

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Jéssica Ribeiro Fontoura

**PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES  
INTENSAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS  
2019



**Jéssica Ribeiro Fontoura**

**PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS NO RIO  
GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

ORIENTADOR: Prof. Daniel Gustavo Allasia Picilli

Santa Maria, RS  
2019

Fontoura, Jéssica Ribeiro  
Padrões de distribuição temporal das precipitações  
intensas no Rio Grande do Sul / Jéssica Ribeiro  
Fontoura.- 2019.  
242 p.; 30 cm

Orientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2019

1. Chuva de projeto 2. Precipitações intensas 3.  
Drenagem urbana 4. Distribuição GEV I. Allasia Piccilli,  
Daniel Gustavo II. Título.



**Jéssica Ribeiro Fontoura**

**PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 8 de março de 2019:**

---

**Daniel Gustavo Allasia Piccilli, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Rutineia Tassi, Dra. (UFSM)**

---

**Masato Kobiyama, Dr. (UFRGS)**

Santa Maria, RS  
2019



## AGRADECIMENTOS

*Esta dissertação de mestrado jamais seria finalizada sem a contribuição de diversas pessoas as quais eu gostaria de agradecer:*

*Primeiramente aos dois amores da minha vida Gabriel e Leo, pois sem o suporte e o amor deles eu teria desistido.*

*Ao meu orientador Professor Daniel Allasia que sempre acreditou e confiou em mim, que teve paciência e boa vontade para aturar minhas frustrações, sabedoria e compreensão para me guiar até o final deste trabalho. Ele que sempre me desafiou com suas ideias inovadoras, e me comoveu com sua ética e bondade, contribuiu muito para quem sou hoje não só como profissional, mas também como pessoa.*

*À Professora Rutinéia Tassi por ser ela, essa pessoa extraordinária, competente, inspiradora, compreensiva, dedicada, enfim Rutinha.*

*Ao Raviel que contribuiu imensuravelmente para o desenvolvimento deste trabalho deixando muitas vezes sua tese de lado para pensar em soluções para meus problemas.*

*A todos os membros do grupo de pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecológicas que tem um lugar especial reservado em meu coração por toda evolução que me proporcionaram nestes anos de convivência.*

*À convivência e amizade dos meus colegas de aquário Ana, Bibi, Calina, Carla, Fernanda, Lucas, Mag, Pedro e Tiago.*

*Aos amigos que fiz em Santa Maria e fizeram desta cidade meu segundo lar, entre eles especialmente Nicolli, Amanda, Bruna e Ingrid.*

*Aos meus colegas do PPGE e do PPGEAMB, professores e funcionários dos programas que de alguma forma contribuíram para minha formação e compartilharam momentos importantes desta jornada.*

*Ao professor Latif Kalin por todo conhecimento compartilhado.*

*À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido.*

*Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por disponibilizar os dados.*

*A todos estes e a Deus, por colocar pessoas maravilhosas em minha vida e me dar forças para seguir buscando meu sonho de transformar a sociedade por meio da educação e da ciência.*

**MUITO OBRIGADA!**

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001*



## RESUMO

### PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS NO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Jéssica Ribeiro Fontoura

ORIENTADOR: Daniel Gustavo Allasia Piccilli

Existem diversos métodos para a estimativa da chuva de projeto sendo a abordagem mais comum a redistribuição no tempo das parcelas obtidas a partir de relações de intensidade-duração-frequência (IDF). Esta redistribuição pode seguir um padrão sintético ou crítico, como sugere o método dos blocos alternados, ou se basear no comportamento real da precipitação a partir de curvas adimensionais, como as propostas por Huff (1967). Os métodos que simulam condições críticas geralmente são simples e versáteis, porém muitas vezes resultam em vazões muito distintas das observadas em determinada bacia hidrográfica. Neste sentido, as metodologias que se baseiam no comportamento real da precipitação são mais vantajosas, o que é importante principalmente para projetos de estruturas hidráulicas e mapeamento de áreas de inundação. Apesar da importância e relevância da utilização de uma metodologia de estimativa de chuva de projeto bem ajustada as características da precipitação local, não há um estudo detalhado e abrangente sobre a distribuição temporal da precipitação do Rio Grande do Sul (RS). Isto seria muito importante uma vez que esta é uma região fortemente afetada por eventos extremos que geram uma constante necessidade de investimentos em infraestrutura para controle de cheias e sistemas de alertas de inundação. Portanto, esta pesquisa teve como objetivo contribuir para o entendimento da distribuição temporal das precipitações intensas do RS. Para isto, o banco de dados horários disponível no estado foi sintetizado na forma de curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação. Devido ao intervalo de amostragem dos dados e a curta extensão das séries históricas foi preciso adaptar a metodologia de elaboração proposta por Huff (1967). Para avaliar se os padrões de diferentes localidades do RS eram semelhantes foram elaboradas curvas pontuais a partir dos dados de cada estação. Já para investigar se os padrões do RS são semelhantes aos de outras localidades do mundo, foram elaboradas curvas regionais que representam o comportamento médio de todas as estações. Para conferir maior flexibilidade à estimativa de chuvas de projeto a partir destas curvas adimensionais foi realizado o ajuste de uma distribuição teórica de probabilidade. Análises de correlação entre as curvas pontuais indicaram que existe uma forte tendência da distribuição temporal da precipitação ser semelhante em todo estado. Ainda mais, a curva regional se mostrou semelhante as desenvolvidas para outras localidades do mundo, indicando que diferentes regiões climáticas também podem apresentar características de distribuição temporal da precipitação semelhantes. Por fim, as curvas desenvolvidas em outros países a partir de dados com discretização sub-horária apresentaram padrão semelhante as desenvolvidas neste trabalho indicando que, independente do intervalo de amostragem dos dados a distribuição temporal da precipitação se mantém.

**Palavras-chave:** Chuva de projeto. Precipitações intensas. Drenagem urbana.



## ABSTRACT

### TEMPORAL DISTRIBUTION PATTERNS OF INTENSE PRECIPITATION IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Jéssica Ribeiro Fontoura

ADVISOR: Daniel Gustavo Allasia Piccilli

Rainfall design can be estimated by several methods. The most common approach is the time redistribution of plots obtained from intensity-duration-frequency (IDF) relationships. This redistribution may follow a synthetic or critical pattern, as suggested by the alternating blocks method, or based on the actual precipitation behavior from dimensionless curves, as proposed by Huff (1967). Methods that simulate critical conditions are usually simple and versatile but often result in very different flow rates than those observed in a given river basin. In this sense, methodologies based on the actual precipitation behavior are more advantageous, which is important mainly for hydraulic structures projects and mapping of flood areas. Despite the importance and relevance of using a well-designed rainfall estimation methodology for local precipitation characteristics, there is no detailed and comprehensive study of the temporal distribution of Rio Grande do Sul (RS) precipitation. This would be very important by the fact that the region is heavily affected by extreme rainfall events, which represents a constant need for investment in flood control and flood warning systems infrastructure. Therefore, this research aimed to contribute to the understanding of the temporal distribution of intense rainfalls in RS. For this, the hourly database available in the state was synthesized in the form of dimensionless time distribution curves of the precipitation. Due to the sampling interval of the data and the short extension of the historical series, it was necessary to adapt the elaboration methodology proposed by Huff (1967). In order to evaluate the similarity of patterns of different RS locations, point curves were elaborated from the data of each station. With regard to investigating whether RS patterns are similar to those of other locations in the world, regional curves have been developed that represent the average behavior of all the stations. A theoretical probability distribution was adjusted in order to give greater flexibility to the estimation of design rains from these dimensionless curves. Correlation analyses between the punctual curves indicated that there is a strong tendency of the temporal distribution of precipitation to be similar thorough the state. Moreover, the regional curve has been similar to that developed for other localities of the world, indicating that different climatic regions may also present similar temporal distribution characteristics of precipitation. Finally, the curves developed in other countries from sub-hourly data discretization presented a similar pattern to those developed in this study, indicating that regardless of the sampling interval of the data adopted, the temporal distribution of precipitation is maintained. Hence, it can be concluded that the dimensionless curves developed in this work can be used to estimate design rainfall with lower sampling intervals.

**Keywords:** Design storm. Heavy rainfall. Urban drainage.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curvas de massa que caracterização a assinatura do sistema .....	35
Figura 2.2 – Volumes do Atlas 14 que trazem os padrões de distribuição temporal para diferentes regiões dos EUA .....	36
Figura 2.3 – Estações de monitoramento da precipitação no estado do Rio Grande do Sul até Maio de 2017 .....	39
Figura 2.4 – Hietograma de uma chuva de projeto .....	42
Figura 2.5 – Diferentes configurações para reordenamento das parcelas de chuva gerada a partir da IDF de Porto Alegre para região do Aeroporto .....	44
Figura 2.6 – Efeito da configuração de reordenamento das parcelas na vazão de pico	45
Figura 2.7 – Diferentes configurações de posicionamento do pico em relação a duração total do evento .....	45
Figura 2.8 – Efeito do posicionamento do pico na vazão de projeto .....	46
Figura 2.9 – Elementos do hietograma do método de Chicago .....	48
Figura 2.10 – Hietograma Triangular proposto por Yen e Chow (1980) .....	49
Figura 2.11 – Hietograma de projeto método triangula de Yen e Chow para uma duração de 240 min e Tr 2 anos IDF de Porto Alegre para região do Aeroporto	50
Figura 2.12 – Representação esquemática da metodologia de Pilgrim e Cordery (1975)	51
Figura 2.13 – Exemplos de hietogramas de projeto gerados a partir das metodologias propostas por Pilgrim e Cordery (1975) para Porto Alegre .....	52
Figura 2.14 – Curvas de distribuição temporal descritas por Huff (1967) .....	53
Figura 2.15 – Exemplos de hietogramas gerados a partir do método proposto por Huff (1967) .....	54
Figura 2.16 – Padrões de distribuição temporal da precipitação propostos pelo SCS (1986) para 24 h de duração .....	55
Figura 2.17 – Regiões homogêneas de distribuição temporal da precipitação de acordo com SCS (1986) .....	55
Figura 2.18 – Curvas adimensionais desenvolvidas com 10 e 182 eventos .....	58
Figura 3.1 – Mapa de localização e relevo do Rio Grande do Sul .....	62
Figura 3.2 – Mapa de localização das 42 estações automáticas do INMET utilizadas nesta pesquisa .....	66
Figura 3.3 – Diagrama de fluxo das etapas da metodologia adotada para elaboração das curvas .....	71
Figura 3.4 – Eventos expressos em termos de precipitação acumulada pela duração .	72
Figura 3.5 – Curvas adimensionais de distribuição temporal de cada evento .....	73
Figura 3.6 – Séries de porcentagem de precipitação para intervalos iguais de porcentagem de duração .....	74
Figura 4.1 – Relação média em porcentagem do número de eventos significativos no total de eventos selecionados por ano .....	83
Figura 4.2 – Curvas adimensionais elaboradas a partir da série histórica de Porto Alegre .....	87
Figura 4.3 – Boxplots das ordenadas de todas as estações INMET no RS para cada vertical de duração das curvas com 50% de probabilidade .....	89
Figura 4.4 – Curvas adimensionais elaboradas a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS e distribuição empírica de probabilidade .....	92

Figura 4.5 – Curvas pontuais com e sem estações identificadas como outliers e curva regional correspondentes a probabilidade de 50% para os Quartis I e II	93
Figura 4.6 – Curvas pontuais com e sem estações identificadas como outliers e curva regional correspondentes a probabilidade de 50% para os Quartis III e IV	94
Figura 4.7 – Estações que apresentaram comportamento diferenciado (outliers) das demais curvas pontuais em pelo menos uma das verticais de duração da curvas correspondentes a 50% de probabilidade	95
Figura 4.8 – Curvas adimensionais elaboradas a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS e distribuição empírica de probabilidade	98
Figura 4.9 – Comparação entre as curvas regionais desenvolvidas a partir da distribuição empírica e teórica de probabilidade	99
Figura 4.10 – Chuvas de projeto com intervalos de discretização de 1 hora estimadas a partir das equações propostas para as curvas do RS correspondentes ao nível de 50% de probabilidade	101
Figura 4.11 – Chuvas de projeto com intervalos de discretização de 15 minutos estimadas a partir das equações propostas para as curvas do RS correspondentes ao nível de 50% de probabilidade	102
Figura 4.12 – Comparação entre padrões de distribuição temporal da precipitação do Rio Grande do Sul e os padrões de outras regiões do mundo	103
Figura C.1 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Alegrete	127
Figura C.2 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Bagé	128
Figura C.3 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Bento Gonçalves	129
Figura C.4 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Caçapava do Sul	130
Figura C.5 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Camaquã	131
Figura C.6 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Cambará do Sul	132
Figura C.7 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Campo Bom	133
Figura C.8 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Canela	134
Figura C.9 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Canguçu	135
Figura C.10 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Cruz Alta	136
Figura C.11 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Dom Pedrito	137
Figura C.12 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Erechim	138
Figura C.13 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Frederico W.	139
Figura C.14 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Ibirubá	140

Figura C.15 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Jaguarão ....	141
Figura C.16 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Lagoa Vermelha .....	142
Figura C.17 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Mostardas ...	143
Figura C.18 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Palmeiras das Missões .....	144
Figura C.19 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Passo Fundo	145
Figura C.20 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Porto Alegre .	146
Figura C.21 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Quaraí .....	147
Figura C.22 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Rio Grande ..	148
Figura C.23 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Rio Pardo ...	149
Figura C.24 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santa Maria .	150
Figura C.25 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santana do Livramento .....	151
Figura C.26 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santa Rosa .	152
Figura C.27 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santa Vitória do Palmar .....	153
Figura C.28 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santiago ....	154
Figura C.29 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santo Augusto	155
Figura C.30 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São Borja ...	156
Figura C.31 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Gabriel .....	157
Figura C.32 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São José dos Ausentes .....	158
Figura C.33 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São Luiz Gonzaga .....	159
Figura C.34 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São Vicente do Sul .....	160
Figura C.35 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série	

histórica de precipitação da estação INMET localizada em Serafina Cor- rea .....	161
Figura C.36 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Soledade ....	162
Figura C.37 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Teutônia .....	163
Figura C.38 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Torres .....	164
Figura C.39 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Tramandaí ...	165
Figura C.40 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Tupanciretã ..	166
Figura C.41 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Uruguiana ..	167
Figura C.42 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Vacaria .....	168
Figura D.1 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Alegrete	169
Figura D.2 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Bagé ...	170
Figura D.3 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Bento Gonçalves .....	171
Figura D.4 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Caçapava do Sul .....	172
Figura D.5 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Camaquã	173
Figura D.6 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Campo Bom .....	173
Figura D.7 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Canela .	174
Figura D.8 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Cagunçu	175
Figura D.9 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Cruz Alta	176
Figura D.10 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Dom Pe- drito .....	177
Figura D.11 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Erechim	178
Figura D.12 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Frederico Westphalen .....	179
Figura D.13 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Ibirubá	180
Figura D.14 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Jagua- rão .....	181
Figura D.15 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Lagoa Vermelha .....	182
Figura D.16 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Mostar- das .....	183
Figura D.17 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Palmeira das Missões .....	184
Figura D.18 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Passo Fundo .....	185
Figura D.19 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Porto Alegre .....	186
Figura D.20 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Quaraí	187
Figura D.21 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Rio Grande	

Figura D.22 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Rio Pardo	189
Figura D.23 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santa Maria	190
Figura D.24 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santa Rosa	191
Figura D.25 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santa Vitória do Palmar	192
Figura D.26 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santana do Livramento	193
Figura D.27 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santiago	194
Figura D.28 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santo Augusto	195
Figura D.29 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Borja	196
Figura D.30 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Gabriel	197
Figura D.31 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São José dos Ausentes	198
Figura D.32 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Luiz Gonzaga	199
Figura D.33 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Vicente do Sul	200
Figura D.34 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Serafina Correa	200
Figura D.35 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Soledade	201
Figura D.36 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Teutônia	202
Figura D.37 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Torres	203
Figura D.38 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Tramandaí	204
Figura D.39 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Tupanciretã	205
Figura D.40 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Uruguaiana	206
Figura D.41 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Vacaria	207



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Densidade mínima ( $\text{km}^2 \cdot \text{estação}^{-1}$ ) recomendada pela OMM (2008)...	38
Tabela 2.2 – Exemplo de construção do hietograma de projeto pelo método de Pilgrim e Cordery (1975).....	51
Tabela 2.3 – Frequências de ocorrência das precipitações em cada um dos quartis propostos por Huff (1967).....	60
Tabela 3.1 – Descrição das estações automáticas do INMET em operação no RS até 2017.....	67
Tabela 3.2 – Configurações propostas para identificar o $V_m$ e o $MPS$ ideais.....	68
Tabela 4.1 – Resultado das simulações a partir das séries de Porto Alegre (A801) e Uruguaiana (A809) para escolha da melhor configuração de critérios do $V_m$ e $MPS$ .....	79
Tabela 4.2 – Relação de eventos classificados em cada uma das estações INMET no RS.....	81
Tabela 4.3 – Porcentagem de eventos classificados a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS em cada um dos quartis de acordo com a estação do ano.....	84
Tabela 4.4 – Porcentagem de eventos significativos a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS classificados em cada um dos quartis de acordo com a estação do ano.....	85
Tabela 4.5 – Porcentagem de eventos classificados a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS em cada um dos quartis de acordo com a classe de duração.....	85
Tabela 4.6 – Porcentagem de eventos significativos classificados a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS em cada um dos quartis de acordo com a classe de duração.....	86
Tabela 4.7 – Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a aderência dos elementos de cada vertical a distribuição GEV.....	97
Tabela 4.8 – Parâmetros da distribuição GEV ajustados aos elementos das verticais obtidas a partir do agrupamento dos dados de todas as estações INMET do RS.....	97
Tabela 4.9 – Parâmetros da função Recíproca Quadrática-YD para cada um dos quartis.....	100
Tabela B.1 – Matriz de correlação para as curvas do Quartil I correspondentes a probabilidade de 50%.....	124
Tabela B.2 – Matriz de correlação para as curvas do Quartil I correspondentes a probabilidade de 50%.....	125
Tabela B.3 – Matriz de correlação para as curvas do Quartil I correspondentes a probabilidade de 50%.....	126
Tabela E.1 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Alegrete A826.....	210
Tabela E.2 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Bagé A827.....	211
Tabela E.3 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Bento Gonçalves A840.....	212
Tabela E.4 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação	

	de Caçapava do Sul A812.....	213
Tabela E.5 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Camaquã A838 .....		214
Tabela E.6 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Canela A879 .....		215
Tabela E.7 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Canguçu A811 .....		216
Tabela E.8 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Cruz Alta A853 .....		217
Tabela E.9 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Cruz Alta A853 .....		218
Tabela E.10 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Erechim A828 .....		219
Tabela E.11 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Frederico Westphalen A854 .....		220
Tabela E.12 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Ibirubá A883 .....		221
Tabela E.13 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Jagurão A836 .....		222
Tabela E.14 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Lagoa Vermelha A884 .....		223
Tabela E.15 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Mostardas A878 .....		224
Tabela E.16 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Palmeira da Missões A856 .....		225
Tabela E.17 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Passo Fundo A839 .....		226
Tabela E.18 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Porto Alegre A801 .....		227
Tabela E.19 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Quaraí A831 .....		228
Tabela E.20 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Rio Grande A802 .....		229
Tabela E.21 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Rio Pardo A813 .....		230
Tabela E.22 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Santa Maria A803 .....		231
Tabela E.23 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Santa Rosa A810 .....		232
Tabela E.24 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Santa Vitória do Palmar A899 .....		233
Tabela E.25 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Santana do Livramento A804 .....		234
Tabela E.26 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Santiago A833 .....		235
Tabela E.27 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Santo Augusto A805 .....		236
Tabela E.28 – Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da esta-		



	ção de São Borja A830 .....	237
Tabela E.29	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de São Gabriel A832 .....	238
Tabela E.30	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de São José dos Ausentes A852 .....	239
Tabela E.31	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de São Luiz Gonzaga A852 .....	240
Tabela E.32	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Soledade A837 .....	241
Tabela E.33	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Torres A808 .....	242
Tabela E.34	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Tramandai A834 .....	243
Tabela E.35	– Ordenadas das curvas pontuais elaboradas a partir de dados da estação de Vacaria A880 .....	244
Tabela F.1	– Ordenadas das curvas regionais elaboradas a partir da distribuição empírica e GEV - Quartil I .....	245
Tabela F.2	– Ordenadas das curvas regionais elaboradas a partir da distribuição empírica e GEV - Quartil II .....	246
Tabela F.3	– Ordenadas das curvas regionais elaboradas a partir da distribuição empírica e GEV - Quartil III .....	247
Tabela F.4	– Ordenadas das curvas regionais elaboradas a partir da distribuição empírica e GEV - Quartil IV .....	248



## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Coeficientes de avanço de tormenta determinados para diversas localidades com base em séries históricas de precipitação .....	47
Quadro 4.1 – Desvio padrão (mm) entre as ordenadas de % de precipitação das curvas de todas as estações INMET para cada vertical de % de duração de cada nível de probabilidade e quartil .....	91
Quadro A.1 – Eventos significativos classificados no Quartil III da estação de Dom Pedrito (A881) expressos em porcentagem acumulada da precipitação pela porcentagem da duração total .....	120
Quadro A.2 – Eventos significativos classificados no Quartil III da estação de Dom Pedrito (A881) expressos em porcentagem acumulada da precipitação interpolada para cada intervalo de 10% de duração .....	121



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AS* América do Sul
- ANA* Agência Nacional da Águas
- BDMEP* Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
- CN* Curva Número
- CCMs* Complexo Convectivo de Mesoescala
- ENOS* El Niño Oscilação Sul
- GEV* Distribuição Generalizada de Valores Extremos
- IDF* Intensidade-relação-frequência
- INMET* Instituto Nacional de Meteorologia
- IOS* Índice de Oscilação Sul
- JBN* Jatos de Baixos Níveis
- JST* Jatos Subtropicais de Nível Superior
- KS* Kolmogorov–Smirnov
- MHE* Modelo Hidrológico Ecotecnologias
- MNT* Modelo Numérico do Terreno
- MPS* Mínimo Período Seco
- NOAA* Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
- OMM* Organização Mundial de Meteorologia
- ODP* Oscilação Decadal do Pacífico
- OMJ* Oscilação de Madden e Julian
- RS* Rio Grande do Sul
- SCS* Serviço de Conservação do Solo
- SCMs* Sistemas Convectivos de Mesoescala
- SFs* Sistema Frontal
- TR* Tempo de Retorno
- VCANs* Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis



## LISTA DE SÍMBOLOS

$i$	Intensidade da precipitação
$t_a$	Tempo de descida do hidrograma
$t_b$	Tempo de subida do hidrograma
$t_d$	Duração da chuva
$t_p$	Tempo de pico
$r$	Coefficiente de avanço
$\rho$	Correlação de Pearson
$d$	Distância entre curvas
$V_m$	Volume mínimo para um registro ser considerado
$E_t$	Eventos totais
$E_s$	Eventos significativos
$D_m$	Duração mínima para um evento ser considerado
$V_e$	Volume total mínimo para um evento ser considerado
$\kappa$	Parâmetro de forma
$\xi$	Parâmetro de escala
$\alpha$	Parâmetro de posição
$t$	Intervalo de duração





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
1.1	OBJETIVO .....	30
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>30</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
2.1	PRECIPITAÇÃO .....	33
2.1.1	<b>Variabilidade Temporal</b> .....	<b>34</b>
2.1.2	<b>Variabilidade Espacial</b> .....	<b>36</b>
2.1.3	<b>Monitoramento</b> .....	<b>37</b>
2.1.4	<b>Seleção de eventos a partir de séries históricas</b> .....	<b>40</b>
2.2	CHUVAS DE PROJETO .....	42
2.2.1	<b>Métodos baseados em relações IDF</b> .....	<b>43</b>
2.2.2	<b>Métodos baseados na estrutura interna das tormentas</b> .....	<b>48</b>
2.2.3	<b>Métodos baseados na análise de tormentas históricas</b> .....	<b>50</b>
2.2.4	<b>Métodos baseados em curvas de precipitação acumulada</b> .....	<b>52</b>
2.3	FATORES LIMITANTES DAS CURVAS ADIMENSIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO .....	57
2.3.1	<b>Amostragem dos dados de precipitação</b> .....	<b>57</b>
2.3.2	<b>Critérios de seleção de eventos</b> .....	<b>59</b>
2.3.3	<b>Critérios de agrupamento</b> .....	<b>59</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>61</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	61
3.1.1	<b>Fenômenos atuantes no tempo e clima do RS</b> .....	<b>63</b>
3.1.2	<b>Mecanismos formadores de precipitações intensas no RS</b> .....	<b>64</b>
3.2	DADOS DE PRECIPITAÇÃO .....	66
3.2.1	<b>Avaliação de critérios para seleção de eventos</b> .....	<b>68</b>
3.2.2	<b>Seleção de eventos significativos</b> .....	<b>69</b>
3.2.3	<b>Classificação dos eventos significativos em quartis</b> .....	<b>70</b>
3.3	ELABORAÇÃO DAS CURVAS ADIMENSIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO .....	71
3.3.1	<b>Curvas pontuais</b> .....	<b>72</b>
3.3.2	<b>Curvas regionais</b> .....	<b>76</b>
3.4	COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE DIFERENTES REGIÕES .....	78
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>79</b>
4.1	DADOS COLETADOS .....	79
4.1.1	<b>Critérios de seleção dos eventos extremos</b> .....	<b>79</b>
4.1.2	<b>Eventos selecionados</b> .....	<b>80</b>
4.1.3	<b>Avaliação do agrupamento em quartis</b> .....	<b>84</b>
4.2	DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS DO RS .....	86
4.2.1	<b>Curvas pontuais</b> .....	<b>86</b>
4.2.2	<b>Curvas regionais</b> .....	<b>88</b>
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DO RS E DE OUTRAS REGIÕES DO MUNDO .....	102
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>107</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE A – EXEMPLO DA REAMOSTRAGEM DOS EVENTOS SIGNIFICATIVOS.....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE B – MATRIZ DE CORRELAÇÃO .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE C – CURVAS DE MASSA EVENTOS SIGNIFICATIVOS .....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE D – CURVAS PONTUAIS PARA AS ESTAÇÕES INMET DO RS ...</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE E – ORDENADAS DAS CURVAS PONTUAIS DAS ESTAÇÕES INMET DO RS.....</b>	<b>209</b>
<b>APÊNDICE F – ORDENADAS DAS CURVAS REGIONAIS ELABORADAS A PARTIR DAS DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE .....</b>	<b>245</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Chuvas de projeto são utilizadas para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e mapeamento de áreas de inundação em projetos de drenagem urbana (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; BEVEN, 2011; MONTEIRO; KOBAYAMA, 2014). Comumente as alturas precipitadas são estimadas a partir de relações de intensidade-duração-frequência (IDF) ou de séries históricas de precipitação (BONTA, 2004; GUO; HARGADIN, 2009; NOTARO et al., 2016). Já a determinação do comportamento da precipitação intensa ao longo da duração do evento é geralmente arbitrada de maneira indireta, uma vez que medições sub-diárias não estão disponíveis para a maioria dos locais de estudo (TUCCI et al., 2000; AKAN; HOUGHTALEN, 2003; CANHOLI, 2014).

A distribuição temporal da chuva de projeto condiciona o volume infiltrado e a forma do hidrograma de saída, por isso a relevância da utilização de um método de determinação do hietograma de projeto bem ajustado ao local de estudo (BEMFICA; GOLDENFUM; SILVEIRA, 2000). Em sua maioria, as metodologias de distribuição temporal das alturas precipitadas são baseadas nos conceitos de relações IDF (KEIFER; CHU, 1957; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; MCCUEN et al., 1989) na estrutura interna das tormentas (SIFALDA, 1973; DESBORDES; RAOUS, 1976; YEN; CHOW, 1980), em curvas de precipitação acumulada (HUFF, 1967; SCS, 1986; BONNIN et al., 2006a), ou em análises diretas de tormentas históricas (PILGRIM; CORDERY, 1975; KOUTSOYIANNIS, 1994).

Dentre as metodologias existentes, as curvas do SCS (1986) e as de Huff (1967) são amplamente utilizadas e recomendadas como método padrão para derivar tormentas de projeto em muitos países. Entretanto, estas foram baseadas em dados observados nos Estados Unidos e os próprios autores alertam para sua utilização em regiões geoclimáticas distintas. Alguns estudos para diferentes regiões demonstraram que os padrões de precipitação gerados por tais abordagens realmente não correspondem aos locais quando comparados (AZLI; RAO, 2010; EWEA et al., 2016; GHASSABI et al., 2016; YIN et al., 2016; EL-SAYED, 2017; PAN et al., 2017), podendo acarretar tanto falhas nas estruturas quanto superdimensionamento das redes de drenagem (DOLŠAK; BEZAK; ŠRAJ, 2016; DULLO; KALYANAPU; TEEGAVARAPU, 2017).

Outra metodologia amplamente aplicada para distribuir totais de precipitação é o método dos blocos alternados. Este método é simples, pois apenas reorganiza as alturas precipitadas dadas pela relação IDF de forma que o bloco de maior volume se localize no centro da duração do evento (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Esta configuração não representa nenhum padrão de precipitação observado e, apesar de o método poder ser aplicado em qualquer localidade (GARCÍA-BARTUAL; ANDRÉS-DOMÉNECH, 2017), pode trazer resultados que não correspondem estatisticamente à realidade local, levando a projetos mal concebidos e perdas econômicas (ABREU; SOBRINHA; BRANDAO, 2017).

Baseado no exposto fica claro que a utilização de uma chuva de projeto obtida por procedimentos que se encaixem bem às características climáticas de uma determinada região apresenta um grande potencial para otimização e redução de custos dos projetos relacionados à gestão de águas pluviais em áreas urbanas, principalmente os voltados para o controle de cheias (BEMFICA; GOLDENFUM; SILVEIRA, 2000). Isto é particularmente importante para regiões como o Rio Grande do Sul onde existe forte incidência de eventos extremos (ZIPSER et al., 2006; BROOKS; DOTZEK, 2008) ocasionando uma constante necessidade de investimentos em infraestrutura para controle de cheias e sistemas de alertas de inundação.

Mesmo tendo em vista que o entendimento dos padrões locais de distribuição temporal da precipitação pode auxiliar na prevenção de danos e prejuízos causados por eventos extremos, ainda hoje há poucos estudos desenvolvidos no Brasil que abordem a distribuição temporal da precipitação (MOLIN et al., 1996; PAIVA, 1997; PINHEIRO; NAGHETTINI, 1998; MEHL et al., 2001; CRUCIANI; MACHADO; SENTELHAS, 2002; BACK, 2011; COUTINHO et al., 2014; BACK; SONEGO; POLA, 2015; TIECHER et al., 2013; FERREIRA, 2015).

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é contribuir para o entendimento da distribuição temporal das precipitações intensas do Rio Grande do Sul para fins de estimativa de chuva de projeto.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um conjunto de curvas adimensionais que representem a distribuição temporal dos volumes precipitados em determinada localidade;
- Elaborar um conjunto de curvas regionais a partir do agrupamento dos dados das estações que apresentaram padrão de distribuição temporal da precipitação semelhantes;
- Verificar a aderência das curvas pontuais ao padrão regional;

- Comparar as curvas regionais com padrões adimensionais desenvolvidos em outros países;



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PRECIPITAÇÃO

As precipitações são classificadas de acordo com os mecanismos da sua formação em frontais, convectivas e orográficas. As precipitações frontais estão condicionadas pela passagem dos sistemas frontais, pois ocorrem quando se encontram duas grandes massas de ar, de diferente temperatura e umidade. O ar mais quente (mais leve e, normalmente, mais úmido) é empurrado para cima entrando em contato com o ar frio. Como visto anteriormente o resfriamento do ar quente ocasiona a condensação do vapor (REBOITA et al., 2012).

As massas de ar que formam as chuvas frontais podem ter centenas de quilômetros de extensão e movimentam-se de forma relativamente lenta, podendo até ficar estacionárias sobre um local por vários dias. Devido a isto, as chuvas frontais caracterizam-se por atingirem grandes extensões, longa duração e intensidade relativamente baixa. No Brasil as chuvas frontais são muito frequentes na região Sul, atingindo também as regiões Sudeste, Centro Oeste e, por vezes, o Nordeste (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009).

Já, as chuvas convectivas ocorrem pelo aquecimento de massas de ar, relativamente pequenas, que estão em contato direto com a superfície quente dos continentes e oceanos (COLLISCHONN; TASSI, 2008). O aquecimento do ar pode resultar na sua subida para níveis mais altos da atmosfera onde as baixas temperaturas condensam o vapor, formando nuvens cumuliformes. Este processo dá origem aos temporais tropicais caracterizados pelas curtas durações e alta intensidade (STEINKE, 2012). Apesar de as chuvas convectivas ocorrem de forma concentrada sobre áreas relativamente pequenas, a alta intensidade ocasiona problemas de inundação em áreas urbanas (COLLISCHONN; TASSI, 2008). No Brasil há uma predominância de chuvas convectivas, especialmente nas regiões tropicais (DIAS; SILVA, 2009).

As chuvas orográficas ocorrem pela ascensão do ar quente devido a um grande obstáculo do relevo, como uma cordilheira ou serra muito alta. Este obstáculo impede a passagem de ventos quentes e úmidos, que sopram do mar, obrigando o ar a subir. Como em maiores altitudes a temperatura é mais baixa a umidade do ar se condensa, formando nuvens junto aos picos da serra, onde chove com muita frequência (REBOITA et al., 2012). Segundo Steinke (2012), estas precipitações são caracterizadas pela média intensidade e grandes durações. São recorrentes em muitas regiões do Mundo, e no Brasil são especialmente importantes ao longo da Serra do Mar (DIAS; SILVA, 2009).

### 2.1.1 Variabilidade Temporal

Assim como os demais processos do ciclo hidrológico, a precipitação apresenta variações ao longo do tempo. A análise desta variação é muito importante e pode ser desenvolvida em uma escala de anos, meses, dias, horas ou até mesmo minutos, dependendo da aplicação prática para qual o conhecimento do comportamento da precipitação servirá de base.

Entre as principais razões para conhecer a variação da precipitação no tempo pode-se citar a caracterização climatológica de uma determinada região geográfica, a detecção de tendências de longo termo ou oscilações periódicas nas séries temporais, e a identificação da assinatura do sistema por meio de relações entre o total precipitado e a duração da tormenta (SHUTTLEWORTH, 2012).

As variações climatológicas estão associadas principalmente aos fatores condicionantes de ocorrência da precipitação como a incidência da radiação solar (MAIDMENT et al., 1993). A radiação é naturalmente variável ao longo do ano e determina a temperatura do globo regulando a movimentação das massas de ar (SHUTTLEWORTH, 2012).

Existem ainda outros fatores e fenômenos que influenciam na temperatura da superfície e oceanos que também são responsáveis por ocasionar condições específicas ao longo do tempo, como a formação de precipitações intensas e até mesmo o crescimento dos máximos das precipitações (HAYLOCK et al., 2006).

Na prática, conhecer e analisar estas variações e mudanças do comportamento da precipitação ao longo do tempo auxiliam o gerenciamento dos recursos hídricos na previsão de secas severas, na determinação da confiabilidade de esperar um volume de chuva maior do que o mínimo requerido para uma determinada cultura se desenvolver, no controle e prevenção da erosão, no manejo de águas pluviais, entre outros. Ainda mais, por meio da análise da precipitação de séries históricas longas também é possível determinar a frequência e a magnitude de eventos extremos (MAIDMENT et al., 1993).

Além disso, o conhecimento do comportamento da precipitação ao longo da duração de um evento extremo permite a construção de curvas de massa (Figura 2.1) que são importantes para a identificação de qual mecanismo atmosférico causou o evento, ou para construção de padrões adimensionais que retratam características geoclimáticas de localidade específicas. Isto é particularmente importante para fins de dimensionamento de estruturas hidráulicas em projetos de drenagem urbana, pois em função das pequenas áreas e baixos tempos de concentração a os intervalos de tempo são normalmente discretizados em escala sub-diária, e até mesmo, sub-horária.

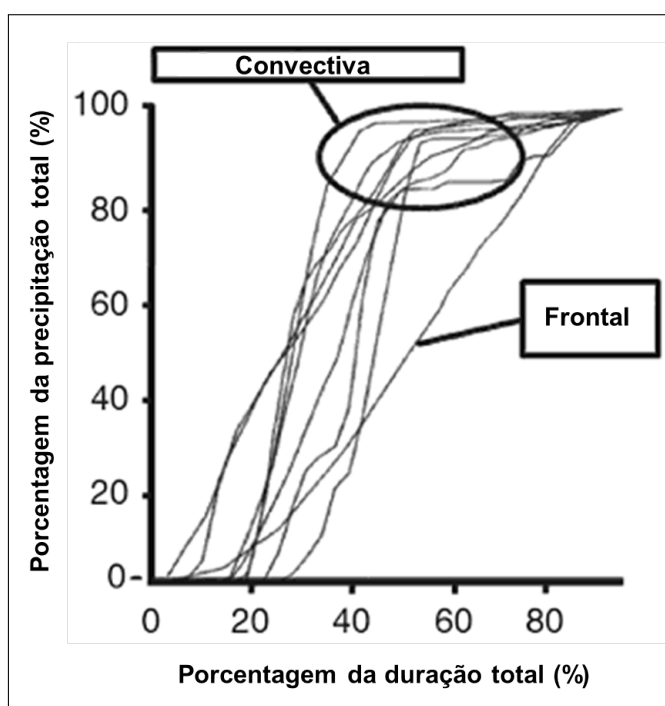
Esta abordagem simplifica a análise e apresentação dos dados de chuvas intensas possibilitando a construção de hietogramas de projeto, principal entrada dos modelos chuva-vazão, bem ajustados a cada localidade. No entanto, para que seja possível a realização de tais análises é necessário monitorar a precipitação em escala sub-diária, o que não é comum em países em desenvolvimento como o Brasil, em que a maior disponibi-



lidade de dados é em escala diária e o monitoramento é visto como custo e não como investimento.

Devido a tais limitações ainda hoje muitos países não tem um conjunto de curvas que represente o comportamento das precipitações intensas ao longo do tempo sendo necessária a recomendação de metodologias alternativas simplificadas como o método dos blocos alternados ou ainda, curvas adimensionais desenvolvidas para outras regiões (DEP, 2005; GDF, 2009; AZLI; RAO, 2010; SMDU, 2012; PAN et al., 2017; GARCÍA-BARTUAL; ANDRÉS-DOMÉNECH, 2017), sendo os Estados Unidos um dos únicos países que apresenta um estudo completo sobre a distribuição temporal da precipitação para diferentes regiões, o Atlas 14 (NOAA, 2018).

Figura 2.1 – Curvas de massa que caracterização a assinatura do sistema

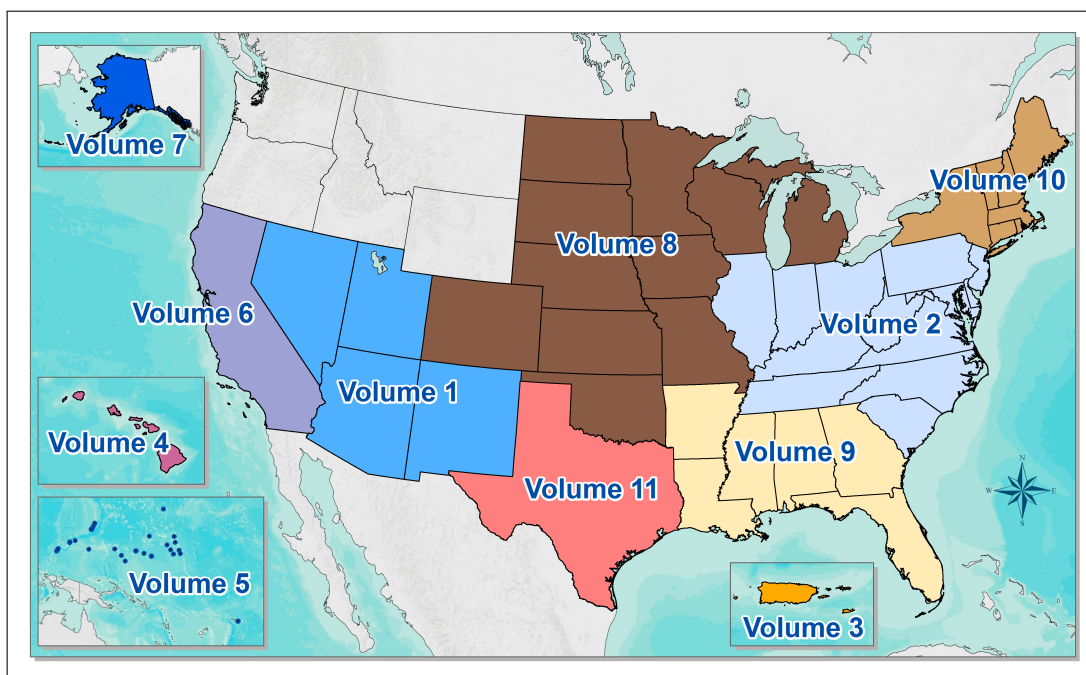


Fonte: Adaptado de Shuttleworth (2012).

O Atlas 14 é o documento oficial para estimativa da chuva de projeto nos Estados Unidos e foi desenvolvido pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (da sigla em inglês NOAA). O documento está dividido em onze volumes (Figura 2.2) que representam diferentes regiões dos Estados Unidos (BONNIN et al., 2011; BONNIN et al., 2006b; BONNIN et al., 2008; PERICA et al., 2011a; PERICA et al., 2011b; PERICA et al., 2014; PERICA et al., 2012; PERICA et al., 2013a; PERICA et al., 2013b; PERICA et al., 2015; PERICA et al., 2018). As curvas para realização da distribuição temporal da precipitação são disponibilizadas para nove níveis de probabilidade de excedência (de 10 a 90%), quatro quartis e para as durações específicas de 6, 12, 24 e 96 horas. A metodologia de

elaboração foi baseada na proposta por Huff (1967) com algumas adaptações (PERICA et al., 2014). As regiões foram delineadas com base em características das precipitações extremas (BONNIN et al., 2011).

Figura 2.2 – Volumes do Atlas 14 que trazem os padrões de distribuição temporal para diferentes regiões dos EUA



Fonte: NOAA (2018).

### 2.1.2 Variabilidade Espacial

A precipitação máxima pontual não ocorre sobre toda a bacia ao mesmo tempo, existe uma natural variabilidade espacial mesmo numa pequena área de alguns quilômetros quadrados (TUCCI et al., 2000). A variabilidade espacial da precipitação dificilmente segue um padrão físico identificável e muda rapidamente entre os intervalos de tempo do evento chuvoso. Sendo assim, existem normalmente uma grande quantidade de núcleos de precipitação que nascem, crescem, deslocam-se e desaparecem sobre a área de passagem da chuva, impedindo a ocorrência de uma estrutura espacial estável (SHUTTLEWORTH, 2012).

Segundo Garcez (1988) a variabilidade espacial das precipitações pode estar associada a fatores como latitude, disponibilidade hídrica e relevo. A latitude representa a variação desigual de pressões e temperaturas, sendo importante fator quando analisadas grandes áreas (REBOITA et al., 2012). Quanto à disponibilidade hídrica, cabe-se ressaltar

que quanto mais próximo da fonte permanente de umidade, maior o total precipitado. Como exemplo, temos as nuvens formadas sobre os oceanos que vão se reduzindo conforme avançam sobre o continente. Por fim, são observados maiores volumes de precipitação com aumento da altitude, principalmente pela diminuição da temperatura.

Todos estes fatores dificultam o entendimento por completo do fenômeno da precipitação podendo ocasionar erros nos projetos de controle de cheias. Isto se deve ao fato de que o escoamento superficial está totalmente atrelado à variabilidade espacial da precipitação (BRACKEN; COX; SHANNON, 2008). Em uma bacia urbana, por exemplo, uma precipitação que se intensifica na mesma direção do escoamento, produzirá um pico mais elevado do que se estivesse movendo-se na direção oposta (SINGH, 1997).

Em seu estudo pioneiro Huff (1967) avaliou a variabilidade da distribuição temporal da precipitação no espaço. O autor constatou baixa variabilidade nas curvas para áreas entre 100 e 1000 quilômetros quadrados. No entanto quando avaliadas as curvas para áreas menores, de até 25 quilômetros quadrados, detectou-se uma maior intensidade no início das tormentas. Segundo Huff (1967), isto pode indicar uma tendência para uma maior porcentagem de precipitação total nos estágios iniciais em áreas menores ou uma variabilidade amostral devido à densificação da rede de monitoramento.

A variabilidade espacial da precipitação pode ser contornada através da abordagem estatística, pois é possível extrair uma estrutura de correlação espacial dos eventos chuvosos no entorno do ponto de máxima precipitação com base em hipóteses estatísticas. Silveira (2001) estimou a estrutura de correlação espacial para Porto Alegre e propôs coeficientes de abatimento para redução da precipitação máxima pontual na extrapolação deste valor para toda uma área em seu entorno. O autor destaca que quanto maior a área, maior o abatimento devido à menor ocorrência de eventos extremos concomitantes em toda a área. No entanto, esta abordagem assume que o máximo de precipitação ocorre no ponto de monitoramento, o que nem sempre ocorre na realidade.

Ainda mais, existem outros estudos que determinam zonas ou regiões nas quais o comportamento das relações entre precipitações de diferentes durações é homogêneo e constante, independentemente da altura da precipitação (BASSO et al., 2016). Assim, entendimento completo do comportamento da precipitação no espaço só pode ser obtido por meio da análise de dados de radar ou satélite, que ainda são escassos para a maioria das localidades, abrangem curtos períodos, ou ainda não foram validados para região de estudo (BECK et al., 2017).

### **2.1.3 Monitoramento**

Como visto anteriormente a alta variabilidade temporal e espacial da precipitação torna esta variável meteorológica uma das mais difíceis de ser monitorada (BECK et al.,

2017). Portanto, a qualidade e a eficiência de projetos de drenagem urbana são dependentes da densidade da rede de monitoramento hidrometeorológico e da qualidade dos dados observados.

Tendo isto em vista, no ano de 2000 a Agência Nacional de Águas foi criada e recebeu a atribuição de promover e coordenar atividades relacionadas à Rede Hidrometeorológica Nacional, cabendo a ela disponibilizar os dados e manter o cadastro atualizado das estações hidrometeorológicas do país (ANA, 2009).

No entanto, ter uma rede hidrometeorológica densa e com observações ininterruptas é um desafio, especialmente no Brasil, que é um país com dimensões continentais, regiões de floresta tropical e restrição de recursos financeiros. A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) propõe uma densidade mínima (Tabela 2.1) para redes de monitoramento de acordo com a variabilidade espacial da precipitação em diferentes regiões geográficas.

Tabela 2.1 – Densidade mínima ( $\text{km}^2 \cdot \text{estação}^{-1}$ ) recomendada pela OMM (2008)

Região	Tipo de estação	
	Pluviômetro	Registrador automático
Costeira	900	9.000
Montanhosa	250	2.500
Planícies Interiores	575	5.750
Morros	575	5.750
Pequenas ilhas	25	250
Áreas urbanas	-	10-20
Polar/árida	1.000	100.000

Fonte: Adaptado de OMM (2008).

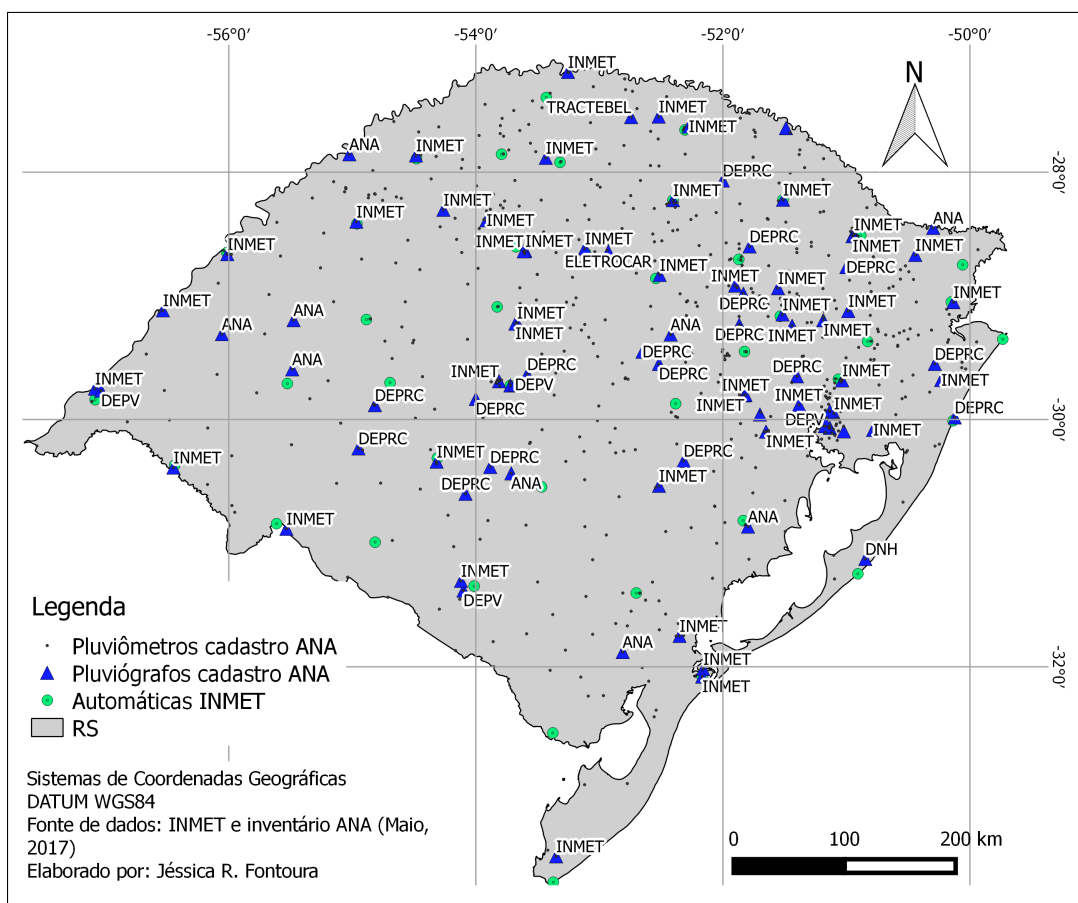
A densidade mínima foi estabelecida pela OMM de modo a evitar graves deficiências no desenvolvimento de projetos, não sendo adequada para atender às numerosas exigências de uma região desenvolvida. Sendo assim, a rede mínima para uma determinada região deve ser expandida conforme análise de necessidades específicas (WMO, 2008).

No RS por exemplo, de acordo com inventário disponibilizado pela ANA, existem 87 pluviógrafos operando em todo estado (até Maio de 2017). Dentre estes, apenas 48 localizam-se em perímetros urbanos. Assim, o RS possui um número abaixo da recomendação mínima para áreas urbanas que seria de 200 a 400 equipamentos de medição automática por  $\text{km}^2$  de área urbana (Tabela 2.1).

