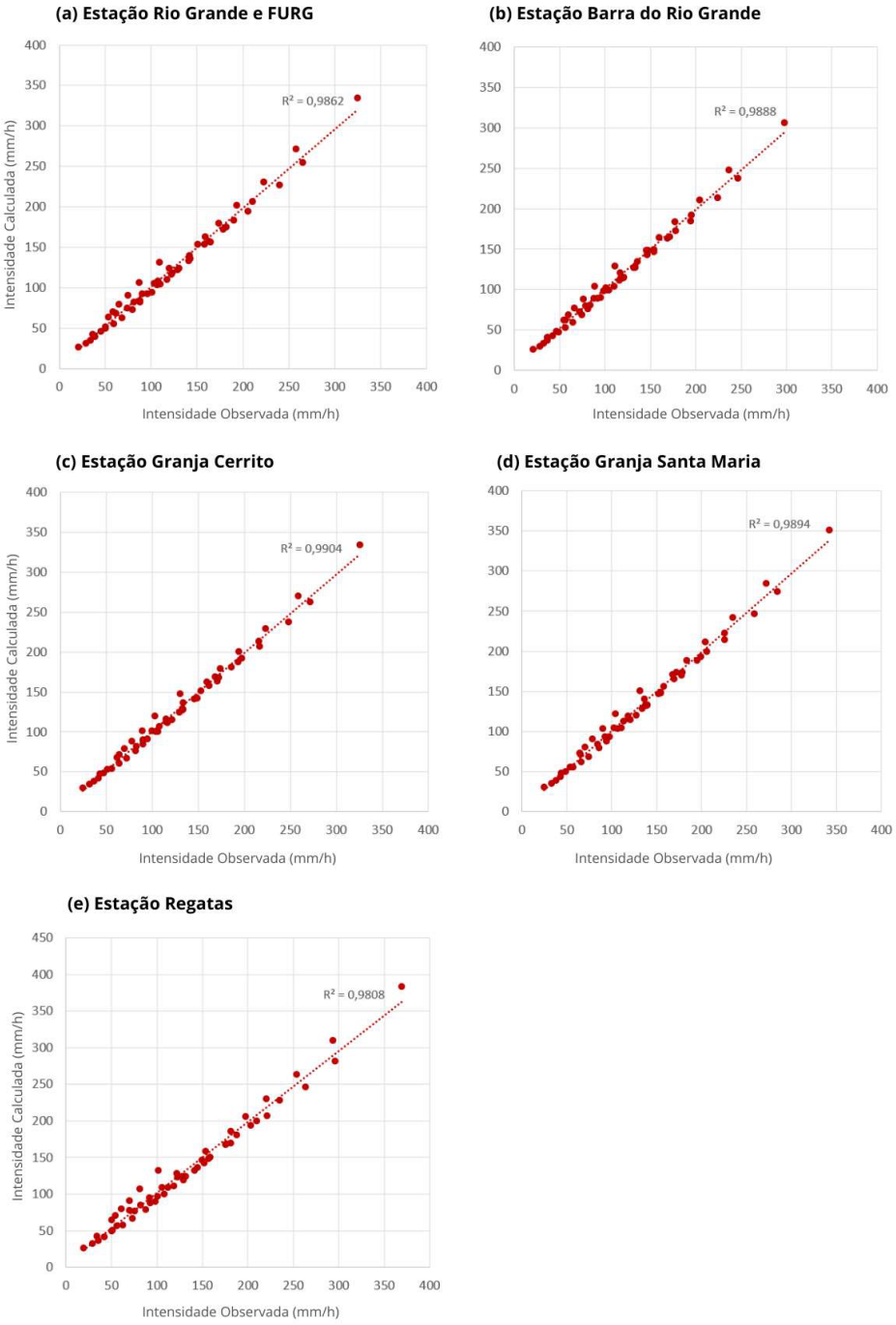


Figura C.3: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande, intervalo de 5 a 120 minutos: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.