A cobertura de pluviômetros declarada no inventário é maior (702). Porém, Favaretto (2016) destaca que entre estes, apenas 496 estavam disponíveis quando realizou seu estudo, e que a extensão da série não passa de 30 anos, sendo igual a 15 anos para a maior parte das estações.

No entanto, como já mencionado, totais diários não permitem avaliação da distribuição temporal da precipitação durante um evento chuvoso, e por isto apenas as estações que possuem registradores automáticos são de interesse para este trabalho. Dentre as estações automáticas em funcionamento no RS, 47 são operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e as demais por diversas entidades públicas e privadas como mostra o mapa da Figura 2.3.

Figura 2.3 – Estações de monitoramento da precipitação no estado do Rio Grande do Sul até Maio de 2017



Fonte: Elaborado pela autora.

A baixa densidade da rede de monitoramento no RS é um problema, pois quanto mais sofisticados os modelos hidrológicos se tornam, mais necessários são os dados com incrementos na ordem de minutos para gestão urbana das águas pluviais. Porém, mediadores automáticos são mais caros do que os pluviômetros convencionais e exigem mais manutenção, energia elétrica, e em alguns casos até mesmo, sinais de telefonia móvel para envio de dados.

Assim como no exemplo do RS, existem em todo país grandes áreas sem monitoramento e séries repletas de falhas (XAVIER; KING; SCANLON, 2016; MELATI; MARCUZZO, 2015). Esta realidade impõe barreiras para determinadas situações de projeto,

como por exemplo, o dimensionamento de estruturas de alto risco e elevado período de retorno como hidroelétricas.

#### **2.1.4 Seleção de eventos a partir de séries históricas**

Comumente, na realização de estudos que envolvem o entendimento dos processos do ciclo hidrológico, se faz necessária a segmentação de séries históricas de precipitação em eventos. No entanto, caracterizar um evento não é um processo simples e, dependendo dos critérios adotados, o comportamento observado pode ser desfigurado. Desta maneira, é preciso adotar critérios capazes de selecionar eventos sem perder as características reais da precipitação e diretamente relacionados com a aplicação desejada.

Os critérios correntemente empregados na literatura são baseados na individualização de séries de precipitação a partir da intensidade, volume, ou determinado número de intervalos consecutivos sem registro de precipitação (DUNKERLEY, 2008). Um exemplo da combinação destes critérios é o estudo realizado por Kerr et al. (1974). Os autores estabeleceram que um evento começa uma hora antes da intensidade atingir  $1,3 \text{ mm.h}^{-1}$  e acaba quando atinge  $0,51 \text{ mm.h}^{-1}$  por mais de uma hora, seguido de um período de 12 horas com volume total precipitado menor que 6,4 mm.

Powell et al. (2007) avaliaram os critérios propostos por Kerr et al. (1974) e observaram que foram selecionados eventos com perfis longos repletos de intervalos com baixa precipitação, chegando, algumas vezes, a representar até 75% da duração total do evento. Ainda mais, a hora adicionada quando detectado o início do evento influenciou muito na posição do pico de tormentas de curta duração.

Como os resultados a partir da combinação proposta por Kerr et al. (1974) desconfiguraram o comportamento dos eventos de curta duração, Powell et al. (2007) determinaram um tempo de separação de 4 horas e  $0,51 \text{ mm.h}^{-1}$  como a intensidade que marca o início e fim da precipitação. Apesar de remover os longos intervalos com baixa precipitação, e não alterar os eventos de menor duração, a atenuação dos picos permaneceu. Além disso, mesmo alterando os critérios propostos por Kerr et al. (1974), não foi possível incorporar os eventos de menor duração em eventos maiores, o que é um comportamento bastante observado em tormentas reais.

As particularidades apresentadas nos estudos de Kerr et al. (1974) e Powell et al. (2007) são apenas alguns exemplos de como os critérios de seleção podem desconfigurar os eventos selecionados para realização dos estudos. Desta maneira, é preciso ter atenção na escolha dos critérios e levar em conta que estes podem alterar o número de eventos selecionados, as durações e intensidades médias e, até mesmo, a relação que a chuva tem com outros processos hidrológicos (2010). Além disso, Bonta (2004) mostrou que dependendo da localidade a independência entre dois eventos pode ser sazonal.

Dentre os critérios apresentados, a estipulação de um determinado número de registros sem precipitação é amplamente adotada na literatura para individualizar eventos (DUNKERLEY, 2008). Este critério pode se basear nos processos que se deseja representar ou nas propriedades da própria chuva. Por exemplo, Lloyd (1990) adotou um mínimo período seco (MPS) de 3 horas em seu estudo realizado na região amazônica porque considerou que este intervalo era suficiente para a secagem completa dos níveis superior e médio do dossel. Já, Bracken et al.(2008) empregaram um MPS de 12 horas para uma área no sudeste da Espanha na tentativa de reduzir o efeito da umidade antecedente em um estudo do escoamento de base.

Seguindo a mesma proposta, Bracken et al. (2008) definiram eventos aos períodos sem lacunas de mais de 12 horas sem chuva, porque este período é suficientemente longo para que a superfície do solo, em uma bacia com clima semi-árido, se torne seca. Desta maneira, a umidade do solo antecedente não influenciará a geração de escoamento. Já, Aryal et al. (2007) adotaram um MPS de 8 horas em um estudo para modelar o escoamento, depois de considerar que as reservas de água perto da superfície estavam novamente disponíveis após 8 horas.

Dentre as abordagens que visam determinar o MPS baseando-se nas propriedades das precipitações está a análise de autocorrelação (ASQUITH et al., 2005; WENZEL; VOORHEES, 1981), a escolha de um coeficiente de correlação de ranqueamento (GRACE; EAGLESON, 1967) ou a utilização do método exponencial (RESTREPO-POSADA; EAGLESON, 1982). Segundo Molina et al. (2016), os trabalhos que empregam autocorrelação escolhem um mínimo período seco com base no tempo de atraso em que o coeficiente de autocorrelação cai abaixo de um determinado limite. Asquith et al. (2005) utilizaram análises de autocorrelação para uma série de precipitação com dados horários. Os autores mostraram que as autocorrelações médias de diferentes locais caíram para valores próximos de zero quando adotados períodos de 8 horas sem precipitação.

O método de correlação de ranqueamento é semelhante, mas analisa a autocorrelação usando o coeficiente de correlação de Spearman, que tem a vantagem de ser não-paramétrico. Já o método exponencial, encontra o período inter-eventos que resulta de tempestades exponencialmente distribuídas, que é a distribuição estatística esperada de tempestades independentes seguindo o processo de Poisson. Restepro e Posada (1982) por meio de tentativa e erro tentaram aproximar uma propriedade da distribuição exponencial para encontrar o tempo entre eventos. Este procedimento foi reproduzido por Powell et al. (2007) mas não apresentou resultados satisfatórios, pois as estações só apresentaram coeficientes de variação próximos de 1 para mínimos períodos secos superiores a 12 horas.

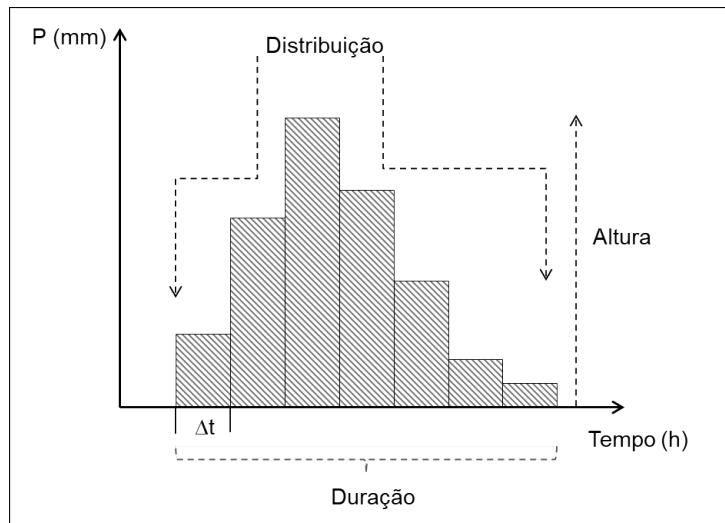
Sendo assim, de uma maneira geral pode-se concluir que não existe consenso na literatura, podendo ser encontrados valores de MPS variando de 2 horas (TYRRELL; HASFURTHER, 1983) até 24 horas (VANDENBERGHE et al., 2010). Ainda mais, na maior

parte das vezes os autores não especificam o porquê da escolha deste critério. Este é o caso de Huff (1967) que utilizou seis horas como mínimo período seco entre eventos em seu estudo sem maiores justificativas. Desde então esta mesma escolha têm sido adotada por diversos autores para individualizar tormentas (WISCHMEIER; SMITH, 1978; YEN; CHOW, 1980; GUO; URBONAS, 1996; POWELL et al., 2007; GUO; HARGADIN, 2009; DUNKERLEY, 2010; DOLŠAK; BEZAK; ŠRAJ, 2016), provavelmente visando a comparação com outros estudos.

## 2.2 CHUVAS DE PROJETO

A utilização de uma chuva de projeto como entrada em modelos de simulação chuva-vazão é uma das práticas mais adotadas para contornar o problema da falta de dados observados de vazão em projetos de drenagem urbana (CANHOLI, 2014). A chuva de projeto geralmente é caracterizada na forma de hietograma que é um gráfico como o apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Hietograma de uma chuva de projeto



Fonte: Elaborado pela autora.

Como mostra a Figura 2.4, a partir do hietograma é possível conhecer a duração total do evento, a altura total precipitada (área hachurada) e a distribuição temporal das alturas precipitadas em cada intervalo de duração ( $\Delta t$ ). A altura total é comumente derivada das relações intensidade-duração-frequência (IDF) ou da análise estatística de séries temporais diárias oriundas de pluviômetros. A duração total do evento ( $td$ ) é um critério de projeto, e vai variar de acordo com a estrutura hidráulica que se pretende dimensionar, porém não deve ser menor que o tempo de concentração da bacia hidrográfica.



O valor adotado para  $\Delta t$  deve ser menor ou igual a 1/3 do tempo de pico ou 1/5 do tempo de concentração da bacia, para caracterizar corretamente o tempo de ascensão do hidrograma (TUCCI, 2005; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). A distribuição das alturas precipitadas ao longo da duração do evento é comumente realizada a partir de metodologias empíricas que desagregam e reorganizam as parcelas de chuva no tempo.

Chow et al. (1988) ressaltam que os métodos para gerar hietogramas de projeto devem ser flexíveis o suficiente para abranger a variabilidade no tempo e no espaço das características das precipitações. Além disso, espera-se que uma chuva de projeto seja representativa de muitos eventos registrados e tenha as características de intensidade, volume e duração de uma tormenta de mesma frequência (CANHOLI, 2014; NOTARO et al., 2016).

Jaton (1984) e Chow et al. (1988) destacam que os procedimentos existentes podem ter sua concepção baseada basicamente em quatro abordagens: nos conceitos das relações IDF, na estrutura interna das tormentas, em curvas de precipitações acumuladas ou análises diretas de tormentas históricas. Bemfica et al. (2000) evidenciam que, em sua grande maioria, as metodologias existentes não buscam a modelação dos padrões reais de precipitação, mas sim de padrões que causem efeito crítico no escoamento.

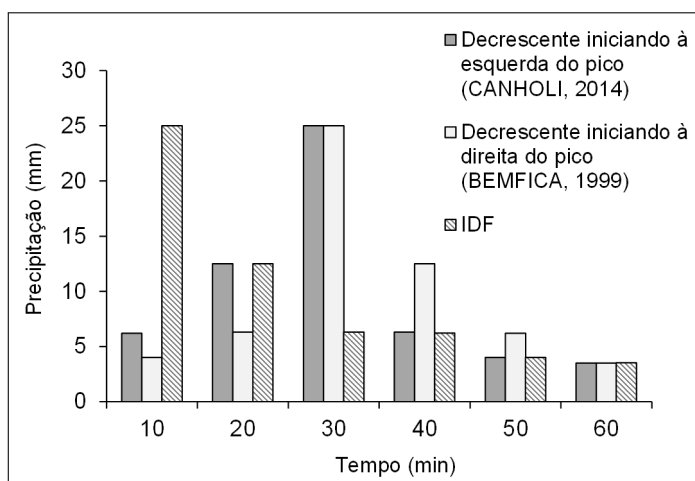
Alguns autores criticam as tormentas padronizadas pelo fato de que estas não reproduzem adequadamente a frequência de ocorrência das cheias (PACKMAN; KIDD, 1980; WENZEL; VOORHEES, 1981; WALESH, 1989; REILLY; PIECHOTA, 2005; WATT; MARSALLEK, 2013). No entanto, como ressaltado por Urbonas e Stahre (1990), estas se tornam a única alternativa em função da inexistência de dados locais. Sendo assim, as limitações dos métodos não inviabilizam sua utilização, apenas demonstram que estes precisam ser aplicados com maior critério.

A seguir, uma discussão mais detalhada sobre os métodos mais usados para desagregação de tormentas e composição de chuvas de projeto.

### **2.2.1 Métodos baseados em relações IDF**

O método dos blocos alternados é o de utilização mais simples entre os desta categoria, pois não busca representar os fenômenos físicos, apenas propõe a distribuição de totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração total de modo a caracterizar uma condição crítica de projeto (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; MCCUEN et al., 1989). Neste procedimento é realizado um reordenamento das alturas precipitadas obtidas a partir das relações IDF para cada um dos intervalos de tempo até fechar a duração total definida para o evento, a configuração resultante representa uma precipitação completamente adiantada (ZAHED; MARCELLINI, 1995), como mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Diferentes configurações para reordenamento das parcelas de chuva gerada a partir da IDF de Porto Alegre para região do Aeroporto



Fonte: Elaborado pela autora.

Para realização do reordenamento primeiramente as parcelas devem ser numeradas em ordem crescente de acordo com o volume precipitado. Definida a maior parcela esta deve ser a primeira a ser posicionada em um intervalo de tempo qualquer de forma arbitrária (dependendo do efeito que se quer causar no hidrograma). Depois de posicionada a maior parcela, em seguida os demais blocos devem ser colocados em ordem decrescente alternadamente nos demais intervalos de tempo. Assim como o pico, a sequência de reordenamento também pode assumir diferentes configurações.

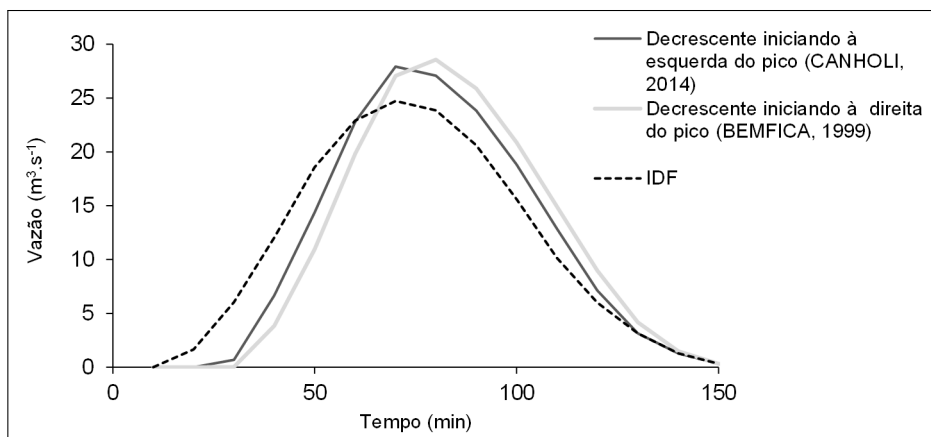
No trabalho desenvolvido por Bemfica (1999) o segundo bloco de maior volume foi posicionado a direita do maior bloco, que por sua vez foi colocado em 50% da duração total (5, 3, 1, 2, 4, 6) (Figura 2.5). Esta configuração é a recomendada pelo manual de drenagem urbana de Porto Alegre (DEP, 2005). Já Canholi (2014) indica que o reordenamento deve iniciar pelo posicionamento do segundo maior volume a esquerda do maior bloco, também posicionado na metade da duração total do evento (4, 2, 1, 3, 5,6) (Figura 2.5). Na prática o efeito da sequência de reordenamento é amenizado, pois é comum a utilização de um número maior de intervalos de tempo.

A Figura 2.6 ilustra os hidrogramas resultantes a partir de cada uma das configurações de reordenamento das parcelas apresentadas anteriormente. A partir da análise dos hidrogramas é possível concluir que quando o pico é posicionado a 50% da duração e o segundo bloco de maior volume a direita, acontece uma maximização do pico do hidrograma. Isto ocorre porque as chuvas iniciais atendem as perdas por infiltração e depressões da bacia, permitindo que todo o volume do incremento de maior valor vire escoamento superficial.

Ambas configurações apresentaram uma vazão de pico mais elevada do que o padrão completamente adiantado da IDF. Porém, a configuração adotada por Bemfica (1999)

e sugerida no manual de drenagem de Porto Alegre (DEP, 2005) gerou as vazões de pico mais elevadas do que a descrita por (CANHOLI, 2014).

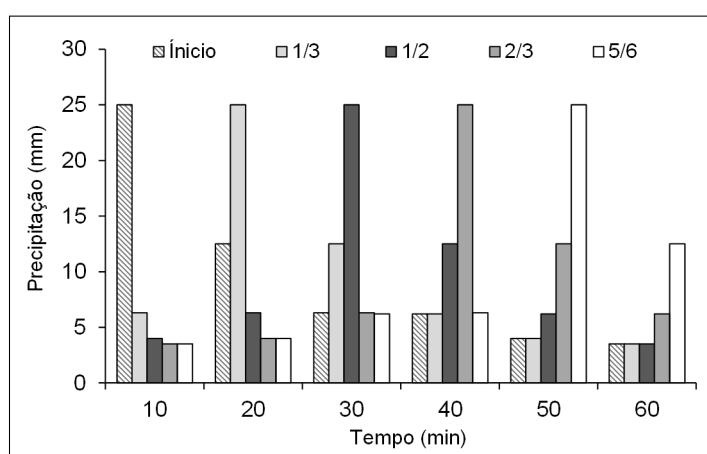
Figura 2.6 – Efeito da configuração de reordenamento das parcelas na vazão de pico



Fonte: Elaborado pela autora.

Outro fator desta metodologia que afeta o hidrograma de saída é o posicionamento do pico. Na Figura 2.7 são apresentadas algumas configurações possíveis. Os efeitos do posicionamento do bloco de maior volume na vazão de pico podem ser conferidos na Figura 2.8. A partir dos hidrogramas é possível perceber que quanto mais para o fim da duração é posicionado o bloco de maior volume, maior a vazão de pico.

Figura 2.7 – Diferentes configurações de posicionamento do pico em relação a duração total do evento

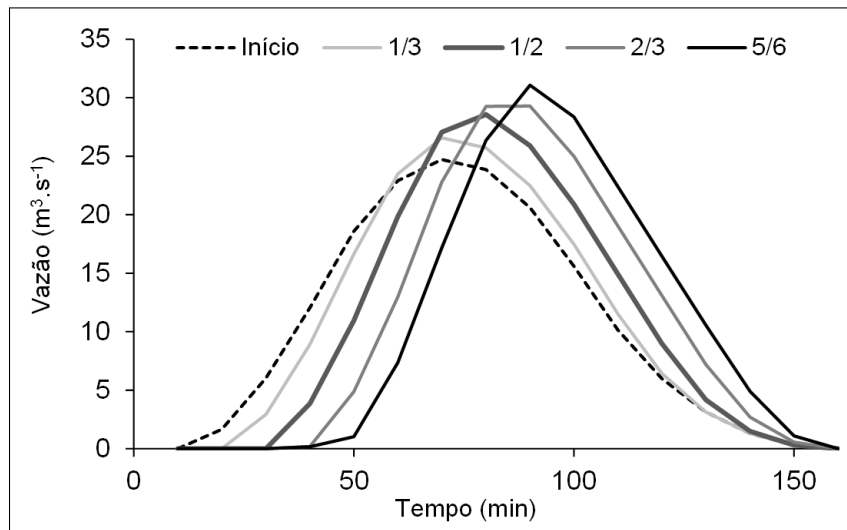


Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar de simples de aplicar este método possui algumas limitações principalmente

por ser baseado no pressuposto de que a precipitação máxima para qualquer duração menor do que a duração total da tempestade deveria ter o mesmo período de retorno, o que não é realista e até mesmo conservador (ZAHED; MARCELLINI, 1995; NGUYEN; GROSSI; RANZI, 2008).

Figura 2.8 – Efeito do posicionamento do pico na vazão de projeto



Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, o método dos blocos alternados gera chuvas de projeto com configurações distintas das observadas na natureza. Desta maneira, Keifer e Chu (1957) propuseram um coeficiente para posicionar o pico de chuva de acordo com uma configuração observada. Este coeficiente é denominado coeficiente de avanço da tempestade  $r$  e representa uma medida de adiantamento do pico em relação ao início do evento. Este coeficiente é estimado a partir da análise de séries históricas (Equação 2.1) e já foi determinado para diversas localidades como mostrado no Quadro 2.1.

$$r = \frac{tp}{td}, \quad (2.1)$$

sendo  $r$  o coeficiente de avanço da tempestade,  $tp$  o instante do pico e  $td$  a duração total. Apesar de os valores de  $r$  poderem variar de 0 até 1 (o que representa um pico de tempestade completamente adiantado ou atrasado), o Quadro 2.1 mostra que, em geral, não passam da metade da tempestade quando analisados diversas localidades.

Um estudo realizado por Yen e Chow (1983) analisou os coeficientes de avanço de 10 mil tempestades dos EUA pertencentes a quatro regiões distintas do ponto de vista hidrológico. Os autores constaram que o pico da intensidade de precipitação tende a cair no segundo quartil da duração total do evento, podendo assim, ser considerado em média

igual a 0,375 *td*.

Quadro 2.1 – Coeficientes de avanço de tormenta determinados para diversas localidades com base em séries históricas de precipitação

Cidade	Dados	Duração	r	TR	Fonte
Chicago, EUA	83 eventos	180 min	0,38	5 anos	Keifer e Chu (1957)
Ohio, EUA	3 anos	100 min	0,33	1 ano	Preul e Papadakis (1973)
Gauhati, Índia	107 eventos	150 min	0,40	2 meses	Bandyopadhyay (1972)
Porto Alegre, Brasil	20 anos	240 min	0,44	2 anos	Díaz (1973)
São Paulo, Brasil	1 posto	Média	0,36	Médio	Tucci (2000)
Santa Maria, Brasil	2643 eventos	Média	0,25	Médio	Paiva (1997)

Fonte: Elaborada pela autora.

A escolha de um valor fixo de  $r$  facilita a aplicação do método, porém é preciso ter consciência de que este parâmetro pode variar de acordo com a duração, período de recorrência e posição no espaço tendo (BEMFICA, 1999). Sendo assim, a variação deste parâmetro pode ajudar bastante na otimização dos projetos de redes de drenagem, o que nem sempre é possível devido à falta de dados observados.

Determinado o coeficiente de avanço, é possível então dar continuidade ao procedimento proposto por Keifer e Chu (1957). Para isto, a equação IDF precisa ser expressa somente em função da duração na forma geral da fórmula de Talbot como indicado pela Equação 2.2:

$$i = \frac{A}{(td + C)^B}, \quad (2.2)$$

sendo  $i$  a intensidade da precipitação (mm/min),  $A$ ,  $B$  e  $C$  são as constantes adimensionais obtidas a partir da IDF local, e  $td$  a duração da chuva (min). Se a probabilidade de ocorrência utilizada para determinação das constantes for coincidente com a dos eventos utilizados na determinação de  $r$  a chuva de projeto se torna mais representativa.

O método considera que independentemente da duração da chuva, existe um pico que divide o hietograma em dois setores de intensidades, crescentes e decrescentes, e estes podem ser determinadas a partir das Equações respectivamente:

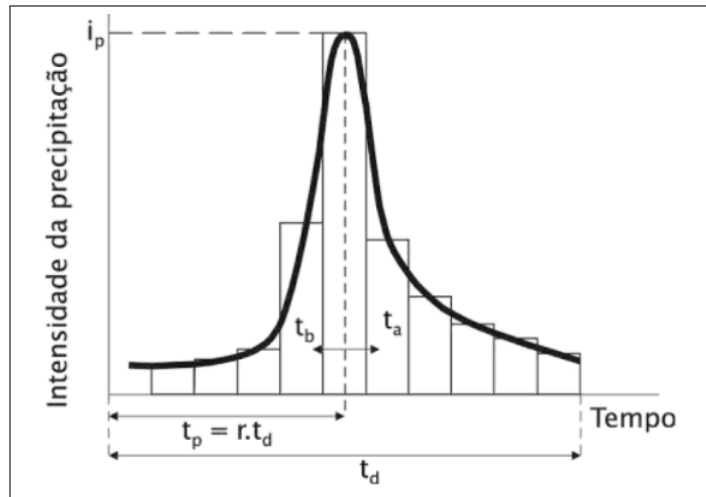
$$i = \frac{A [(1 - B)(tb/r)^B + C]}{[(tb/r)^B + C]^2}, \quad (2.3)$$

$$i = \frac{A [(1 - B)(ta/1 - r)^B + C]}{[(ta/1 - r)^B + C]^2}, \quad (2.4)$$

sendo  $tb$  definido por  $(tp - td)$  e  $ta$  por  $(td - tp)$ . A Figura 2.11 mostra os elementos

mencionados anteriormente na forma gráfica.

Figura 2.9 – Elementos do hietograma do método de Chicago



Fonte: Canholi (2014).

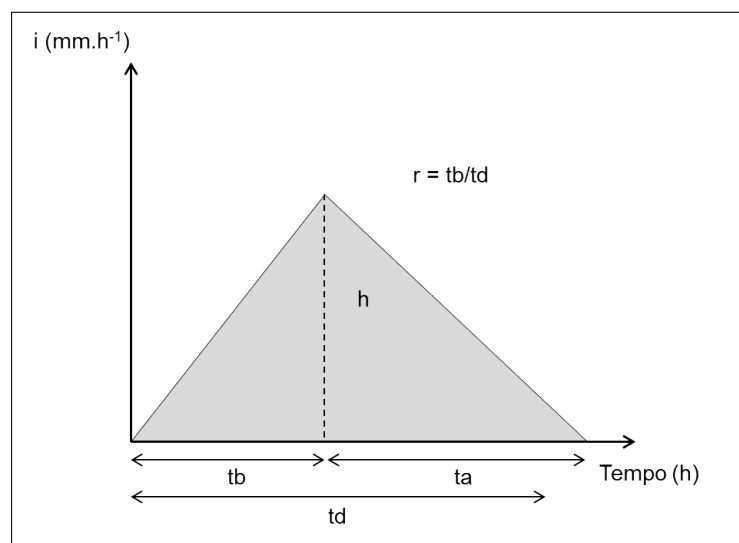
Apesar da ausência de base física ou estatística, ambos os métodos são muito utilizados pela simplicidade e facilidade de programação (BEMFICA; GOLDENFUM; SILVEIRA, 2000). Porém, ambas metodologias apresentam o mesmo problema, podem gerar valores de precipitação subestimados ou superestimados. Isto se deve, principalmente, ao fato de que são baseadas em dados médios de intensidade e não na série histórica real de precipitação (BEDIENT; HUBER; VIEUX, 2002).

## 2.2.2 Métodos baseados na estrutura interna das tormentas

Os métodos desta categoria envolvem análises estatísticas de séries históricas para determinação de características específicas das tormentas, dentre estes podem ser citados os procedimentos desenvolvidos por Sifalda (1973), Yen e Chow (1980) e Desbordes (1976). O procedimento proposto por Yen e Chow (1980) é bastante simples para a determinação da chuva de projeto em estudos realizados em pequenas áreas. Tal método baseia-se na análise estatística dos momentos que descrevem a geometria, ou estrutura interna do hietograma.

A descrição da distribuição temporal da chuva é mais acurada quanto mais momentos são incluídos, porém é mais difícil obter um ajuste para muitos momentos. Pensando nisso, os autores sugeriram a utilização apenas do primeiro momento, a partir do qual é obtida uma distribuição triangular da intensidade da chuva, como apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Hietograma Triangular proposto por Yen e Chow (1980)



Fonte: Adaptado de Canholi (2014).

Buscando uma representação mais genérica da distribuição temporal, os autores adimensionalizaram o hietograma, usando como parâmetros a altura precipitada e a duração como expresso pela Equação 2.5:

$$i = \frac{2P}{td}, \quad (2.5)$$

sendo  $i$  a intensidade em  $mm.h^{-1}$ ,  $2P$  a precipitação total em mm e  $td$  tempo de duração da precipitação em min. É importante ressaltar que  $i$  é dada pela IDF do local de interesse para uma determinada duração e período de retorno  $Tr$ .

No entanto, a Equação 2.5 dá apenas a altura do triângulo, sendo assim ainda é necessário posicioná-la no tempo. Para isto, Yen e Chow (1980) determinaram o coeficiente de avanço da tormenta com dados de três pluviógrafos para diversas durações e estações do ano. A partir do coeficiente de avanço  $r$ , é então possível determinar os elementos  $tb$  e  $ta$  apresentados na Figura 2.10 pelas Equações 2.6 e 2.7.

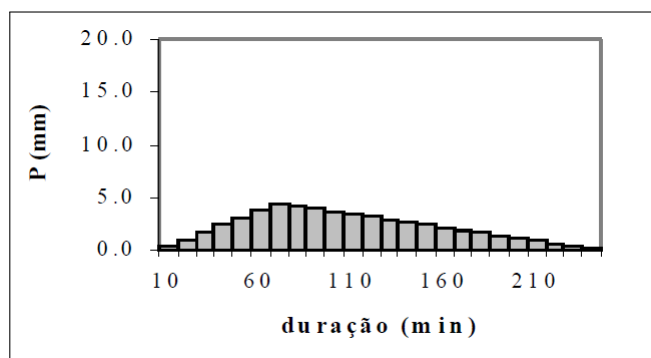
$$tb = r * td \quad (2.6)$$

$$ta = (1 - r) * td \quad (2.7)$$

Algumas literaturas trazem o posicionamento do pico já na forma  $0,375 td$ , devido ao estudo realizado por Yen e Chow (1983) e citado no item 2.2.1. No entanto, se apli-

cam aqui as mesmas observações realizadas por Bemfica (1999) quanto à determinação do coeficiente de avanço para utilização do método Chicago, referentes à reavaliação do coeficiente de avanço a partir de análise de eventos históricos para aplicação do método em outras localidades. A Figura 2.11 apresenta um hietograma derivado a partir desta metodologia.

Figura 2.11 – Hietograma de projeto método triângulo de Yen e Chow para uma duração de 240 min e Tr 2 anos IDF de Porto Alegre para região do Aeroporto



Fonte: Bemfica et al. (2000).

### 2.2.3 Métodos baseados na análise de tormentas históricas

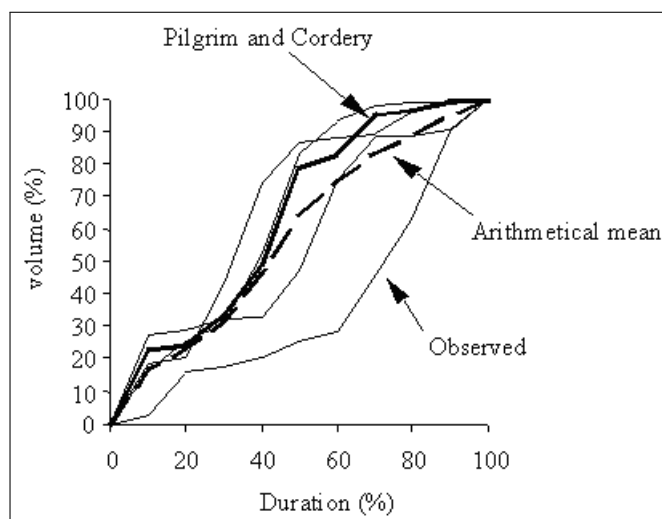
É possível definir uma tormenta de projeto a partir da análise direta de dados observados de eventos de grande intensidade. O procedimento sugerido por Pilgrim e Cordery (1975) foi desenvolvido com base em dados de precipitação de Sydney na Austrália com durações variando de 10 à 24 horas e baseia-se em dois conceitos:

- A curva IDF não permite identificar a distribuição temporal da tormenta de projeto, especialmente a posição correta do bloco mais intenso;
- Para obter uma vazão de projeto com frequência de ocorrência o mais próxima possível da chuva de projeto, deve-se encontrar uma distribuição média temporal de precipitação como mostra a Figura 2.12.

Portanto, para obtenção dos hietogramas de projeto a partir deste método é necessário selecionar eventos históricos críticos do local em estudo para a mesma duração. Cordery e Pilgrim (1984) sugerem que é necessário uma amostra de 50 chuvas para gerar uma tormenta de projeto representativa. Já Mussy (1998) recomenda dez eventos podem ser suficientes para a determinação de uma chuva de projeto adequada.



Figura 2.12 – Representação esquemática da metodologia de Pilgrim e Cordery (1975)



Fonte: Musy (1998).

Os eventos críticos de igual duração devem ser divididos em intervalos escolhidos de acordo com as necessidades práticas da estimativa de vazões. Um exemplo com incrementos de 10% é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Exemplo de construção do hietograma de projeto pelo método de Pilgrim e Cordery (1975)

D (%)	Evento 1		Evento 2		Evento 3		Evento 4		i	i	P i	P
	P(%)	i	P(%)	i	P(%)	i	P(%)	i	Médio	Final	média (%)	projeto (mm)
10	28	2	18	3	16	3	2	7	4	2	23	29
20	1	9	2	7	10	5	14	4	6	8	2	2
30	6	6	24	2	5	6	2	7	5	5	9	11
40	1	9	30	1	22	2	2	7	5	5	9	11
50	14	3	13	4	31	1	6	6	4	1	29	37
60	29	1	1	10	10	5	2	7	6	6	4	5
70	13	4	2	7	5	6	18	2	5	4	12	16
80	0	10	6	5	1	8	17	3	7	9	1	2
90	2	7	3	6	0	10	27	1	6	7	3	3
100	10	5	2	7	1	9	10	5	7	10	1	1

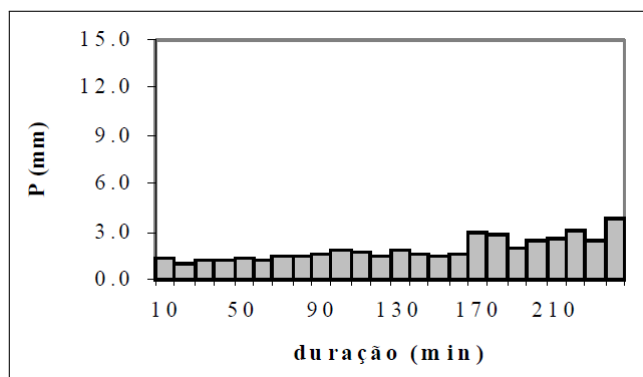
Fonte: Adaptado de Mussy (1998).

Em cada período apresentado na Tabela 2.2 calcula-se a altura precipitada como porcentagem da altura total. Identificada a porcentagem da precipitação total que ocorreu em cada intervalo de duração é então atribuído um índice ( $i$ ) correspondente à posição do volume precipitado em relação aos demais do mesmo período.

Quando ocorrem valores iguais de precipitação em mais de um período, o índice ( $i$ )

atribuído é uma média dos índices individuais. O volume de chuva de cada parcela será a média das porcentagens com mesmo índice ( $i$ ) e a distribuição temporal destes será de acordo com o ranqueamento da média dos índices para cada incremento. A Figura 2.13 ilustra exemplos de hietogramas gerados a partir desta metodologia.

Figura 2.13 – Exemplos de hietogramas de projeto gerados a partir das metodologias propostas por Pilgrim e Cordery (1975) para Porto Alegre



Fonte: Bemfica et al. (2000).

Esta metodologia é criticada porque a aproximação média do comportamento da precipitação minimiza padrões críticos observados (Figura 2.13). Além disso, necessita de dados de precipitação monitorados em intervalos menores que um dia, para que seja possível identificar quanto do volume total precipitado caiu até determinada duração, não servindo como alternativa para localidades sem monitoramento sub-diário.

## 2.2.4 Métodos baseados em curvas de precipitação acumulada

Os métodos desta categoria permitem a estimativa de chuvas de projeto a partir de curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação que resumem o padrão de distribuição de determinada região. A partir das curvas é possível a construção de hietogramas de projeto com diferentes durações a partir de qualquer altura total de chuva desejada. Entre os principais trabalhos que adotaram esta abordagem estão os desenvolvidos por Hershfield (1962), Huff (1967), SCS (1986) e mais recentemente o Atlas 14 (NOAA, 2018) apresentado no item 2.1.1 deste trabalho.

Hershfield (1962) analisou 400 eventos registrados em 50 postos com diferentes regimes de chuvas. O objetivo principal do autor era desenvolver uma curva média de distribuição temporal que fosse aplicável para diversas durações, pois foi observada uma pequena variação entre as curvas desenvolvidas para durações distintas (6,12,18 e 24 horas). No entanto, estudos mais recentes mostraram que chuvas de diferentes durações

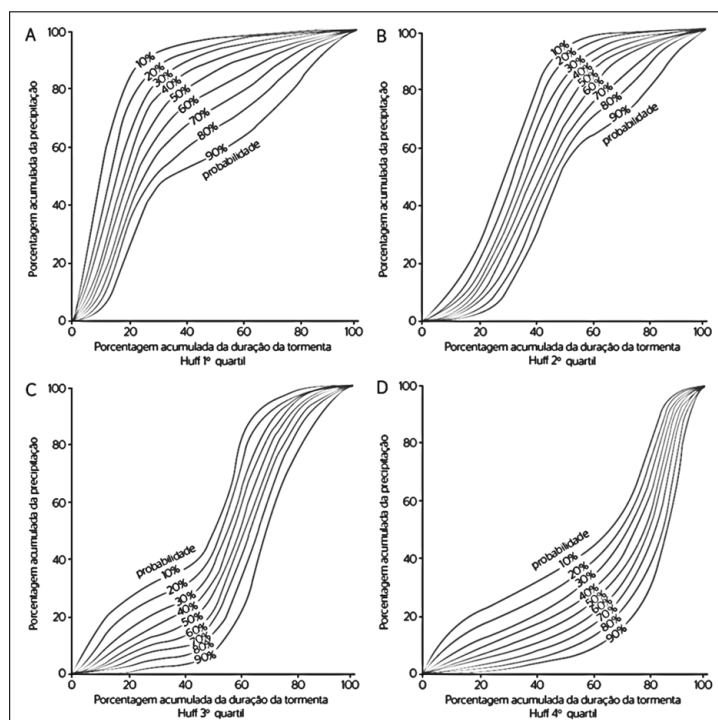
apresentam variações na distribuição temporal (HUFF, 1967; HUFF; ANGEL et al., 1989; HUFF; ANGEL et al., 1992), principalmente, quando comparados eventos intensos de curta e longa duração, o que não foi o caso da análise realizada por Hershfield (1962).

Portanto, a curva proposta por Hershfield (1962) não fornece nenhuma medida dos diferentes tipos de perfis de tempestade que ocorrem na natureza, o que é importante para muitas aplicações em hidrologia. Este tipo de curva média é útil caso nenhuma informação melhor exista, mas é preciso ter em vista que, retrata uma distribuição que raramente ocorre na natureza assim como os padrões sintéticos apresentados anteriormente.

Tais limitações foram superadas no estudo realizado por Huff (1967) que envolveu 12 anos de dados de 49 pluviógrafos em uma área de aproximadamente 1000 quilômetros quadrados localizados no estado de Illinois, região central dos Estados Unidos. Huff (1967) observou que a maior porção de chuva ocorria em uma pequena parte da duração total da precipitação, independentemente da duração da tempestade, do tamanho da área analisado ou do número de rajadas.

Baseado nisto, Huff (1967) decidiu classificar as tempestades em quatro grupos, dependendo se o pico de chuva ocorreu no primeiro, segundo, terceiro ou quarto da duração total do evento. Dentro do período de dados analisados foram qualificadas 261 tempestades com durações totais variando de 1 a 48 horas. O conjunto de curvas para cada um dos quartis e nove decis de probabilidade pode ser conferido na Figura 2.14.

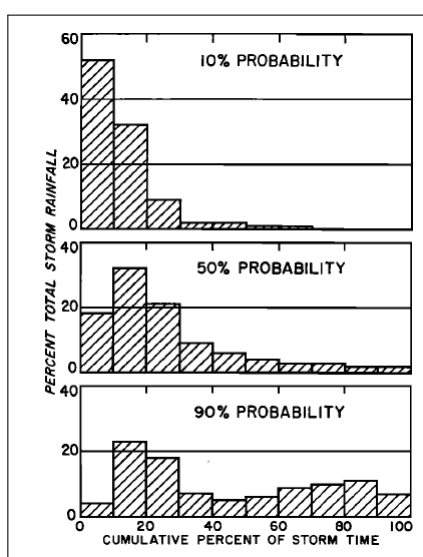
Figura 2.14 – Curvas de distribuição temporal descritas por Huff (1967)



Fonte: Adaptado de Abreu et al. (2017).

Bonta e Rao (1988) compararam os procedimentos de definição de chuva de projeto propostos por Huff (1967), Yen e Chow (1980), Sifalda (1973) e Desbordes (1976), e chegaram à conclusão de que o desenvolvido por Huff (1967) mostrou-se o mais flexível por representar bem a variabilidade temporal natural de uma precipitação intensa. Sendo assim, a metodologia proposta por Huff (1967) reflete não somente efeitos críticos ao escoamento, mas também as características da região. A Figura 2.15 exemplifica a flexibilidade da metodologia trazendo hietogramas gerados a partir de curvas do mesmo quartil, porém para diferentes níveis de probabilidade.

Figura 2.15 – Exemplos de hietogramas gerados a partir do método proposto por Huff (1967)



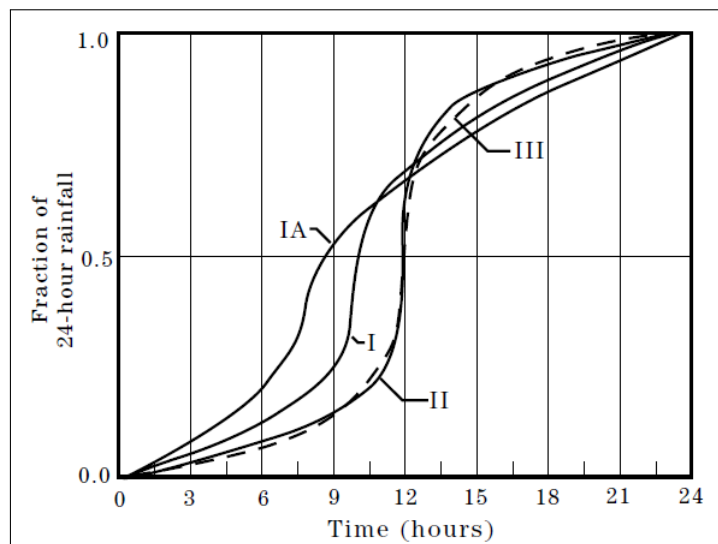
Fonte: Huff (1967).

De acordo com Huff (1967), as curvas podem ser aplicadas em regiões de climas e fisiografias similares aos da elaboração do estudo, e para estimar as distribuições temporais em áreas urbanas de 25 a 1000 quilômetros quadrados e em pequenas bacias rurais. Contudo, apesar de Huff et al. (1990) ressaltarem que as relações de distribuição temporal podem variar entre regiões com diferentes regimes climáticos de precipitação, estas têm sido aplicadas, sem adaptações, para locais com características de clima e fisiografia muito distintas das para as quais foram desenvolvidas.

Neste sentido, é importante o desenvolvimento de estudos que contemplem áreas maiores a exemplo dos estudos desenvolvidos nos Estados Unidos que dão diretrizes para dimensionamento de chuvas de projeto em todo território. Primeiramente foram propostas pelo SCS (SCS, 1986) curvas mais simplificadas que representam apenas quatro tipos de padrões adimensionais de distribuição temporal e permitem a estimativa de chuvas de projeto com duração total de 24 horas, existindo um fator de conversão para eventos com 6 horas de duração (Figura 2.16). O mapa da Figura 2.17 representa a recomendação de

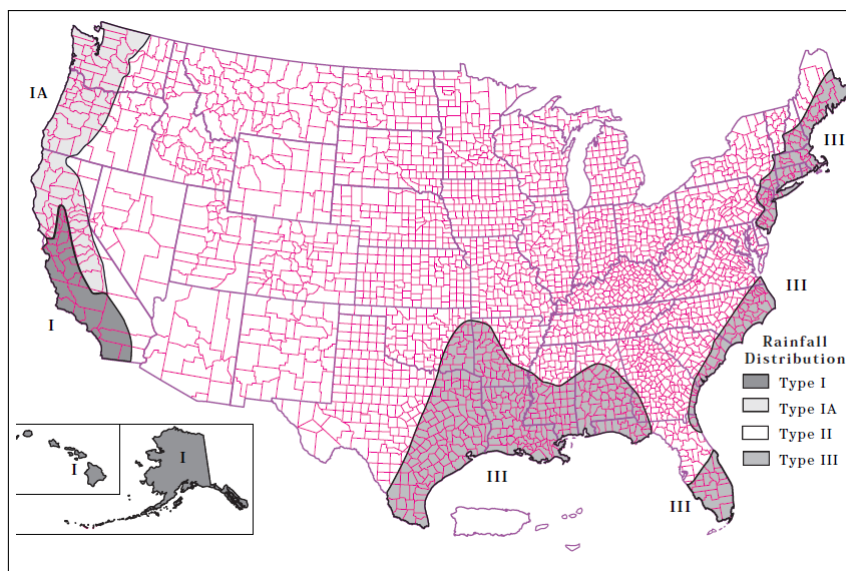
qual tipo deve ser aplicado em cada região.

Figura 2.16 – Padrões de distribuição temporal da precipitação propostos pelo SCS (1986) para 24 h de duração



Fonte: SCS (1986).

Figura 2.17 – Regiões homogêneas de distribuição temporal da precipitação de acordo com SCS (1986)



Fonte: SCS (1986).

A simplificação dos padrões de distribuição temporal da precipitação em quatro tipos facilita a aplicação, porém assim como os métodos apresentados anteriormente não representa toda gama de configurações que são observadas na natureza, pois os hietrogramas provenientes destas curvas apresentam 60% do volume total em apenas 10% da

duração, o que segundo Powell et al. (2007), faz com que este método seja conservativo podendo gerar estruturas superdimensionadas. Ainda mais, por serem adimensionais, tais curvas muitas vezes são utilizadas para derivar tormentas com diferentes durações, assumindo que não existe diferença no padrão da precipitação de eventos com diferentes durações, ou seja, o pico ocorre na mesma porcentagem da duração para eventos de 3 ou 24 horas de duração.

Assim, conforme apresentado no item 2.1.1, o NOAA desenvolveu um conjunto de curvas atualizado e mais representativo do comportamento real das precipitações do que as curvas tipo do SCS (1986). As curvas são disponibilizadas para dez regiões distintas dos Estados Unidos e a metodologia de elaboração adotada pelo NOAA para construção dos padrões a partir de séries históricas foi semelhante a proposta por Huff (1967) com algumas adaptações (PERICA et al., 2013b).

Neste mesmo sentido, alguns autores desenvolveram curvas adimensionais para representar características específicas da distribuição temporal da precipitação de determinadas regiões do mundo como, África do Sul (TSUBO; WALKER; HENSLEY, 2005), Malásia (AZLI; RAO, 2010), Itália (TERRANOVA; IAQUINTA, 2011), Iran (GHASSABI et al., 2016), Eslovênia (DOLŠAK; BEZAK; ŠRAJ, 2016), Egito (EL-SAYED, 2017) e China (PAN et al., 2017).

No Brasil, Pinheiro e Naghettini (1998) desenvolveram um conjunto de curvas para Belo Horizonte, Minas Gerais. Os autores verificaram nessas curvas, um desvio com o aumento da duração dos eventos, isto é, quanto maior a duração da precipitação, menos uniforme é a sua distribuição temporal. Em Minas Gerais, Ferreira (2015) construiu uma curva para o estado a partir de dados de 115 pluviógrafos e chuvas com até 2h de duração buscando encontrar um padrão regional entre as distribuições.

Em Pelotas, no Rio Grande do Sul, Molin et al. (1996) selecionaram 232 eventos para elaboração das curvas e identificaram que as chuvas do primeiro quartil são as mais frequentes para a maioria das durações, exceto, para as durações de 18 a 24h que apresentaram terceiro quartil. Além disso, os autores constataram que, quando aumenta a duração, diminui a frequência de ocorrência.

Também no Rio Grande do Sul, Paiva (1997) e Thiecher et al. (2013) estudaram os padrões de distribuição para a cidade de Santa Maria. Paiva (1997) a partir da análise de 2643 eventos, determinou que as precipitações na cidade possuem um padrão adiantado, com pico em até 25% da duração total do evento. Já Thiecher et al. (2013) construíram padrões adimensionais para quatro classes de intensidade das precipitações propuseram equações de ajuste para cada uma destas. Segundo os autores supracitados, a análise demonstrou uma homogeneidade na distribuição temporal para diferentes durações de chuva, sendo que existe uma tendência muito semelhante na distribuição dos volumes ao longo da duração.

Em São Paulo, Cruciani et al. (2002) ajustou diferentes funções de probabilidade

na tentativa de identificar os padrões mais comuns de distribuição temporal. Os autores chegaram à conclusão de que as chuvas, em geral, se ajustam à distribuição exponencial negativa, o que retrata padrões adiantados de chuvas. Foram analisadas precipitações de 60 e 120 min de duração divididas em intervalos de 20 min. O resultado se assemelhou ao encontrado por Sentelhas et al. (1998) para chuvas com durações de 240 min para mesma região. Segundo Cruciani et al. (2001) isto indica que o padrão de distribuição temporal não é afetado nem pela altura total precipitada nem pela duração. No entanto, foram avaliadas apenas durações consideradas curtas, com até 4 horas de duração.

Conforme apresentado, os estudos realizados no Brasil são pontuais ou para pequenas áreas, não podendo ser utilizados como base para elaboração de diretrizes de projetos de drenagem urbana e estudos hidrológicos no país. Sendo assim, quando existentes, os manuais de drenagem desenvolvidos no país sugerem o método dos blocos alternados ou as curvas de Huff para o 2º quartil para distribuição temporal da precipitação, como é o caso do manual de drenagem da cidade de São Paulo (SMDU, 2012; GDF, 2009; DEP, 2005).

Baseado no exposto, a metodologia de Huff (1967) foi escolhida para construção de padrões de distribuição temporal das precipitações intensas do estado do Rio Grande do Sul, e por isso, a seção a seguir detalha os fatores limitantes no processo de elaboração das curvas.

## 2.3 FATORES LIMITANTES DAS CURVAS ADIMENSIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

Não existem normas ou guias para o desenvolvimento de curvas adimensionais que representam a distribuição temporal da precipitação (BONTA, 2004). Sendo assim, as especificações de elaboração são definidas a partir do objetivo de cada trabalho, como por exemplo, definir padrões de precipitações intensas para dimensionamento de chuvas de projeto, ou apenas caracterizar a distribuição temporal das precipitações de determinada região. Para gerar padrões bem representativos é importante considerar os fatores que mais influenciam no desenvolvimento destes padrões.

### 2.3.1 Amostragem dos dados de precipitação

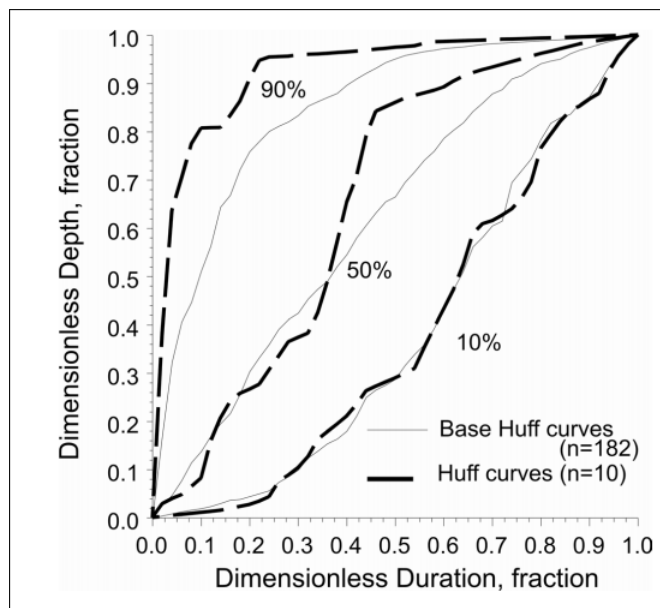
Tanto o intervalo de amostragem quanto o tamanho da amostra interferem na configuração final das curvas adimensionais. O estudo desenvolvido por Huff (1967) construiu curvas a partir de 261 eventos discretizados em intervalos de 30 minutos. O autor destaca que os incrementos de 30 min tendem a suavizar as curvas, porém não realizou uma

análise de sensibilidade quanto ao intervalo de amostragem, e nem quanto ao número de eventos utilizados.

Neste sentido, Bonta e Rao (1987) computaram dados de pluviogramas em diferentes intervalos (3, 10, 20, 30, 40,50 e 60 min) e chegaram à conclusão de que, de uma maneira geral, o intervalo de amostragem não causou uma variabilidade significativa nas curvas (menor do que o desvio padrão). Este resultado indica que dados horários, geralmente disponíveis em maior quantidade do que dados sub-horários, podem ser utilizados para elaboração das curvas sem que se perca representatividade. Isto se explica pelo fato de que, quando o monitoramento não contém erros, os volumes precipitados ao final de cada hora coincidem, não alterando as relações com a duração (POWELL et al., 2007).

Ainda mais, Bonta (2004) investigou o efeito do número de eventos selecionados nas curvas adimensionais. Como pode ser observado na Figura 4.1, o estudo detectou uma certa variabilidade conforme eram adicionados eventos. Entretanto, assim como em outros trabalhos (BONTA; SHAHALAM, 2003), o autor constatou que existe um número mínimo total de eventos selecionados a partir do qual a curva se estabilizaria, não mudando de posição quando adicionados mais eventos.

Figura 2.18 – Curvas adimensionais desenvolvidas com 10 e 182 eventos



Fonte: Bonta (2004).

É importante destacar que o número mínimo total de eventos pode variar para cada localidade, sendo necessário um estudo específico para determinação da quantidade mínima de eventos para gerar uma curva bem representativa de cada região. Bonta (1988) encontrou um número mínimo de 90 eventos para Coshocton, Ohio e Bonta e Shahalam (2003), 120 para dados de Invercargill, Nova Zelândia. Sendo assim, o número mínimo de



eventos necessários pode ser definido a partir de uma análise do coeficiente de variação das curvas conforme adicionados eventos. Desta maneira, quando plotadas as curvas médias contra o número de anos de dados as curvas médias tendem a se aproximar de uma constante.

### **2.3.2 Critérios de seleção de eventos**

Como visto no item 2.1.4, os critérios utilizados para segmentação da série histórica influenciam na quantidade e qualidade dos eventos selecionados. Sendo assim, da mesma maneira que o mínimo período seco (MPS) afeta a caracterização das propriedades das tormentas, este também pode causar variações nas curvas adimensionais. Entretanto, se a variação avaliada for menor do que o desvio padrão, as curvas podem ser consideradas insensíveis a este fator (BONTA; RAO, 1987; DUNKERLEY, 2008).

Ainda mais, a adoção de um volume mínimo para um registro de precipitação ser considerado permite a construção de uma curva mais representativa de eventos de maior intensidade, pois segmenta longos eventos com baixa intensidade em porções menores, e mais confiável, uma vez que elimina possíveis erros dos aparelhos de medição.

Por fim, Bonta (2004) avaliou o efeito do volume mínimo total para um evento ser considerado significativo nas curvas finais e chegou à conclusão que um grupo com tormentas que incluam volumes menores que 12,7 mm deslocam as curvas para baixo. Segundo o mesmo autor, isso ocorre devido ao fato de que tormentas com volumes menores do que 12,7 mm consistem de dois pontos formando uma linha reta.

### **2.3.3 Critérios de agrupamento**

Em seu estudo Huff (1967) observou que a maior parte da precipitação acontecia em uma pequena parcela do evento, o que o levou a propor a separação em quartis de acordo com a porcentagem total da duração em que ocorreu o maior volume precipitado. Com este agrupamento Huff (1967) percebeu que a maioria das precipitações de Illinois com mais de 24 horas de duração se enquadravam no quarto quartil, as de menos de 12 horas no primeiro e segundo, e as entre 12 e 24 horas no terceiro.

No entanto, como demonstrado pela Tabela 2.3 (adaptada do artigo original), a maioria das precipitações, em termos de soma de frequência de ocorrência, realmente apresentaram este comportamento. Porém, uma boa parcela das demais precipitações apresentaram comportamento diferenciado, indicando que precipitações de mesma duração podem ter distribuição temporal diferenciada.

Tabela 2.3 – Frequências de ocorrência das precipitações em cada um dos quartis propostos por Huff (1967)

Quartil	<12h (%)	12-24h (%)	>24h (%)	Frequência (%)
1	45	29	26	32
2	50	33	17	34
3	35	42	23	25
4	22	26	52	9
<b>Todos os eventos</b>	42	33	25	100

Fonte: Adaptado de Huff (1967).

Em um estudo desenvolvido na Eslovênia, foi adotado apenas o critério de durações para o agrupamento sendo classificadas no mesmo grupo as tormentas de 3 a 6 horas, 6 a 12 horas, 12 a 24 horas e maiores que 24 horas (DOLŠAK; BEZAK; ŠRAJ, 2016). A partir da classificação proposta, os autores detectaram variações nas distribuições temporais para diferentes durações principalmente entre as de longa (maior do que 24 horas) e de curta duração (menor do que 12 horas). Os autores ainda destacaram que a variação nas curvas era menor quanto maior a duração. Dolsak et al. (2016) atribuem estas variações ao fato de que as tormentas de curta duração são formadas por mecanismos convectivos mais instáveis, e as de maior duração, por mecanismos frontais com distribuição menos variável.

Por fim, além dos critérios apresentados alguns estudos avaliam a influência do agrupamento dos eventos de acordo com a estação do ano. Bonta e Rao (1987) detectaram variações no formato das curvas quando desenvolvidas especificamente para tormentas de verão ou inverno, comprovando que a estação do ano tem certa influência no formato da curva. Ainda no mesmo estudo, as curvas elaboradas com eventos recorrentes no inverno tiveram uma menor variação na intensidade do que as que ocorrem no verão e primavera. Os autores atribuíram estes fatos principalmente à diferenças nos sistemas formadores das precipitações atuantes em cada uma das estações. Nerc (1975) também identificou diferenças entre as estações do ano, e sugeriu que os dados não deveriam ser combinados para todas as estações como feitas por Huff em (1967).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como visto no capítulo anterior, as metodologias de derivação de chuva de projeto que simulam um comportamento sintético ou crítico apesar de simples e versáteis, muitas vezes resultam em vazões superiores as realmente observadas em determinada bacia hidrográfica. Neste sentido, as metodologias que se baseiam no comportamento real da precipitação são mais vantajosas, porém precisam ser desenvolvidas para cada localidade ou região a partir séries históricas.

Como apresentado no item 2.2.4, a metodologia proposta por Huff (1967) tem grande potencial para otimização dos projetos de drenagem urbana. Esta metodologia permite a derivação de diferentes configurações de distribuição temporal da precipitação a partir de curvas adimensionais que representam padrões observados. Porém, o trabalho original de Huff (1967) não trás maiores detalhes sobre a metodologia de construção das curvas. Desta maneira, como mencionado por Bonta (2004), não existem diretrizes para elaboração das curvas na literatura, e, cada autor apresenta suas adaptações de acordo com o conjunto de dados de precipitação que se deseja representar.

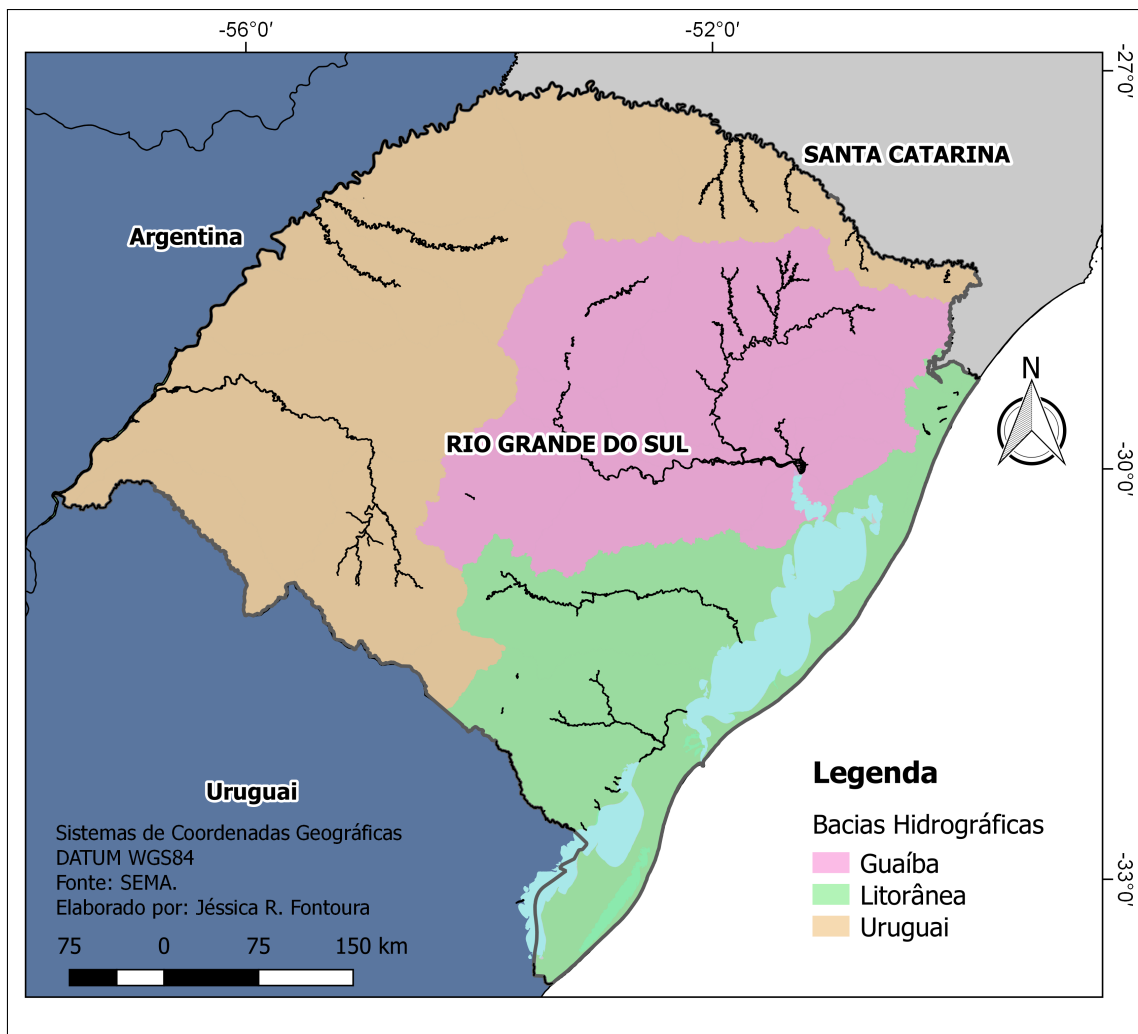
Sendo assim, para a determinação dos padrões de distribuição temporal das precipitações intensas do Rio Grande do Sul, baseou-se principalmente nas metodologias de elaboração de curvas adimensionais propostas por Huff (1967), Bonta (2004) e Bonnin et al. (2006), com adaptações para o banco de dados disponível no estado.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Rio Grande do Sul é um estado da região Sul do Brasil que faz fronteira com a Argentina, Uruguai, Santa Catarina e Oceano Atlântico (Figura 3.1). Sendo o 5º estado mais populoso do país, o RS possui 497 municípios e população total estimada em 11.329.605 habitantes. A extensão territorial é de 281.748 km<sup>2</sup>, configurando uma densidade populacional de 40,21 hab.km<sup>-2</sup> (CARGNIN et al., 2014).

A economia é a 5ª maior do país (com um PIB de 357,8 milhões) e está intimamente ligada com o regime de precipitações e com a disponibilidade hídrica, pois estes são fatores essenciais para o setor agropecuário, que totaliza cerca de 10% do PIB, e mais da metade das exportações do estado (CARGNIN et al., 2013). O estado possui uma das redes hidrográficas com maior disponibilidade de água no Brasil, dividida em três grandes bacias (Figura 3.1): a bacia do Uruguai, que drena cerca de 57% da área total do Estado, a do Guaíba, 30%, e a Litorânea, abrangendo cerca de 13% do território (SCP-RS, 2017).

Figura 3.1 – Mapa de localização e relevo do Rio Grande do Sul



Fonte: Elaborado pela autora.

As características topográficas influenciam os elementos climáticos, principalmente o regime pluviométrico. O relevo é dividido em cinco unidades geomorfológicas: Cuesta do Haedo, Planalto, Depressão Central, Escudo Sul-Rio Grandense e a planície Costeira (SCP-RS, 2017). Na extremidade a oeste, o resultado do trabalho da erosão diferencial formou a chamada Cuesta do Haedo. Já na porção norte, o Planalto é formado por rochas ígneas e é a unidade que concentra as maiores altitudes, sendo o ponto mais alto o pico do Monte Negro, localizado a 1400 m do nível do mar, no município de São José dos Ausentes. A Depressão Central, compreende uma faixa que se estende pelo centro do estado, no sentido leste-oeste, é formada, em sua maioria, por rochas sedimentares. As altitudes desta unidade não apresentam grandes magnitudes, sendo que os pontos mais altos estão em torno de 250 m. O Escudo Sul-Rio Grandense, localizado ao sul, é formado por rochas cristalinas e as maiores altitudes atingem aproximadamente 600 m. Por último,

a planície Costeira, com morfologia moldada por uma série de regressões e transgressões marinhas, não apresenta altitudes superiores a 150 m (MONTEIRO, 1963; GONÇALVES; SANTOS, 1985).

De acordo com a classificação climática global de Koppen-Geiger (1961) adaptada por Kottek et al. (2006), o clima do RS é do tipo subtropical úmido, sendo que a maior parte do seu território pertence ao grupo climático Cfa (sempre úmido com verões quentes) e uma pequena área, localizada na região nordeste (nas altitudes mais elevadas), ao tipo Cfb (sempre úmido com verões amenos). A temperatura apresenta grande variação ao longo do ano, podendo apresentar mínimas negativas em algumas regiões no inverno e máximas próximas dos 40 °C no verão. A temperatura média anual varia entre 14 °C e 22 °C. A distribuição das chuvas é bastante uniforme ao longo do ano (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998), com acumulados anuais que variam de 1200 mm a mais de 1900 mm (ROSSATO, 2011).

Definir a variabilidade espacial dos elementos do clima de acordo com fatores geográficos locais e regionais é importante para compreensão da dinâmica da precipitação. No entanto, como o RS apresenta regiões climaticamente bem diferenciadas, para compreender em maior detalhe a precipitação é necessário analisar todos os fenômenos que podem influenciar esta região e também os diferentes mecanismos formadores de precipitação.

### **3.1.1 Fenômenos atuantes no tempo e clima do RS**

Como dito anteriormente, devido a posição geográfica o tempo e o clima do estado do Rio Grande do Sul são afetados por diversos fenômenos de diferentes escalas (REBOITA et al., 2010). Considerando os fenômenos de escala sinótica, têm-se as frentes frias que passam regularmente pelo estado, favorecendo a convecção profunda e a boa distribuição espacial e temporal das chuvas (CERA; FERRAZ; BENDER, 2009). A localização do estado também é favorável a ação de sistemas de escala sub-sinótica, como os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) que associados aos Jatos de Baixos Níveis (JBN) transportam umidade e calor das baixas latitudes, provocando chuvas intensas na região sul e sudeste do Brasil (MADDOX, 1980).

Fenômenos de escala intrasazonal como a Oscilação de Madden e Julian (OMJ) também influenciam indiretamente a precipitação no estado (FERRAZ, 2004). Em uma escala global, observam-se as influências remotas dos Oceanos Atlântico e Pacífico no regime das chuvas no Sul do Brasil. Entre os fenômenos de baixa frequência, observam-se o El Niño e a La Niña (GRIMM, 2003). Estes fenômenos ocorrem devido ao aquecimento e resfriamento anômalo das águas do Oceano Pacífico Equatorial, respectivamente. Existe ainda um fenômeno de grande escala associado a estes dois fenômenos, o Índice de Oscilação Sul (IOS) que é caracterizado pela diferença da pressão ao nível do mar entre o

Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico Oeste (Darwin/Austrália) causando o enfraquecimento ou intensificação dos ventos alísios sobre o Oceano Pacífico Equatorial (CERA; FERRAZ; BENDER, 2009). A combinação destes fenômenos oceânicos e atmosféricos é chamada de El Niño Oscilação Sul (ENOS).

As duas fases do ENOS provocam mudanças na circulação de todo o globo (GRIMM, 2003). No caso do El Niño, observa-se um aumento no volume das chuvas na costa do Peru, meio Oeste dos EUA e no Sul e Sudeste do Brasil. No RS, de modo geral, observa-se precipitação superior à média climatológica na primavera, principalmente outubro e novembro, e temperatura abaixo da média no inverno (GRIMM, 2009).

Durante o fenômeno La Niña uma grande área sobre a Indonésia (incluindo parte do Oceano Índico e Pacífico) concentra altos índices pluviométricos, enquanto na região do Pacífico Equatorial Central e Oriental há redução no volume de precipitação. Durante estes eventos o RS fica mais vulnerável a longos períodos de estiagem (principalmente na primavera), e verões com temperatura abaixo da climatologia no ano posterior ao evento (PAMPUCH; FERRAZ, 2012).

Modos de variabilidade climática de baixa frequência, com escalas decadais, também apresentam importantes teleconexões climáticas (ANDREOLI; KAYANO, 2005). Estes modos ocorrem no Pacífico e Atlântico, e, quando superpostos aos modos interanuais, como o ENOS, podem alterar o efeito deste em algumas regiões do globo, inclusive na América do Sul (KAYANO; OLIVEIRA; ANDREOLI, 2009). Um exemplo é a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) que ocorre quando as águas da região tropical e a costa do continente Norte Americano se tornam mais quentes, enquanto a região extratropical fica mais fria, e são chamadas de fase positiva (fria) e negativa (quente), respectivamente (MANTUA et al., 1997). Além de todas as variabilidades naturais apresentadas, estudos indicam que ações antrópicas também podem causar alterações no clima da América do Sul (MARENGO, 2009; MARENGO et al., 2010).

### **3.1.2 Mecanismos formadores de precipitações intensas no RS**

Conforme Reboita et al. (2010), os Sistemas Frontais (SFs), os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) e os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs), são os principais mecanismos responsáveis pela ocorrência de chuvas na região Sul do Brasil. Os SFs tem relações diretas com as entradas de frentes frias que ocorrem o ano todo, porém são mais frequentes nos meses de maio a setembro (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009; SANTOS, 2012). Apesar de estas frentes serem responsáveis por um regime de precipitação bem distribuído ao longo do ano, não são as mais atuantes para formação de precipitações intensas, sendo os mecanismos convectivos e ciclônicos os mais importantes para ocorrência de eventos extremos.

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) são um tipo de SCM e possuem uma espessa cobertura de nuvens frias, com forma aproximadamente circular (MADDOX, 1980) e formam uma importante contribuição para a precipitação local, bem como para o balanço hidrológico global (ROMATSCHKE; HOUZEJR, 2013). Campos e Eichholz (2011) analisaram eventos convectivos recorrentes no RS para o período de 2004 a 2008 e determinaram que a maior parte destes eventos tem entre 6 e 12 horas de duração. A ocorrência desses eventos se dá em todas as estações do ano, porém com maior incidência no período quente (de outubro até maio), respondendo por grande parte da precipitação total no RS (GRIMM, 2009; DURKEE; MOTE, 2010).

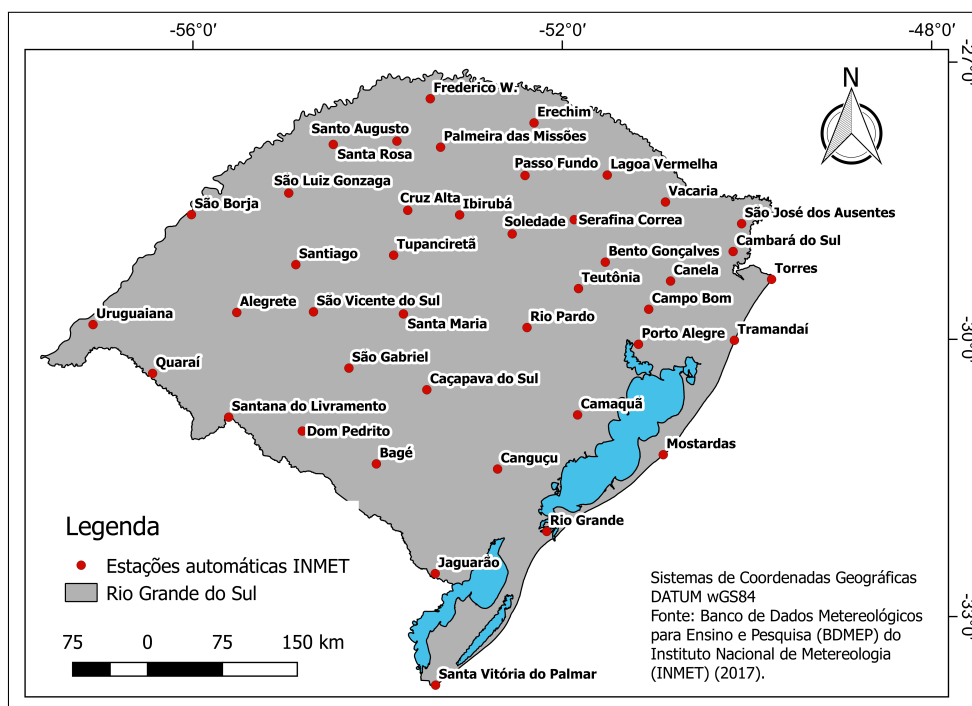
Diversos estudos de casos de CCMs apontam que estes estão frequentemente associados a eventos de precipitações intensas, fortes rajadas de vento e até tornados, motivando seu estudo com base nas aplicações em previsão do tempo (ABDOULAEV; CASARIN, 1994; DUQUIA; DIAS, 1994; CAVALCANTI, 1982; FIGUEIREDO; SCOLAR, 1996; CAMPOS; EICHHOLZ, 2011). A forte intensidade dos CCMs está associada à posição dos jatos subtropicais de nível superior (JST), que são ventos fortes com ar mais frio e seco em altos níveis e estão sobre a região Sul da América do Sul (AS) durante o outono e primavera. A interação dos JTS com os jatos de baixos níveis (JBN) intensificam os CCMs (MADDOX, 1983). Os JBN transportam umidade e calor da região da Amazônica ao longo do lado leste da Cordilheira dos Andes para latitudes inferiores. Este canal de umidade contribui para a formação dos CCMs no Paraguai e Norte da Argentina, que geralmente são advectados para o Rio Grande do Sul (MARENGO, 2009).

Já os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são sistemas meteorológicos caracterizados por centros de pressão relativamente baixa que se originam na alta troposfera e se estendem até os níveis médios, dependendo da instabilidade atmosférica (FERREIRA; RAMIREZ; GAN, 2009). Os VCANs de origem subtropical formam-se em qualquer época do ano e geralmente desenvolvem-se sobre o Oceano Pacífico Sul, e muitas vezes cruzam os Andes provocando chuva e ventos fortes afetando regiões do Uruguai, Argentina, Paraguai e extremo Sul do Brasil (GAN; RAO, 1991). Os vórtices ciclônicos possuem uma vida média que varia consideravelmente, uns duram apenas algumas horas, outros mais de duas semanas. Gan e Rao (1991) constataram que, para a primavera, há duas regiões com maior frequência destes ciclones. Estas encontram-se sobre o RS e Uruguai, e sobre o litoral central da Argentina. Ainda mais, Hoskins e Hodges (2005) apresentam a região sudeste da América do Sul como trajetória preferencial de ciclones extratropicais ao longo de todo o ano.

### 3.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Para realização deste trabalho foram utilizados dados horários disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As séries históricas de precipitação são disponibilizados em planilhas no formato (.xlsx) do software Excel, e podem ser obtidos através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), acessado via internet em (<http://www.inmet.gov.br/portal/bdmp>). Atualmente existem 43 estações automáticas do INMET operando em diferentes localidades do estado, como mostra o mapa da Figura 3.2. Como o banco de dados desta pesquisa foi coletado em 2017, e a 43ª estação, localizada em Encruzilhada do Sul, foi instalada em 2018, apenas 42 estações foram consideradas (Tabela 3.1).

Figura 3.2 – Mapa de localização das 42 estações automáticas do INMET utilizadas nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

Como o ano de início de monitoramento não é igual para todas as estações, a extensão das séries utilizadas é bem variada (Tabela 3.1). Apesar destas estações não possuírem grandes séries de registros (< 17 anos), formam o conjunto de dados observados em escala sub-diária mais organizado e de fácil acesso no estado. Porém, em função de problemas técnicos e períodos de manutenção e aferição dos medidores, existem falhas de continuidade (Tabela 3.1).



Tabela 3.1 – Descrição das estações automáticas do INMET em operação no RS até 2017

<b>COD INMET</b>	<b>Localização</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Ano de instalação</b>	<b>Extensão da série (anos)</b>	<b>Falhas (%)</b>
A826	Alegrete	121	2006	11	8,0
A827	Bagé	226	2007	11	4,0
A840	Bento Gonçalves	623	2006	11	3,6
A812	Caçapava do Sul	421	2006	11	3,2
A838	Camaquã	92	2006	11	5,2
A897	Cambará do Sul	1017	2016	1	0,9
A884	Campo Bom	23	2013	4	0,4
A879	Canela	831	2008	9	2,1
A811	Canguçu	447	2007	11	4,4
A853	Cruz Alta	427	2007	10	1,4
A881	Dom Pedrito	157	2010	7	20,9
A828	Erechim	777	2006	11	9,8
A854	Frederico Westphalen	489	2007	10	1,5
A883	Ibirubá	455	2012	5	6,8
A836	Jaguarão	31	2007	11	5,4
A844	Lagoa Vermelha	834	2007	10	4,0
A878	Mostardas	4	2008	9	5,8
A856	Palmeira das Missões	614	2008	9	10,9
A839	Passo Fundo	681	2006	11	1,0
A801	Porto Alegre	41	2000	17	4,5
A831	Quaraí	113	2007	10	7,9
A802	Rio Grande	5	2001	16	13,3
A813	Rio Pardo	107	2006	11	4,8
A804	Santa do Livramento	103	2001	15	18,8
A803	Santa Maria	328	2003	16	4,0
A810	Santa Rosa	273	2006	11	12,0
A899	Santa Vitória do Palmar	7	2008	9	6,9
A833	Santiago	390	2009	8	3,0
A805	Santo Augusto	490	2001	16	19,0
A830	São Borja	81	2007	10	13,5
A832	São Gabriel	115	2007	10	6,4
A829	São José dos Ausentes	1229	2006	11	4,6
A852	São Luiz Gonzaga	246	2007	10	11,0
A889	São Vicente do Sul	134	2016	1	0,1
A894	Serafina Corrêa	545	2016	1	0,5
A837	Soledade	660	2008	9	4,1
A882	Teutônia	80	2012	5	5,7
A808	Torres	8	2006	11	6,2
A834	Tramandaí	5	2008	9	3,0
A886	Tupanciretã	462	2016	1	0,2
A809	Uruguaina	74	2006	11	4,2
A880	Vacaria	970	2008	9	2,4

Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar de a porcentagem média de falhas ser de apenas 6,1%, 11 estações apresentaram porcentagens de falhas superiores ao desvio padrão do grupo (5,1%). No entanto, não existem metodologias para preenchimento de falhas em séries históricas de precipitação que apresentem resultados satisfatórios para dados amostrados em escala sub-horária ou até mesmo diária (DEPINÉ; CASTRO; PEDROLLO, 2014). Desta maneira, os eventos que apresentaram falhas foram desconsiderados.

### 3.2.1 Avaliação de critérios para seleção de eventos

Como apresentado no item 2.1.4, existem diversos critérios que podem ser adotados para segmentação de séries temporais de precipitação em eventos. Neste trabalho foram adotados os seguintes critérios: volume mínimo em milímetros para uma medição ser considerada ( $V_m$ ), mínimo período seco entre eventos em horas ( $MPS$ ). Como também apresentado no item 2.1.4, não existe consenso na literatura quanto aos valores a serem adotados para estes critérios, porém sua definição deve estar bem correlacionada com objetivo da aplicação desejada. Desta maneira, os critérios  $V_m$  e  $MPS$  foram variados de forma a identificar a combinação que gera a amostra mais razoável de eventos com capacidade para geração de escoamento. A Tabela 3.2 apresenta a configuração proposta para cada uma das simulações.

Tabela 3.2 – Configurações propostas para identificar o  $V_m$  e o  $MPS$  ideais

Simulação	COD INMET	Localização	$V_m$ (mm)	$MPS$ (h)
1	A801	Porto Alegre	0	6
2	A801	Porto Alegre	2	6
3	A801	Porto Alegre	2	4
4	A801	Porto Alegre	2	2
5	A801	Porto Alegre	1	6
6	A801	Porto Alegre	1	4
7	A801	Porto Alegre	1	2
8	A809	Uruguaiana	0	6
9	A809	Uruguaiana	2	6
10	A809	Uruguaiana	2	4
11	A809	Uruguaiana	2	2
12	A809	Uruguaiana	1	6
13	A809	Uruguaiana	1	4
14	A809	Uruguaiana	1	2

Para permitir uma análise ampla e condizente com o banco de dados disponível, estas combinações foram aplicadas para a estação com maior período de monitoramento (17 anos), e para uma estação que representa a extensão média do banco de dados (11 anos). Na Tabela 3.2 é possível observar que as simulações 1 e 8 foram realizadas considerando-se registros de chuva com qualquer volume.

Isto foi realizado para que seja possível comprovar que quando não é adotado um volume mínimo para um registro ser considerado os eventos selecionados englobam pequenos volumes que atrapalham a caracterização da parte intensa do evento extremo. Os resultados foram avaliados em termos de: número total de eventos selecionados, duração máxima de um evento, volume total de um evento e número total de eventos significativos (definidos na seção seguinte). A configuração que apresentou o resultado mais satisfatório foi aplicada para todas as estações.

### 3.2.2 Seleção de eventos significativos

Nem todos os eventos selecionados a partir dos critérios do item anterior foram significativos para o objetivo desta pesquisa, principalmente em termos de volume. Desta maneira, para garantir a seleção de eventos que contribuam para geração de escoamento superficial em uma bacia hidrográfica e caracterizem bem o padrão de distribuição temporal da precipitação, adotaram-se os seguintes critérios para definição de um evento significativo: volume total mínimo em milímetros para um evento ser considerado ( $V_e$ ) e duração mínima total do evento em horas ( $D_m$ ).

Estipulou-se um  $V_e$  igual ou superior a 25 milímetros porque como visto no item 2.3.2 quando volumes muito pequenos são considerados, as curvas se deslocam para baixo. Isto ocorre porque eventos com pequeno volume consistem, na maior parte das vezes, de dois pontos formando uma linha reta (BONTA, 2004). Em seu estudo, Huff (1967) também adotou um critério de volume total mínimo. O autor considerou uma tormenta apenas quando uma ou mais estações marcaram no mínimo 25,4 milímetros ao longo de toda duração, e ou a média observada na rede de estações foi superior a 12,7 milímetros.

O  $D_m$  de 4 horas foi adotado levando-se em conta os estudos de Kerr et al. (1974) e Tyrrell e Hasfurth (1983) que indicaram que quatro pontos são suficientes para caracterizar bem o padrão de distribuição temporal de um evento. Estudos mais recentes recomendam que para abranger bem a variabilidade da distribuição temporal das tormentas, devem ser utilizados seis pontos para gerar uma curva (POWELL et al., 2007). No entanto, estes estudos utilizaram dados sub-horários, o que limitou o  $D_m$  em 30 min. Já para uma série horária, a limitação do  $D_m$  a partir do mesmo critério ficaria em 6 horas, comprometendo muito a quantidade de eventos selecionados levando-se em conta a curta extensão das séries disponíveis.

### 3.2.3 Classificação dos eventos significativos em quartis

Após determinar quantos dos eventos individualizados das séries históricas de precipitação são significativos para representar o comportamento típico das chuvas intensas na região, os eventos de cada estação foram agrupados em quartis. Um quartil é definido como um segmento temporal de 25% da duração total do evento, em que o volume máximo da precipitação ocorre (HUFF, 1967; HUFF et al., 1990) .

Como os dados estão amostrados em escala horária, a intensidade ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) de cada registro é o próprio volume (mm) e a intensidade máxima é o volume máximo registrado em determinado intervalo de tempo. Sendo assim, para classificar os eventos em determinado quartil inicialmente identificou-se o registro de intensidade máxima em cada evento e o número de intervalos de tempo correspondentes. Deste modo foi possível determinar a porcentagem da duração total em que ocorreu a maior parte da chuva e classificar os eventos significativos de cada estação da seguinte maneira:

- Quartil I: 0 a 25 %
- Quartil II: 25 a 50 %
- Quartil III: 50 a 75 %
- Quartil IV: 75 a 100 %

Além disso, Bonta (2004) sugeriu que determinado quartil pode agrupar um maior número de eventos ocorridos em determinada estação do ano, ou dentro de determinada classe de duração. Assim, para melhor avaliar o agrupamento em quartil foram determinadas as frequências totais de eventos classificados em cada um dos quartos de porcentagem da duração de acordo com a estação do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera) em que ocorreram e com sua duração total. Para análise quanto a duração foram propostas as seguintes classes de duração:

- Classe I: 4 a 6 horas
- Classe II: 7 a 12 horas
- Classe III: 13 a 18 horas
- Classe IV: 18 a 24 horas
- Classe V: mais de 24 horas

Os agrupamentos propostos foram realizados para os eventos totais e significativos, sendo que aos eventos totais adicionou-se uma classe anterior a Classe I para representar os eventos descartados por apresentarem duração entre 1 e 3 horas. O desvio padrão

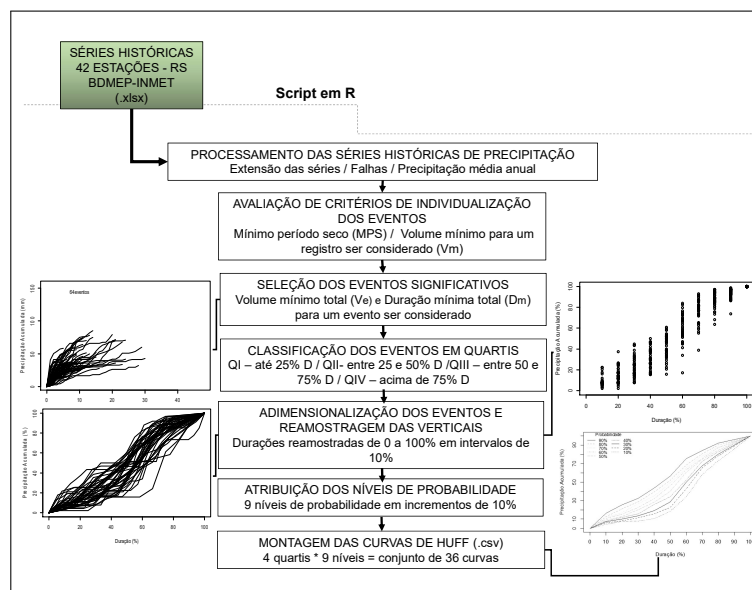
foi a medida estatística utilizada para realização de inferências quanto à significância das diferenças entre as estações e classes de duração.

A consideração feita no item 2.3.3 quanto à importância de, além dos quartis, também elaborar curvas para classes de duração, é relevante. Porém, devido à curta extensão das séries, o sub-agrupamento dos quartis em faixas de duração classificou um número de eventos inferior ao mínimo necessário para elaboração de tais curvas. Além disso, o agrupamento dos dados poderia ter sido realizado somente em faixas de duração, como nos trabalhos de Azli e Rao (2010), Dolšak et al. (2016), El-Sayed (2017), entre outros. Porém, este critério de agrupamento geraria curvas sem definição do quartil de duração em que está o pico de maior intensidade. Isto acontece porque dois eventos de mesma duração podem apresentar distribuições temporais distintas suavizando a caracterização dos picos na curva adimensional (BONNIN et al., 2006a). Como a posição do pico é um importante critério para elaboração de chuvas de projeto, um conjunto de curvas resultantes de uma classificação que considera apenas a duração dos eventos não é o mais adequado para o objetivo proposto neste trabalho.

### 3.3 ELABORAÇÃO DAS CURVAS ADIMENSIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

As etapas de elaboração das curvas estão ilustradas em forma de fluxograma na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagrama de fluxo das etapas da metodologia adotada para elaboração das curvas



Fonte: Elaborado pela autora.

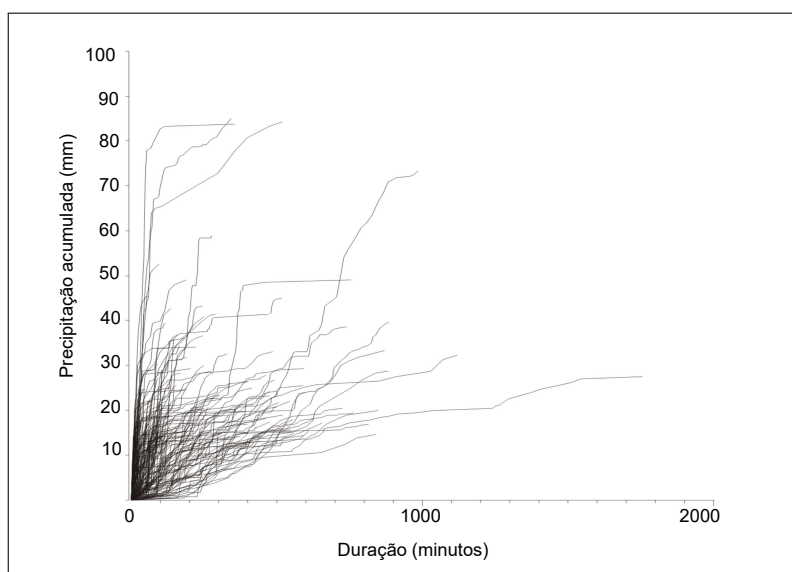
Todos os procedimentos apontados no fluxograma são descritos com maior detalhe ao decorrer desta seção e foram realizados a partir de rotinas escritas na linguagem de programação R (R Core Team, 2015).

As curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação podem ser desenvolvidas para uma localidade específica, ou para representar o comportamento médio de determinada área. Neste trabalho, primeiramente construiu-se curvas pontuais que resumem o comportamento da distribuição temporal da precipitação observado em cada uma das estações apresentadas na Tabela 3.1. Após, avaliou-se a semelhança entre as curvas pontuais e agrupou-se os dados das estações em que o comportamento da distribuição temporal da precipitação foi considerado similar, formando um novo conjunto de curvas.

### 3.3.1 Curvas pontuais

Após definidos os eventos significativos e efetuada a classificação dos mesmos em quartis, foi possível iniciar a elaboração das curvas propriamente. Primeiramente foram determinadas as curvas de massa, que nada mais são do que curvas que expressam o total precipitado acumulado em função da duração, como mostra a Figura 3.4. Portanto, cada evento passou a possuir um conjunto de coordenadas x (duração) e y (precipitação acumulada) que caracterizam a distribuição do volume de chuva no tempo.

Figura 3.4 – Eventos expressos em termos de precipitação acumulada pela duração



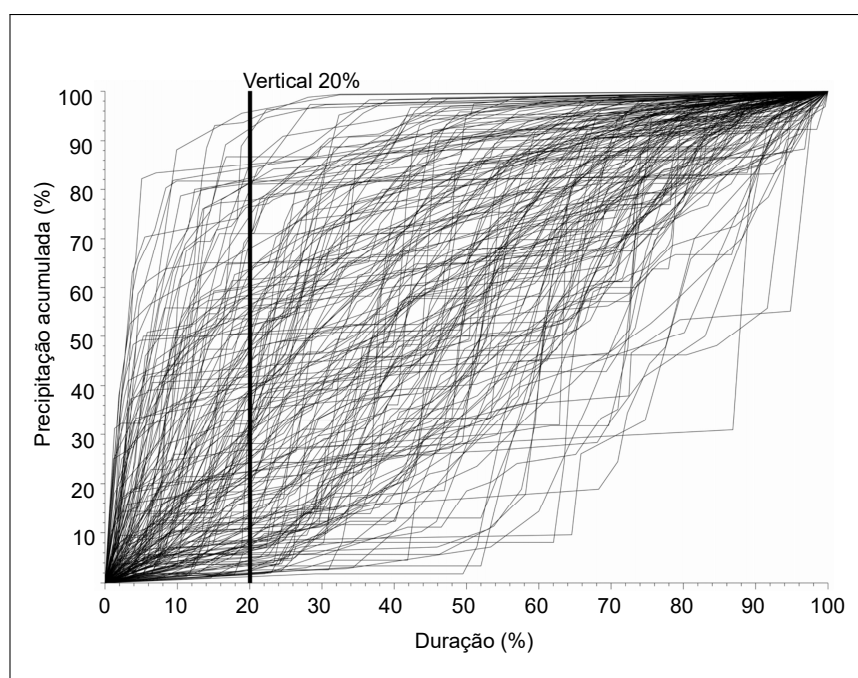
Fonte: Adaptado de Bonta (2004).

A partir da Figura 3.4 é possível observar que alguns eventos acumulam grande

parte do volume total precipitado logo nos primeiros minutos do evento, e outros acumulam o volume lentamente ao decorrer do evento. Para sintetizar esta diversidade de comportamentos e determinar qual o padrão de distribuição temporal da precipitação em determinada estação, foi preciso adimensionalizar o conjunto de coordenadas de cada evento. Para isto, dividiu-se o valor de precipitação acumulada em cada intervalo pelo volume total do evento. Este procedimento foi repetido para a duração.

Posteriormente os quocientes foram expressos em porcentagem. Na Figura 3.5, os pares de coordenadas adimensionais de cada evento são ligados formando curvas adimensionais da distribuição da precipitações de cada evento. Na Figura 3.5, também é possível observar que existe uma série de porcentagem de precipitação correspondente a uma mesma porcentagem de duração, formando uma vertical. Cada vertical contém tantos elementos quanto eventos que apresentaram determinada porcentagem de duração.

Figura 3.5 – Curvas adimensionais de distribuição temporal de cada evento



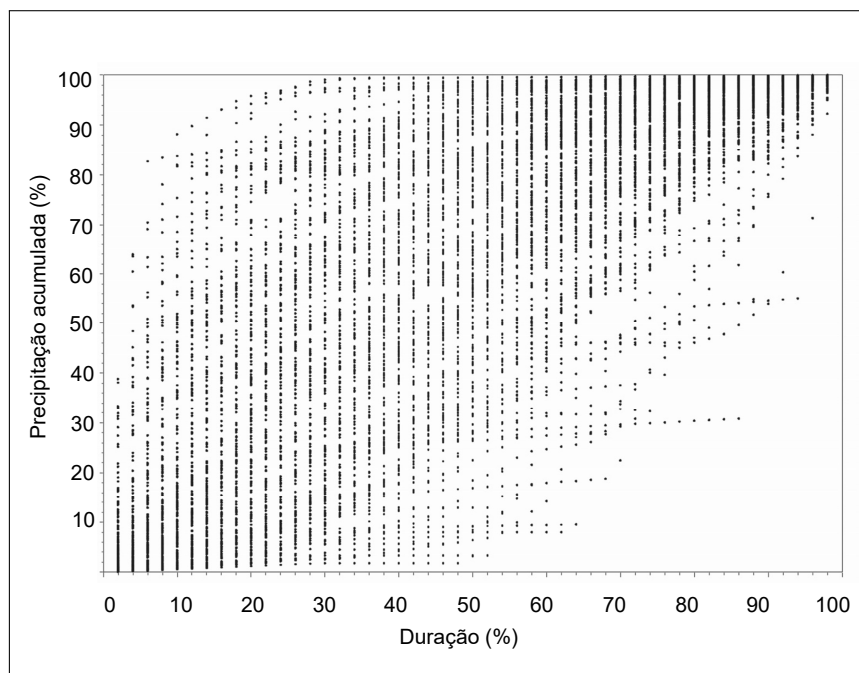
Fonte: Adaptado de Bonta (2004).

Para dar seguimento a metodologia de elaboração das curvas, as porcentagens de precipitação de cada evento precisaram ser reamostradas em intervalos iguais de porcentagem de duração. Segundo Pan et al. (2017), o intervalo de 10% é comumente aplicado em estudos semelhantes e foi também adotado para este estudo. Sendo assim, conforme proposto por Bonta (2004) e Rao e Kao (2006), as porcentagens de precipitação de cada evento foram reamostradas em onze intervalos de duração (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%) por meio de interpolação linear.

Como os registros de precipitações são horários, para que seja possível estimar as verticais iniciais são necessários eventos com 10 ou mais horas de duração ( $1/10 = 0,1$ ). Sendo assim, dependendo da duração total dos eventos classificados em cada grupo algumas vezes ao realizar o procedimento de interpolação faltaram valores de referência para estimativa das porcentagens de precipitação para as verticais iniciais.

Desta maneira, quando se trabalha com dados horários, quanto menor o intervalo que se deseja reamostrar os dados, maior a duração mínima necessária para representar os intervalos iniciais de porcentagem de duração. Por exemplo, quando se deseja reamostrar os dados horários em intervalos de 5% de duração são necessários eventos com 20 ou mais horas de duração ( $1/20 = 0,05$ ), e em 2%, eventos com 50 ou mais horas de duração ( $1/50 = 0,02$ ). A Figura 3.6 ilustra a reamostragem dos dados apresentados na Figura 3.5 em incrementos de 2% de duração.

Figura 3.6 – Séries de porcentagem de precipitação para intervalos iguais de porcentagem de duração



Fonte: Adaptado de Bonta (2004).

Logo a seguir, será apresentado que para elaboração do conjunto de curvas para nove níveis de probabilidade, cada vertical deve conter no mínimo nove elementos. Sendo assim, devido a limitação causada pela amostragem horária dos dados explicada anteriormente, para que a vertical de 10% de duração tenha nove elementos, cada quartil deve conter pelo menos nove eventos com 10 ou mais horas de duração.

Como a extensão das séries de algumas estações é curta (Tabela 3.1), em deter-



minadas situações um número insuficiente de eventos foi classificado, impossibilitando a elaboração das curvas para algum nível de probabilidade ou até mesmo, dependendo do número de eventos, para todos. O trabalho desenvolvido por Rao e Kao (2006) também com dados horários não fez alusão a estas limitações, provavelmente porque as séries históricas de precipitação utilizadas possuíam entre 25 e 50 anos de extensão, resultando num maior número de eventos selecionados.

Como apresentado na seção 2.2.4, uma curva de Huff (1967) corresponde a um padrão de distribuição temporal associado a uma chance de ocorrência. Portanto, foi preciso determinar a probabilidade dos  $n$  elementos das verticais de 10% a 90% de duração. Para isto, os elementos de cada uma das nove verticais foram ranqueados em ordem decrescente e a probabilidade de excedência foi atribuída de forma empírica:

$$P(X \geq x) = \frac{m}{(N + 1)}, \quad (3.1)$$

sendo  $P$  a probabilidade  $m$  é o número de ordem de cada elemento da série,  $N$  o número total de elementos de cada série.

É importante ressaltar que para utilizar um modelo de distribuição teórica de probabilidade ao invés de um modelo empírico, é necessário um número considerável de observações para gerar uma estimativa com um intervalo de confiança apropriado. Como as verticais de duração de estações individuais não apresentam um número de elementos considerado suficiente, esta opção foi avaliada apenas na construção dos padrões regionais (seção 3.3.2) quando os dados de diferentes estações foram agrupados configurando um maior número de elementos a cada vertical de porcentagem de duração.

Assim, depois de atribuída a probabilidade empírica, os elementos de cada vertical foram sintetizados em nove decis de probabilidade (10 a 90%). Para isto, em seu estudo original, Huff (1967) fez a média entre todos os elementos de cada vertical de porcentagem de duração com probabilidades entre 0 e 10%, e denotou esta como sendo a curva de distribuição de 10% de probabilidade. Em seguida, fez a média dos próximos elementos com probabilidades entre 10 e 20% e determinou a curva de 20% de probabilidade. O autor repetiu esse procedimento sucessivamente até formar a curva de 90%.

Neste trabalho, para definição dos valores de porcentagem de precipitação correspondentes a cada decil de probabilidade (10% a 90%) aplicou-se interpolação linear, pois acredita-se que a estimativa de um valor baseada em dois valores próximos gera um valor de porcentagem de precipitação mais aproximado do observado do que a média entre todos os valores dentro de um determinado intervalo de probabilidade.

Após interpolação, tomou-se para cada uma das verticais de duração o valor em porcentagem do volume precipitado correspondente ao mesmo nível de probabilidade, formando uma curva com mesmo nível de probabilidade de seus elementos. Assim como

proposto por Huff (1967), as denotações adotadas neste trabalho remetem a probabilidade de excedência. Assim, cada denotação representa as chances de determinada distribuição temporal ser igualada ou superada. O procedimento descrito foi repetido para os quatro quartis de todas as estações formando um conjunto de 36 curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação.