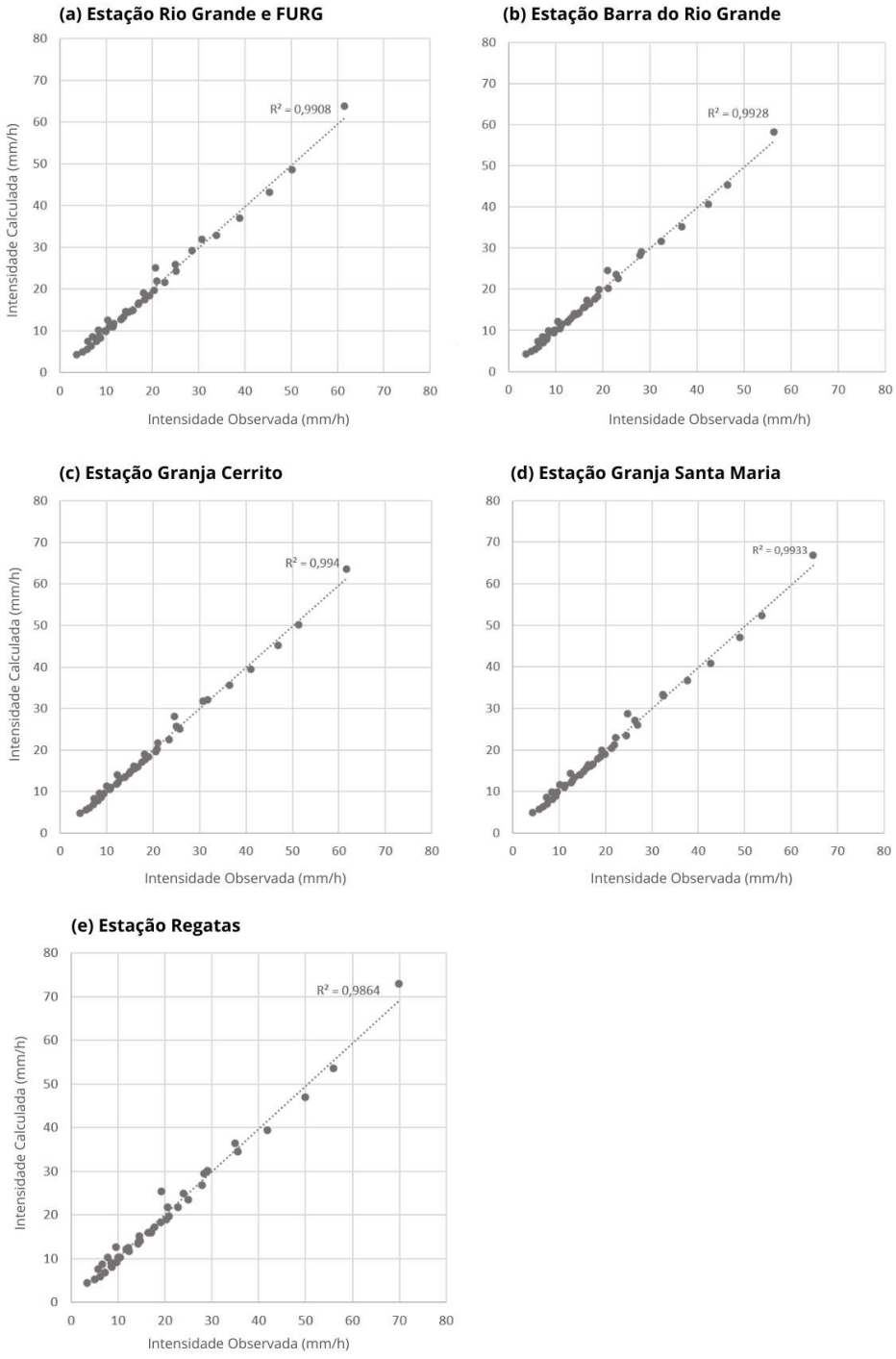


Figura C.4: Ajuste ao método de mínimos quadrados, conforme coeficientes de desagregação apresentados pela CETESB (1986) para cinco estações pluviométricas pertencentes ao município de Rio Grande, intervalo de 120 a 1440 minutos: a) Rio Grande e FURG, b) Barra do Rio Grande, c) Granja Cerrito, d) Granja Santa Maria e e) Regatas.