### 3.3.2 Curvas regionais

Tendo em vista que existem regiões onde a precipitação é homogênea, intuitivamente, a distribuição temporal da precipitação de localidades próximas também pode ser semelhantes, caracterizando um padrão regional. Um conjunto de curvas que representa o comportamento da precipitação em determinada área facilita a aplicação das curvas e permite a estimativa de chuvas de projeto para localidades sem dados.

Entretanto, para que seja possível construir este conjunto de curvas primeiro foi necessário identificar as estações que apresentaram curvas pontuais semelhantes. Para isto, plotou-se as curvas de mesma probabilidade e quartil de todas as estações no mesmo gráfico e determinou-se a média, o desvio padrão e a distribuição em quartis das ordenadas de mesma porcentagem de duração.

Além da estatística descritiva básica, a semelhança entre as curvas foi avaliada por meio da determinação da distância entre as curvas de mesma probabilidade e quartil de cada estação. Esta distância  $d$  foi computada por meio da Equação 4.1.

$$d = 1 - \rho \quad (3.2)$$

sendo  $\rho$  o coeficiente de Pearson amplamente utilizado para determinar a associação numérica linear entre duas variáveis (WILKS, 2006). Esta medida de correlação exprime o grau de relação entre variáveis através de valores situados entre -1 e 1.

Assim, um coeficiente de correlação próximo de zero indica que não há relação entre as duas variáveis, e quanto mais eles se aproximam de 1 ou -1, mais forte é a relação e conseqüentemente, pela Equação 4.1, menor a distância entre as curvas (BERTHOLD; HÖPPNER, 2016). Os dados das estações que apresentaram curvas pontuais fortemente correlacionadas foram agrupados para elaboração de uma nova curva. A metodologia de elaboração das curvas regionais foi a mesma aplicada para construção dos padrões pontuais (item 3.3.1).

Como visto no item 3.3.1, apesar da interpolação linear gerar estimativas mais aproximadas do que a média de valores dentro determinado intervalo a aplicação da função inversa da probabilidade geraria valores ainda mais aproximados. Desta maneira, como depois do agrupamento dos dados cada vertical de duração apresentou um número maior

de elementos, foi possível ajustar um modelo de distribuição teórica de probabilidade.

Sendo assim, para selecionar a distribuição mais apropriada e evitar erros de estimativa foi preciso testar vários modelos. Para isto, utilizou-se o software EasyFit Versão 5.6 (SCHITTKOWSKI, 2002). Este pacote computacional permitiu a avaliação da qualidade do ajuste de 61 modelos de distribuição de probabilidade por meio dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Chi-Squared. As diferenças entre as curvas geradas a partir da atribuição empírica ou teórica de probabilidade foram exploradas apenas graficamente.

Ainda mais, dependendo do objetivo para o qual o conjunto de curvas esta sendo desenvolvido é necessário disponibilizar curvas em intervalo menores de porcentagem de duração (ex.: 5%, 2% ou até mesmo 1%). Isto é particularmente importante para fins de aplicação em projetos de drenagem urbana, pois os tempos de concentração em pequenas bacias impermeabilizadas são pequenos e conseqüentemente os intervalos de discretização da chuva de projeto (uma vez que este usualmente adota-se um intervalo de discretização igual a 1/5 do tempo de concentração).

Na prática, este procedimento pode ser realizado por meio de análise gráfica das curvas apresentadas ou de interpolação linear das coordenadas de porcentagem de precipitação e porcentagem de duração. No entanto, este procedimento é oneroso, sendo mais adequado o ajuste de uma equação que represente que permita a estimativa da porcentagem de precipitação a partir de qualquer porcentagem de duração desejada.

Tendo isto em vista, com auxílio do software Curve Expert Basic Versão 2.1.0 (HYAMS, 2011) buscou-se o ajuste de uma equação que represente as relações entre porcentagem de precipitação e porcentagem de duração das curvas regionais correspondentes ao nível de probabilidade de 50%. A qualidade dos ajustes das equações disponíveis no Curve Expert Basic Versão 2.1.0 foi avaliada por meio das seguintes métricas: erro padrão, que dá uma medida de erro de estimativa na mesma unidade dos dados (ou seja porcentagem de precipitação), e coeficiente de correlação, que expressa a relação linear entre os pontos observados e os amostrados a partir das equações ajustadas.

Escolhida a função que melhor se ajustou as quatro curvas foram estimados hietogramas de projeto para uma duração total de 6 horas em intervalos de 1 hora e de 15 min. O volume de 150 mm foi distribuído de acordo com as porcentagens de precipitação obtidas a partir das equações para as porcentagens de duração desejadas.

Este procedimento de aplicação de curvas de distribuição temporal desenvolvidas a partir de dados com intervalos horário para intervalos inferiores é sustentada pelos resultados dos estudos de Bonta e Rao 1987 e Powell et al. 2007, e reforçado pelos resultados obtidos neste trabalho a partir das análises propostas no item a seguir.

### 3.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE DIFERENTES REGIÕES

As curvas regionais desenvolvidas neste trabalho foram comparadas com as desenvolvidas em outras três regiões do mundo. Foram escolhidas curvas desenvolvidas a partir de dados de duas regiões dos Estados Unidos (HUFF, 1967; PERICA et al., 2013c), e de uma região da Malásia (AZLI; RAO, 2010). As curvas da primeira região selecionada são as desenvolvidas por Huff (1967) para região de Illinois nos Estados Unidos, pois como apresentado no item 2.2.4 estas curvas pioneiras são recomendadas para derivação de chuvas de projeto em diversos manuais de drenagem urbana do mundo, inclusive no Brasil.

Além das curvas de Huff, as curvas regionais foram comparadas com as do Atlas 14 (Volume 9), correspondentes ao sudoeste dos Estados Unidos. O clima desta região sofre influência do Golfo do México e do Oceano Atlântico. De acordo com a classificação climática global (atualizada) de Köppen-Geiger 2007, assim como o RS, o sudoeste dos Estados Unidos também possui clima subtropical úmido (Cfa). Esta região também é propícia para formação de sistemas convectivos de mesoescala (PERICA et al., 2013c).

Devido a diferenças de topografia e outros fatores que afetam o clima na região, o Volume 9 apresenta distribuições temporais para duas regiões. A região 1 correspondente ao Vale do Missisipi foi a escolhida. Como as curvas do Atlas 14 são disponibilizadas para durações específicas (6, 12, 24, ou 96 horas) em incrementos de 5% de duração, estas foram interpoladas para intervalos compatíveis com as desenvolvidas neste trabalho (incrementos de 10% de duração).

Por fim, as curvas do RS foram comparadas com as desenvolvidas para a Península da Malásia por Azli e Rao (2010). Esta região foi escolhida porque apesar de possuir características climáticas distintas (clima equatorial (Am) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007)) os autores detectaram semelhanças entre os perfis de distribuição temporal da Península da Malásia e meio-oeste dos Estados Unidos (curvas do Volume 8 do Atlas 14) (BONNIN et al., 2006a).

Apesar de todos os conjuntos de curvas apresentarem curvas para nove decis de probabilidade, foram avaliadas as semelhanças apenas entre as curvas de 50% de probabilidade de todos os quartis. Como mencionado no item anterior estas são as curvas mais estáveis e por isso as mais utilizadas para derivação de hietogramas em projetos de estruturas hidráulicas (PILGRIM; CORDERY, 1975).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DADOS COLETADOS

#### 4.1.1 Critérios de seleção dos eventos extremos

Como proposto no item 3.2.1, a fim de identificar quais são os critérios que geram o maior número de eventos significativos foram realizadas simulações com os limites mínimos ( $V_m$ ) de 1 e 2 mm e os mínimos períodos secos ( $MPS$ ) de 2, 4 e 6 h. A Tabela 4.1 mostra o número total de eventos  $Et$ , o número de eventos significativos  $Es$ , a duração máxima e o volume total máximo dentre os eventos significativos. A partir dos dados apresentados na Tabela 4.1, é possível observar que quando não é feita nenhuma restrição quanto ao volume mínimo para um registro ser considerados (simulações 1 e 8) longos períodos com pequenos volumes precipitados (garoadas) são incorporados aos eventos selecionados.

Tabela 4.1 – Resultado das simulações a partir das séries de Porto Alegre (A801) e Uruguaiana (A809) para escolha da melhor configuração de critérios do  $V_m$  e  $MPS$

Simulação	Estação	Total de eventos	Eventos significativos	Duração máxima (h)	Volume total máximo (mm)
1	A801	2358	279	102	168,8
2	A801	1119	177	38	140,2
3	A801	1237	165	26	140,2
4	A801	1418	145	18	140,2
5	A801	1419	218	47	154,4
6	A801	1564	208	47	147,2
7	A801	1837	186	38	143
8	A809	1146	193	57	208,2
9	A809	610	156	33	155
10	A809	282	150	19	155
11	A809	757	130	18	135
12	A809	705	172	37	155
13	A809	769	169	28	155
14	A809	905	151	22	135

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.1 concluiu-se que os critérios propostos na simulação 4 e 12 foram os que geraram o maior número de eventos significativos e não aglomeraram precipitações em eventos com mais de 48 horas de duração. McBride e Ebert (2000) e Azli e Rao (2010) também determinaram em seus estudos que o valor mais adequado para selecionar o maior número de eventos com significância é igual a 1 mm. Sendo assim, valores de precipitação total em uma hora abaixo de 1 mm foram considerados como nulos. Ainda mais, assim como grande parte dos estudos disponíveis (DOLSAK; BEZAK; SRAJ, 2010; POWELL et al., 2007; GUO; HARGADIN, 2009; GUO; URBONAS, 1996; HUFF, 1967) o mínimo período seco de seis horas se mostrou o mais apropriado para individualização de eventos

Portanto, primeiramente as séries históricas de precipitação foram individualizadas por meio dos critérios propostos na simulação 4:  $V_m$  igual a 1 mm e  $MPS$  igual a 6 horas. Posteriormente, como proposto no item 3.2.2, foram selecionados apenas os eventos considerados significativos para elaboração deste estudo ( $V_e \geq 25$  mm e  $D_m \geq 4$  horas).

#### 4.1.2 Eventos selecionados

Dados de precipitação horária de 42 estações mencionadas na seção 3.2 foram utilizadas para análise. Os dados foram individualizados e filtrados de acordo com os critérios definidos no item anterior. Ao total foram individualizados 31.390 eventos com diversos volumes e durações dentre os quais 6.479 foram selecionados como significativos. Como o regime pluviométrico do estado é bem distribuído ao longo dos meses, os eventos ficaram bem distribuídos entre as estações ano, sendo que 29% ocorreu no verão, 27% na primavera, 21% no outono e 22% no inverno. Ainda mais, o fato de que a maior parte dos eventos (56%) ocorreu no verão e na primavera pode ser explicado pela maior incidência de sistemas convectivos de mesoescala nesta época do ano (GRIMM, 2009; DURKEE; MOTE, 2010).

O predomínio destes sistemas durante os períodos quentes do ano pode ser explicado pelo estabelecimento de condições ambientais favoráveis ao seu desenvolvimento, tais como condições sinóticas de grande escala, influência da topografia e processos dinâmicos e termodinâmicos que ocorrem em suas proximidades (CAMPOS; EICHHOLZ, 2011). Isto também pode explicar o fato de que a maior parte dos eventos ocorridos entre 2000 e 2017 no RS são de curta duração (55% dos 31.390 eventos possuem duração inferior a 3 horas, 19% entre 4 e 6 horas, 17% entre 7 e 12 horas, 6% entre 13 a 18 horas e apenas 2% maiores do que 24 horas), pois de acordo com Campos e Eichholz (2011) os eventos causados por estes sistemas no estado possuem em média 6 horas de duração, não ultrapassando, em sua maioria, 12 horas.

Tabela 4.2 – Relação de eventos classificados em cada uma das estações INMET no RS

<b>COD INMET</b>	<b>Localização</b>	<b>Total de eventos</b>	<b>Eventos significativos</b>	<b>QI</b>	<b>QII</b>	<b>QIII</b>	<b>QIV</b>
A826	Alegrete	740	173	47	60	38	28
A827	Bagé	765	139	39	45	28	27
A840	Bento Gonçalves	1004	179	56	47	39	37
A812	Caçapava do Sul	911	201	64	52	38	47
A838	Camaquã	916	149	42	41	39	27
A897	Cambará do Sul	76	9	2	3	3	1
A884	Campo Bom	384	69	14	21	24	10
A879	Canela	991	197	72	57	34	34
A811	Canguçu	842	143	35	37	35	36
A853	Cruz Alta	866	216	68	57	49	42
A881	Dom Pedrito	395	73	26	25	12	10
A828	Erechim	938	195	56	59	53	27
A854	Frederico W.	869	224	71	73	37	43
A883	Ibirubá	379	95	27	27	18	23
A836	Jaguarão	715	146	40	43	33	30
A844	Lagoa Vermelha	978	183	55	43	44	41
A878	Mostardas	677	97	21	28	19	29
A856	Palmeira das Missões	697	165	59	40	39	27
A839	Passo Fundo	1028	218	65	66	48	39
A801	Porto Alegre	1418	218	64	64	41	49
A831	Quaraí	613	147	57	41	25	24
A802	Rio Grande	1013	184	41	44	45	54
A813	Rio Pardo	882	190	60	53	48	29
A803	Santa Maria	623	253	72	80	50	51
A810	Santa Rosa	777	188	65	60	37	26
A899	Santa Vitória do P.	850	94	18	32	21	23
A804	Santana do Livramento	1159	205	65	61	48	31
A833	Santiago	638	177	55	53	26	43
A805	Santo Augusto	1131	286	88	86	56	56
A830	São Borja	551	152	36	50	35	31
A832	São Gabriel	716	144	38	38	35	33
A829	São José dos A.	1121	158	46	43	41	28
A852	São Luiz Gonzaga	715	200	71	55	45	29
A889	São Vicente do Sul	115	31	8	10	6	7
A894	Serafina Correa	111	29	8	3	13	5
A837	Soledade	823	194	49	53	48	44
A882	Teutônia	448	100	30	27	25	18
A808	Torres	1020	151	36	43	33	39
A834	Tramandaí	804	129	33	40	27	29
A886	Tupanciretã	86	25	8	7	6	4
A809	Uruguaiana	704	172	71	53	31	17
A880	Vacaria	945	181	58	56	40	27

Fonte: Elaborado pela autora.

Como explicado no item 3.2.1, nem todos os eventos individualizados são significativos para o objetivo desta pesquisa. A Tabela 4.2 apresenta o número de eventos totais, significativos e o número de eventos significativos classificado em cada quartil a partir dos dados de precipitação de cada localidade. Nem sempre a estação que apresentou o maior número de eventos classificou o maior número de eventos significativos. Como por exemplo, na série de Porto Alegre foram identificados 1.418 eventos, e dentre estes, apenas 218 são significativos. Já a partir da série de Santa Maria, foram identificados apenas 623 eventos, e dentre estes 253 são significativos. A Figura 4.1 ilustra a porcentagem do número de eventos significativos no total de eventos selecionados por ano de monitoramento de cada estação INMET.

Apesar da distribuição do número de eventos significativos entre as estações do ano também ser uniforme (22% verão, 24% outono, 25% inverno e 29% primavera), as estações que apresentaram o maior número de eventos foram a primavera e o inverno. Isto pode estar associado ao fato de que apenas precipitações com duração superior a três horas foram consideradas significativas, sendo estas mais recorrentes no verão como mencionado anteriormente. Dos 6.479 eventos significativos selecionados 24% possui duração total entre 4 e 6 horas, 40% entre 7 e 12 horas, 21% entre 13 e 18 horas, 9% entre 18 e 24 horas, e apenas 7% possui mais do que 24 horas de duração. Desta maneira, pode-se concluir que a maioria dos eventos significativos também apresentam curta e média durações, sendo que 64% possuem entre 4 e 12 horas.

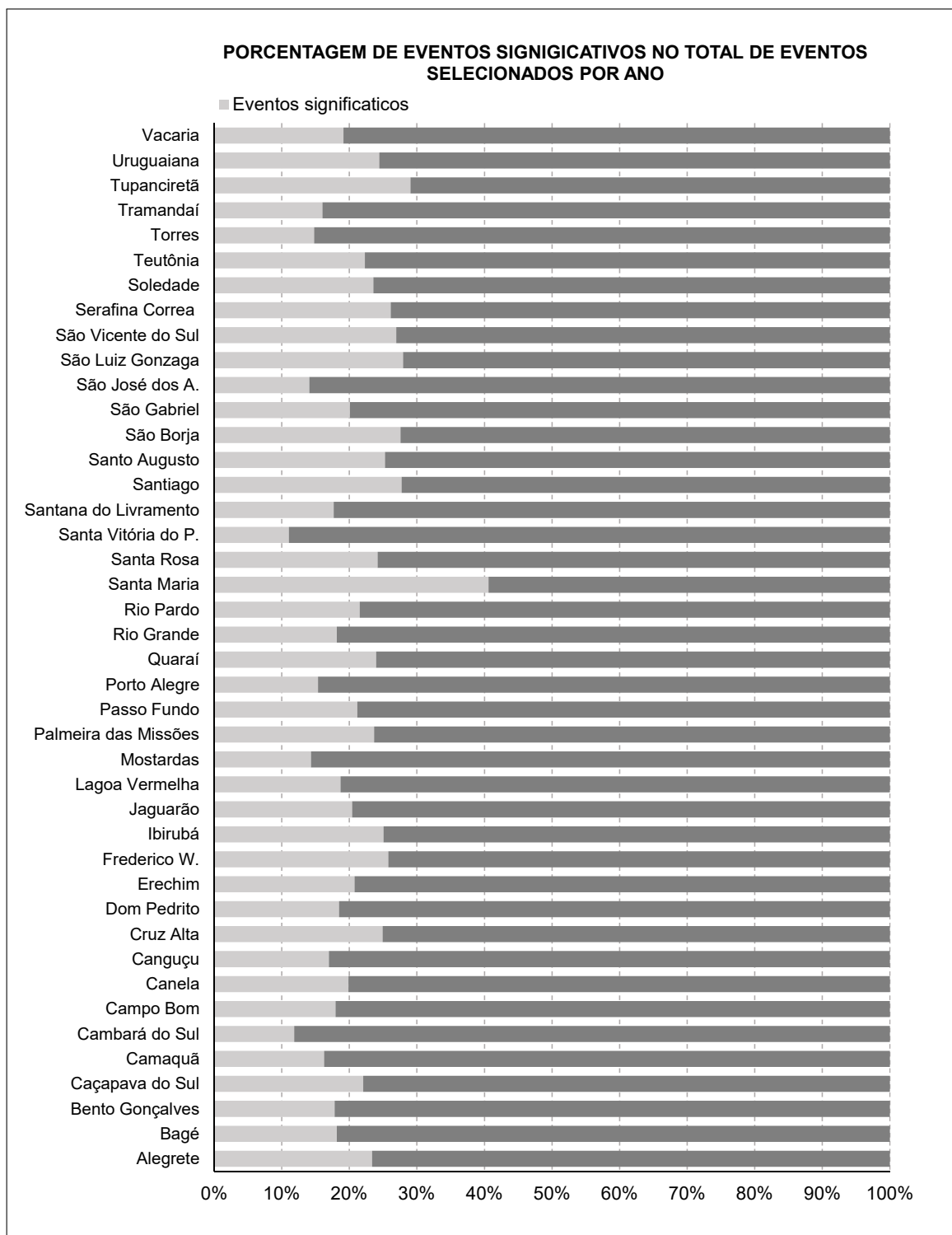
Quanto a classificação em quartis, é importante ressaltar que 51% dos 31.390 eventos selecionados apresentaram o maior volume de precipitação acima de 75% da duração total, 13% em até 25%, 23% entre 25 e 50% e 12% entre 50 e 75%. Isto indica que a maior parte do volume precipitado ocorre depois da metade do início do evento. Entretanto, quando analisada a classificação em quartis apenas dos eventos significativos a distribuição de frequências se altera, sendo que 30% dos 6.479 eventos significativos apresentaram o maior volume em até 25% da duração, 29% entre 25 e 50%, 22% entre 50 e 75% e apenas 19% acima de 75%. Assim, a maior parte dos eventos considerados significativos para geração do escoamento tem o pico de maior intensidade antes da metade da duração total do evento.

Os eventos significativos representam em média 21% dos eventos totais selecionados em determinada estação, sendo o desvio padrão igual a mais ou menos 5,5%. Tupanciretã, São Luiz Gonzaga, São Borja, Santiago e Santa Maria apresentaram número de eventos superior a média do grupo (diferença superou positivamente desvio padrão). Já Torres, São José dos Ausentes, Santa Vitória do Palmar e Mostardas apresentaram um número de eventos significativos menor do que a média (diferença superou negativamente o desvio padrão). As diferenças entre o número de eventos significativos selecionados podem estar relacionada com o relevo ou com a pluviometria média, devido a atuação mais ou menos frequente de determinado mecanismo formador. Desta maneira, uma avalia-



ção da aplicação de critérios de seleção variados poderia ampliar o número de eventos significativos de determinada localidade.

Figura 4.1 – Relação média em porcentagem do número de eventos significativos no total de eventos selecionados por ano



Fonte: Elaborado pela autora.

Baseado nos resultados apresentados neste item é possível concluir que a maioria dos eventos significativos selecionados para elaboração das curvas ocorrem na primavera, possuem durações entre 4 e 12 horas, e apresentam um pico de volume antes da metade da duração total. Maiores detalhes sobre a dependência entre o agrupamento em quartis e a duração e época do ano em que ocorreu o evento são apresentados no próximo item.

#### 4.1.3 Avaliação do agrupamento em quartis

Neste item são discutidos os resultados da avaliação da dependência entre a época do ano e a duração dos eventos com o agrupamento dos dados em quartis. A Tabela 4.3 apresenta a porcentagem de eventos que ocorreram em cada estação do ano para cada um dos quartis. O desvio padrão também é apresentado para que se possam fazer conclusões quanto a significância das diferenças entre as estações.

Tabela 4.3 – Porcentagem de eventos classificados a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS em cada um dos quartis de acordo com a estação do ano

	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Desvio padrão
<b>Quartil I</b>	24%	22%	23%	31%	4%
<b>Quartil II</b>	29%	21%	22%	28%	4%
<b>Quartil III</b>	23%	23%	28%	26%	3%
<b>Quartil IV</b>	32%	21%	21%	26%	5%

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.3, é possível observar que o Quartil I agrupou mais frequentemente precipitações decorridas na primavera, pois a diferença do número de eventos detectados nessa estação do ano em relação ao outono, inverno e verão (9, 10 e 7 % respectivamente) é maior do que o desvio padrão deste quartil (4%). Já o Quartil II, classificou mais frequentemente eventos ocorridos no verão e na primavera, uma vez que as diferenças do número de eventos ocorridos nestas estações superou os ocorridos no outono em 6 e 7%, respectivamente, e os ocorridos no inverno em 5 e 6% respectivamente. Como o desvio padrão para este grupo é de 4%, estas diferenças são significativas para confirmar a ocorrência mais frequente de eventos que apresentam o maior volume de precipitação entre 25 e 50% da duração, no verão e na primavera.

No Quartil III, o número de eventos classificados ocorridos na primavera e no inverno superou os no outono e verão em 3 e 5%, respectivamente. Como pode ser observado na Tabela 4.3, estas diferenças são superiores ao desvio padrão no quartil (3%), e portanto significativas para concluir que as precipitações do Quartil III ocorreram mais frequentemente na primavera e no inverno. O Quartil IV classificou mais frequentemente

eventos ocorridos verão, sendo a diferença entre o número dos eventos ocorridos nesta estação e no outono, inverno e primavera igual a 11, 11 e 6 % respectivamente. A Tabela 4.4 apresenta a distribuição de acordo com o quartil e estação do ano para os eventos significativos. As diferenças entre o número de eventos ocorridos em cada estação do ano nos diferentes quartis confirmam a hipótese de que existe dependência entre os quartis propostos e as estações do ano.

Tabela 4.4 – Porcentagem de eventos significativos a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS classificados em cada um dos quartis de acordo com a estação do ano

	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Quartil I</b>	24%	21%	19%	36%	8%
<b>Quartil II</b>	23%	25%	24%	27%	2%
<b>Quartil III</b>	20%	25%	30%	25%	4%
<b>Quartil IV</b>	22%	26%	28%	24%	3%

A Tabela 4.5 apresenta o número de eventos significativos que ocorreram em cada uma das classes propostas no item 3.2.3 de duração para cada um dos quartis. Pelos dados apresentados na Tabela 4.5 é possível concluir que a maioria dos eventos teve entre 1 e 3 horas de duração em todos os quartis com exceção do Quartil I, que classificou zero eventos, uma vez que não existe valor de referência entre zero e 25% da duração de eventos com menos de quatro horas de duração amostrados em intervalos horários ( $1/3 = 33\%$ ).

Tabela 4.5 – Porcentagem de eventos classificados a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS em cada um dos quartis de acordo com a classe de duração

	<b>1 a 3 (h)</b>	<b>4 a 6 (h)</b>	<b>7 a 12 (h)</b>	<b>13 a 18 (h)</b>	<b>18 a 24 (h)</b>	<b>&lt;24 (h)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Quartil I</b>	0%	41%	40%	12%	4%	3%	19%
<b>Quartil II</b>	51%	22%	18%	6%	2%	2%	19%
<b>Quartil III</b>	30%	25%	27%	10%	5%	3%	12%
<b>Quartil IV</b>	76%	10%	9%	3%	1%	1%	30%

As porcentagens de eventos significativos classificados em cada quartil de acordo com classes de duração são apresentadas na Tabela 4.6. É possível constatar que a primeira classe que incluía eventos com até três horas de duração foi omitida, uma vez que, como os dados são horários, chuvas com menos de três horas de duração não são adequadas para análise (RAO; KAO, 2006). Desta maneira, 17.127 eventos foram desconsiderados independente do volume total precipitado. Para que eventos com tal duração

possam ser considerados para elaboração das curvas estes precisam estar amostrados em intervalos de no máximo 15 minutos, uma vez que um mínimo quatro pontos são necessários para representação adequada da distribuição temporal de um evento.

Tabela 4.6 – Porcentagem de eventos significativos classificados a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS em cada um dos quartis de acordo com a classe de duração

	<b>4 a 6 (h)</b>	<b>7 a 12 (h)</b>	<b>13 a 18 (h)</b>	<b>18 a 24 (h)</b>	<b>&lt;24 (h)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Quartil I</b>	25%	41%	20%	8%	6%	14%
<b>Quartil II</b>	31%	37%	17%	8%	6%	14%
<b>Quartil III</b>	18%	41%	23%	11%	7%	13%
<b>Quartil IV</b>	18%	41%	23%	10%	8%	13%

No estudo realizado por Huff (1967), foi observado que a configuração de quartis agrupou mais frequentemente as precipitações com durações maiores que 24 horas no quarto quartil, as de menos de 12 horas no primeiro e segundo e as de 12 até 24 horas no terceiro. A partir da Tabela 4.6 é possível constatar que todos os quartis agruparam mais frequentemente precipitações com durações entre 7 e 12 horas. Os Quartis I e II agruparam mais frequentemente precipitações entre 4 e 12 horas, e os Quartis III e IV precipitações com durações entre 7 e 18 horas. A partir dos resultados apresentados é possível concluir que existe indícios de dependência entre o agrupamento em quartis com a época do ano e com as durações.

Como as séries de precipitação utilizadas neste estudo não são superiores a dezessete anos, algumas vezes um número muito pequeno de eventos foi classificado. Na próxima seção, as distribuições pontuais são discutidas e as limitações causadas pelo número insuficiente de eventos apresentadas.

## 4.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS DO RS

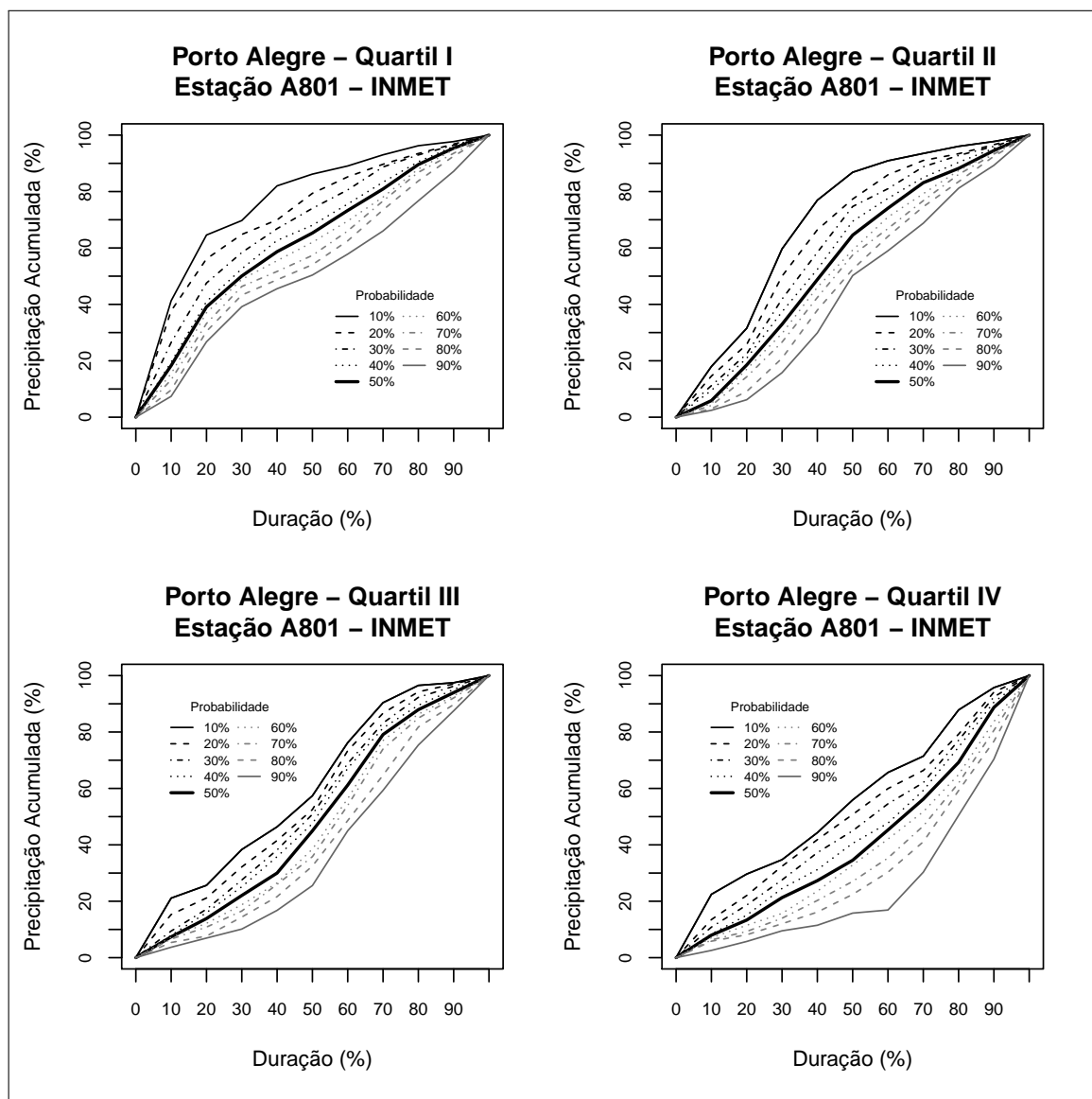
A seguir são apresentados os padrões pontuais e regionais de distribuição temporal das precipitações intensas do Rio Grande do Sul.

### 4.2.1 Curvas pontuais

A partir da metodologia proposta foi possível gerar o conjunto completo de 36 curvas para 35 das 42 estações INMET. As curvas geradas a partir dos dados da estação de

Porto Alegre (A801) são ilustradas na Figura 4.2, as curvas para as demais localidades são apresentadas no Apêndice D. Para facilitar a aplicação das curvas elaboradas no Apêndice E, são apresentadas as ordenadas do conjunto de curvas de cada estação.

Figura 4.2 – Curvas adimensionais elaboradas a partir da série histórica de Porto Alegre



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre todas as estações, não foi possível gerar nenhuma curva apenas para a estação de Cambará do Sul (A897), pois a partir de sua série histórica foram classificados apenas 9 eventos significativos (Tabela 4.2). Para outras seis localidades, também não foi possível determinar as curvas para todos os níveis de probabilidade propostos porque um número insuficiente de eventos com duração total igual ou superior à 10 horas foi classificado. Dentre estas estão Campo Bom (A884), Dom Pedrito (A881), São Vicente do

Sul (A889), Serafina Corrêa (A894), Tupanciretã (A886) e Uruguaiana (A809).

A partir dos dados das estações de São Vicente do Sul (A889) e Tupanciretã (A886), foi possível determinar para todos os quartis pelo menos a curva que representa o comportamento médio (50% de probabilidade)(Figuras D.33 e D.39). Já para as localidades de Campo Bom (A884) e Serafina Corrêa (A894) só foi possível determinar as curvas do Quartil I, II e III para no máximo 7 níveis de probabilidade (Figuras D.6 e D.34). Também não foi possível determinar as curvas de 10% e 90% de probabilidade para os Quartis III e IV de Dom Pedrito (A881), e para o Quartil IV de Uruguaiana (A809) (Figuras D.10 e D.40).

O Quadro A.1 apresentado no Apêndice A exemplifica os eventos significativos classificados no Quartil III da estação de Dom Pedrito já adimensionalizados de acordo com procedimento descrito no item 3.3.1. Já o Quadro A.2, também apresentado no Apêndice A, mostra os mesmos eventos, porém já reamostrados em incrementos de 10% de duração. Como pode ser observado no Quadro A.1, os eventos possuem durações diversas formando tantas verticais quantas porcentagens de durações distintas existirem e, com número de elementos igual ao número de eventos que apresentem determinada porcentagem de duração.

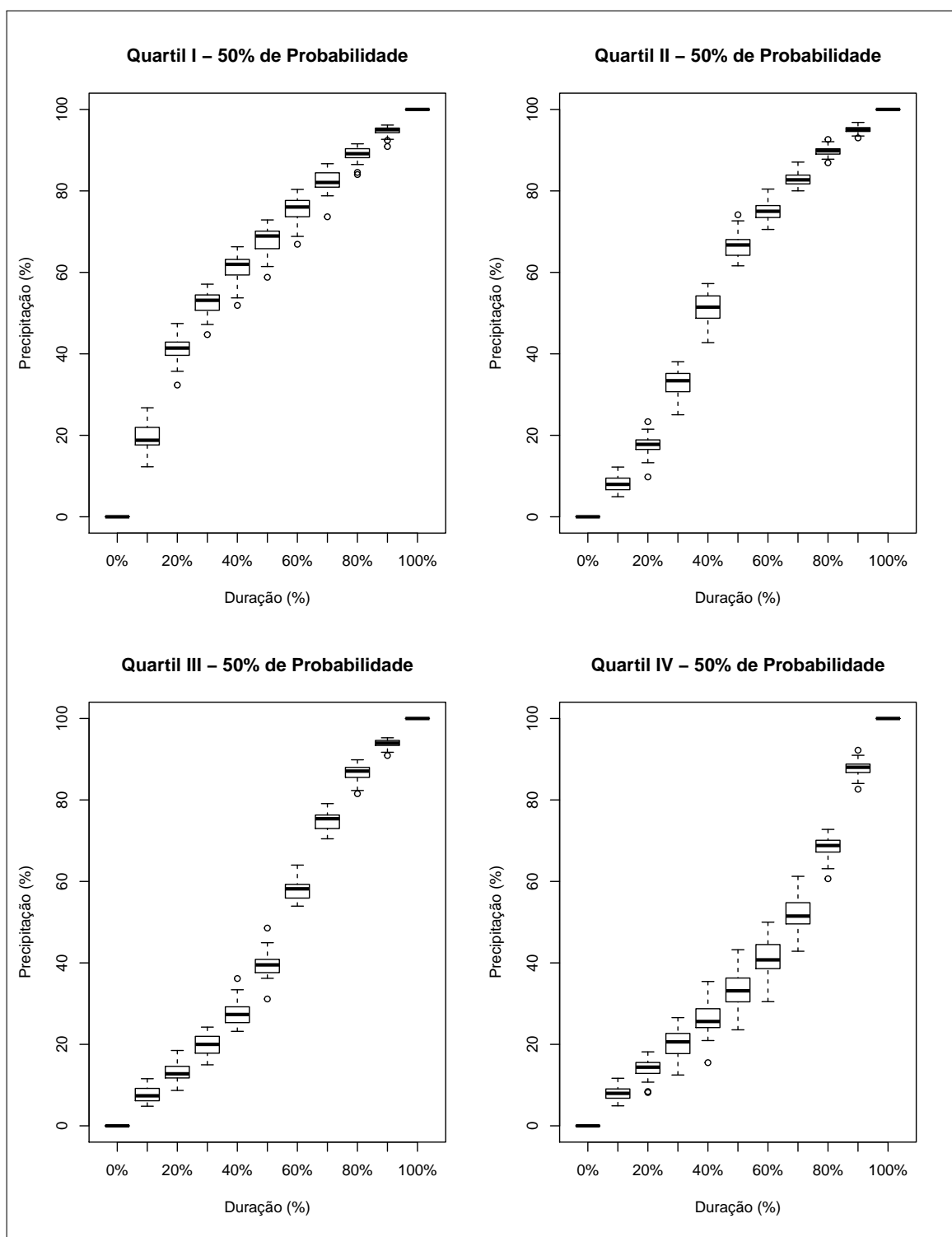
Após a interpolação (Quadro A.2) se formam apenas onze verticais de porcentagem de duração (como os dados são adimensionais a primeira é composta por zeros e a última por cem). O efeito da falta de valores de referência para estimativa das verticais iniciais de eventos com menos de dez horas de duração pode ser observado no Quadro A.2 para a vertical de 10% nos eventos P3, P6, P8,P9 e P12 e 20% nos evento P3.

Note que, as curvas de diferentes níveis de probabilidade nunca irão se cruzar, mas podem estar mais ou menos próximas indicando que existe uma variação maior ou menor entre as distribuições observadas. Ainda mais, as porcentagens de precipitação devem sempre se acumular até atingir 100%. Quanto maior o número de eventos, maior a representatividade dos padrões de distribuição observados em determinada estação e portanto, mais confiável a curva.

#### **4.2.2 Curvas regionais**

Como proposto no item 3.3.2, a semelhança entre as curvas pontuais foi avaliada por meio de estatística descritiva básica e por uma medida de distância diretamente relacionada com a correlação entre as mesmas. A Figura 4.3 ilustra os gráficos boxplot para as ordenadas e todas as estações INMET no RS para cada vertical de duração das curvas com 50% de probabilidade.

Figura 4.3 – Boxplots das ordenadas de todas as estações INMET no RS para cada vertical de duração das curvas com 50% de probabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 4.3, as variações entre as porcentagens de precipitação observadas nas diferentes estações não varia muito, com exceção de alguns

outliers que serão identificados ao decorrer da análise dos padrões regionais. Além da estatística descritiva básica, também foi determinado o desvio padrão entre as ordenadas de cada vertical de duração para todos os níveis de probabilidade (Quadro 4.1).

O desvio padrão médio observado é igual a 2,73% de porcentagem de precipitação acumulada (P), sendo o desvio máximo observado igual a 6,67% P (ordenadas de 80% de duração das curvas de 90% de probabilidade do Quartil IV). Observando o comportamento apresentado na Figura 4.3 e os dados do Quadro 4.1, pode-se concluir que de uma maneira geral as curvas pontuais de diferentes localidades são similares. Isto fica ainda mais claro quando analisados os resultados da distância entre as curvas.

Como a medida de distância entre as curvas proposta no item 3.3.2 se baseia no coeficiente de correlação de Pearson, foram computadas trinta e seis matrizes para determinação da correlação entre todas as curvas pontuais de todos os quatro quartis e nove níveis de probabilidade. Um exemplo da matriz de correlação para curvas de probabilidade de 50% para o Quartil I é apresentado nos Quadros B.1, B.2 e B.3 do Apêndice B.

Dentre as correlações computadas nas trinta e seis matrizes, apenas três estações apresentaram valor inferior a 0,95. Isto ocorreu nas matrizes do Quartil I entre as curvas de 70% de probabilidade das estações Tupanciretã (A886) e São Vicente do Sul (A889) e entre as curvas de 80% de probabilidade das estações Tupanciretã (A886) e Serafina Corrêa (A894). Ambas apresentaram coeficientes de correlação iguais a 0,9. A matriz do Quartil IV para o nível de 50% de probabilidade apresentou correlação de 0,90 entre as estações de Serafina Corrêa (A894) e Santiago (A833).

Se de acordo com Berthold e Hoppner (2016) a distância entre duas curvas pode ser definida como  $1 - \rho$ , observando os valores de correlação dos Quadros B.1, B.2 e B.3 pode-se concluir que todas as curvas estão próximas, uma vez que a distância entre as curvas de mesmo nível de probabilidade e quartil, não ultrapassou 0,1, sendo que, para grande maioria das curvas esta distância foi inferior a 0,05.

Azli e Rao (2010) também computaram as matrizes de correlação entre curvas pontuais geradas a partir de dados horários de 13 estações da Península da Malásia. Os resultados encontrados pelos autores indicaram forte correlação entre as curvas pontuais e por isso, estas foram combinadas em um conjunto de curvas regionais. Ferreira (2015) aplicou outra metodologia para avaliar a relação espacial entre curvas pontuais geradas a partir de dados sub-horários de 218 pluviógrafos do estado de Minas Gerais. A autora também não conseguiu detectar grande variabilidade e definiu um único modelo de distribuição temporal da precipitação para todo o estado. Comprovada a semelhança entre as curvas pontuais, os dados foram combinados para elaboração de um conjunto de curvas regional apresentado na Figura 4.4.

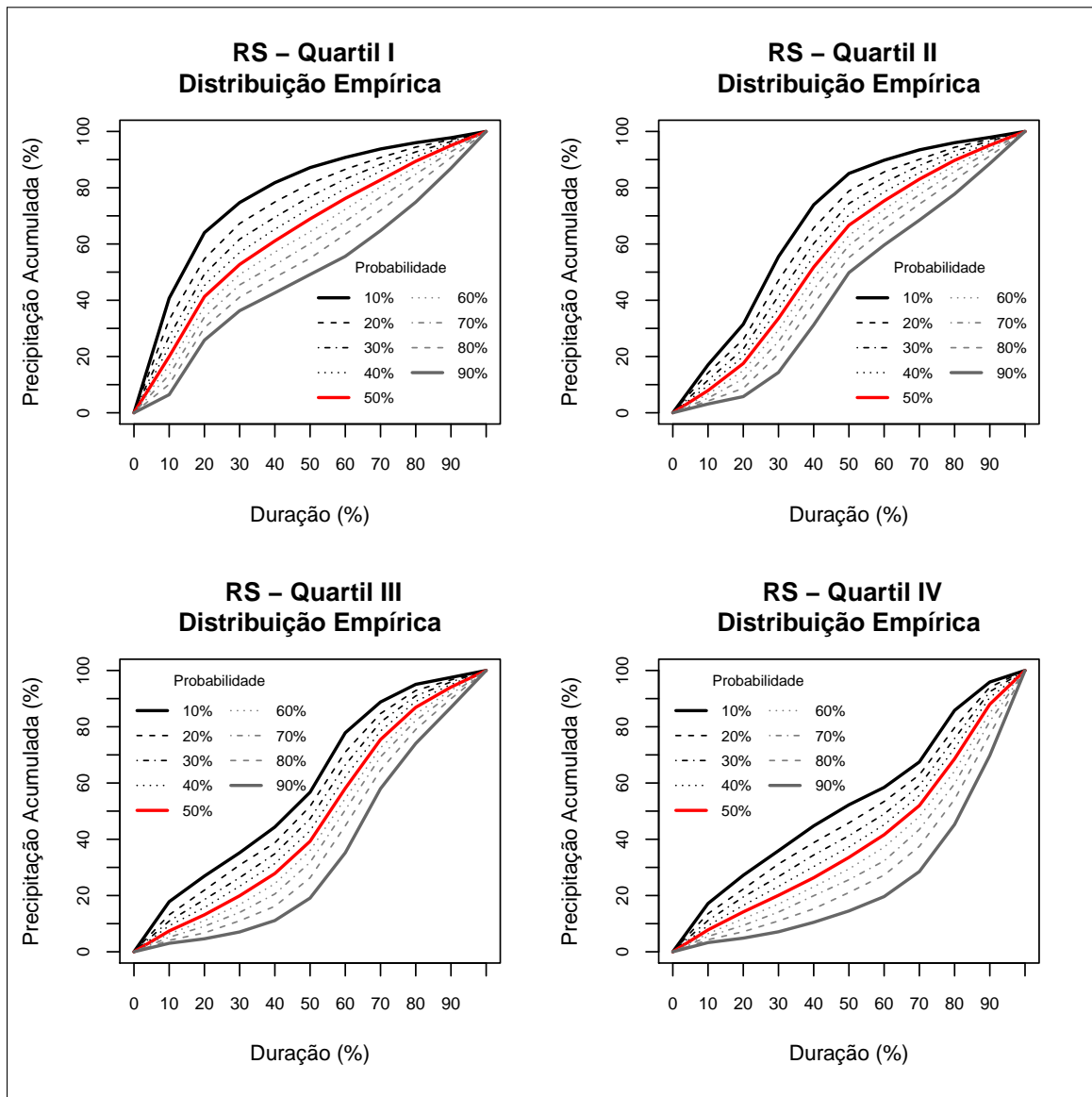


Quadro 4.1 – Desvio padrão (mm) entre as ordenadas de % de precipitação das curvas de todas as estações INMET para cada vertical de % de duração de cada nível de probabilidade e quartil

<b>Duração</b>	<b>0%</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>	<b>70%</b>	<b>80%</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>
<b>Quartil I</b>											
Curvas 10%	0	4,53	5,58	4,38	3,94	3,37	2,28	1,33	0,89	0,53	0
Curvas 20%	0	3,98	3,90	4,15	4,11	3,25	2,61	1,83	1,23	0,58	0
Curvas 30%	0	4,04	3,14	3,82	3,97	3,53	2,72	1,96	1,23	0,70	0
Curvas 40%	0	3,48	2,97	2,86	3,37	3,41	3,13	2,65	1,75	1,08	0
Curvas 50%	0	3,48	2,97	2,86	3,37	3,41	3,13	2,65	1,75	1,08	0
Curvas 60%	0	3,21	3,04	2,71	3,19	3,17	3,02	2,69	1,96	1,15	0
Curvas 70%	0	2,79	2,40	2,80	2,77	2,89	2,97	2,93	2,43	1,54	0
Curvas 80%	0	2,41	2,31	2,84	3,42	3,18	3,24	3,55	3,26	1,90	0
Curvas 90%	0	1,87	3,17	3,55	3,44	4,21	4,41	4,34	3,97	2,62	0
<b>Quartil II</b>											
Curvas 10%	0	2,72	2,86	4,78	4,86	2,76	1,99	1,41	0,77	0,33	0
Curvas 20%	0	1,97	1,96	3,83	3,90	2,50	1,88	1,28	1,01	0,54	0
Curvas 30%	0	2,10	2,25	3,17	3,51	2,49	1,90	1,37	1,00	0,60	0
Curvas 40%	0	1,81	2,56	3,13	3,23	2,95	2,24	1,63	1,21	0,76	0
Curvas 50%	0	1,81	2,56	3,13	3,23	2,95	2,24	1,63	1,21	0,76	0
Curvas 60%	0	1,53	2,44	3,35	3,44	2,90	2,16	2,01	1,42	0,95	0
Curvas 70%	0	1,81	2,56	3,13	3,23	2,95	2,24	1,63	1,21	0,76	0
Curvas 80%	0	0,87	1,88	3,33	3,72	2,50	2,48	2,54	2,26	1,15	0
Curvas 90%	0	0,60	1,24	3,24	5,12	2,34	4,04	3,30	2,90	1,59	0
<b>Quartil III</b>											
Curvas 10%	0	3,71	3,89	3,41	2,93	3,63	4,69	2,48	0,97	0,39	0
Curvas 20%	0	3,35	2,91	3,23	3,11	2,65	3,23	2,15	1,33	0,51	0
Curvas 30%	0	2,71	2,30	2,92	2,91	2,52	3,09	2,05	1,54	0,77	0
Curvas 40%	0	1,80	2,30	2,68	3,08	3,02	2,51	2,48	2,00	1,03	0
Curvas 50%	0	1,80	2,30	2,68	3,08	3,02	2,51	2,48	2,00	1,03	0
Curvas 60%	0	1,42	2,04	2,65	3,38	3,00	2,67	2,46	2,19	1,11	0
Curvas 70%	0	1,01	1,55	2,32	3,26	4,18	3,39	3,02	2,40	1,19	0
Curvas 80%	0	0,97	1,28	2,50	3,60	4,63	4,11	3,95	2,84	1,32	0
Curvas 90%	0	0,77	1,03	1,87	2,90	4,93	5,63	4,53	3,07	1,95	0
<b>Quartil IV</b>											
Curvas 10%	0	3,91	3,07	3,64	4,16	4,21	4,04	3,27	3,24	1,02	0
Curvas 20%	0	2,82	3,02	3,37	3,77	3,86	3,67	3,04	3,13	1,16	0
Curvas 30%	0	2,35	2,52	3,58	3,31	3,83	3,78	3,45	2,34	1,59	0
Curvas 40%	0	1,81	2,31	3,28	3,98	4,12	4,58	4,04	2,73	1,97	0
Curvas 50%	0	1,81	2,31	3,28	3,98	4,12	4,58	4,04	2,73	1,97	0
Curvas 60%	0	1,52	2,05	2,89	3,34	4,26	4,71	4,13	3,17	2,79	0
Curvas 70%	0	1,40	1,86	2,81	3,49	4,11	4,30	3,57	3,34	3,13	0
Curvas 80%	0	1,16	1,71	2,59	3,26	3,92	4,73	4,69	3,70	3,62	0
Curvas 90%	0	1,01	1,28	2,20	2,66	3,86	5,05	4,97	6,67	5,92	0

Fonte: Elaborado pela autora.

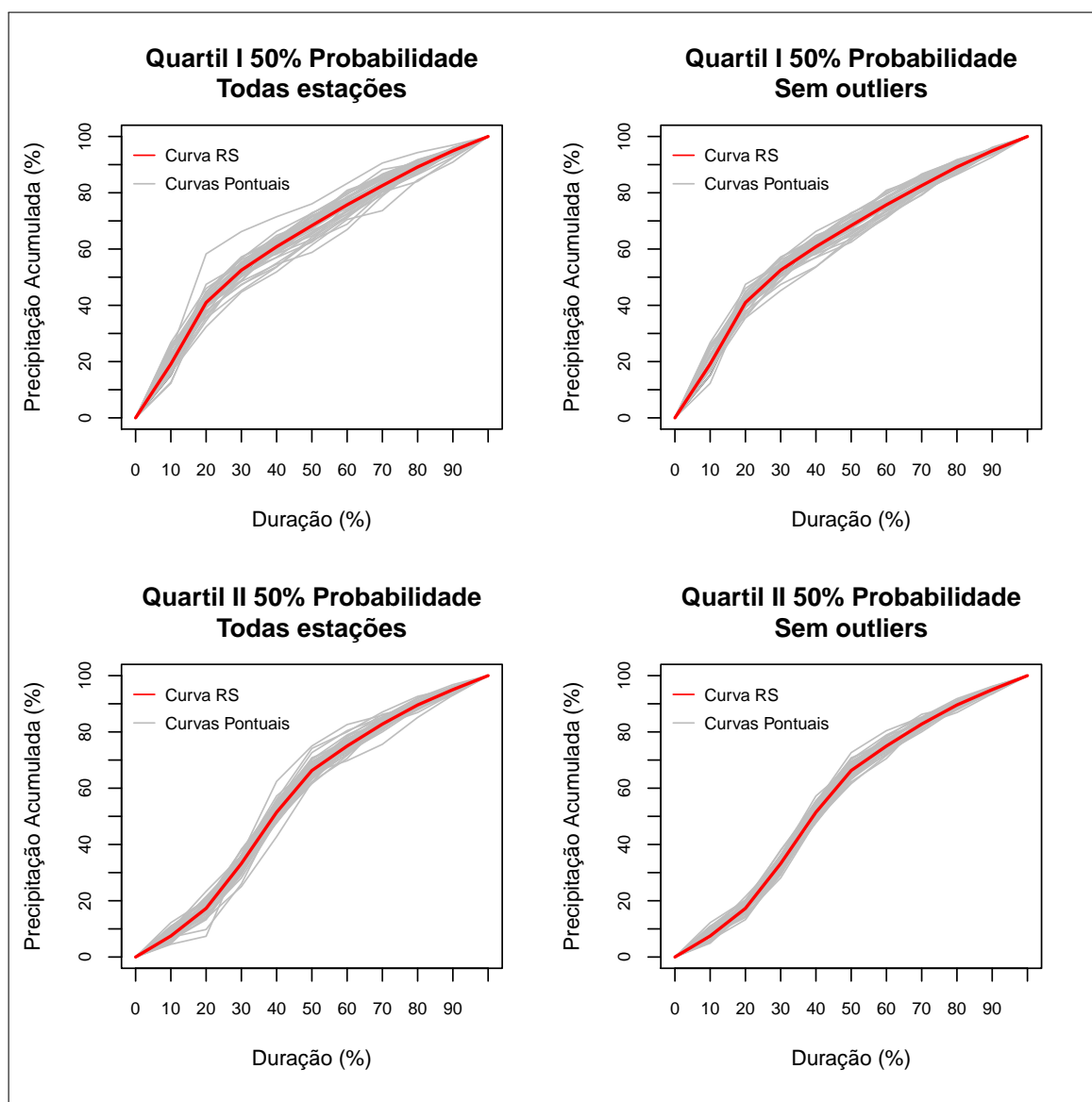
Figura 4.4 – Curvas adimensionais elaboradas a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS e distribuição empírica de probabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

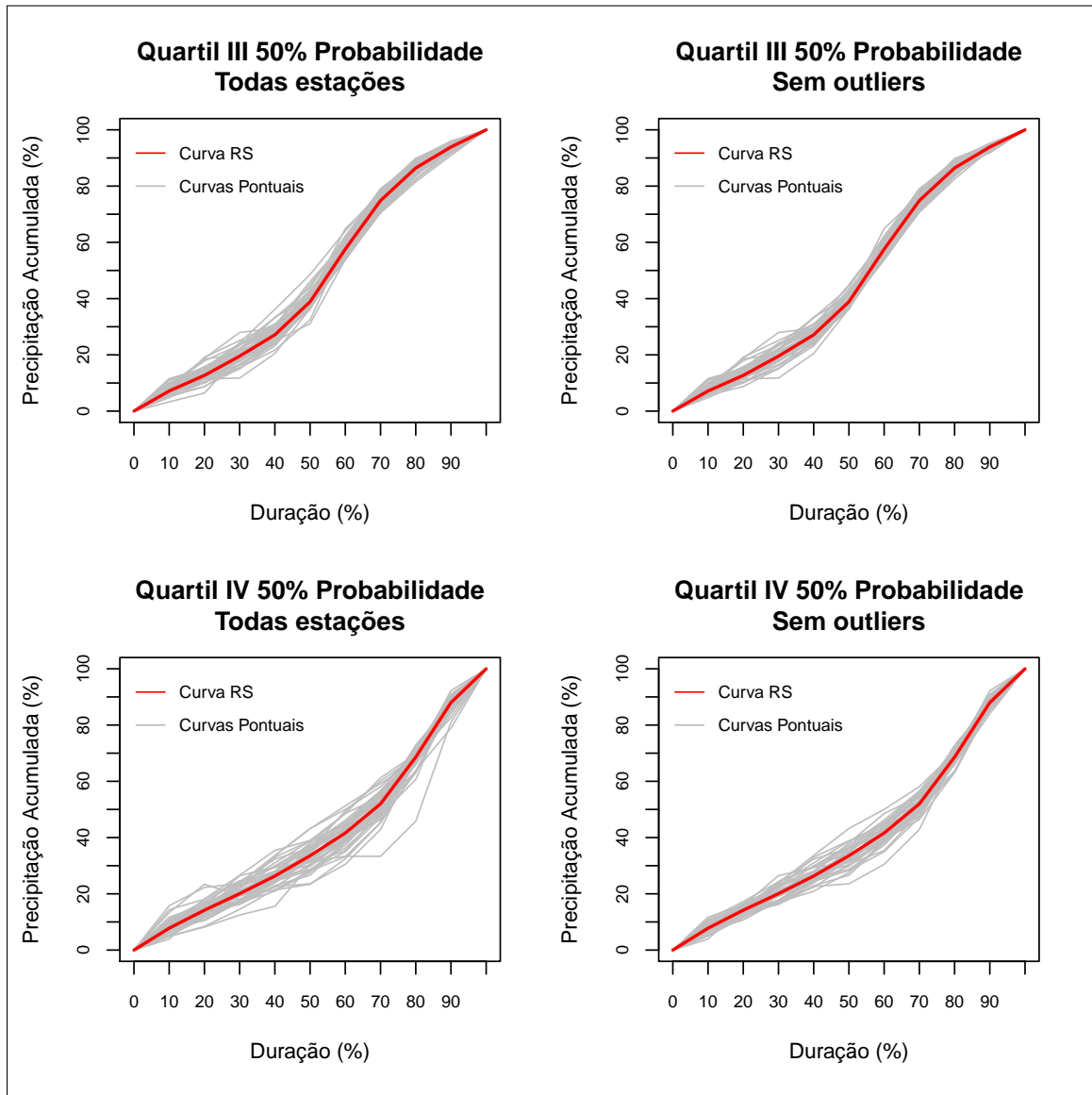
Para que seja possível visualizar graficamente as semelhanças indicadas nas análises aplicadas, as curvas pontuais de todas as estações para o nível de probabilidade de 50% foram plotadas juntamente com a curva elaborada a partir da combinação de todos os dados para todos os quartis (Figuras 4.5 e 4.6). Nas Figuras 4.5 e 4.6 também foram plotadas as curvas, eliminando-se as curvas das estações que apresentaram outliers (Figura 4.3). Ainda mais, foram eliminadas todas as curvas de estações que apresentaram pontos considerados fora do padrão, mesmo que isto tenha ocorrido em apenas uma vertical de duração. Como por exemplo, a curva de 50% de probabilidade da estação localizada em Torres (A838) que apresentou outliers apenas no Quartil II na vertical 90% de duração.

Figura 4.5 – Curvas pontuais com e sem estações identificadas como outliers e curva regional correspondentes a probabilidade de 50% para os Quartis I e II



Fonte: Elaborado pela autora.

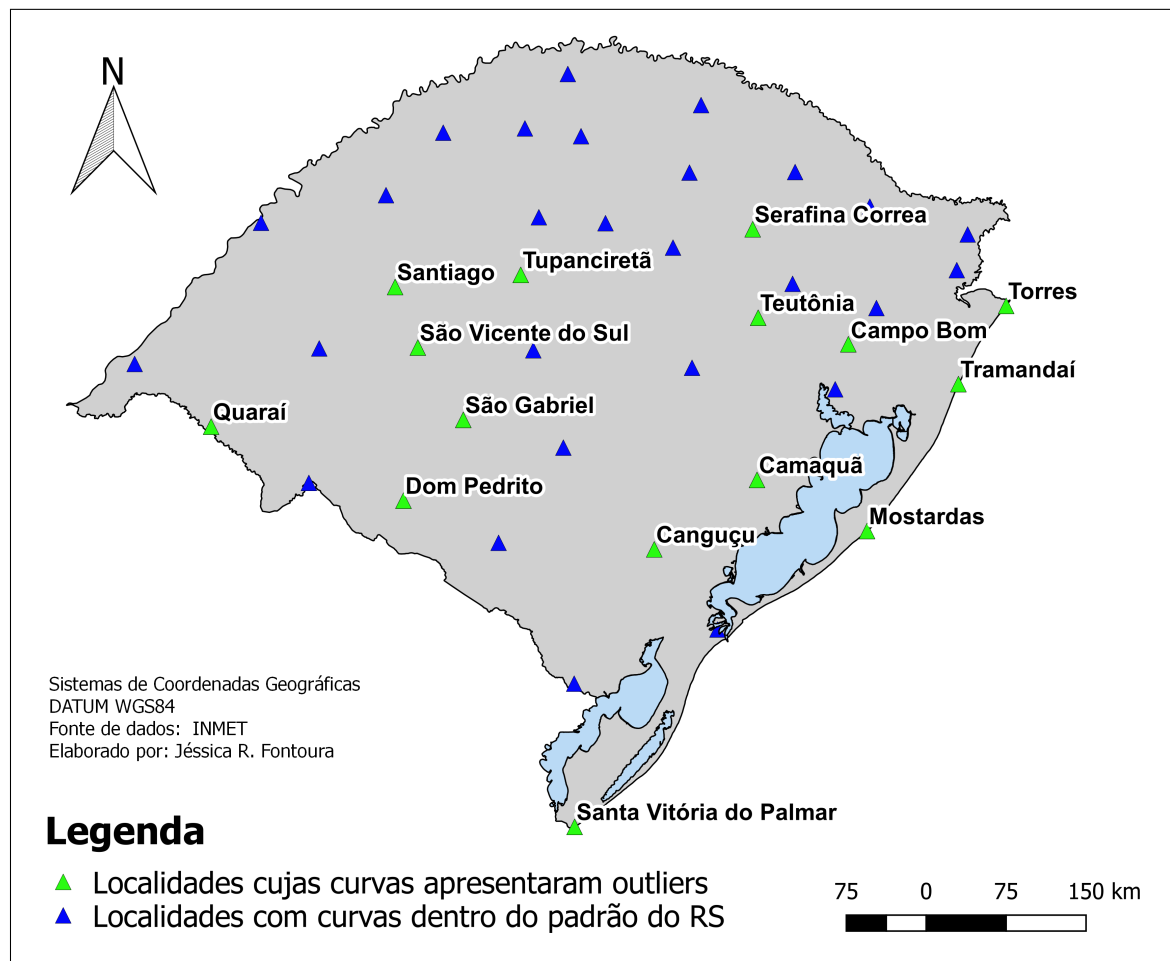
Figura 4.6 – Curvas pontuais com e sem estações identificadas como outliers e curva regional correspondentes a probabilidade de 50% para os Quartis III e IV



Fonte: Elaborado pela autora.

Observando as Figuras 4.5 e 4.6, é possível observar que a distribuição das curvas pontuais em torno da curva do RS fica bem mais uniforme, quando eliminadas as curvas com comportamento diferenciado em determina vertical de porcentagem de duração. Sendo assim, apesar da distância entre estas curvas com outliers e as demais não ser maior do que 0,1, estas apresentam uma distribuição temporal da precipitação que se destaca das demais curvas pontuais. As 16 estações que apresentaram comportamento fora do padrão são identificadas na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Estações que apresentaram comportamento diferenciado (outliers) das demais curvas pontuais em pelo menos uma das verticais de duração da curvas correspondentes a 50% de probabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando analisados as curvas de massa dos eventos significativos classificados em cada um dos quartis (Apêndice C) para as estações eliminadas, é possível fazer duas inferências principais sobre as razões pelas quais as curvas destas estações se destacam das demais. A primeira está relacionada com a classificação de um pequeno número de eventos, como é o caso das estações de Serafina Corrêa (A894), São Vicente do Sul (A889), Tupanciretã (A886), Campo Bom (A884) e Dom Pedrito (A881). As limitações para aplicação das curvas destas estações já foram discutidas no item anterior, sendo assim, não é nenhuma surpresa que tenham apresentado comportamento diferenciado das demais curvas pontuais, uma vez que foram elaboradas com um número bem inferior de eventos do que as demais. Para confirmar se as diferenças entre essas curvas e as demais estão relacionadas apenas com a quantidade de eventos amostrados, é preciso dar continuidade ao monitoramento.

A segunda conclusão está relacionada com a presença de um evento muito diferen-

ciado dos demais classificados em determinado quartil. Isto pode ser tanto um evento com uma duração muito longa, como observado na estação de Torres (A808) que classificou no Quartil II um evento com 80 horas de duração, ou com uma intensidade muito acentuada, como é o caso da estação de Tramandaí (A834), que possui um evento bem mais intenso do que os demais classificados no Quartil IV. Eventos que se destacam dos demais classificados no grupo também foram observados nas curvas de massa das estações A899, A831, A882, A878 e A811, A833, A878, A832. Sendo assim, as diferenças encontradas podem estar associadas a eventos com características muito distintas dos demais, que acabam sendo refletidas nos elementos de determinada vertical de porcentagem de duração.

Baseado no exposto, acredita-se que quanto maior a extensão da série de monitoramento, mais aproximada a curva pontual fica das demais curvas da região, pois os problemas destacados se amenizam conforme se adicionam eventos a determinado quartil. Porém isto só pode ser confirmado dando continuidade ao monitoramento no estado.

Como mencionado no item 3.3.2, além da distribuição empírica de frequências acumulada também foi avaliado o ajuste de uma distribuição teórica aos elementos de porcentagem de precipitação observados em determinada vertical de porcentagem de duração. A partir da avaliação de 61 modelos de distribuição realizados no software Easy Fit Versão 5.6, o modelo de distribuição generalizada de valores extremos (GEV) foi o escolhido para ajuste dos dados observados. Os resultados do teste de aderência de Kolmogorov–Smirnov para cada uma das 36 verticais de porcentagem de duração podem ser observados na Tabela 4.7.

O teste de Kolmogorov–Smirnov utiliza as distribuições acumuladas, isto é, ele compara a distribuição de frequências acumulada que deveria ocorrer sob a distribuição desejada com a distribuição de frequências acumuladas dos valores observados (amostrais). A estatística do teste  $D_{teste}$  é o ponto de maior diferença (em valor absoluto) entre as duas distribuições. Quando o valor calculado  $D_{teste}$  não é maior do que valor tabelado para determinado nível de significância aceita-se a hipótese nula de que os dados da amostra provêm da distribuição teórica. Para este trabalho foram considerados os valores tabelados para significância igual a 0,01 ( $D_{C1\%}$ ) e 0,05 ( $D_{C5\%}$ ) (Tabela 4.7). Além do índice  $D$ , pode-se utilizar o p-valor como critério para aceitar ou rejeitar a hipótese nula, sendo a significância de 0,05 comumente adotada (Tabela 4.7).

A distribuição GEV possui três parâmetros: parâmetro de forma  $\kappa$ , parâmetro  $\alpha$  e o parâmetro de posição  $\xi$ . Estes foram determinados a partir das funções propostas por Hosking e Wallis (1997) e são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a aderência dos elementos de cada vertical a distribuição GEV

	10% D	20% D	30% D	40% D	50% D	60% D	70% D	80% D	90% D
<b>Quartil I</b>									
p-valor	0,425	0,878	0,838	0,517	0,670	0,665	0,836	0,781	0,021
$D_{teste}$	0,028	0,014	0,014	0,019	0,017	0,017	0,014	0,015	0,034
$D_{5\%}$	0,043	0,033	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
$D_{1\%}$	0,052	0,039	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
<b>Quartil II</b>									
p-valor	0,014	0,007	0,708	0,180	0,883	0,844	0,950	0,920	0,220
$D_{teste}$	0,052	0,040	0,016	0,025	0,014	0,014	0,012	0,013	0,024
$D_{5\%}$	0,045	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
$D_{1\%}$	0,054	0,040	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
<b>Quartil III</b>									
p-valor	0,280	0,045	0,254	0,416	0,710	0,183	0,603	0,893	0,670
$D_{teste}$	0,035	0,038	0,027	0,024	0,019	0,029	0,020	0,015	0,019
$D_{5\%}$	0,048	0,037	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
$D_{1\%}$	0,057	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
<b>Quartil IV</b>									
p-valor	0,161	0,060	0,401	0,450	0,881	0,808	0,765	0,290	0,794
$D_{teste}$	0,041	0,038	0,025	0,024	0,017	0,018	0,019	0,028	0,018
$D_{5\%}$	0,050	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
$D_{1\%}$	0,059	0,047	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046

Fonte: Elaborado pela autora.

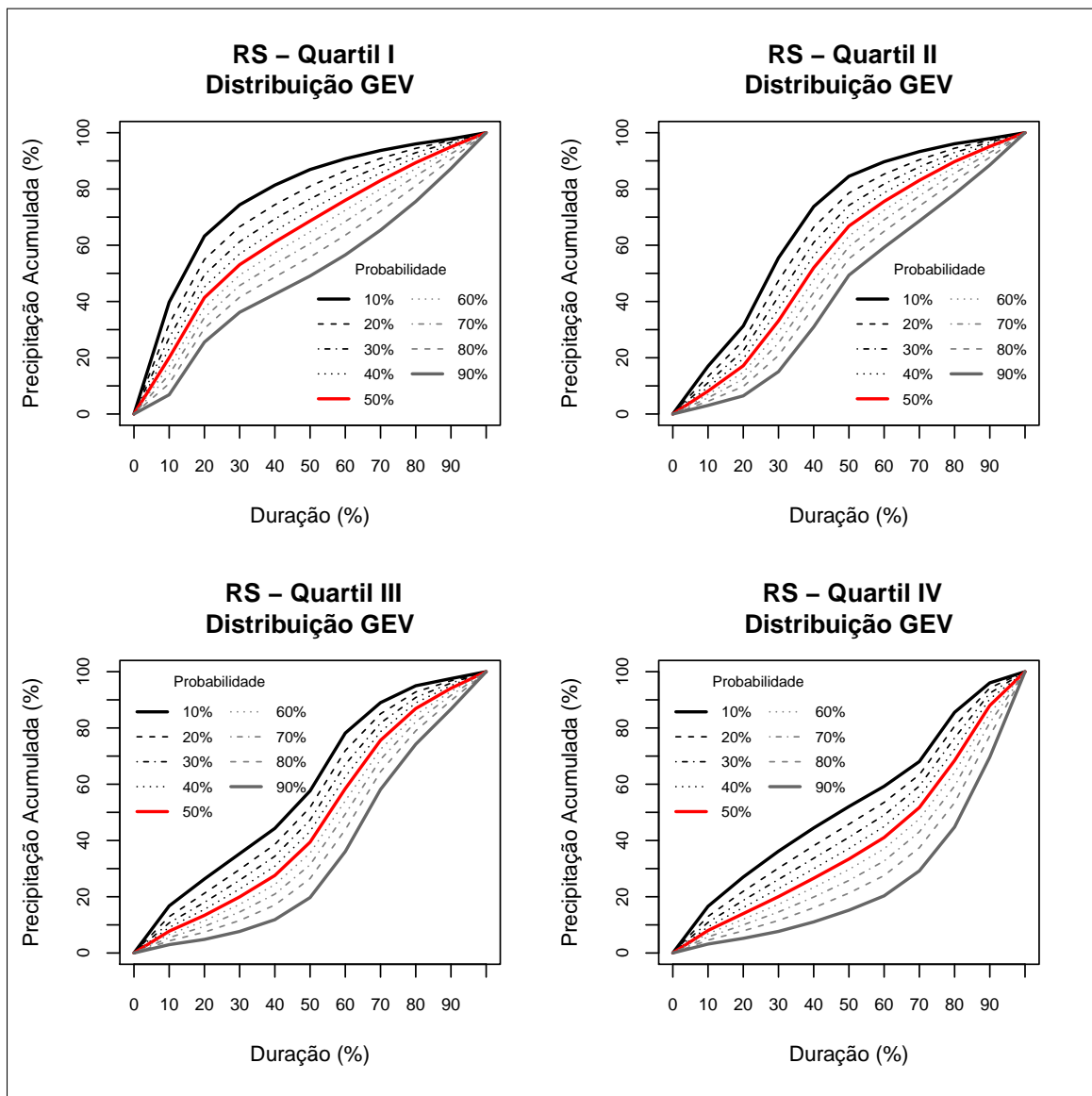
Tabela 4.8 – Parâmetros da distribuição GEV ajustados aos elementos das verticais obtidas a partir do agrupamento dos dados de todas as estações INMET do RS

Quartil I	10% D	20% D	30% D	40% D	50% D	60% D	70% D	80% D	90% D
$\xi$	16,06	36,72	48,23	56,05	63,49	71,20	78,95	86,43	93,49
$\alpha$	10,90	12,92	13,60	14,57	14,93	14,25	12,34	9,18	4,80
$\kappa$	0,03	0,08	0,14	0,24	0,34	0,48	0,64	0,80	0,99
Quartil II	10% D	20% D	30% D	40% D	50% D	60% D	70% D	80% D	90% D
$\xi$	6,56	14,04	27,95	46,30	62,12	71,39	79,58	87,18	93,78
$\alpha$	4,31	8,68	14,49	16,37	13,54	12,29	10,44	7,89	4,26
$\kappa$	-0,07	0,11	0,15	0,28	0,29	0,40	0,53	0,71	0,89
Quartil III	10% D	20% D	30% D	40% D	50% D	60% D	70% D	80% D	90% D
$\xi$	6,22	10,79	16,43	23,26	34,24	52,65	71,30	83,95	92,57
$\alpha$	4,09	7,08	9,88	12,28	15,01	16,89	12,84	8,98	4,88
$\kappa$	-0,12	0,02	0,15	0,25	0,35	0,38	0,48	0,60	0,83
Quartil IV	10% D	20% D	30% D	40% D	50% D	60% D	70% D	80% D	90% D
$\xi$	6,48	11,36	16,45	22,22	28,48	35,71	46,26	62,69	84,25
c	4,09	7,26	10,00	12,30	14,13	15,65	16,37	17,19	11,92
$\kappa$	-0,08	0,04	0,12	0,20	0,28	0,39	0,52	0,52	0,87

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos parâmetros foi possível aplicar a função inversa da função acumulada de probabilidade da distribuição GEV para obter a porcentagem de precipitação correspondente a probabilidade desejada. Para este procedimento também utilizou-se as funções propostas por Hosking e Wallis (1997). As curvas formadas a partir deste procedimento são apresentadas na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Curvas adimensionais elaboradas a partir das séries históricas de todas as estações INMET no RS e distribuição empírica de probabilidade



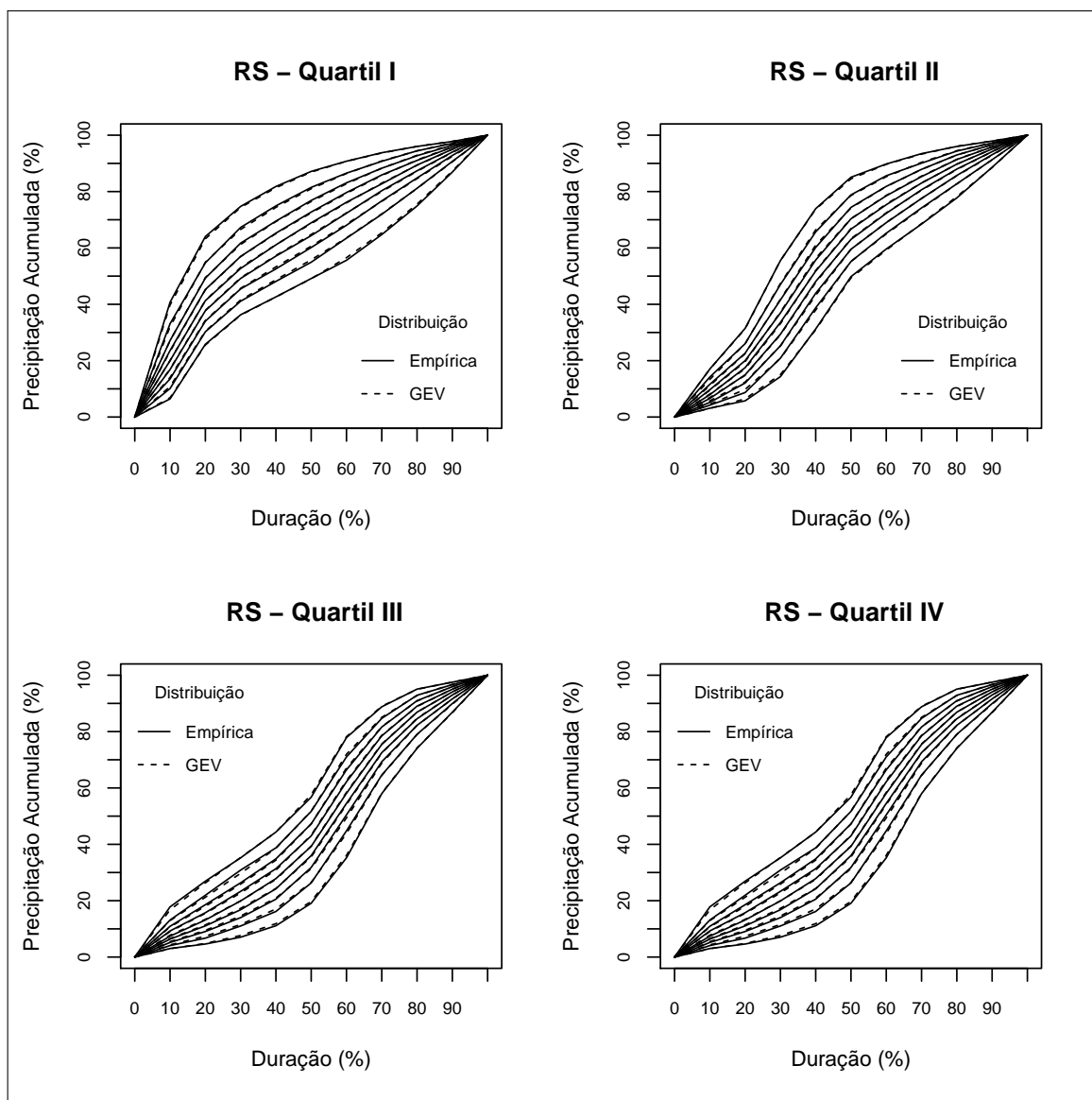
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.9 mostra a comparação gráfica entre as curvas desenvolvidas por ambos procedimentos de atribuição de probabilidade aos elementos das verticais de duração. Como pode ser observado na Figura 4.9, as curvas geradas a partir da interpolação da



distribuição empírica de frequências acumuladas e a partir da aplicação de uma função inversa da distribuição teórica são praticamente idênticas. Isso indica que a distribuição generalizada de extremos (GEV) se ajustou muito bem aos dados observados.

Figura 4.9 – Comparação entre as curvas regionais desenvolvidas a partir da distribuição empírica e teórica de probabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

A seleção de uma determinada curva para dimensionamento é arbitrária. Normalmente, a curva de 50% de probabilidade é a escolhida por ser a curva mais estável para todos os quartis, ou seja não muda significativamente a posição relativa quando adicionados novos eventos observados (HUFF; ANGEL et al., 1989). Já as curvas de 10% e 90% são utilizadas para estimar o escoamento para situações extremas (vazões mínimas

e máximas).

Sendo assim, as demais curvas são comumente ignoradas. No entanto, a partir dos parâmetros fornecidos na Tabela 4.7 é possível gerar números aleatórios dentro dos limites observados em cada vertical. Assim, podem ser construídos hietogramas com n combinações possíveis dentro do padrão observado. Isto confere flexibilidade a derivação de chuvas de projeto a partir destas curvas, e permite uma avaliação mais ampla dos hidrogramas de cheia e de diferentes situações de projeto.

Por fim, para superar a limitação da aplicação das curvas elaboradas para estimativa de chuvas de projeto com intervalos de discretização inferiores a 10% da duração, foram ajustadas funções às relações de porcentagem de precipitação e porcentagem de duração definidas a partir do agrupamento dos dados de todas as estações do RS para o nível de probabilidade de 50%.

A partir das análises realizadas no Curve Expert Basic versão 2.1.0 a equação Recíproca Quadrática-YD (Equação 4.1) foi a escolhida para representar as curvas com 50% de probabilidade estimadas a partir do agrupamento dos dados de todas as estações do RS. Os parâmetros ajustados e as métricas utilizadas para avaliar a qualidade dos ajustes são apresentados na Tabela 4.9.

$$P = D / (a + b * D + c * D^2), \quad (4.1)$$

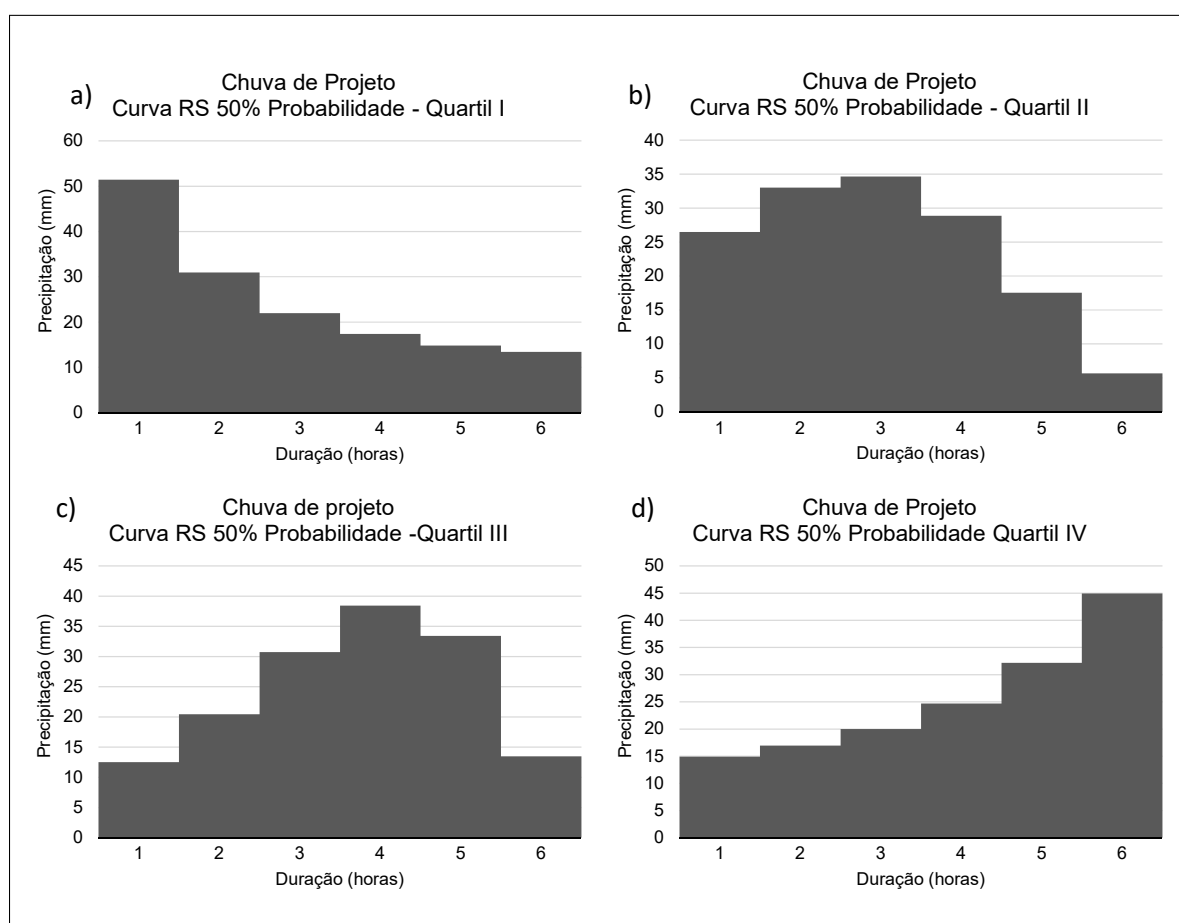
sendo P a precipitação acumulada em % e D a duração em %, a, b e c são os parâmetros apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros da função Recíproca Quadrática-YD para cada um dos quartis

<b>Grupo</b>	<b>Quartil I</b>	<b>Quartil II</b>	<b>Quartil III</b>	<b>Quartil IV</b>
<b>Parâmetro a</b>	0,35620002	1,10824917	2,62111515	1,76616455
<b>Parâmetro b</b>	0,00806255	-0,01163966	-0,04159205	-0,00484976
<b>Parâmetro c</b>	-0,00001621	0,00010813	0,00025450	-0,00003045
<b>Erro padrão</b>	1,42950468	2,82581708	2,17573227	2,61359069
<b>Coefficiente de correlação</b>	0,99918929	0,99759022	0,99860997	0,99746329

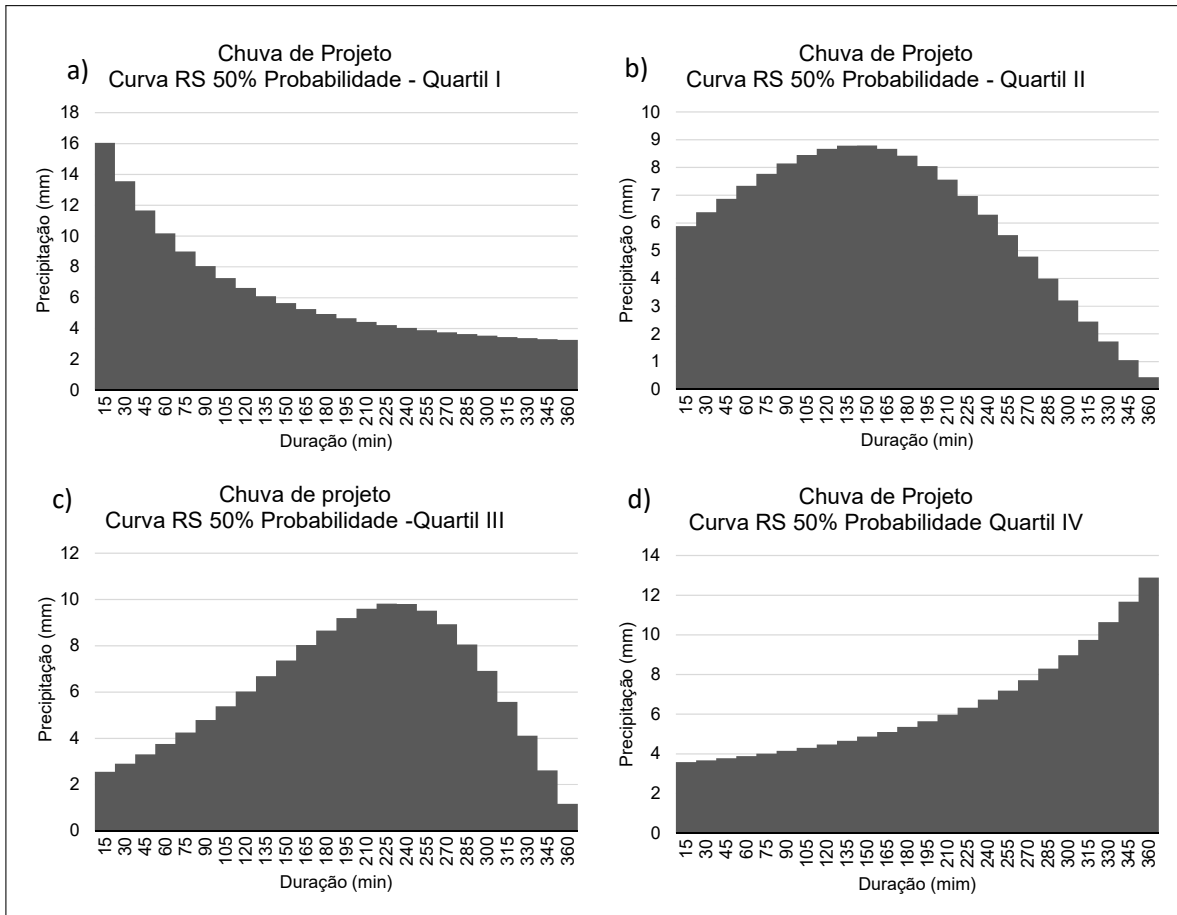
As chuvas de projeto estimadas a partir das equações apresentadas anteriormente podem ser observadas nas Figuras 4.10 e 4.11. É importante ressaltar que, devido aos erros associados à variabilidade da representação de um fenômeno por meio de uma equação matemática, por vezes a aplicação da função proposta pode resultar em porcentagens de precipitação inferiores ou superiores a 100% da precipitação no intervalo de 100% da duração. Porém, é do senso comum que ao final da duração do evento todo o volume proposto deva estar distribuído, sendo assim, os resultados obtidos a partir das equações propostas devem ser sempre reavaliados no último intervalo da chuva de projeto.

Figura 4.10 – Chuvas de projeto com intervalos de discretização de 1 hora estimadas a partir das equações propostas para as curvas do RS correspondentes ao nível de 50% de probabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.11 – Chuvas de projeto com intervalos de discretização de 15 minutos estimadas a partir das equações propostas para as curvas do RS correspondentes ao nível de 50% de probabilidade



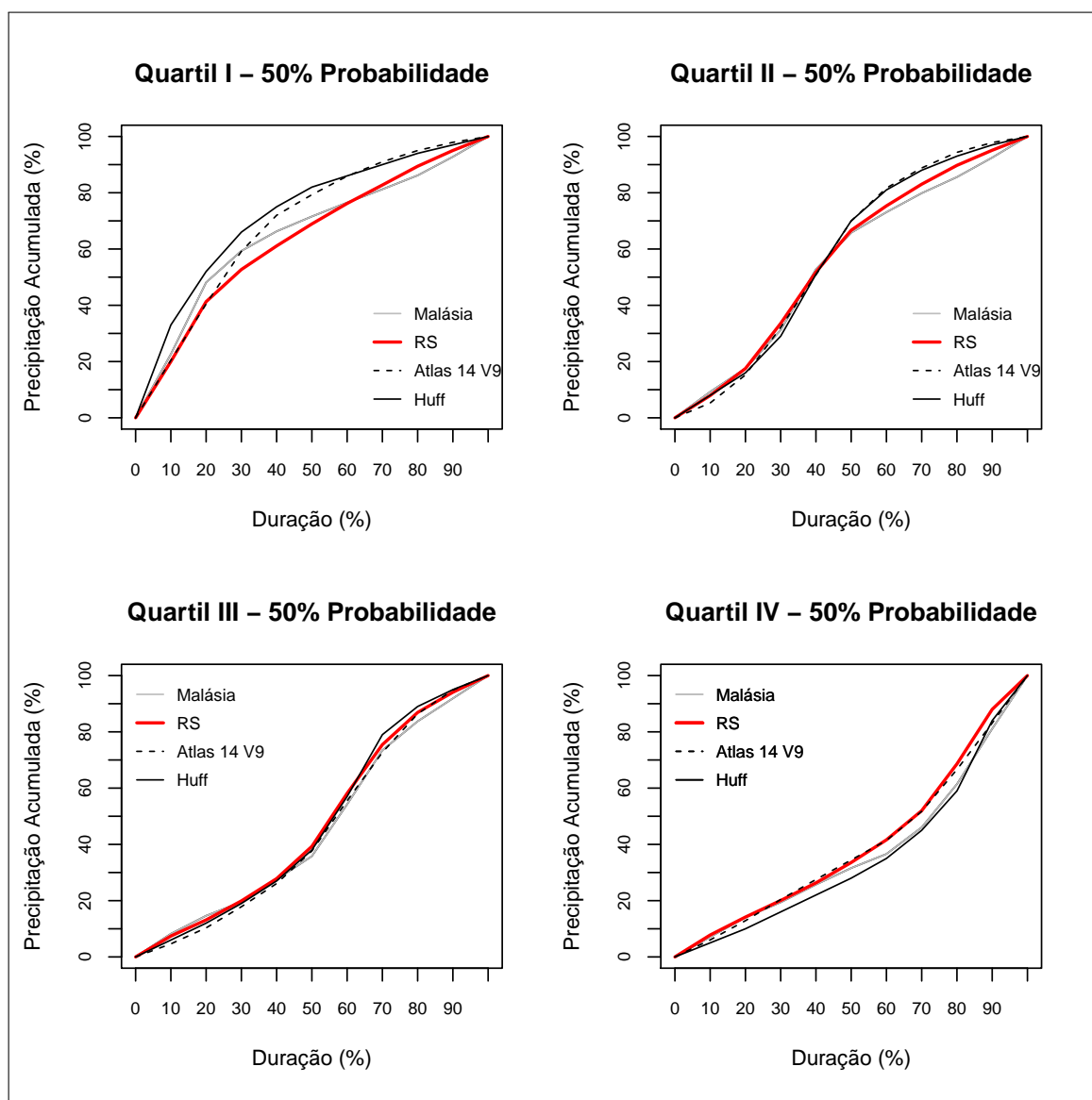
Fonte: Elaborado pela autora.

No próximo item, são apresentadas as comparações entre os padrões de distribuição temporal do Rio Grande do Sul e os desenvolvidos a partir de dados de outras regiões do mundo.

#### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DO RS E DE OUTRAS REGIÕES DO MUNDO

Para comparação, as curvas correspondentes a 50% de probabilidade para todos os quartis das três regiões do mundo selecionadas foram plotadas juntamente com a curva regional do RS (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Comparação entre padrões de distribuição temporal da precipitação do Rio Grande do Sul e os padrões de outras regiões do mundo



Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 4.12, as semelhanças entre as curvas médias dos Quartis II, III e IV das diferentes regiões são maiores do que as do Quartil I, sendo entre todas estas as do Quartil III as mais semelhantes. As diferenças em relação ao Quartil I das demais localidades podem estar associadas a desconsideração de eventos de 1 a 3 horas para elaboração das curvas, pois como visto no item 2.18 estes tendem a apresentar pico em até 25% da duração total. Como nos demais estudos o intervalo de amostragem dos dados era inferior a 1 hora, os eventos com durações entre 1 e 3 horas foram englobados na sintetização das curvas, o que agregou uma diferença significativa para o caso específico das curvas do Quartil I.

As semelhanças encontradas são muito interessantes, pois apesar do clima da região das curvas do Atlas 14 do Volume 9 Região 1 ser semelhante ao do Rio Grande do Sul, as metodologias de elaboração das curvas não são idênticas às utilizadas neste trabalho. Os próprios autores indicam que a definição de evento adotada no Atlas 14 pode gerar curvas de distribuição temporal diferentes das correspondentes ao mesmo nível de probabilidade e quartil desenvolvidas a partir da utilização de eventos isolados. Além disso, as curvas finais foram suavizadas pelo método de programação linear, como proposto por Bonta e Rao (1988).

Já a metodologia do estudo desenvolvido por Alzi e Rao (2010) é muito semelhante a deste trabalho, porém o clima da região estudada é diferente. Sendo assim, apesar das diferenças entre os climas e metodologias de elaboração dos perfis adimensionais, existem fortes indícios de que a distribuição temporal da precipitação de diferentes localidades é semelhante para o mesmo nível de probabilidade e quartil. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Alzi e Rao (2010).

No entanto, apesar de curvas de diferentes regiões, e até mesmo da mesma região, apresentarem comportamento similar, ainda assim existem diferenças nos arranjos da distribuição temporal da precipitação de cada localidade. Sendo assim, uma avaliação da influência destas variações no hidrograma de cheia é recomendada antes de qualquer aplicação.

Por fim, como as curvas dos demais estudos foram desenvolvidas a partir de dados com intervalos de amostragem inferior, reforça-se a hipótese de que a distribuição temporal da precipitação se mantém independentemente da amostragem dos dados, pois os volumes precipitados ao final de cada hora, não alterando as relações com a duração (BONTA; RAO, 1987; POWELL et al., 2007).

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi contribuir para o entendimento da distribuição temporal das precipitações intensas do Rio Grande do Sul para fins de dimensionamento de chuva de projeto. Para isto, sintetizou-se as séries históricas disponíveis no formato de curvas adimensionais de distribuição da precipitação, elaborou-se curvas pontuais e regionais, e comparou-se os padrões observados no estado com padrões de outras regiões do mundo.

A partir dos resultados apresentados conclui-se que as adaptações propostas para elaboração das curvas foi bem sucedida uma vez que foi possível sintetizar as séries históricas de precipitação em padrões adimensionais. As análises de frequência de ocorrência de acordo com o agrupamento em quartis realizadas indicaram que existe dependência entre o agrupamento em quartis com a época do ano e com as durações.

A partir das análises de correlação entre as curvas pontuais é possível concluir que existe uma tendência da distribuição temporal da precipitação ser semelhante em diferentes localidades do estado para precipitações com duração total superior a 4 horas. Ainda mais, os resultados das comparações com curvas desenvolvidas a partir de dados de outras localidades do mundo indicaram que existe uma tendência da distribuição temporal da precipitação ser semelhante em diferentes localidades do mundo.

As semelhanças entre as curvas do RS e de demais lugares do mundo fortaleceram a premissa de que a distribuição temporal da precipitação se mantém independentemente da amostragem dos dados e as equações ajustadas as curvas facilitam a aplicação das mesmas para estimativa de chuvas de projeto com discretização inferior a 1 hora.

Ainda mais, conclui-se que existe uma distribuição teórica de probabilidade capaz de representar os dados observados em determina vertical. O ajuste desta distribuição teórica de probabilidade às verticais de porcentagem de duração agrega muita flexibilidade a estimativa de chuvas de projeto, pois permite a construção de perfis aleatórios com n combinações de distribuição temporal da precipitação permitindo simulações que consideram uma ampla gama de configurações de chuva de projeto.

Por fim, foi possível observar que quantos mais eventos são utilizados para elaboração das curvas mais estas se estabilizam e se aproximam da curva regional desenvolvida a partir do agrupamento dos dados de todas as estações. No entanto, este comportamento só poderá ser comprovado com a continuidade do monitoramento nas estações utilizadas neste estudo.





## 6 RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros recomenda-se a ampliação da avaliação dos critérios para individualização de eventos a partir de séries históricas, principalmente quanto a utilização de critérios variados para localidades distintas buscando uma caracterização mais adequada para representar peculiaridades.

Ainda mais, as adaptações para elaboração das curvas adimensionais a partir do banco de dados horários do INMET propostas nesta pesquisa podem ser aplicadas para séries temporais de outros estados brasileiros.

Como as precipitações com durações inferiores foram desqualificadas para aplicação da metodologia de elaboração das curvas devido ao intervalo de amostragem dos dados, estudos futuros que investiguem eventos com duração inferior a 4 horas a partir de dados sub-horários são fortemente recomendados.

Também são recomendados estudos que comparem as curvas elaboradas neste estudo com outras regiões do mundo para confirmar se a distribuição temporal de diferentes regiões climáticas é semelhante.

Como a partir dos resultados obtidos neste trabalho ficou claro que a distribuição temporal da precipitação se mantém independentemente da amostragem dos dados, recomenda-se a investigação da utilização de produtos de reanálise com ampla disponibilidade espacial e temporal para elaboração das curvas adimensionais.

As análises de similaridade entre as curvas pontuais aplicadas neste estudo são simplificadas, desta forma recomenda-se a exploração de técnicas de regionalização de precipitações intensas para o contexto de curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de um software que permita a estimativa automática da chuva de projeto a partir das curvas desenvolvidas neste trabalho, explorando o ajuste de equações para estimativa de chuvas de projeto em incrementos inferiores a 10% da duração e os parâmetros GEV que proporcionam a estimativa de chuvas de projeto com padrões aleatórios.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOULAEV, S.; CASARIN, A. S. E. D. Estudo preliminar das linhas de convecção observadas no rio grande do sul. In: **VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET, Anais**. [S.l.: s.n.], 1994. v. 2, p. 301–304.

ABREU, F. G. d.; SOBRINHA, A.; BRANDAO, L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Scielo, v. 22, p. 239 – 250, 04 2017.

AGENCIA NACIONAL DE AGUAS. **Inventario das estações Pluviométricas**. Brasília,DF, 2009.

AKAN, A. O.; HOUGHTALEN, R. J. **Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Enso-related rainfall anomalies in south america and associated circulation features during warm and cold pacific decadal oscillation regimes. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 25, n. 15, p. 2017–2030, 2005.

ARYAL, R. K. et al. The role of inter-event time definition and recovery of initial/depression loss for the accuracy in quantitative simulations of highway runoff. **Urban Water Journal**, Taylor & Francis, v. 4, n. 1, p. 53–58, 2007.

ASQUITH, W. H. et al. **Summary of dimensionless texas hyetographs and distribution of storm depth developed for texas department of transportation research project**. Austin, Texas, 2005. 78 p.

AZLI, M.; RAO, A. R. Development of huff curves for peninsular Malaysia. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 388, n. 1, p. 77–84, 2010.

BACK, A. J. Time distribution of heavy rainfall events in urussanga, santa catarina state, brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 583–588, 2011.

BACK, A. J.; SONEGO, M.; POLA, A. C. Distribuição temporal de chuvas intensas de chapecó, sc. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXI., 2015, Brasília. [S.l.]: ABRH, 2015.

BASSO, R. E. et al. Revisão das isozonas de chuvas intensas do brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 635–641, 2016.

BECK, H. E. et al. Mswep: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 589–615, 2017.

BEDIENT, P.; HUBER, W.; VIEUX, B. **Hydrology and Floodplain Analysis**. [S.l.]: Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002. v. 5.

BEMFICA, D. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre**. 1999. Dissertação (Mestrado em Recursos Hidricos e Saneamento Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BEMFICA, D.; GOLDENFUM, J.; SILVEIRA, A. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. **Revista Brasileira dos Recursos Hídricos**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 4, p. 5–16, 2000.

BERTHOLD, M. R.; HÖPPNER, F. On clustering time series using euclidean distance and pearson correlation. **arXiv preprint arXiv:1601.02213**, 2016.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2011.

BONNIN, G. M. et al. Precipitation-frequency atlas of the united states. **NOAA Atlas 14**, v. 14, n. 2, 2006.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - ohio river basin and surrounding states. **NOAA Atlas 14**, v. 2, n. 3, p. 1–265, 2006.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - puerto rico and the u.s. virgin islands. **NOAA Atlas 14**, v. 3, n. 4, p. 1–137, 2008.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - semiarid southwest. **NOAA Atlas 14**, v. 1, n. 5, p. 1–265, 2011.

BONTA, J. Development and utility of huff curves for disaggregating precipitation amounts. **Applied engineering in agriculture**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 20, n. 5, p. 641, 2004.

BONTA, J.; RAO, A. Fitting equations to families of dimensionless cumulative hyetographs. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 31, n. 3, p. 756–0760, 1988.

BONTA, J.; SHAHALAM, A. Cumulative storm rainfall distributions: comparison of huff curves. **Journal of Hydrology (New Zealand)**, JSTOR, p. 65–74, 2003.

BONTA, J. V. Comparison of four design-storm hyetographs. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 31, n. 1, p. 102–0106, 1988.

BONTA, J. V.; RAO, A. R. Factors affecting development of Huff curves. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 30, n. 6, p. 1689–1693, 1987.

BRACKEN, L. J.; COX, N.; SHANNON, J. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east spain. **Hyand Processes**, Wiley Online Library, v. 22, n. 5, p. 683–696, 2008.

BROOKS, H. E.; DOTZEK, N. The spatial distribution of severe convective storms and an analysis of their secular changes. **Climate Extremes and Society**, Cambridge University Press, v. 35, p. 53, 2008.

CAMPOS, C. R. J. d.; EICHHOLZ, C. W. Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o rio grande do sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geofísica**, SciELO Brasil, v. 29, n. 2, p. 331–345, 2011.

CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.

CARGNIN, A. P. et al. Quinze anos de transformações na economia e sociedade gaúchas contados pelas páginas do atlas socioeconômico do rs. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 24, p. 29–62, 2014.

\_\_\_\_\_. Atlas socioeconômico do rio grande do sul: quinze anos acompanhando as transformações do estado. **Revista Geo UERJ**, v. 2, n. 24, 2013.

CAVALCANTI, I. **Um estudo sobre interações entre circulações locais e circulações de grande escala**. [S.l.]: Programa de Pós-graduação em Meteorologia, INPE, Dissertação de Mestrado,(INPE-2494-TDL/097), 113p, 1982.

CAVALCANTI, I.; KOUSKY, V. Frentes frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. et al. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 9, p. 137–280.

CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T.; BENDER, F. D. Influência da oscilação decadal do pacífico e as mudanças no regime de chuva do rio grande do sul. **Ciência e Natura**, Universidade Federal de Santa Maria, p. 317–320, 2009.

CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. **Design storms. Applied Hydrology**, vol. 14. New York: McGraw-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. [S.l.], 2008.

COUTINHO, J. et al. Characterization of sub-daily rainfall properties in three raingauges located in northeast brazil. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, Copernicus GmbH, v. 364, p. 345–350, 2014.

CRUCIANI, D. E.; MACHADO, R. E.; SENTELHAS, P. C. Modelos da distribuição temporal de chuvas intensas em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 6, n. 1, p. 76–82, 2002.

DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS. **Plano Diretor de Drenagem Urbana**: Manual de drenagem. Porto Alegre, 2005. 159 p.

DEPINÉ, H.; CASTRO, N. M. dos R.; PEDROLLO, O. C. Incertezas no preenchimento de falhas de chuvas horárias com redes neurais artificiais. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 15, n. 2, p. 48–57, 2014.

DESBORDES, M.; RAOUS, P. Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques. **La Houille Blanche**, EDP Sciences, n. 1, p. 37–43, 1976.

DIAS, M.; SILVA, M. Para entender o clima. In: CAVALCANTI, I. et al. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 1, p. 17–23.

DOLŠAK, D.; BEZAK, N.; ŠRAJ, M. Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in slovenia. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 541, p. 1395–1405, 2016.

DULLO, T. T.; KALYANAPU, A. J.; TEEGAVARAPU, R. S. Evaluation of changing characteristics of temporal rainfall distribution within 24-hour duration storms and their influences on peak discharges: Case study of asheville, north carolina. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 22, n. 11, p. 17, 2017.

DUNKERLEY, D. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an australian dryland site. **Hydrological Processes**, Wiley Online Library, v. 22, n. 26, p. 5024–5036, 2008.

DUNKERLEY, D. L. How do the rain rates of sub-event intervals such as the maximum 5-and 15-min rates (i5 or i30) relate to the properties of the enclosing rainfall event? **Hydrological processes**, Wiley Online Library, v. 24, n. 17, p. 2425–2439, 2010.

DUQUIA, C. G.; DIAS, M. S. Complexo convectivo de mesoescala: um estudo de caso para o oeste do rio grande do sul. In: **VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET, Anais**. [S.l.: s.n.], 1994. v. 2, p. 610–612.

DURKEE, J. D.; MOTE, T. L. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical south america. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 30, n. 3, p. 418–431, 2010.

EL-SAYED, E. A. H. Development of synthetic rainfall distribution curves for Sinai area. **Ain Shams Engineering Journal**, Elsevier, 2017.

EWEA, H. A. et al. Sensitivity analysis of runoff hydrographs due to temporal rainfall patterns in Makkah Al-Mukkramah region, Saudi Arabia. **Arabian Journal of Geosciences**, Springer, v. 9, n. 5, p. 424, 2016.

FAVARETTO, J. R. et al. Análise de consistência e regionalização das precipitações máximas ocorridas no rio grande do sul entre 1912-2014. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

FERRAZ, S. E. T. **Variabilidade intrasazonal no Brasil e Sul da América do Sul**. 2004. Tese (Doutorado), 2004.

FERREIRA, M. G. de B. **Análise Regional da Distribuição Temporal de Precipitações Sub-diárias para o Estado de Minas Gerais**. 2015. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FERREIRA, N. J.; RAMIREZ, M. V.; GAN, M. A. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do nordeste do brasil. In: CAVALCANTI, I. et al. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 3, p. 43–60.

FIGUEIREDO, J.; SCOLAR, J. Estudo da trajetória dos sistemas convectivos de mesoescala na américa do sul. In: **VII Congresso Argentino de Meteorologia e VII Congresso Latino-americano e Ibérico de Meteorologia, Anais**. [S.l.: s.n.], 1996. p. 165–166.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over south america. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293–1302, 1991.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. **Hidrologia**. 2<sup>a</sup>. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1988.

GARCÍA-BARTUAL, R.; ANDRÉS-DOMÉNECH, I. A two-parameter design storm for Mediterranean convective rainfall. **Hydrology and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 21, n. 5, p. 2377, 2017.

GHASSABI, Z. et al. Time distribution of heavy rainfall events in south west of Iran. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 145, p. 53–60, 2016.

GONÇALVES, J. M. S.; SANTOS, N. M. dos. Análise das classificações do relevo para o rio grande do sul. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 13, n. 1, 1985.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL - SECRETARIA DE ESTADO DE OBRAS. **PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA DO DISTRITO FEDERAL**: Manual de drenagem urbana. Distrito Federal, 2009. v. 2, 128 p.

GRACE, R. A.; EAGLESON, P. S. Scale model of urban runoff from storm rainfall. **Journal of the Hydraulics Division**, 1967.

GRIMM, A. M. The el niño impact on the summer monsoon in brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003.

\_\_\_\_\_. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. et al. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 17, p. 263–280.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern brazil associated with el niño and la niña events. **Journal of climate**, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998.

GUO, J. C.; HARGADIN, K. Conservative design rainfall distribution. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 14, n. 5, p. 528–530, 2009.

GUO, J. C.; URBONAS, B. Maximized detention volume determined by runoff capture ratio. **Journal of Water Resources Planning and Management**, American Society of Civil Engineers, v. 122, n. 1, p. 33–39, 1996.

HAYLOCK, M. R. et al. Trends in total and extreme south american rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. **Journal of climate**, v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 2006.

HERSHFIELD, D. M. Extreme rainfall relationships. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 88, n. 6, p. 73–92, 1962.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1997.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on southern hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, v. 18, n. 20, p. 4108–4129, 2005.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 3, n. 4, p. 1007–1019, 1967.

HUFF, F. A.; ANGEL, J. R. et al. Frequency distributions and hydroclimatic characteristics of heavy rainstorms in Illinois. **Bulletin/Illinois State Water Survey**; 70, Illinois State Water Survey, 1989.

\_\_\_\_\_. Rainfall frequency atlas of the Midwest. **MCC research report 92: 03**, Illinois State Water Survey, 1992.

HUFF, F. A. et al. Time distributions of heavy rainstorms in illinois. **Circular (Illinois State Water Survey)**; 173, Illinois State Water Survey, 1990.

HYAMS, D. **CurveExpert Professional: documentation**. [S.l.]: Release, 2011.

KAYANO, M. T.; OLIVEIRA, C. P. de; ANDREOLI, R. V. Interannual relations between south american rainfall and tropical sea surface temperature anomalies before and after 1976. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 29, n. 10, p. 1439–1448, 2009.

KEIFER, C. J.; CHU, H. H. Synthetic storm pattern for drainage design. **Journal of the hydraulics division**, v. 83, n. 4, p. 1–25, 1957.

KERR, R. L. et al. Time distribution of storm rainfall in Pennsylvania. Institute for Research on Land and Water Resources, 1974.

KOTTEK, M. et al. World map of the köppen-geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

KOUTSOYIANNIS, D. A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 156, n. 1-4, p. 193–225, 1994.

LLOYD, C. The temporal distribution of amazonian rainfall and its implications for forest interception. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 116, n. 496, p. 1487–1494, 1990.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, n. 11, p. 1374–1387, 1980.

\_\_\_\_\_. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 7, p. 1475–1493, 1983.

MAIDMENT, D. R. et al. **Handbook of hydrology**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1993. v. 1.

MANTUA, N. J. et al. A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 78, n. 6, p. 1069–1080, 1997.

MARENGO, J. Mudanças climáticas: detecção e cenários futuros para o brasil até o final do século xxi. In: CAVÁLCANTI, I. et al. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 25, p. 407–424.

MARENGO, J. et al. Mudanças climáticas e eventos extremos no brasil. **Fundação Brasileira para o Desenvolvimento sustentável–FBDS**, 2010.

MCCUEN, R. H. et al. **Hydrologic analysis and design**. [S.l.]: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1989.

MEHL, H. U. et al. Caracterização de padrões de chuvas ocorrentes em santa maria (rs). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, n. 2, 2001.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. Espacialização da recomendação de novas estações pluviométricas na sub-bacia 87 segundo os critérios de densidade da organização mundial de meteorologia. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa - PB: [s.n.], 2015. v. 17.

MOLIN, L. et al. Distribuição temporal de chuvas intensas em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 2, p. 43–51, 1996.

MOLINA-SANCHIS, I. et al. Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 3, p. 226–236, 2016.

MONTEIRO, C. A. d. F. Geomorfologia. **Geografia do Brasil: a Grande Região Sul. Rio de Janeiro: FIBGE/CNG**, v. 1, 1963.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Influências da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação. **Rega**, v. 11, n. 2, p. 25–35, 2014.

MUSSY, A. **Hydrologie appliquée**. 1. ed. Bucareste: HGA, 1998.



NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Precipitation Frequency Data Server**: Temporal distributions. Washington DC, 2018.

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL. **Flood Studies Report**: Meteorological studies. London, 1975. v. 2.

NGUYEN, T. A.; GROSSI, G.; RANZI, R. Design storm selection for mixed urban and agricultural drainage systems: A case study in the Northern delta-Vietnam. In: **Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage**. Edinburgh, UK: [s.n.], 2008. v. 31.

NOTARO, V. et al. Flood frequency analysis for an urban watershed: comparison between several statistical methodologies simulating synthetic rainfall events. **Journal of Flood Risk Management**, Wiley Online Library, 2016.

PACKMAN, J.; KIDD, C. A logical approach to the design storm concept. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 16, n. 6, p. 994–1000, 1980.

PAIVA, J. Padrão das precipitações em santa maria-rs. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XII. [S.l.]: ABRH, 1997.

PAMPUCH, L. A.; FERRAZ, S. E. T. Investigação do modo sul em dados de precipitação no período de 1982 a 2006 no estado do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 107–116, 2012.

PAN, C. et al. Improvement to the huff curve for design storms and urban flooding simulations in Guangzhou, China. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 6, p. 411, 2017.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the koppen-geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007. Disponível em: <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/>>.

PERICA, S. et al. Precipitation-frequency atlas of the united states - california. **NOAA atlas**, v. 6, n. 3, p. 1–233, 2014.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - hawaiian islands. **NOAA Atlas 14**, v. 4, n. 3, p. 1–103, 2011.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - selected pacific islands. **NOAA atlas**, v. 5, n. 3, p. 1–74, 2011.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - alaska. **NOAA atlas**, v. 7, n. 2, p. 1–119, 2012.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - midwestern states. **NOAA atlas**, v. 8, n. 2, p. 1–289, 2013.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - southeastern states. **NOAA atlas**, v. 9, n. 2, p. 1–163, 2013.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - southwestern. **NOAA Atlas 14**, v. 9, n. 2, p. 1–163, 2013.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - northeastern states. **NOAA atlas**, v. 10, n. 2, p. 1–4, 2015.

\_\_\_\_\_. Precipitation-frequency atlas of the united states - texas. **NOAA atlas**, v. 11, n. 2, p. 1–281, 2018.

PILGRIM, D. H.; CORDERY, I. Rainfall temporal patterns for design floods. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 101, n. 1, p. 81–95, 1975.

PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de belo horizonte–rmbh. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 73–88, 1998.

POWELL, D. N. et al. Dimensionless rainfall patterns for south carolina. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 12, n. 1, p. 130–133, 2007.

RAO, A. R.; KAO, S.-C. Statistical analysis of indiana rainfall data. Purdue University, 2006.

REBOITA, M. et al. [S.I.]: Terrae Didatica, 2012. v. 8. 34–50 p.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 25, n. 2, 2010.

REILLY, J. A.; PIECHOTA, T. C. Actual storm events outperform synthetic design storms: A review of scs curve number applicability. In: **Impacts of Global Climate Change**. Las Vegas, NV: [s.n.], 2005. p. 1–13.

RESTREPO-POSADA, P. J.; EAGLESON, P. S. Identification of independent rainstorms. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 55, n. 1, p. 303–319, 1982.

ROMATSCHKE, U.; HOUZEJR, R. A. Characteristics of precipitating convective systems accounting for the summer rainfall of tropical and subtropical south america. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 1, p. 25–46, 2013.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul : variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. 253 p. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia., Porto Alegre, 2011.

SANTOS, D. C. **Padrões atmosféricos associados a extremos de precipitação na primavera no estado do Rio Grande do Sul**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SCHITTKOWSKI, K. Easy-fit: a software system for data fitting in dynamical systems. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Springer, v. 23, n. 2, p. 153–169, 2002.

SCP-RS. **Atlas sócio-econômico do estado do Rio Grande do Sul**. Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria de Planejamento, 2017. Acesso em 19 dez. 2018. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/bacias-e-sub-bacias-hidrograficas>>.

SCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55 (TR-55)**. Washington, DC, 1986.

SECRETARIA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais: Aspectos tecnológicos;diretrizes para projetos**. São Paulo, 2012. v. 3, 128 p.

SENTELHAS, P. C. et al. Distribuição horária de chuvas intensas de curta duração: Um subsídio ao dimensionamento de projetos de drenagem superficial. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, p. 45–52, 1998.

SHUTTLEWORTH, W. J. **Terrestrial hydrometeorology**. 1. ed. UK: John Wiley & Sons, 2012.

SIFALDA, V. Entwicklung eines berechnungsregens für die bemessung von kanalnetzen. **GWF-Wasser/Abwasser**, v. 114, p. 435–440, 1973.

SILVEIRA, A. L. L. da. Abatimento espacial da chuva em porto alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 6, n. 2, 2001.

SINGH, V. Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. **Hydrological processes**, Wiley Online Library, v. 11, n. 12, p. 1649–1669, 1997.

STEINKE, E. T. **Climatologia fácil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

TERRANOVA, O.; IAQUINTA, P. Temporal properties of rainfall events in calabria (southern italy). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 11, n. 3, p. 751–757, 2011.

TIECHER, T. et al. Análise do padrão de distribuição temporal das chuvas em santa maria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XX., 2013, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** ABRH, 2013. Acesso em: 15/10/2017. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=58&SUMARIO=767>>.

TSUBO, M.; WALKER, S.; HENSLEY, M. Quantifying risk for water harvesting under semi-arid conditions: Part i. rainfall intensity generation. **Agricultural water management**, Elsevier, v. 76, n. 2, p. 77–93, 2005.

TUCCI, C. E. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

TUCCI, C. E. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 939 p.

TYRRELL, P. T.; HASFURTHER, V. R. **Design Rainfall Distributions for the State of Wyoming**. Wyoming, US, 1983.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater detention: for drainage, water quality, and CSO management**. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

VANDENBERGHE, S. et al. A stochastic design rainfall generator based on copulas and mass curves. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 12, p. 2429–2442, 2010.

WALESH, S. G. **Urban surface water management**. New York, US: John Wiley & Sons, 1989.

WATT, E.; MARSALEK, J. Critical review of the evolution of the design storm event concept. **Canadian Journal of Civil Engineering**, NRC Research Press, v. 40, n. 2, p. 105–113, 2013.

WENZEL, H. G.; VOORHEES, M. L. **Evaluation of the urban design storm concept**. Illinois, US, 1981.

WILKS, D. S. Empirical distributions and exploratory data analysis. In: **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. San Diego, California: Elsevier, 2006. cap. 3, p. 50–57.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. **Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning.**, USDA, Science and Education Administration, 1978.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Hydrological Practices: Hydrology – from measurement to hydrological information**. Geneva 2, Switzerland, 2008. v. 1, n. 168.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

YEN, B.; CHOW, V. **Local Design Storm: Methodology and analysis**. Washington, DC, 1983. v. 2.

YEN, B. C.; CHOW, V. T. Design hyetographs for small drainage structures. **Journal of the Hydraulics Division**, American Society of Civil Engineers, v. 106, n. HY6, 1980.

YIN, S.-q. et al. Intra-storm temporal patterns of rainfall in china using huff curves. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2016.

ZAHED, K.; MARCELLINI, S. Precipitações máximas. In: TUCCI, C. E.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (Ed.). **Drenagem Urbana**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. cap. 2, p. 37–76.

ZIPSER, E. J. et al. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 8, p. 1057–1071, 2006.



## APÊNDICE A – EXEMPLO DA REAMOSTRAGEM DOS EVENTOS SIGNIFICATIVOS

Quadro A.1 – Eventos significativos classificados no Quartil III da estação de Dom Perdrito (A881) expressos em porcentagem acumulada da precipitação pela porcentagem da duração total

P1 (%)	D1 (%)	P2 (%)	D2 (%)	P3 (%)	D3 (%)	P4 (%)	D4 (%)	P5 (%)	D5 (%)	P6 (%)	D6 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,93	4,55	2,92	8,33	5,53	25,00	7,56	7,69	5,79	7,14	4,20	14,29
7,30	9,09	19,63	16,67	35,97	50,00	9,88	15,38	5,79	14,29	22,27	28,57
7,30	13,64	24,40	25,00	87,75	75,00	9,88	23,08	5,79	21,43	47,48	42,86
12,92	18,18	30,77	33,33	100,00	100,00	18,31	30,77	5,79	28,57	84,45	57,14
22,47	22,73	35,54	41,67			22,38	38,46	9,92	35,71	94,54	71,43
26,40	27,27	49,60	50,00			22,38	46,15	13,64	42,86	94,54	85,71
26,40	31,82	66,58	58,33			25,58	53,85	28,93	50,00	100,00	100,00
26,40	36,36	78,78	66,67			27,62	61,54	47,52	57,14		
26,40	40,91	88,33	75,00			63,95	69,23	61,57	64,29		
26,40	45,45	95,76	83,33			81,69	76,92	70,25	71,43		
26,40	50,00	98,41	91,67			87,79	84,62	80,58	78,57		
31,46	54,55	100,00	100,00			87,79	92,31	88,02	85,71		
48,88	59,09					100,00	100,00	94,63	92,86		
63,48	63,64							100,00	100,00		
70,79	68,18										
74,72	72,73										
87,08	77,27										
90,45	81,82										
90,45	86,36										
90,45	90,91										
94,38	95,45										
100,00	100,00										
P7 (%)	D7 (%)	P8 (%)	D8 (%)	P9 (%)	D9(%)	P10 (%)	D10 (%)	P11(%)	D11 (%)	P12(%)	D12(%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,65	6,25	4,03	12,50	12,50	14,29	3,66	7,14	2,19	9,09	5,26	12,50
10,47	12,50	13,42	25,00	12,50	28,57	7,55	14,29	2,19	18,18	17,76	25,00
13,95	18,75	13,42	37,50	12,50	42,86	7,55	21,43	5,46	27,27	17,76	37,50
18,60	25,00	26,17	50,00	83,88	57,14	10,98	28,57	5,46	36,36	17,76	50,00
26,16	31,25	71,14	62,50	87,50	71,43	16,02	35,71	5,46	45,45	45,39	62,50
31,98	37,50	85,23	75,00	97,04	85,71	24,26	42,86	8,56	54,55	63,16	75,00
40,12	43,75	94,63	87,50	100,00	100,00	42,11	50,00	31,15	63,64	84,21	87,50
47,09	50,00	100,00	100,00			57,67	57,14	75,05	72,73	100,00	100,00
68,60	56,25					78,72	64,29	83,97	81,82		
80,23	62,50					82,84	71,43	98,36	90,91		
90,70	68,75					89,47	78,57	100,00	100,00		
90,70	75,00					94,74	85,71				
90,70	81,25					97,94	92,86				
90,70	87,50					100,00	100,00				
95,35	93,75										
100,00	100,00										

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro A.2 – Eventos significativos classificados no Quartil III da estação de Dom Pedrito (A881) expressos em porcentagem acumulada da precipitação interpolada para cada intervalo de 10% de duração

<b>D (%)</b>	<b>P1 (%)</b>	<b>P2 (%)</b>	<b>P3 (%)</b>	<b>P4 (%)</b>	<b>P5 (%)</b>	<b>P6 (%)</b>
0	0	0	0	0	0	0
10	7,30	6,26	NA	8,26	5,79	NA
20	16,74	21,54	NA	9,88	5,79	11,43
30	26,40	28,22	11,62	17,47	6,61	24,79
40	26,40	34,59	23,79	22,38	12,15	42,44
50	26,40	49,60	35,97	23,98	28,93	65,97
60	51,80	69,02	56,68	27,21	53,14	86,47
70	72,36	82,60	77,39	65,73	68,51	93,53
80	89,10	92,79	90,20	84,13	82,07	94,54
90	90,45	97,88	95,10	87,79	91,98	96,18
100	100	100	100	100	100	100
<b>D (%)</b>	<b>P7 (%)</b>	<b>P8 (%)</b>	<b>P9 (%)</b>	<b>P10(%)</b>	<b>P11 (%)</b>	<b>P12 (%)</b>
0	0	0	0	0	0	0
10	8,14	NA	NA	5,22	2,19	NA
20	14,88	9,66	12,5	7,55	2,84	12,76
30	24,65	13,42	12,5	11,99	5,46	17,76
40	35,23	15,97	12,5	20,96	5,46	17,76
50	47,09	26,17	48,19	42,11	7,01	17,76
60	75,58	62,15	84,61	66,09	22,11	39,87
70	90,70	79,60	87,14	82,01	61,88	56,05
80	90,70	88,99	93,22	90,53	82,19	71,58
90	92,56	95,70	97,93	96,66	96,92	87,37
100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaborado pela autora.





## APÊNDICE B – MATRIZ DE CORRELAÇÃO

Tabela B.1 – Matriz de correlação para as curvas do Quartil I correspondentes a probabilidade de 50%

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	A801	A802	A803	A804	A805	A808	A809	A810	A811	A812	A813	A826	A827	A828
A801	1	0,998	0,997	0,996	0,999	0,996	0,996	0,997	0,999	0,998	0,997	0,998	0,996	0,998
A802	0,998	1	0,996	0,997	0,998	0,999	0,996	0,998	0,997	0,999	0,994	0,995	0,995	0,998
A803	0,997	0,996	1	0,999	0,998	0,996	0,999	0,997	0,995	0,998	0,998	0,995	0,998	0,997
A804	0,996	0,997	0,999	1	0,999	0,998	0,999	0,998	0,995	0,999	0,995	0,994	0,997	0,996
A805	0,999	0,998	0,998	0,999	1	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,998	0,998
A808	0,996	0,999	0,996	0,998	0,998	1	0,998	0,999	0,995	0,999	0,993	0,994	0,996	0,997
A809	0,996	0,996	0,999	0,999	0,998	0,998	1	0,999	0,995	0,999	0,996	0,996	0,998	0,996
A810	0,997	0,998	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	1	0,997	0,999	0,993	0,997	0,997	0,995
A811	0,999	0,997	0,995	0,995	0,999	0,995	0,995	0,997	1	0,997	0,994	0,999	0,995	0,996
A812	0,998	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997	1	0,995	0,996	0,996	0,998
A813	0,997	0,994	0,998	0,995	0,996	0,993	0,996	0,993	0,994	0,995	1	0,994	0,996	0,997
A826	0,998	0,995	0,995	0,994	0,998	0,994	0,996	0,997	0,999	0,996	0,994	1	0,997	0,994
A827	0,996	0,995	0,998	0,997	0,998	0,996	0,998	0,997	0,995	0,996	0,996	0,997	1	0,994
A828	0,998	0,998	0,997	0,996	0,998	0,997	0,996	0,995	0,996	0,998	0,997	0,994	0,994	1
A829	0,998	0,996	0,997	0,996	0,998	0,994	0,997	0,997	0,998	0,996	0,997	0,999	0,998	0,995
A830	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999	0,998	0,996	0,999	0,997	0,996	0,998	0,998
A831	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,998	1	0,999	0,997	0,999	0,997	0,997	0,999	0,998
A832	0,998	0,996	0,994	0,993	0,997	0,992	0,993	0,992	0,998	0,994	0,995	0,996	0,994	0,997
A833	0,997	0,998	0,997	0,998	0,998	0,997	0,998	0,999	0,996	0,998	0,993	0,996	0,997	0,995
A834	0,999	0,998	0,997	0,997	0,999	0,998	0,997	0,998	0,997	0,999	0,995	0,996	0,995	0,999
A836	0,998	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,999	0,996	0,995	0,996	0,999
A837	0,999	0,998	0,997	0,997	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,996	0,999	0,998	0,997
A838	0,998	0,994	0,995	0,992	0,996	0,992	0,994	0,994	0,998	0,994	0,996	0,998	0,994	0,995
A839	0,996	0,998	0,998	0,999	0,998	0,999	0,998	0,998	0,995	0,999	0,994	0,993	0,995	0,998
A840	0,996	0,997	0,999	1	0,998	0,999	0,999	0,998	0,994	0,999	0,995	0,994	0,997	0,997
A844	1	0,998	0,997	0,996	0,999	0,996	0,996	0,997	0,999	0,997	0,995	0,998	0,996	0,998
A852	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999	0,996	1	0,995	0,995	0,996	0,998
A853	0,996	0,993	0,997	0,993	0,996	0,992	0,994	0,991	0,994	0,994	0,999	0,994	0,995	0,997
A854	0,998	0,999	0,998	0,999	0,999	0,998	0,997	0,997	0,996	0,998	0,995	0,995	0,996	0,998
A856	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,998	0,998	0,996	0,999	0,995	0,995	0,996	0,998
A878	0,997	0,993	0,99	0,988	0,994	0,991	0,99	0,99	0,996	0,992	0,993	0,994	0,99	0,996
A879	0,998	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999	0,998	0,999	0,997	1	0,996	0,996	0,997	0,999
A880	0,999	0,998	0,996	0,997	0,999	0,998	0,998	0,999	0,998	0,999	0,994	0,999	0,997	0,996
A881	0,995	0,994	0,997	0,995	0,995	0,992	0,994	0,991	0,992	0,993	0,998	0,991	0,995	0,997
A882	0,997	0,993	0,988	0,988	0,994	0,989	0,989	0,992	0,998	0,992	0,988	0,997	0,989	0,99
A883	0,996	0,996	0,999	0,998	0,998	0,996	0,997	0,995	0,994	0,996	0,998	0,993	0,997	0,998
A884	0,998	0,996	0,998	0,998	0,999	0,996	0,999	0,998	0,998	0,998	0,996	0,998	0,997	0,997
A886	0,999	0,995	0,994	0,992	0,996	0,992	0,992	0,992	0,997	0,994	0,996	0,995	0,992	0,997
A889	0,979	0,985	0,987	0,991	0,986	0,988	0,99	0,99	0,98	0,987	0,976	0,982	0,988	0,978
A894	0,994	0,995	0,995	0,995	0,996	0,995	0,993	0,992	0,992	0,995	0,993	0,989	0,99	0,998
A899	0,996	0,999	0,994	0,996	0,997	0,998	0,994	0,996	0,995	0,997	0,989	0,993	0,992	0,996

Tabela B.2 – Matriz de correlação para as curvas do Quartil I correspondentes a probabilidade de 50%

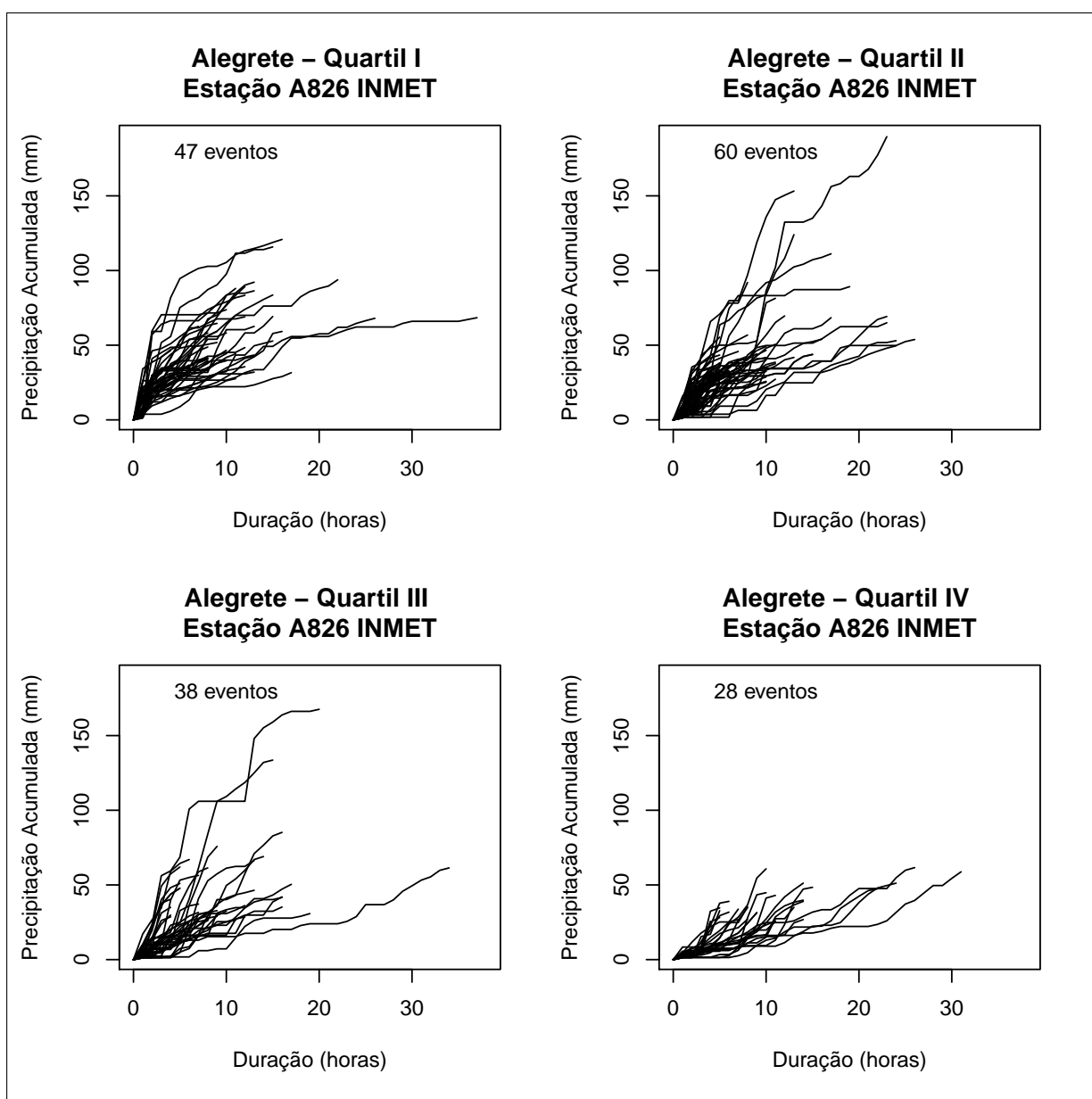
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	A829	A830	A831	A832	A833	A834	A836	A837	A838	A839	A840	A844	A852	A853
A801	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,999	0,998	0,999	0,998	0,996	0,996	1	0,997	0,996
A802	0,996	0,998	0,998	0,996	0,998	0,998	0,999	0,998	0,994	0,998	0,997	0,998	0,999	0,993
A803	0,997	0,999	0,999	0,994	0,997	0,997	0,998	0,997	0,995	0,998	0,999	0,997	0,998	0,997
A804	0,996	0,999	0,999	0,993	0,998	0,997	0,998	0,997	0,992	0,999	1	0,996	0,999	0,993
A805	0,998	0,999	0,999	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,998	0,999	0,999	0,996
A808	0,994	0,998	0,998	0,992	0,997	0,998	0,999	0,998	0,992	0,999	0,999	0,996	0,999	0,992
A809	0,997	0,999	1	0,993	0,998	0,997	0,998	0,998	0,994	0,998	0,999	0,996	0,998	0,994
A810	0,997	0,998	0,999	0,992	0,999	0,998	0,998	0,999	0,994	0,998	0,998	0,997	0,999	0,991
A811	0,998	0,996	0,997	0,998	0,996	0,997	0,997	0,999	0,998	0,995	0,994	0,999	0,996	0,994
A812	0,996	0,999	0,999	0,994	0,998	0,999	0,999	0,999	0,994	0,999	0,999	0,997	1	0,994
A813	0,997	0,997	0,997	0,995	0,993	0,995	0,996	0,996	0,996	0,994	0,995	0,995	0,995	0,999
A826	0,999	0,996	0,997	0,996	0,996	0,996	0,995	0,999	0,998	0,993	0,994	0,998	0,995	0,994
A827	0,998	0,998	0,999	0,994	0,997	0,995	0,996	0,998	0,994	0,995	0,997	0,996	0,996	0,995
A828	0,995	0,998	0,998	0,997	0,995	0,999	0,999	0,997	0,995	0,998	0,997	0,998	0,998	0,997
A829	1	0,997	0,998	0,996	0,996	0,997	0,996	0,999	0,998	0,994	0,995	0,998	0,996	0,996
A830	0,997	1	0,999	0,994	0,997	0,999	0,999	0,998	0,994	0,998	0,999	0,997	0,999	0,996
A831	0,998	0,999	1	0,995	0,999	0,998	0,999	0,999	0,995	0,999	0,999	0,998	0,999	0,995
A832	0,996	0,994	0,995	1	0,994	0,995	0,995	0,997	0,997	0,993	0,992	0,998	0,994	0,996
A833	0,996	0,997	0,999	0,994	1	0,996	0,998	0,998	0,993	0,998	0,997	0,998	0,998	0,99
A834	0,997	0,999	0,998	0,995	0,996	1	0,999	0,998	0,995	0,998	0,998	0,998	0,999	0,996
A836	0,996	0,999	0,999	0,995	0,998	0,999	1	0,999	0,995	0,999	0,999	0,998	1	0,994
A837	0,999	0,998	0,999	0,997	0,998	0,998	0,999	1	0,997	0,997	0,997	0,999	0,998	0,995
A838	0,998	0,994	0,995	0,997	0,993	0,995	0,995	0,997	1	0,992	0,991	0,998	0,993	0,996
A839	0,994	0,998	0,999	0,993	0,998	0,998	0,999	0,997	0,992	1	0,999	0,996	1	0,993
A840	0,995	0,999	0,999	0,992	0,997	0,998	0,999	0,997	0,991	0,999	1	0,995	1	0,994
A844	0,998	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,998	0,996	0,995	1	0,997	0,995
A852	0,996	0,999	0,999	0,994	0,998	0,999	1	0,998	0,993	1	1	0,997	1	0,994
A853	0,996	0,996	0,995	0,996	0,99	0,996	0,994	0,995	0,996	0,993	0,994	0,995	0,994	1
A854	0,996	0,998	0,999	0,995	0,999	0,998	0,999	0,997	0,993	0,999	0,998	0,998	0,999	0,993
A856	0,996	0,999	0,999	0,995	0,999	0,998	0,999	0,998	0,993	1	0,999	0,998	1	0,994
A878	0,994	0,992	0,992	0,998	0,989	0,995	0,993	0,995	0,996	0,99	0,988	0,996	0,991	0,995
A879	0,997	0,999	0,999	0,995	0,998	0,999	1	0,999	0,995	0,999	0,999	0,998	0,999	0,995
A880	0,998	0,998	0,998	0,995	0,998	0,998	0,998	0,999	0,996	0,996	0,996	0,999	0,998	0,992
A881	0,995	0,995	0,996	0,996	0,992	0,994	0,995	0,994	0,994	0,994	0,995	0,995	0,995	0,998
A882	0,995	0,99	0,991	0,994	0,993	0,993	0,992	0,995	0,995	0,989	0,987	0,997	0,99	0,987
A883	0,996	0,998	0,998	0,995	0,995	0,997	0,997	0,996	0,994	0,997	0,998	0,996	0,998	0,998
A884	0,998	0,998	0,999	0,996	0,997	0,998	0,998	0,999	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998	0,996
A886	0,996	0,994	0,994	0,999	0,993	0,996	0,995	0,996	0,998	0,993	0,991	0,998	0,994	0,996
A889	0,982	0,987	0,989	0,973	0,991	0,982	0,985	0,985	0,972	0,988	0,99	0,981	0,989	0,972
A894	0,99	0,996	0,995	0,993	0,992	0,996	0,996	0,993	0,99	0,997	0,996	0,994	0,997	0,994
A899	0,992	0,996	0,996	0,992	0,997	0,997	0,998	0,996	0,99	0,998	0,997	0,996	0,998	0,989

Tabela B.3 – Matriz de correlação para as curvas do Quartil I correspondentes a probabilidade de 50%

	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
	A854	A856	A878	A879	A880	A881	A882	A883	A884	A886	A889	A894	A899
A801	0,998	0,997	0,997	0,998	0,999	0,995	0,997	0,996	0,998	0,999	0,979	0,994	0,996
A802	0,999	0,999	0,993	0,999	0,998	0,994	0,993	0,996	0,996	0,995	0,985	0,995	0,999
A803	0,998	0,998	0,99	0,998	0,996	0,997	0,988	0,999	0,998	0,994	0,987	0,995	0,994
A804	0,999	0,999	0,988	0,998	0,997	0,995	0,988	0,998	0,998	0,992	0,991	0,995	0,996
A805	0,999	0,999	0,994	0,999	0,999	0,995	0,994	0,998	0,999	0,996	0,986	0,996	0,997
A808	0,998	0,999	0,991	0,999	0,998	0,992	0,989	0,996	0,996	0,992	0,988	0,995	0,998
A809	0,997	0,998	0,99	0,998	0,998	0,994	0,989	0,997	0,999	0,992	0,99	0,993	0,994
A810	0,997	0,998	0,99	0,999	0,999	0,991	0,992	0,995	0,998	0,992	0,99	0,992	0,996
A811	0,996	0,996	0,996	0,997	0,998	0,992	0,998	0,994	0,998	0,997	0,98	0,992	0,995
A812	0,998	0,999	0,992	1	0,999	0,993	0,992	0,996	0,998	0,994	0,987	0,995	0,997
A813	0,995	0,995	0,993	0,996	0,994	0,998	0,988	0,998	0,996	0,996	0,976	0,993	0,989
A826	0,995	0,995	0,994	0,996	0,999	0,991	0,997	0,993	0,998	0,995	0,982	0,989	0,993
A827	0,996	0,996	0,99	0,997	0,997	0,995	0,989	0,997	0,997	0,992	0,988	0,99	0,992
A828	0,998	0,998	0,996	0,999	0,996	0,997	0,99	0,998	0,997	0,997	0,978	0,998	0,996
A829	0,996	0,996	0,994	0,997	0,998	0,995	0,995	0,996	0,998	0,996	0,982	0,99	0,992
A830	0,998	0,999	0,992	0,999	0,998	0,995	0,99	0,998	0,998	0,994	0,987	0,996	0,996
A831	0,999	0,999	0,992	0,999	0,998	0,996	0,991	0,998	0,999	0,994	0,989	0,995	0,996
A832	0,995	0,995	0,998	0,995	0,995	0,996	0,994	0,995	0,996	0,999	0,973	0,993	0,992
A833	0,999	0,999	0,989	0,998	0,998	0,992	0,993	0,995	0,997	0,993	0,991	0,992	0,997
A834	0,998	0,998	0,995	0,999	0,998	0,994	0,993	0,997	0,998	0,996	0,982	0,996	0,997
A836	0,999	0,999	0,993	1	0,998	0,995	0,992	0,997	0,998	0,995	0,985	0,996	0,998
A837	0,997	0,998	0,995	0,999	0,999	0,994	0,995	0,996	0,999	0,996	0,985	0,993	0,996
A838	0,993	0,993	0,996	0,995	0,996	0,994	0,995	0,994	0,997	0,998	0,972	0,99	0,99
A839	0,999	1	0,99	0,999	0,996	0,994	0,989	0,997	0,997	0,993	0,988	0,997	0,998
A840	0,998	0,999	0,988	0,999	0,996	0,995	0,987	0,998	0,997	0,991	0,99	0,996	0,997
A844	0,998	0,998	0,996	0,998	0,999	0,995	0,997	0,996	0,998	0,998	0,981	0,994	0,996
A852	0,999	1	0,991	0,999	0,998	0,995	0,99	0,998	0,998	0,994	0,989	0,997	0,998
A853	0,993	0,994	0,995	0,995	0,992	0,998	0,987	0,998	0,996	0,996	0,972	0,994	0,989
A854	1	1	0,991	0,998	0,997	0,995	0,992	0,997	0,997	0,994	0,988	0,996	0,998
A856	1	1	0,991	0,999	0,997	0,995	0,991	0,998	0,997	0,994	0,988	0,997	0,998
A878	0,991	0,991	1	0,994	0,994	0,992	0,993	0,991	0,993	0,999	0,964	0,99	0,989
A879	0,998	0,999	0,994	1	0,999	0,995	0,992	0,997	0,998	0,995	0,985	0,996	0,997
A880	0,997	0,997	0,994	0,999	1	0,992	0,996	0,994	0,997	0,995	0,986	0,991	0,996
A881	0,995	0,995	0,992	0,995	0,992	1	0,985	0,999	0,995	0,995	0,976	0,995	0,989
A882	0,992	0,991	0,993	0,992	0,996	0,985	1	0,986	0,992	0,995	0,973	0,985	0,991
A883	0,997	0,998	0,991	0,997	0,994	0,999	0,986	1	0,997	0,994	0,982	0,997	0,994
A884	0,997	0,997	0,993	0,998	0,997	0,995	0,992	0,997	1	0,995	0,985	0,994	0,994
A886	0,994	0,994	0,999	0,995	0,995	0,995	0,995	0,994	0,995	1	0,97	0,993	0,991
A889	0,988	0,988	0,964	0,985	0,986	0,976	0,973	0,982	0,985	0,97	1	0,977	0,987
A894	0,996	0,997	0,99	0,996	0,991	0,995	0,985	0,997	0,994	0,993	0,977	1	0,995
A899	0,998	0,998	0,989	0,997	0,996	0,989	0,991	0,994	0,994	0,991	0,987	0,995	1

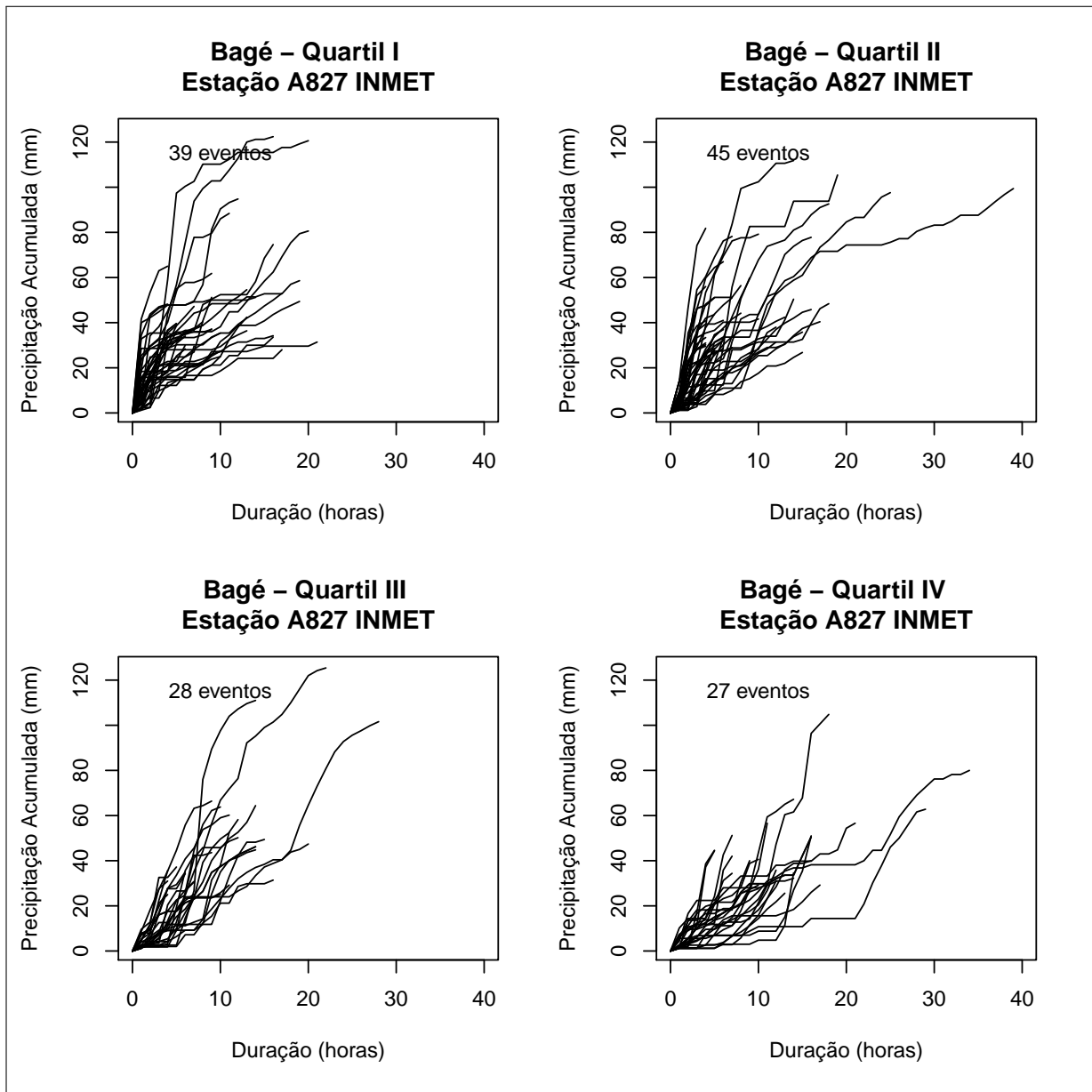
## APÊNDICE C – CURVAS DE MASSA EVENTOS SIGNIFICATIVOS

Figura C.1 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Alegrete



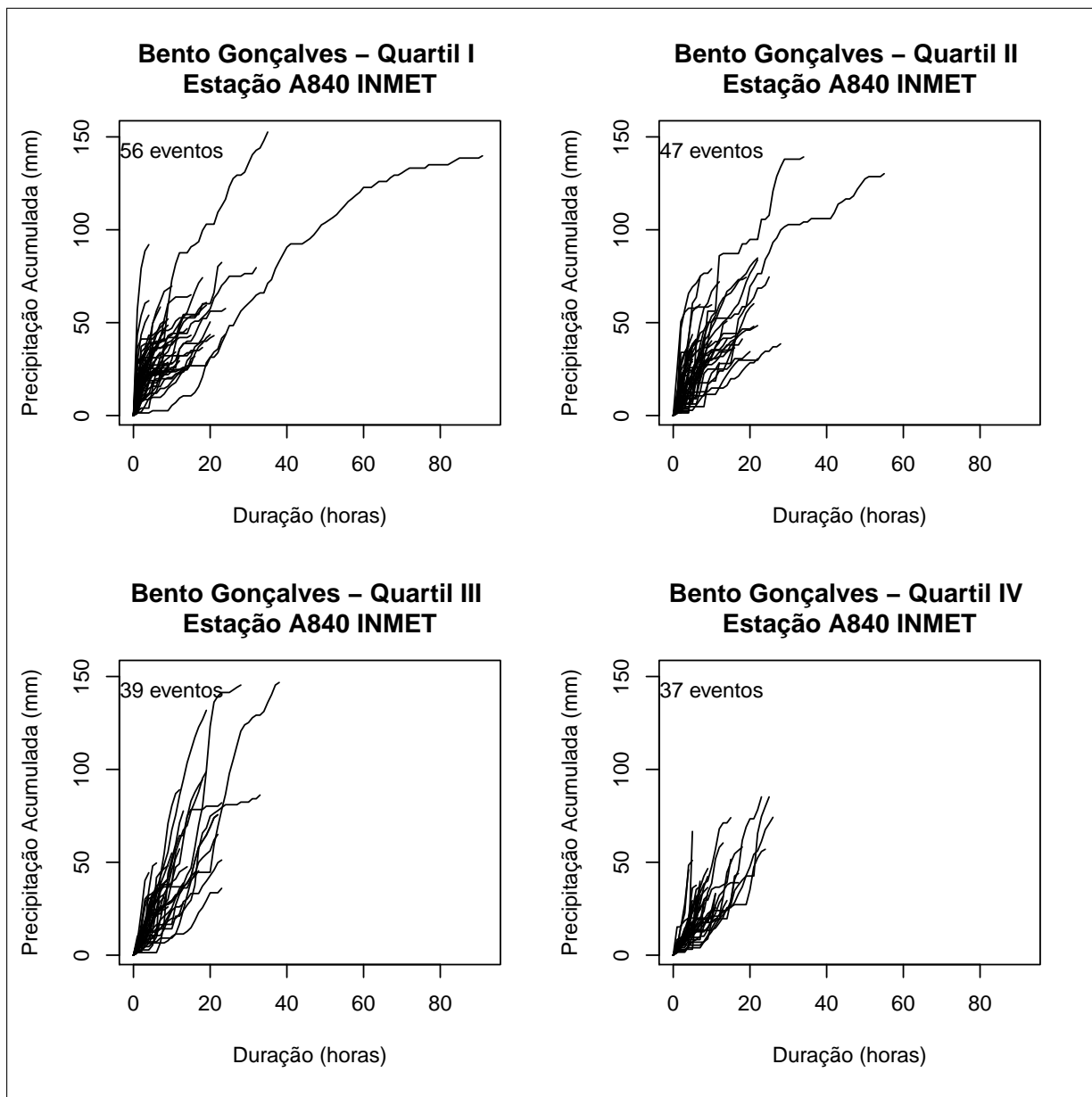
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.2 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Bagé



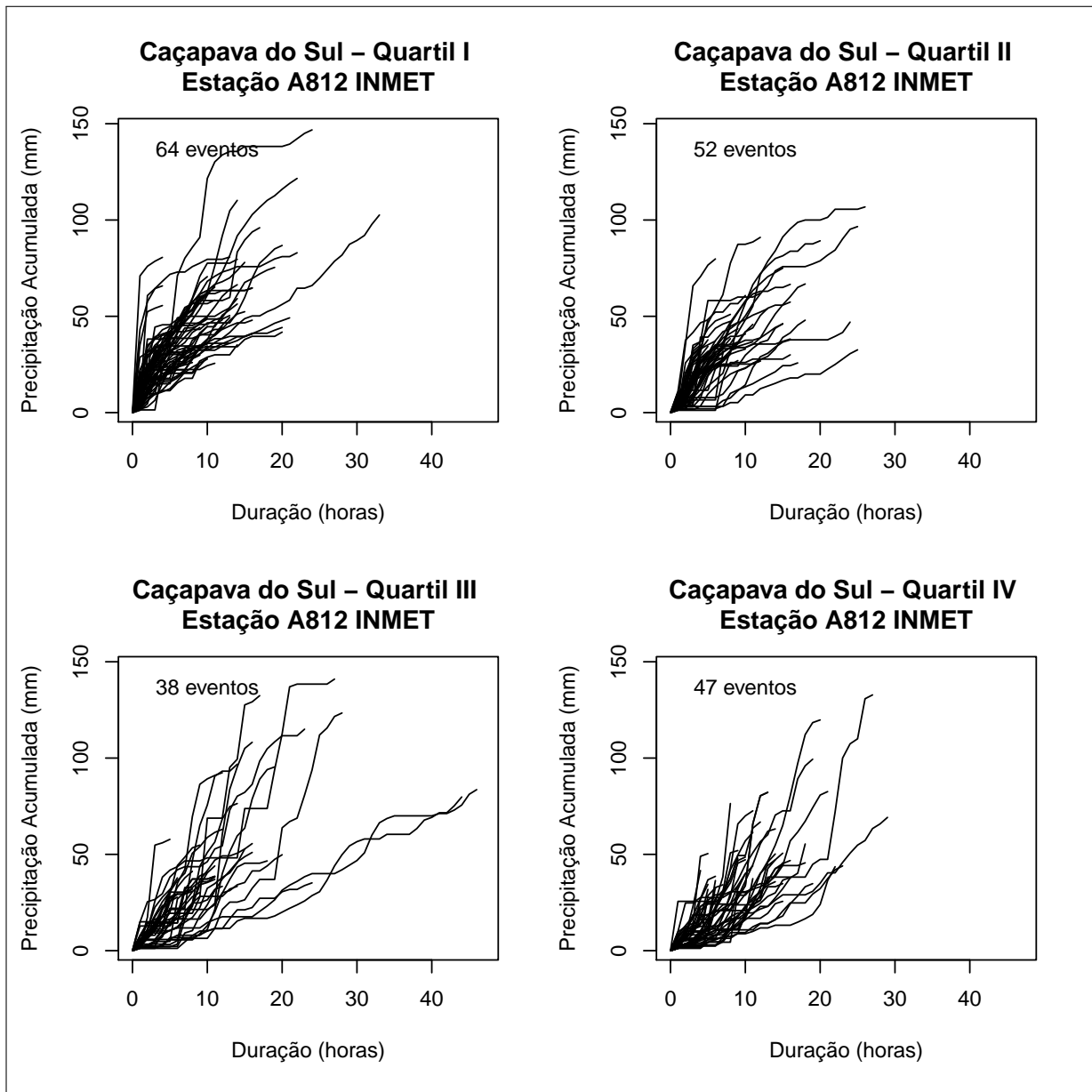
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.3 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Bento Gonçalves



Fonte: Elaborado pela autora.

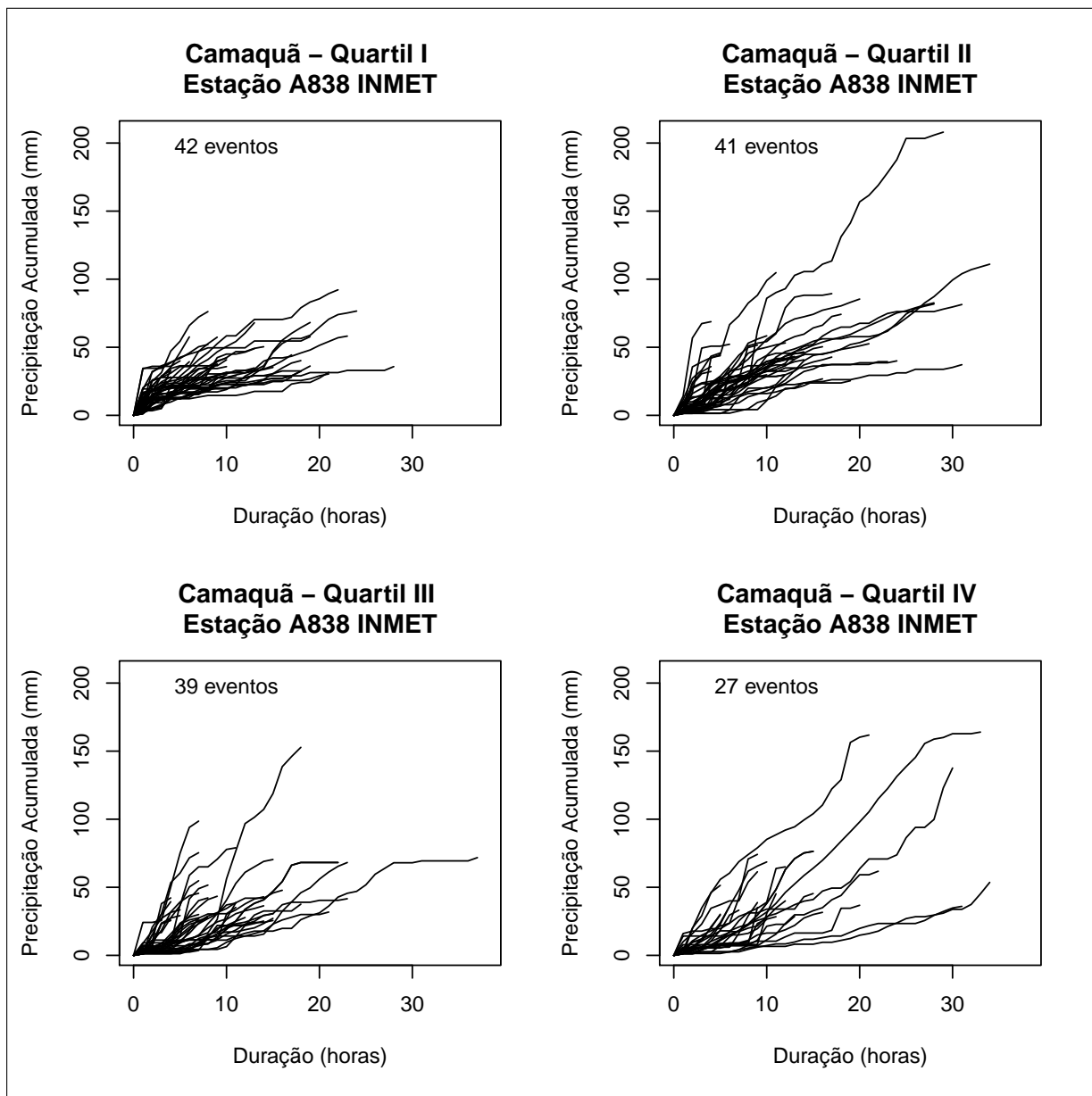
Figura C.4 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Caçapava do Sul



Fonte: Elaborado pela autora.

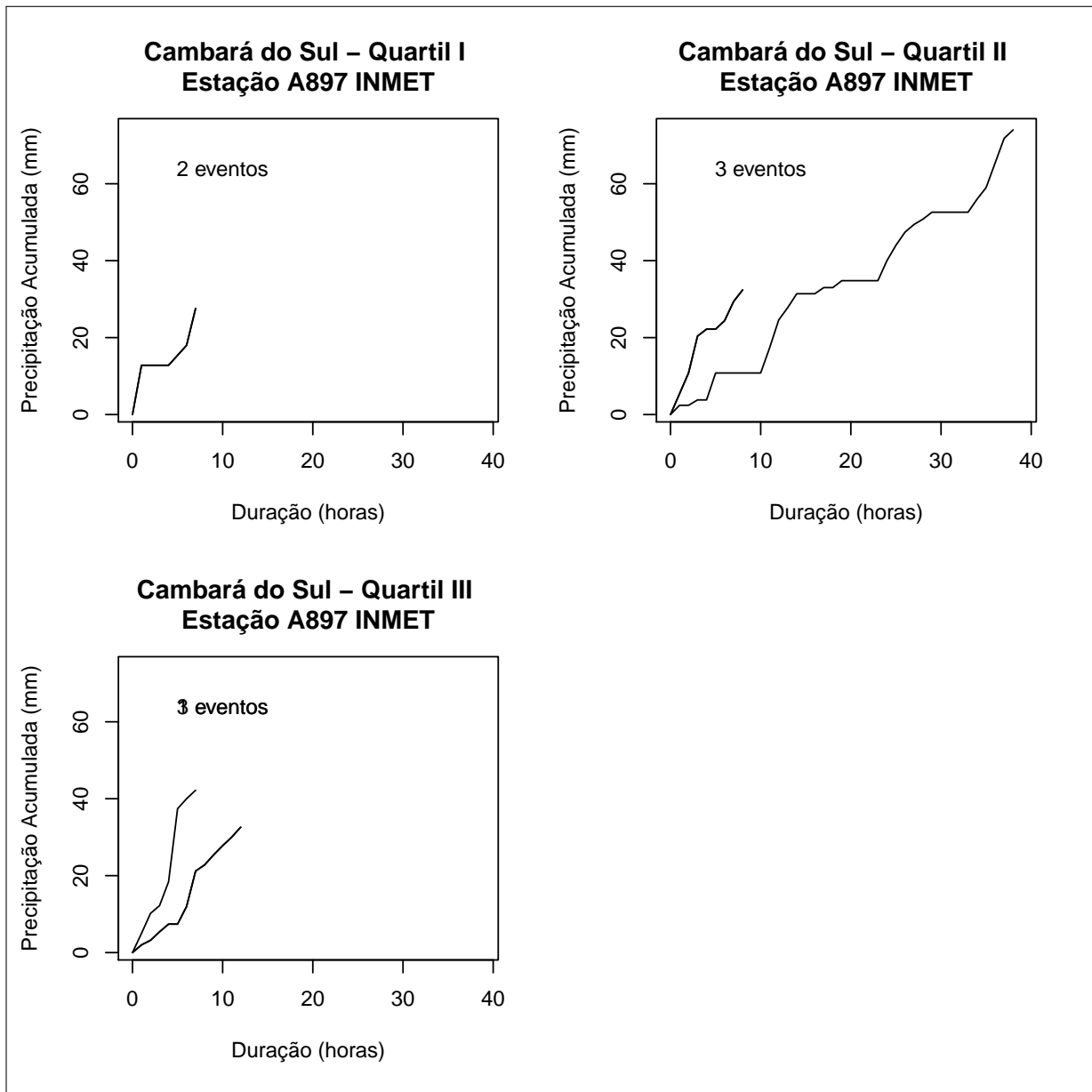


Figura C.5 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Camaquã



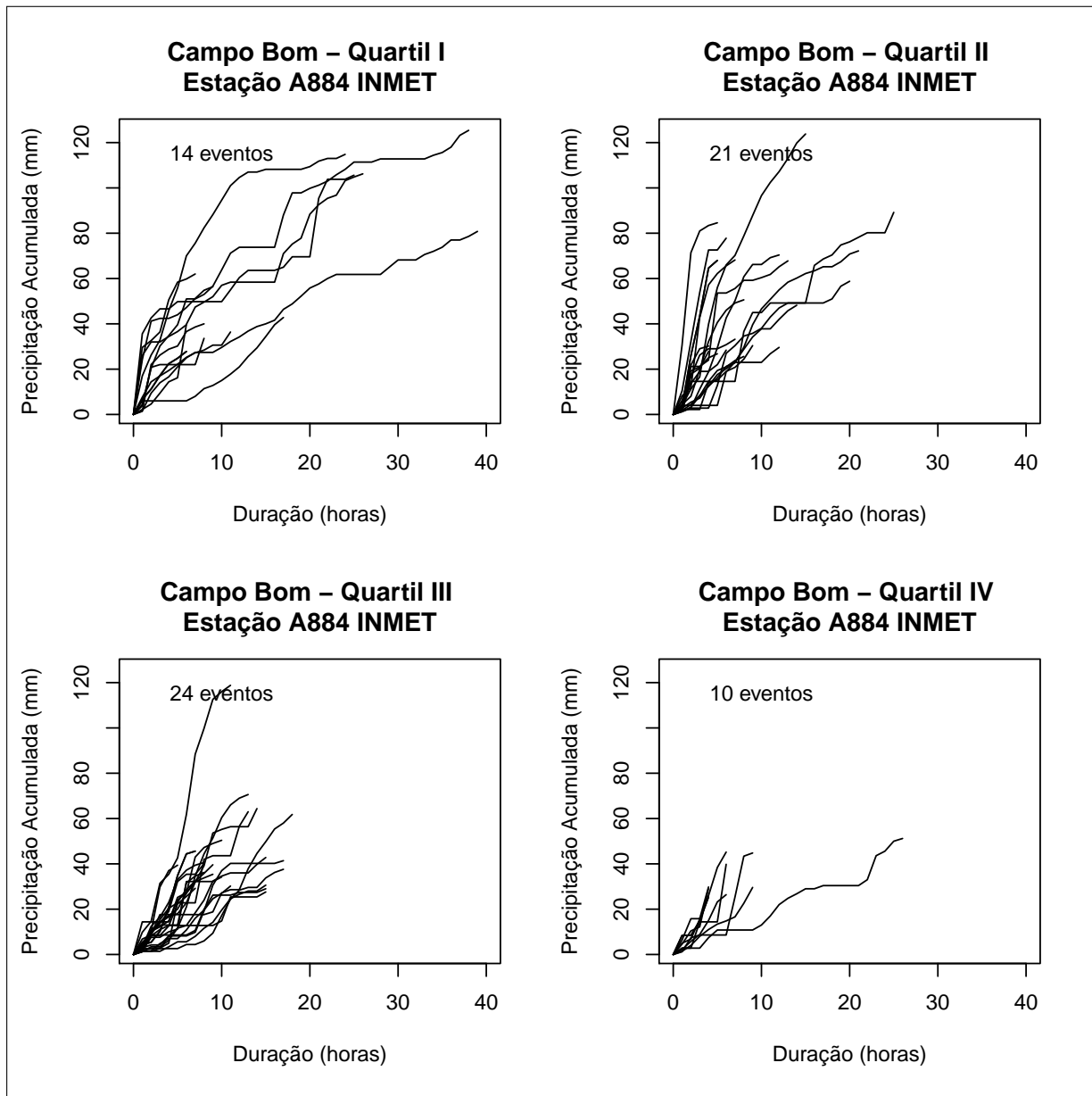
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.6 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Cambará do Sul



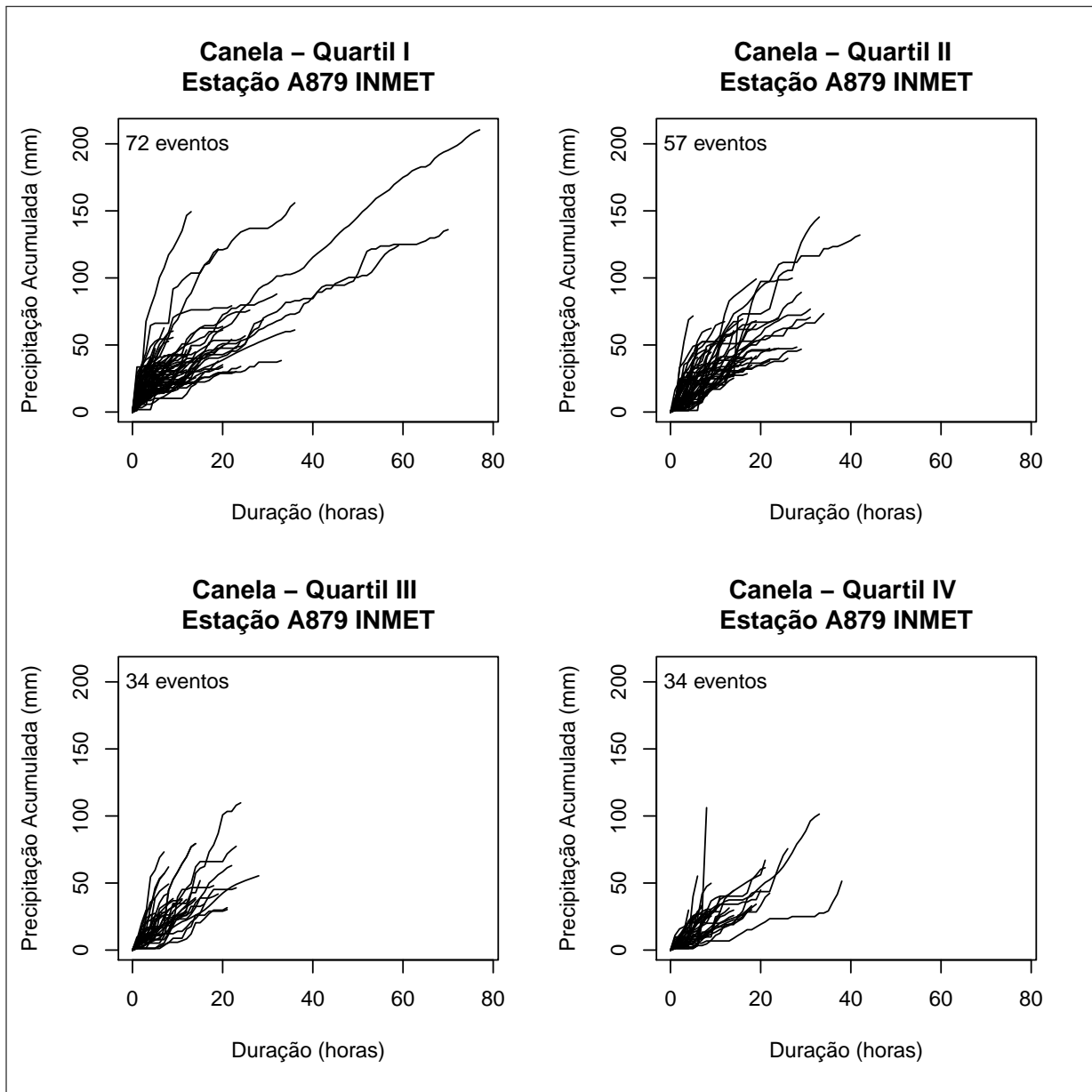
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.7 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Campo Bom



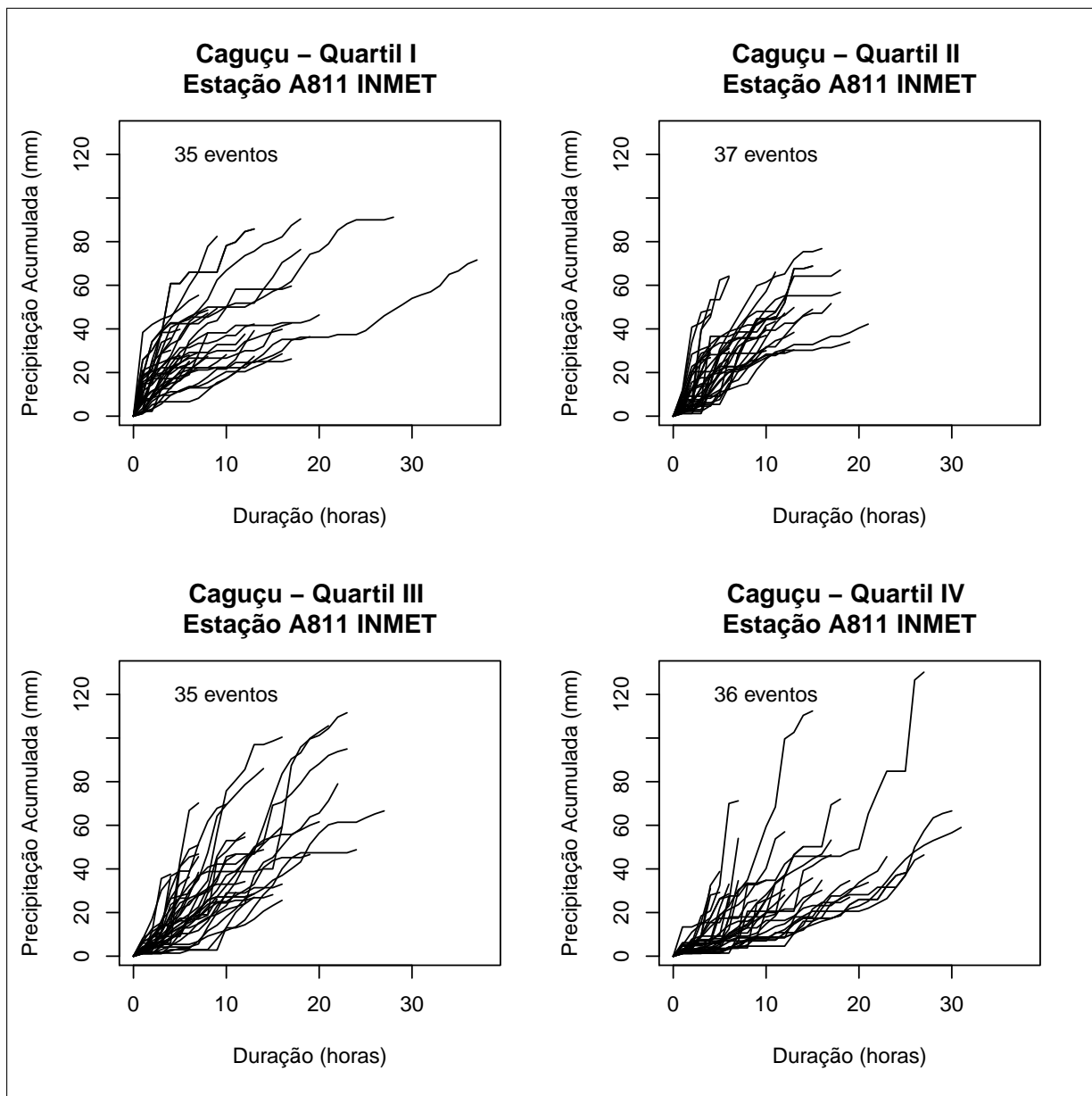
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.8 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Canela



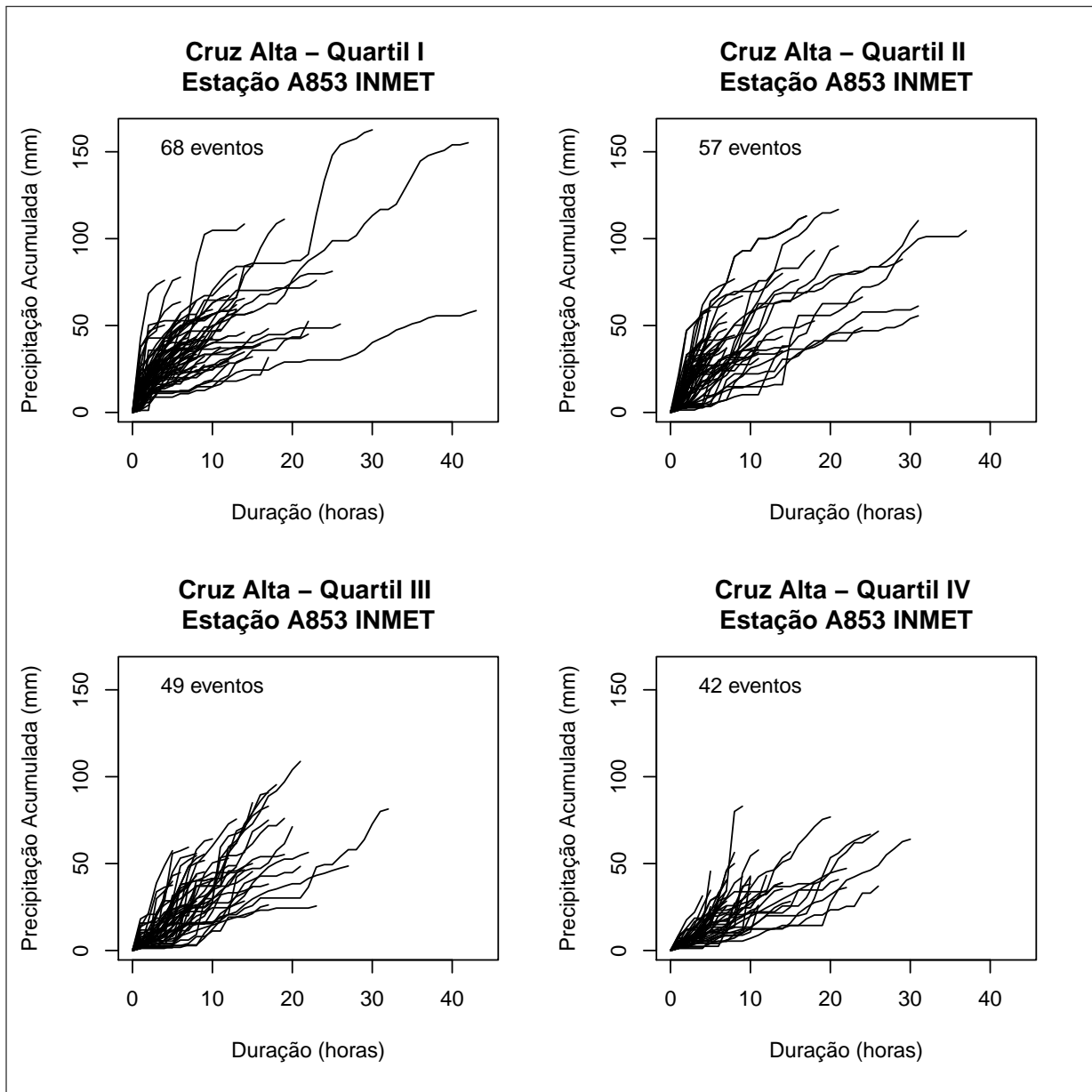
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.9 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Canguçu



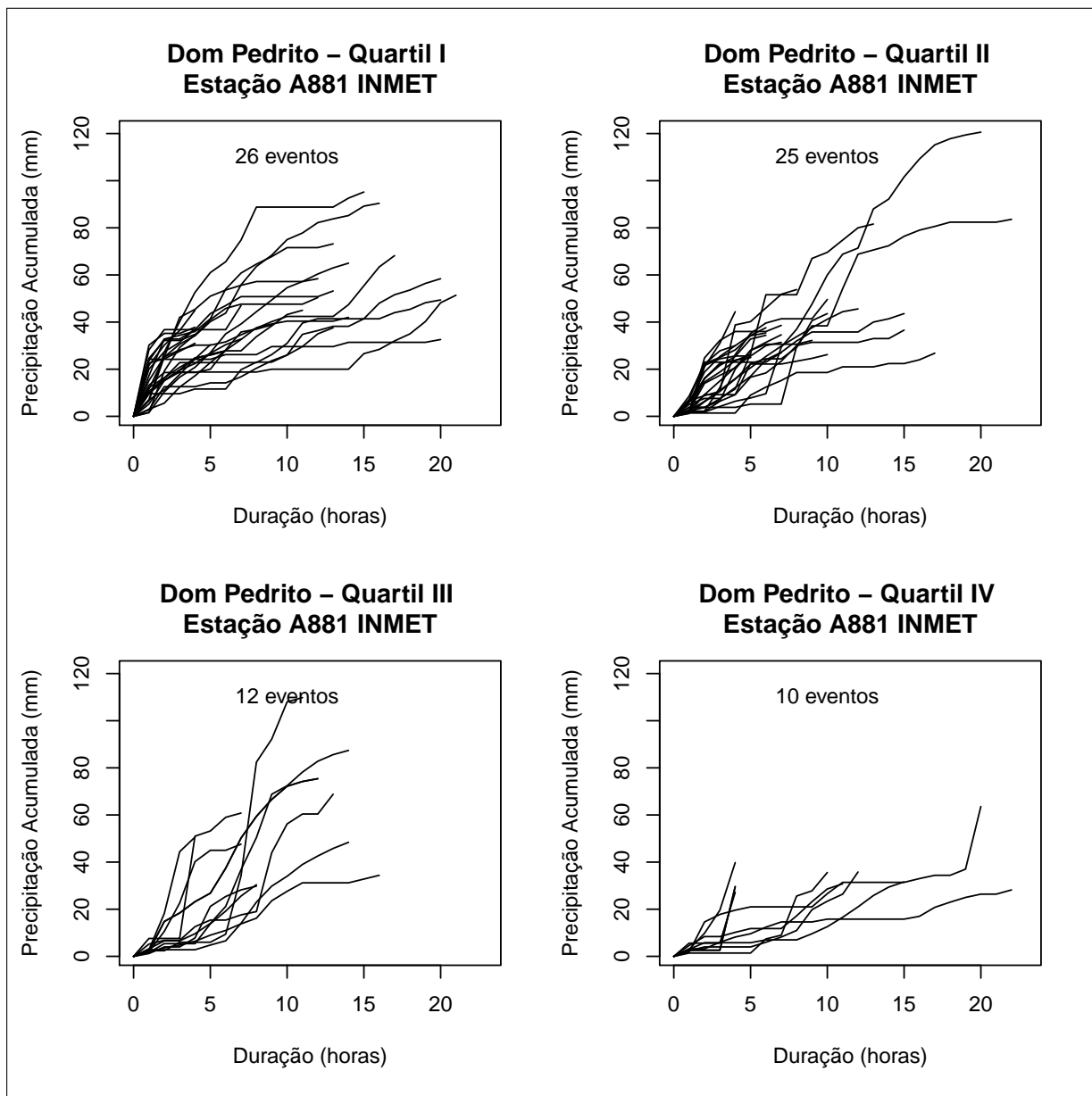
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.10 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Cruz Alta



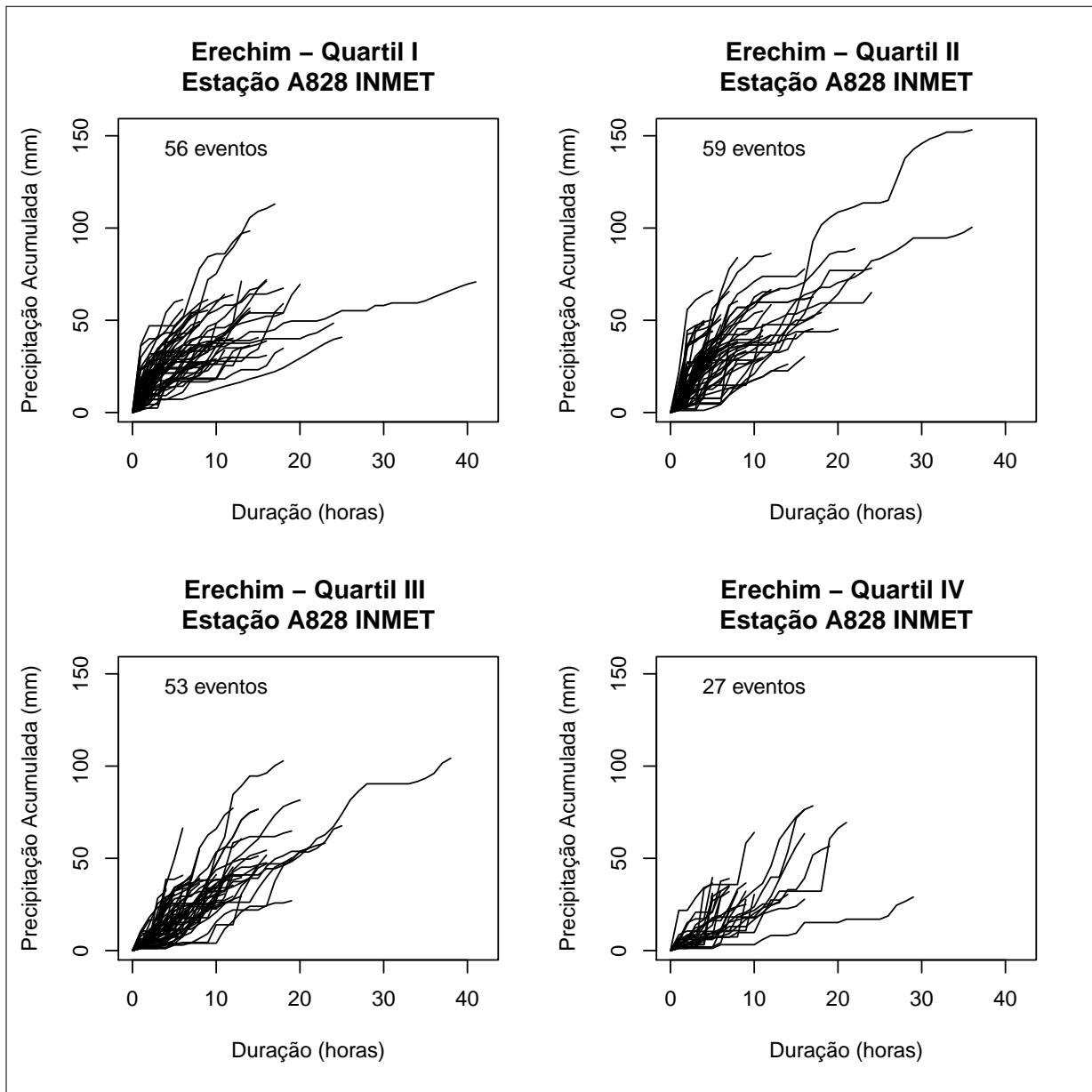
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.11 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Dom Pedrito



Fonte: Elaborado pela autora.

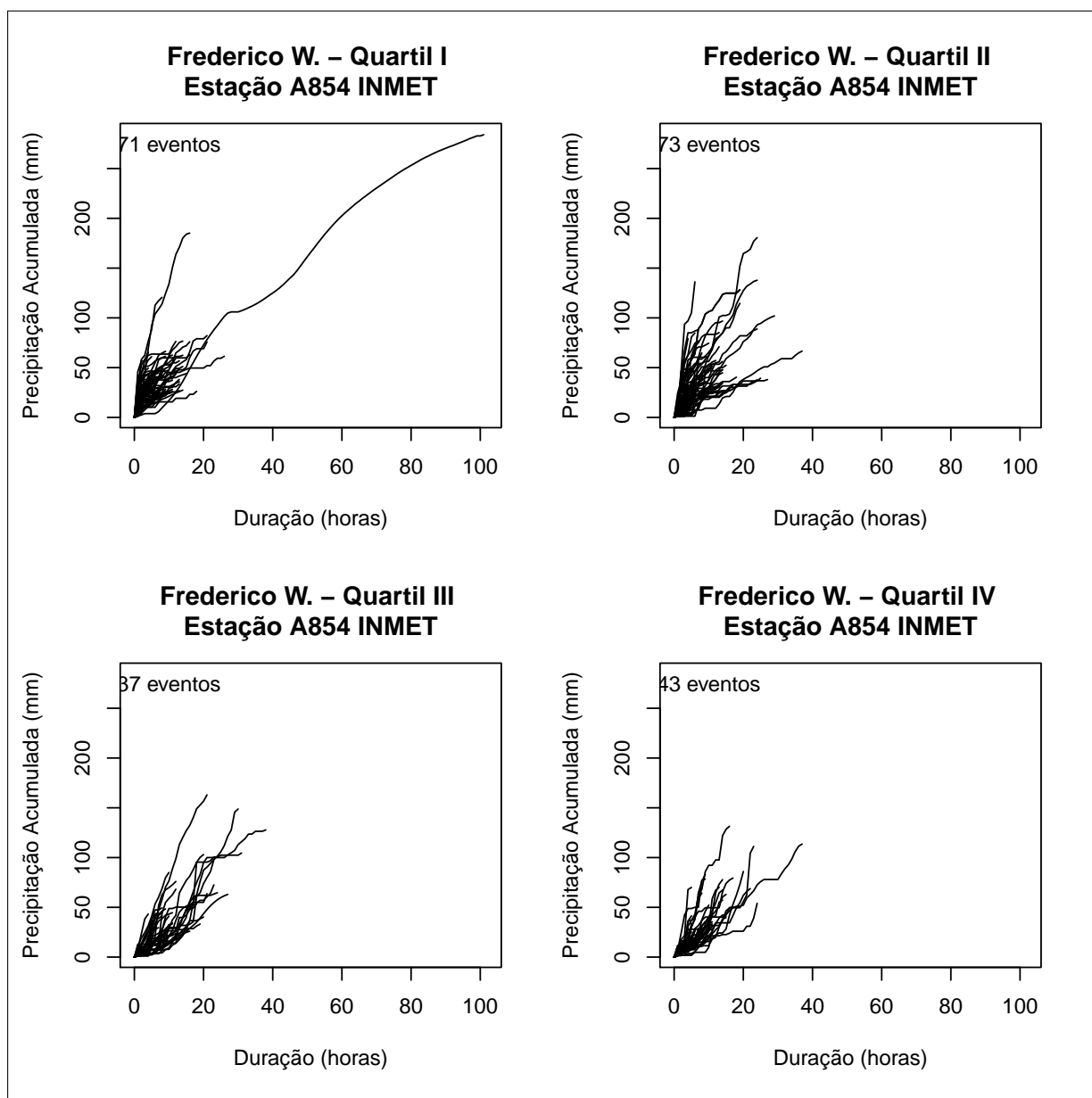
Figura C.12 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Erechim



Fonte: Elaborado pela autora.

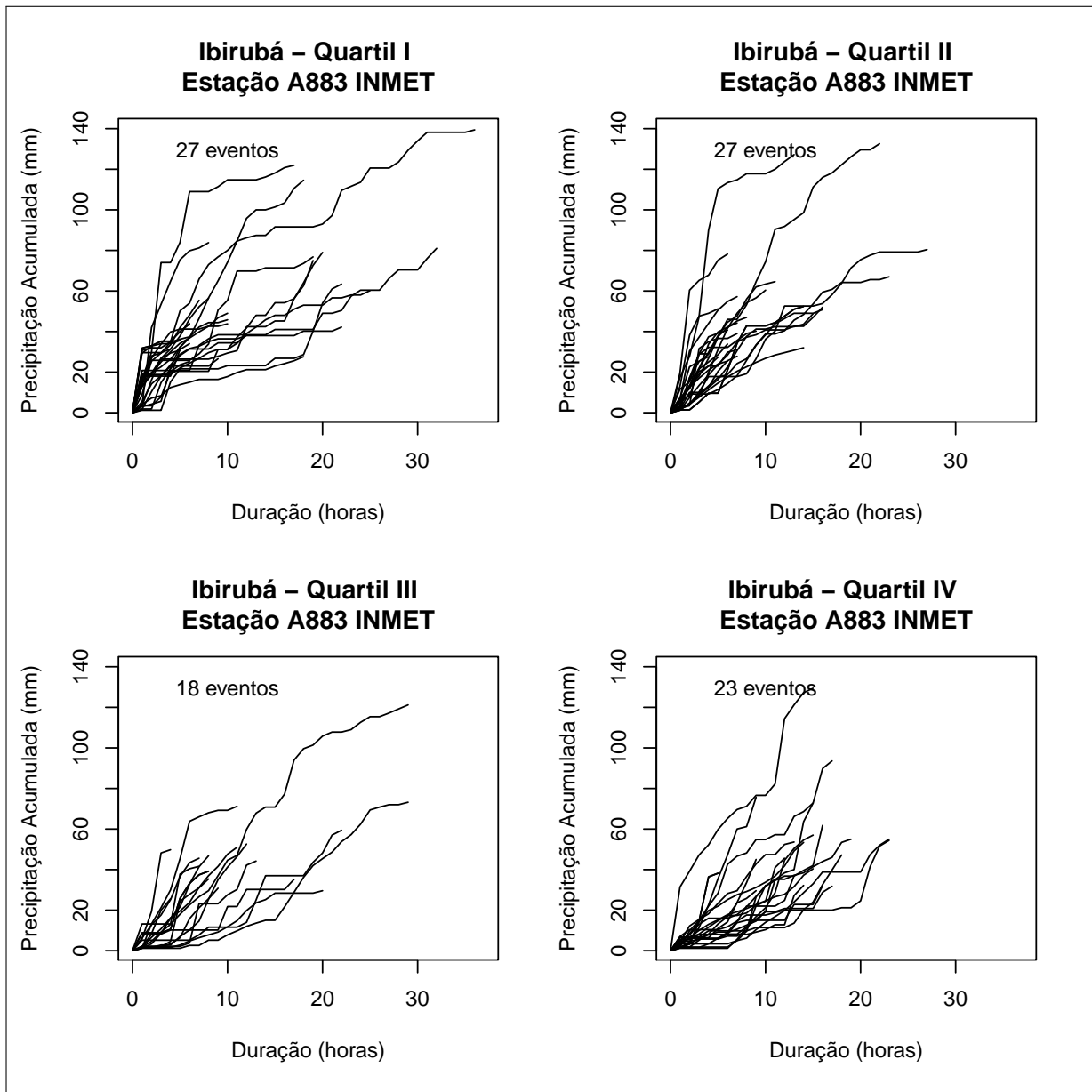


Figura C.13 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Frederico W.



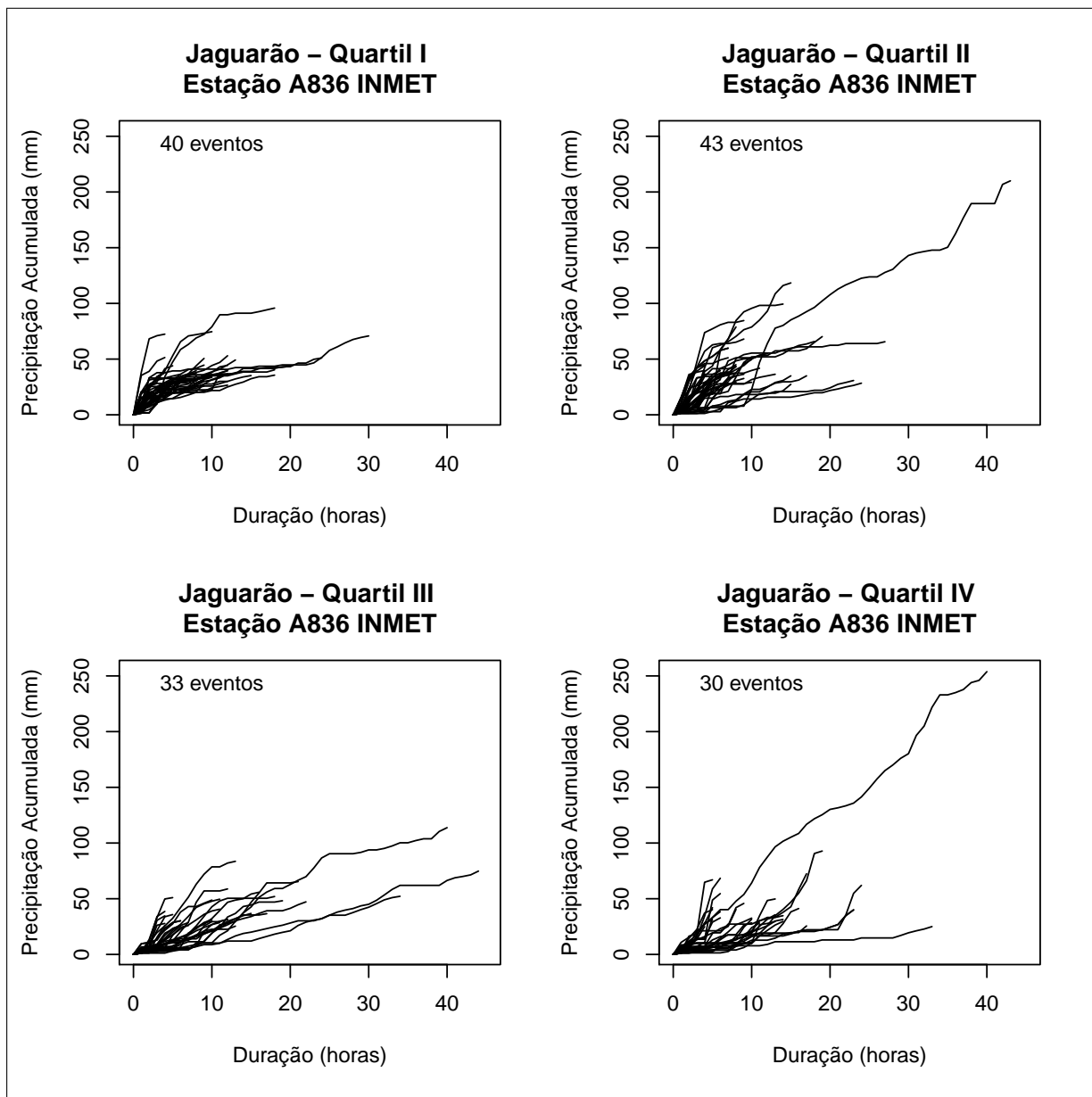
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.14 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Ibirubá



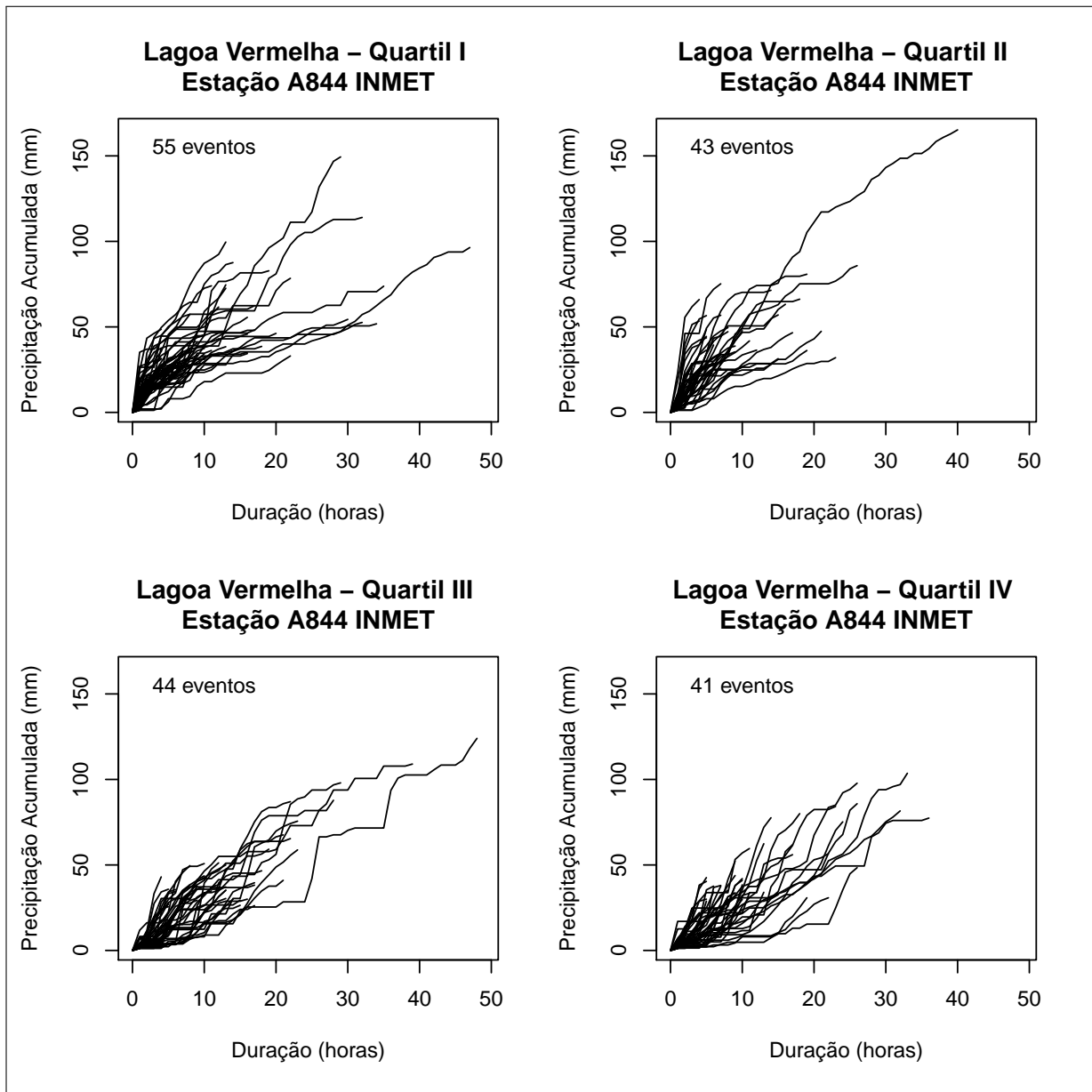
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.15 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Jaguarão



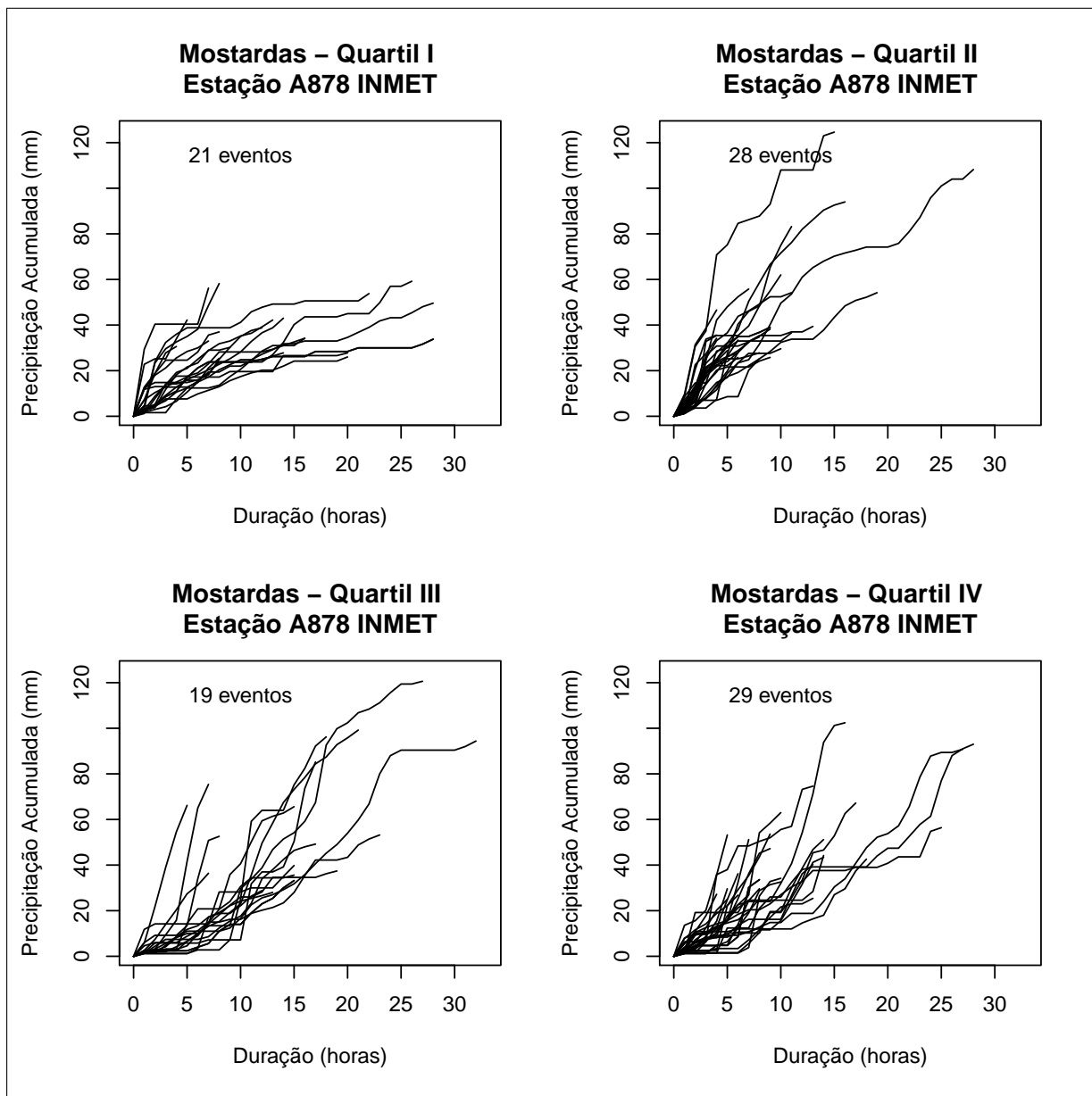
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.16 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Lagoa Vermelha



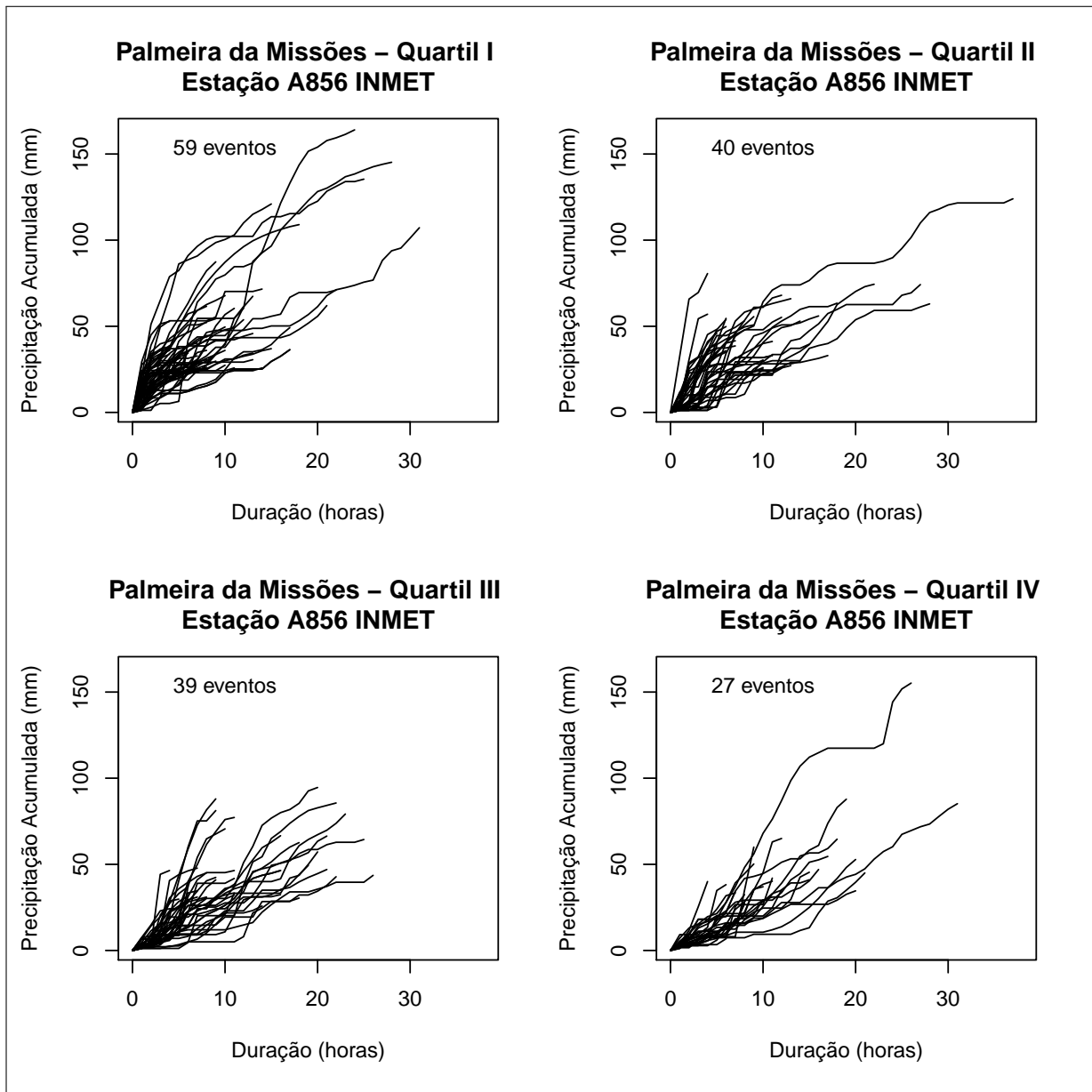
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.17 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Mostardas



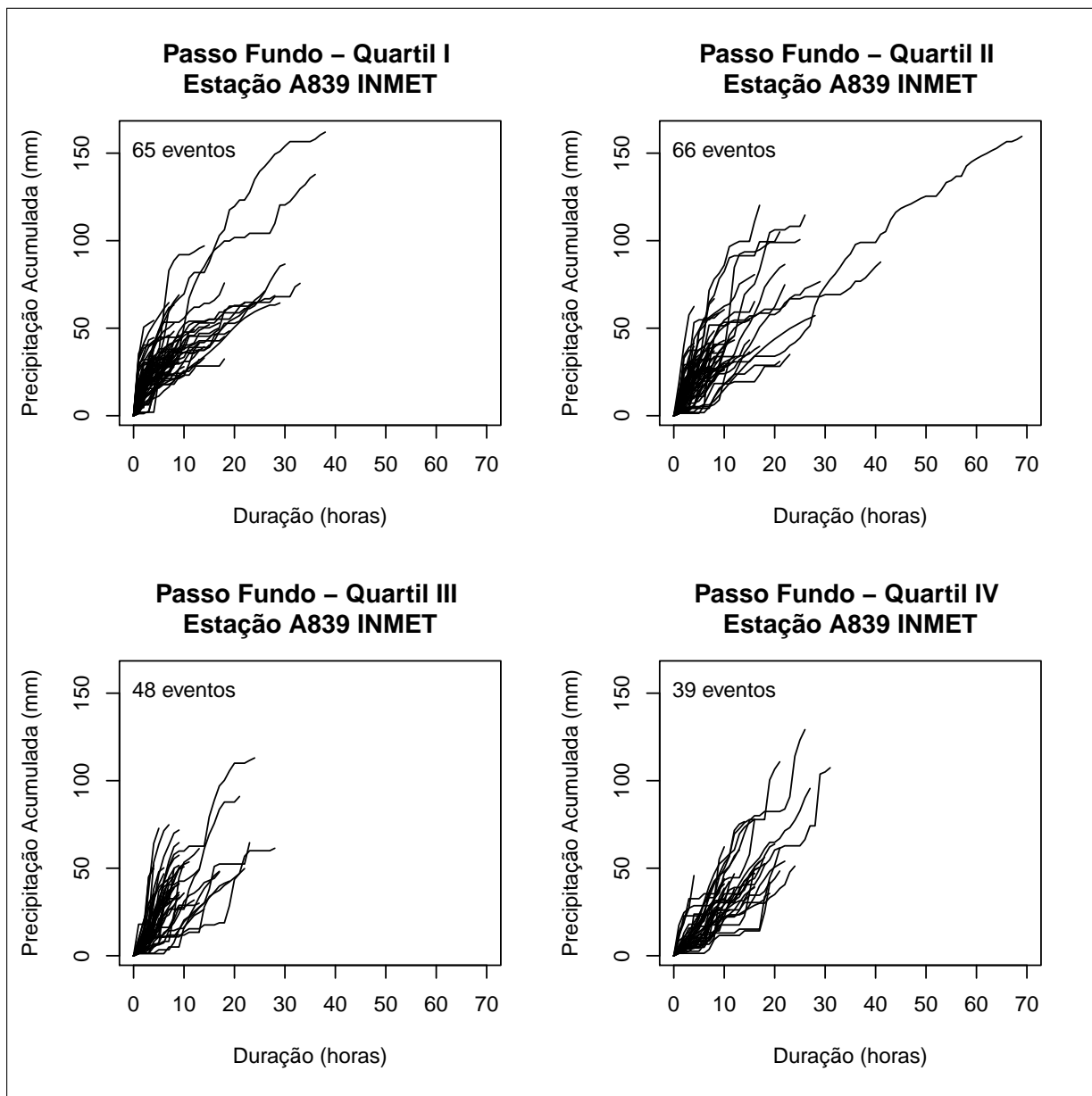
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.18 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Palmeiras das Missões



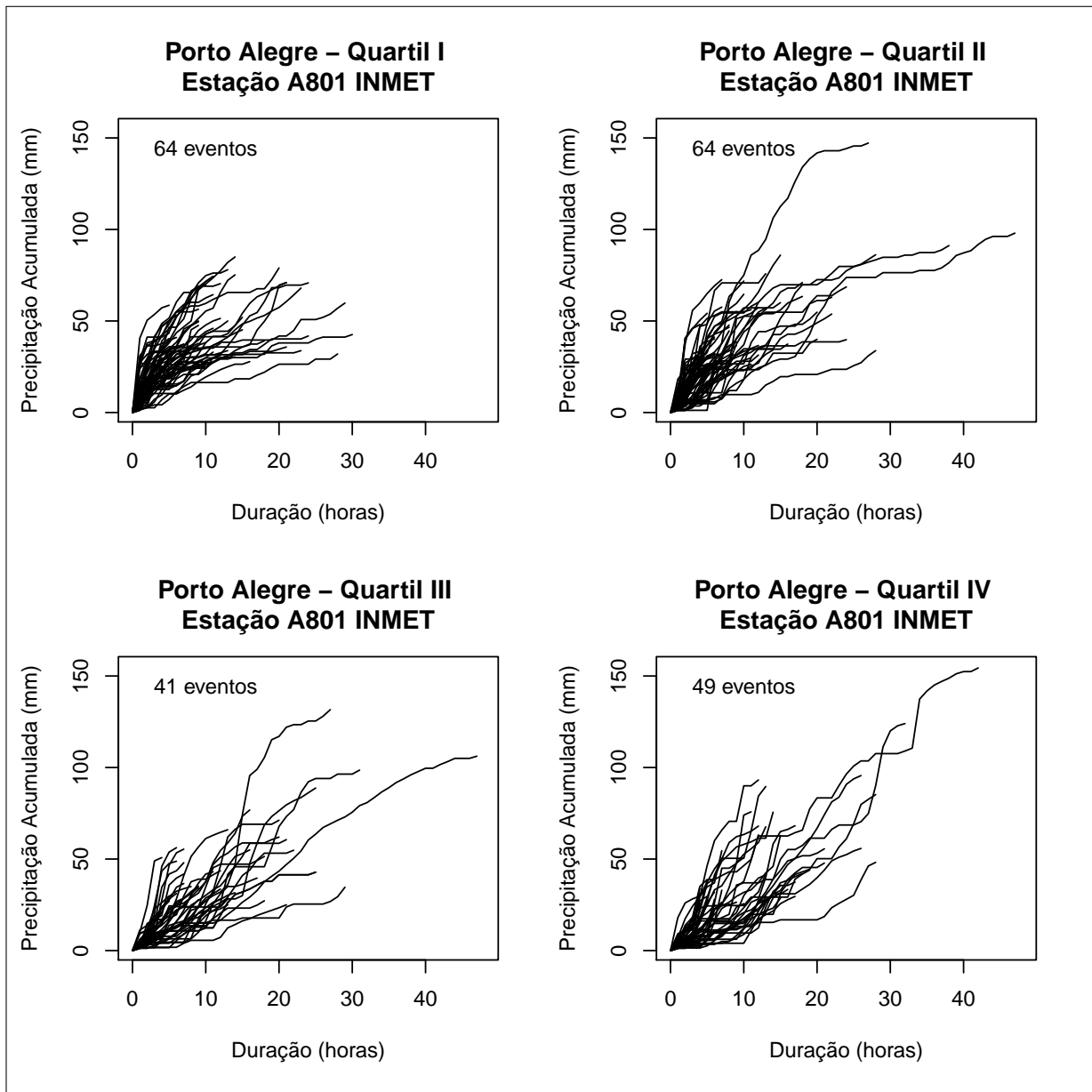
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.19 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Passo Fundo



Fonte: Elaborado pela autora.

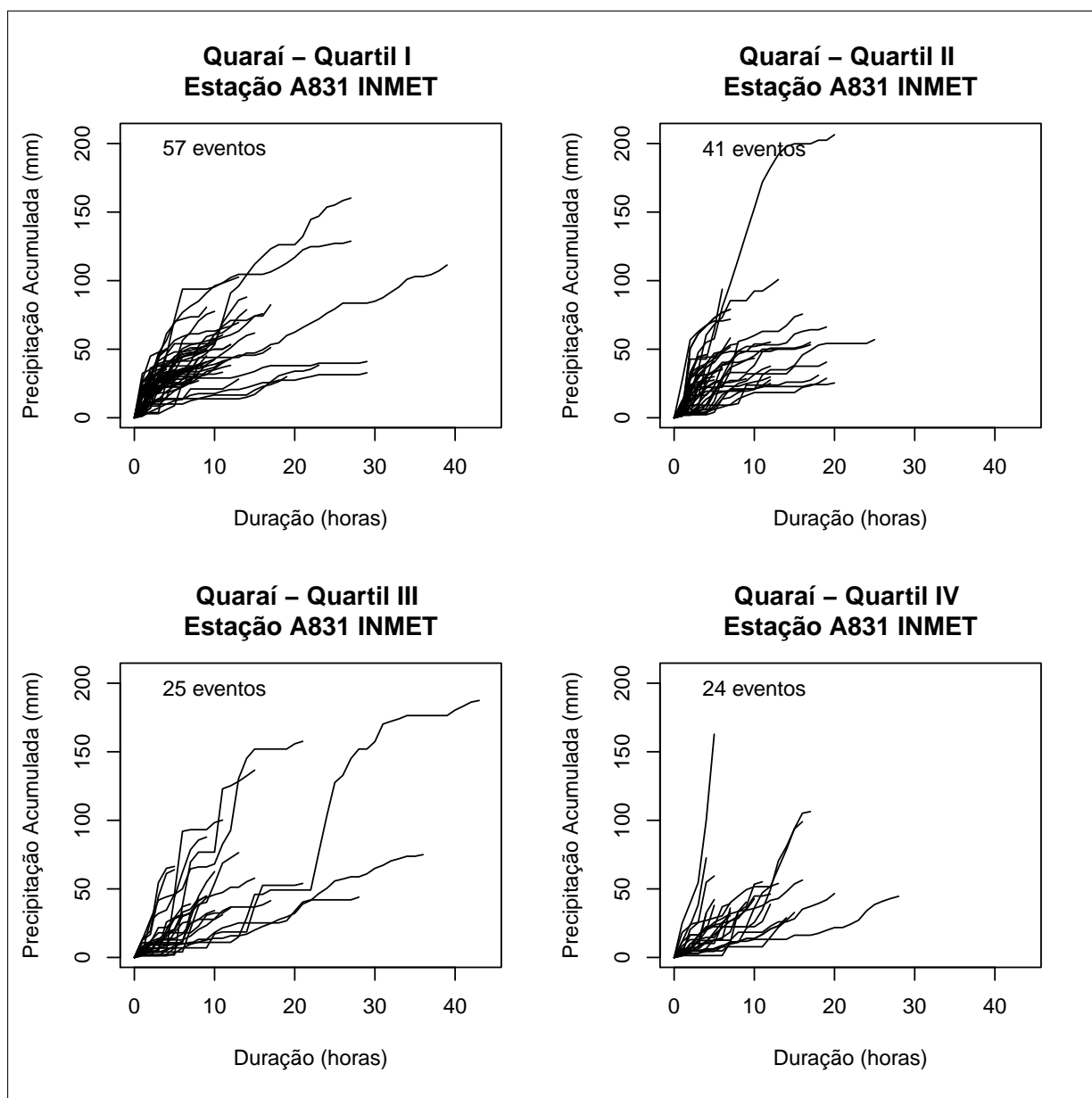
Figura C.20 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Porto Alegre



Fonte: Elaborado pela autora.

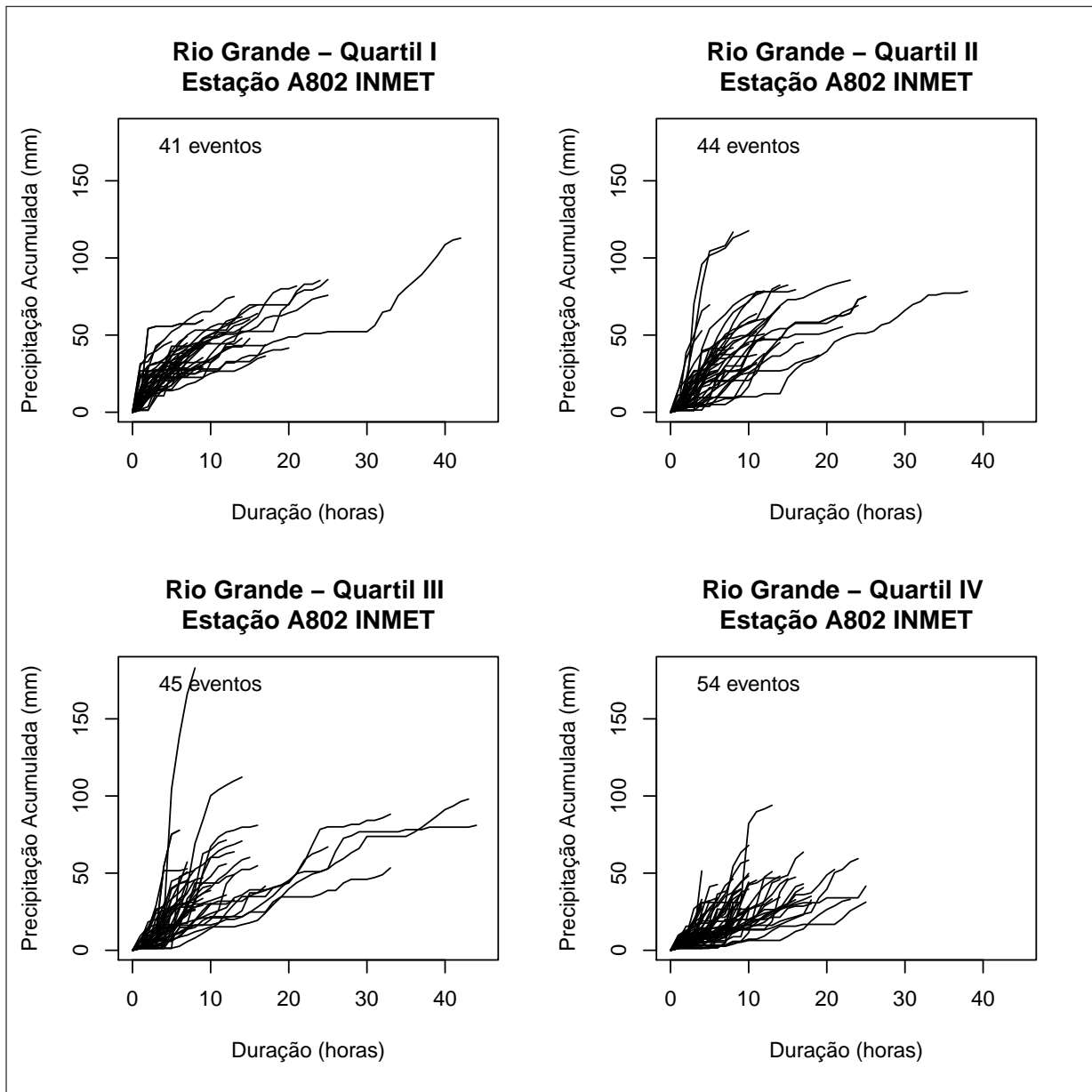


Figura C.21 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Quaraí



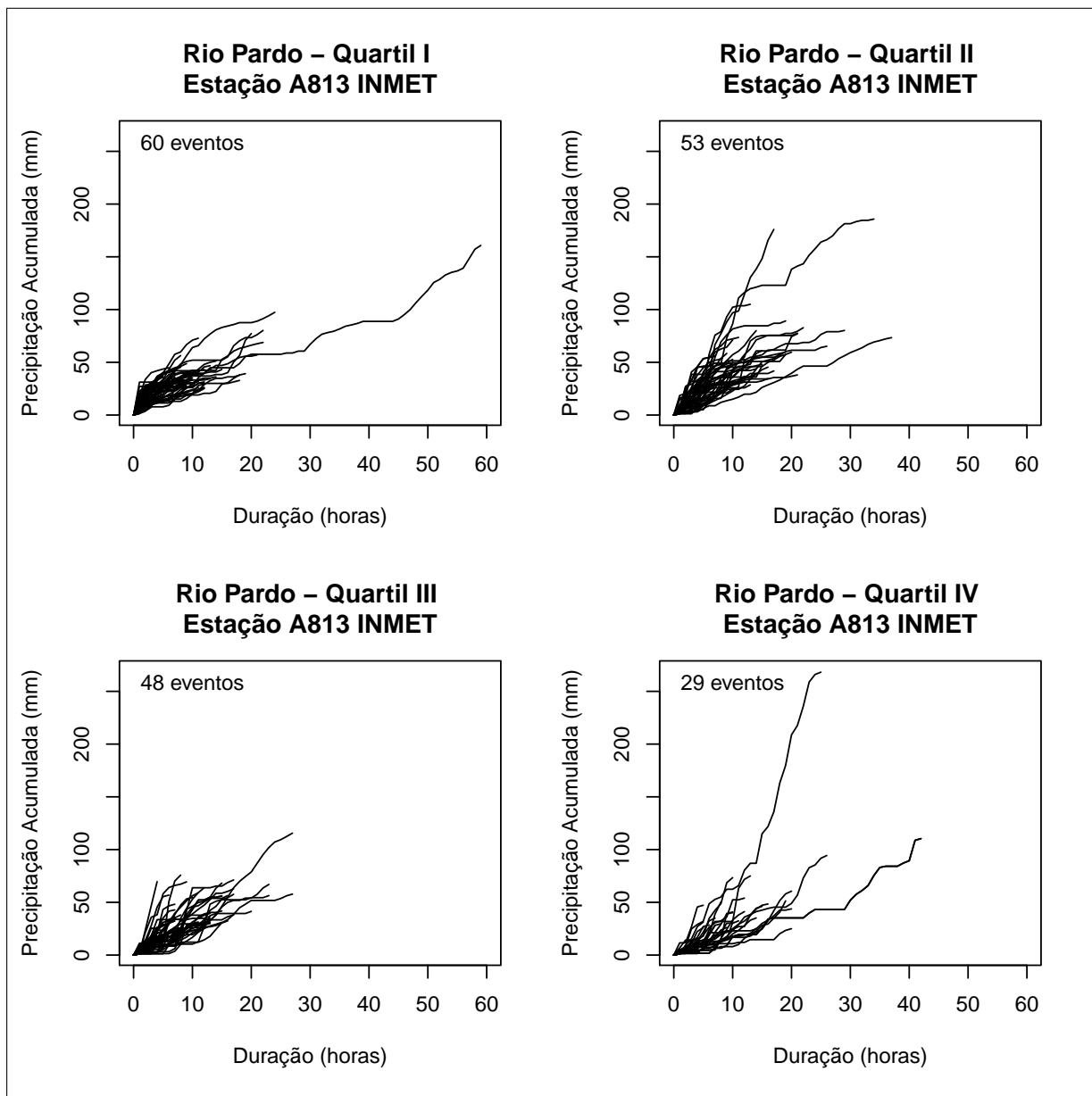
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.22 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Rio Grande



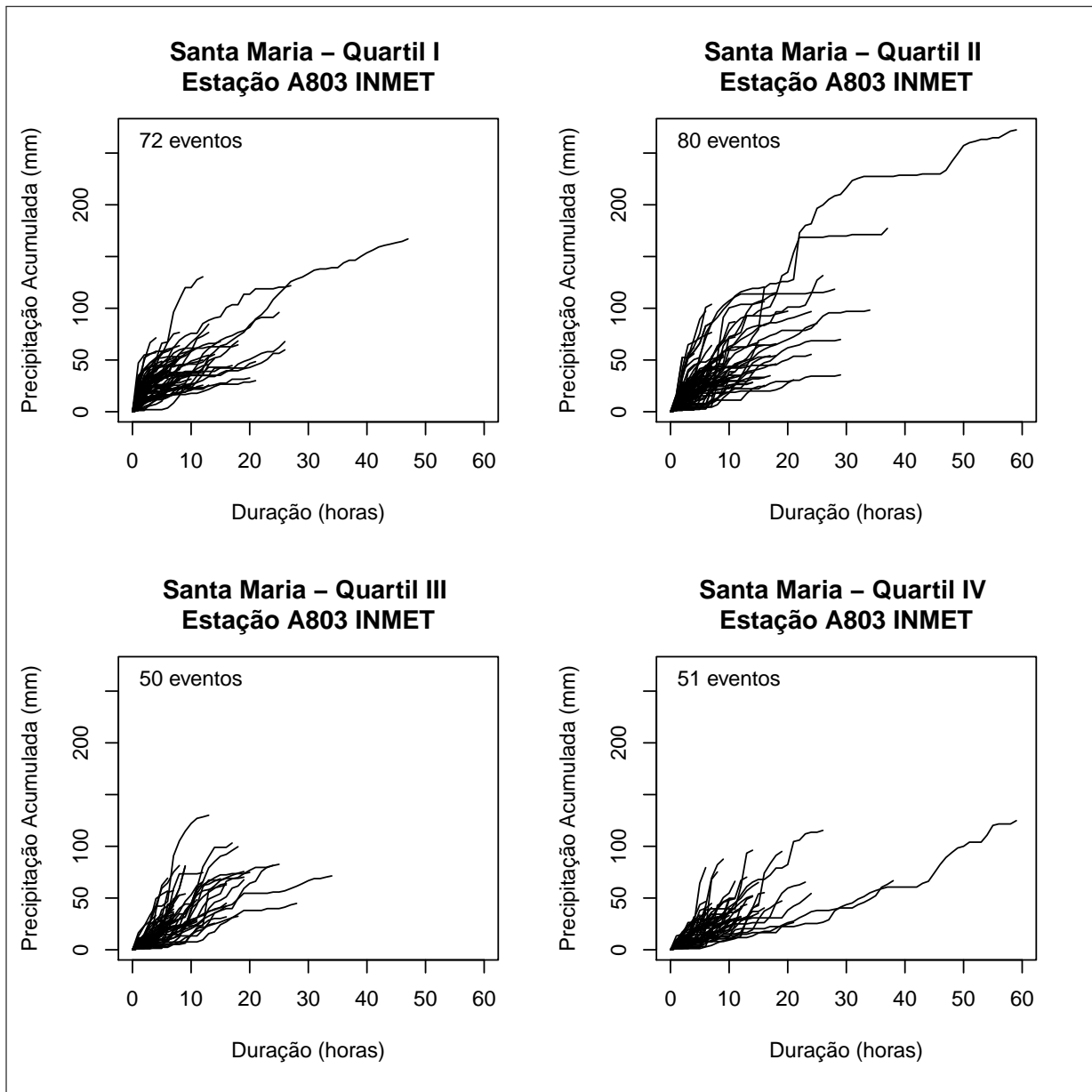
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.23 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Rio Pardo



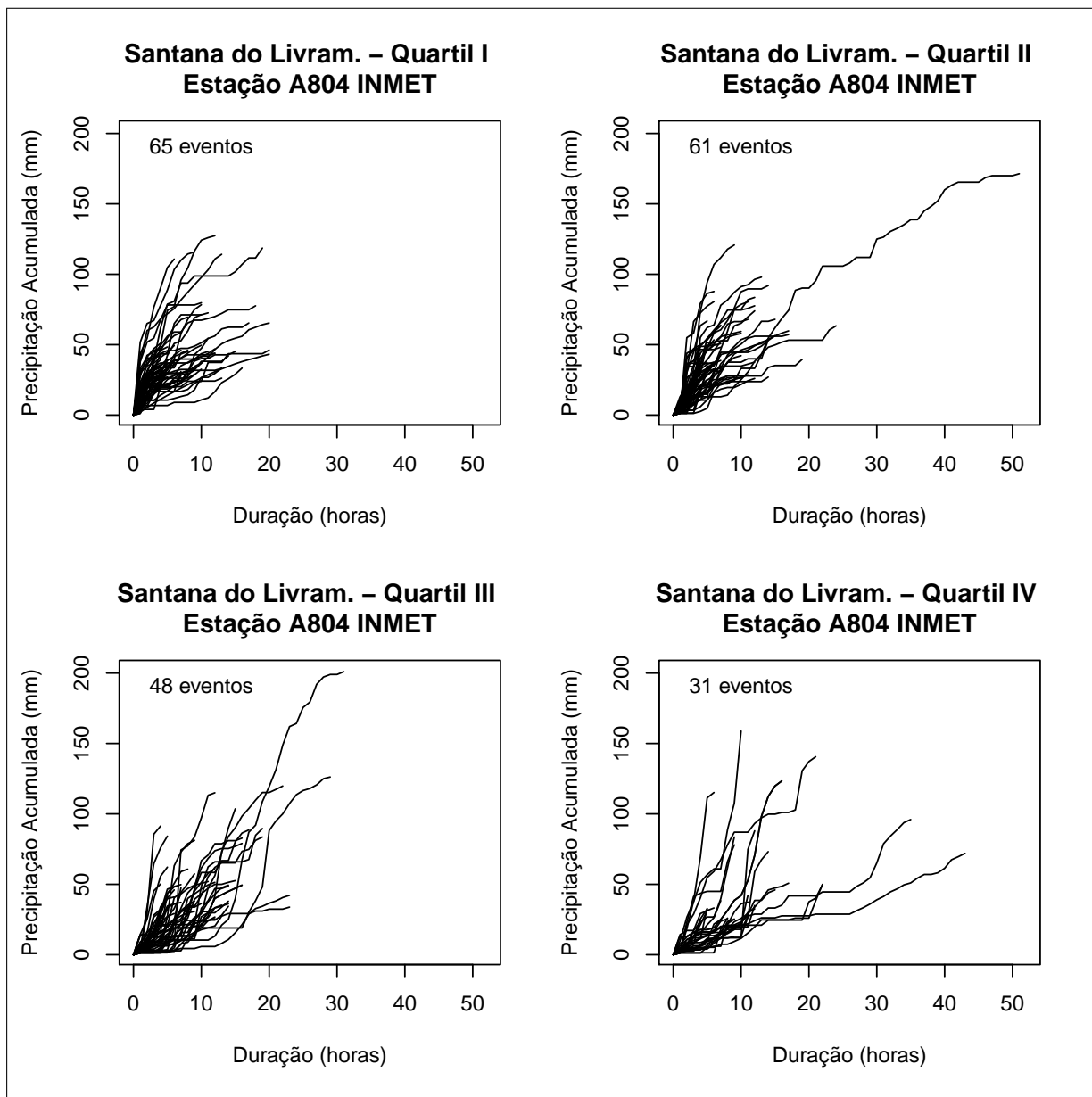
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.24 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santa Maria



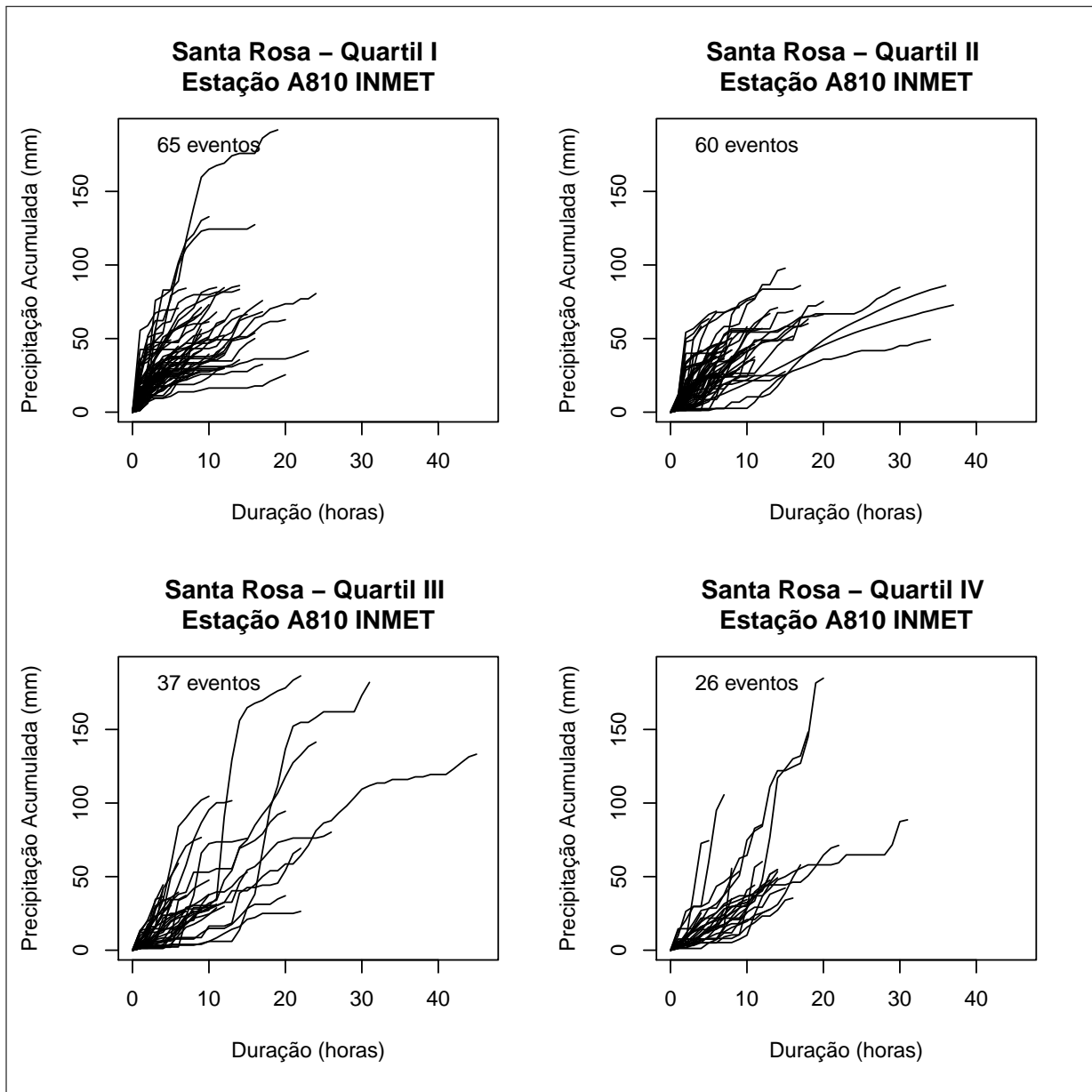
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.25 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santana do Livramento



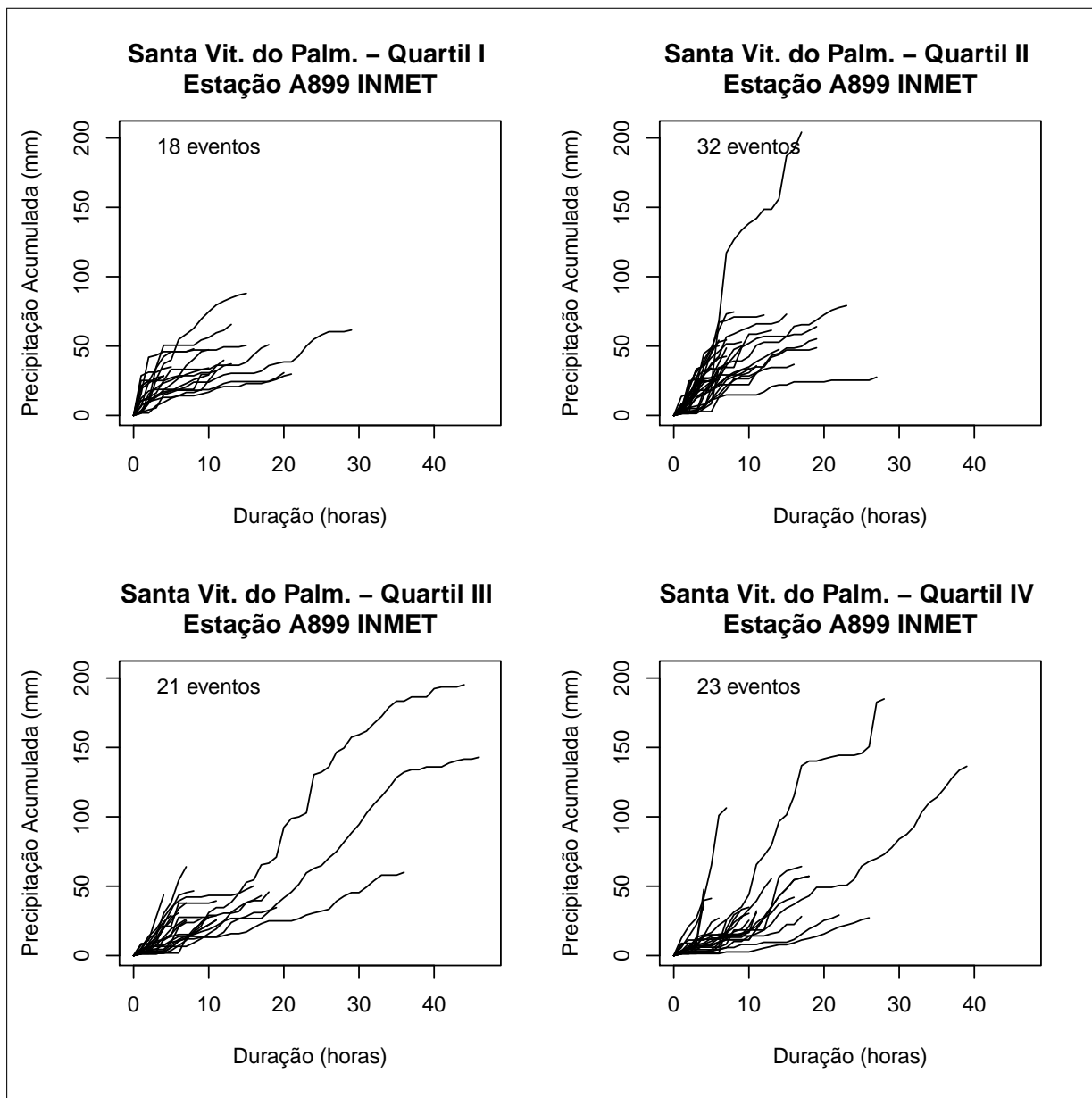
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.26 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santa Rosa



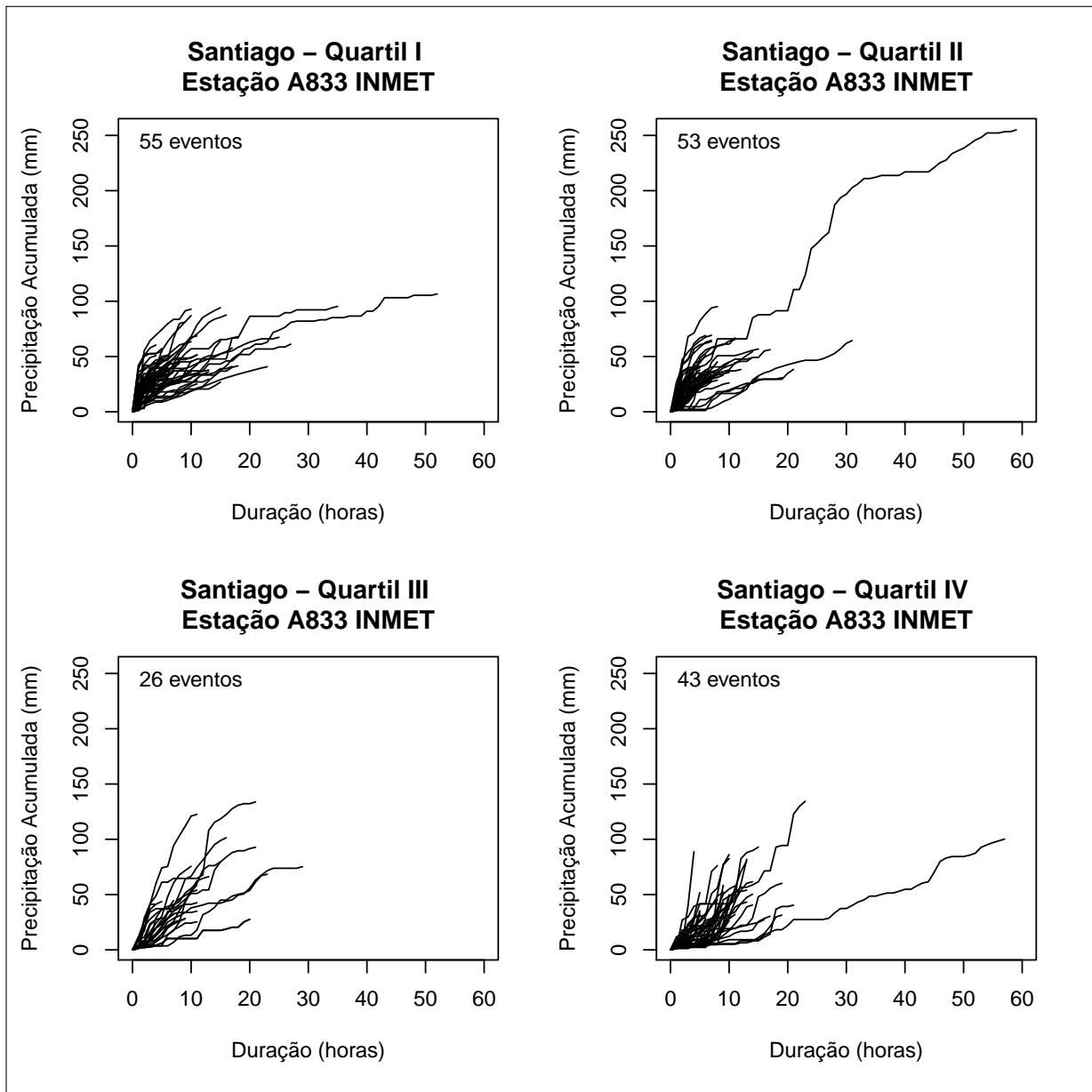
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.27 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santa Vitória do Palmar



Fonte: Elaborado pela autora.

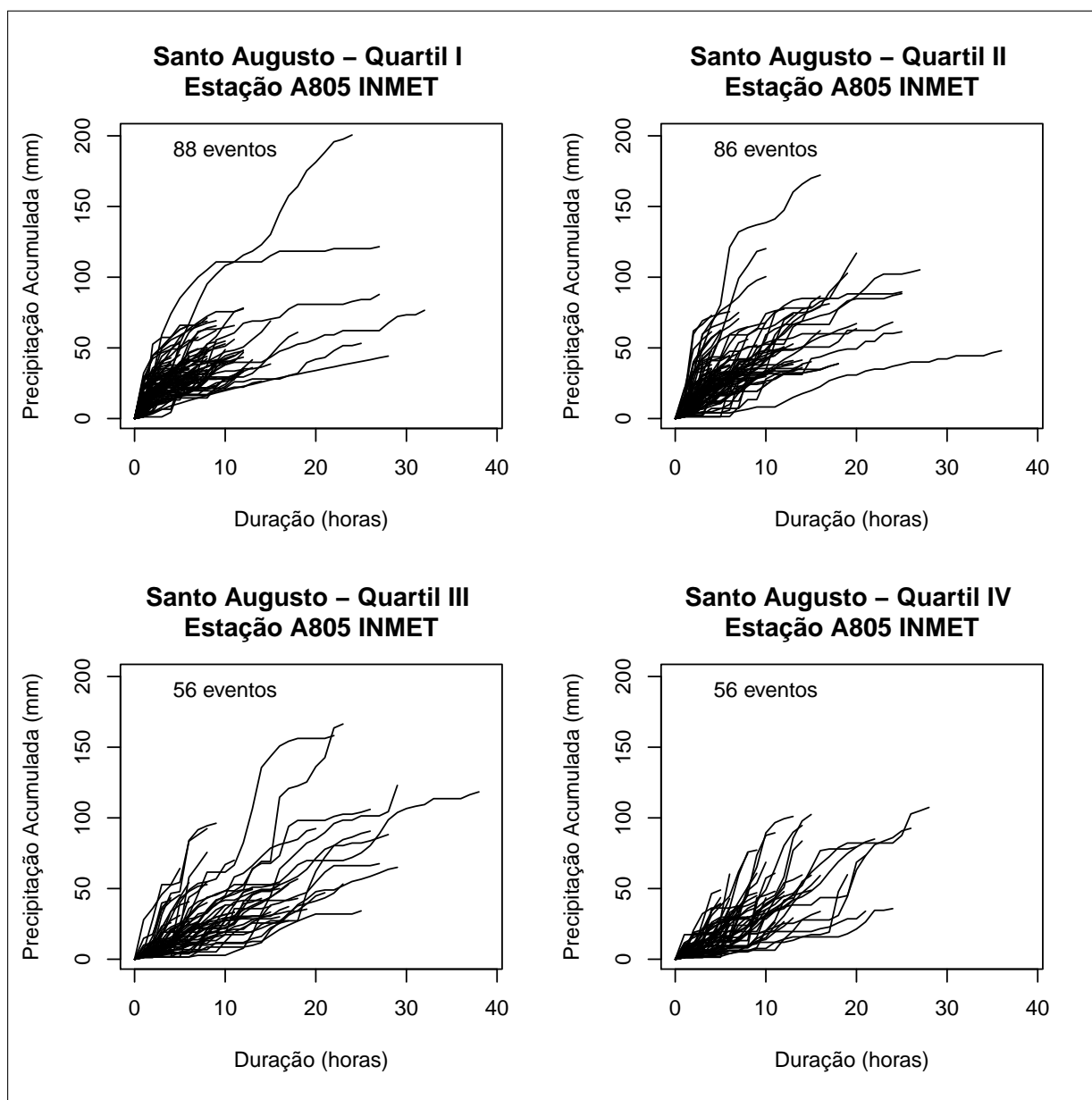
Figura C.28 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santiago



Fonte: Elaborado pela autora.

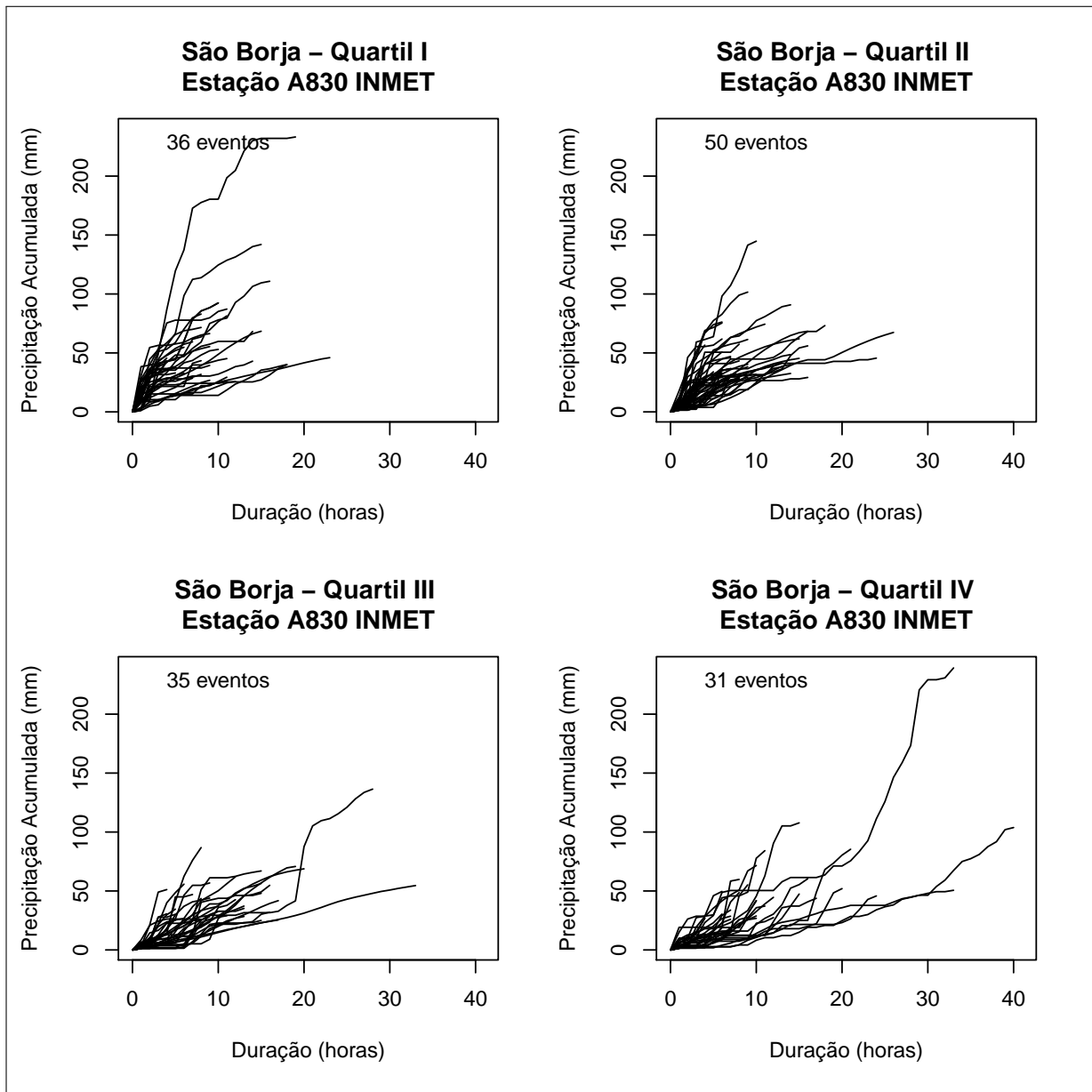


Figura C.29 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Santo Augusto



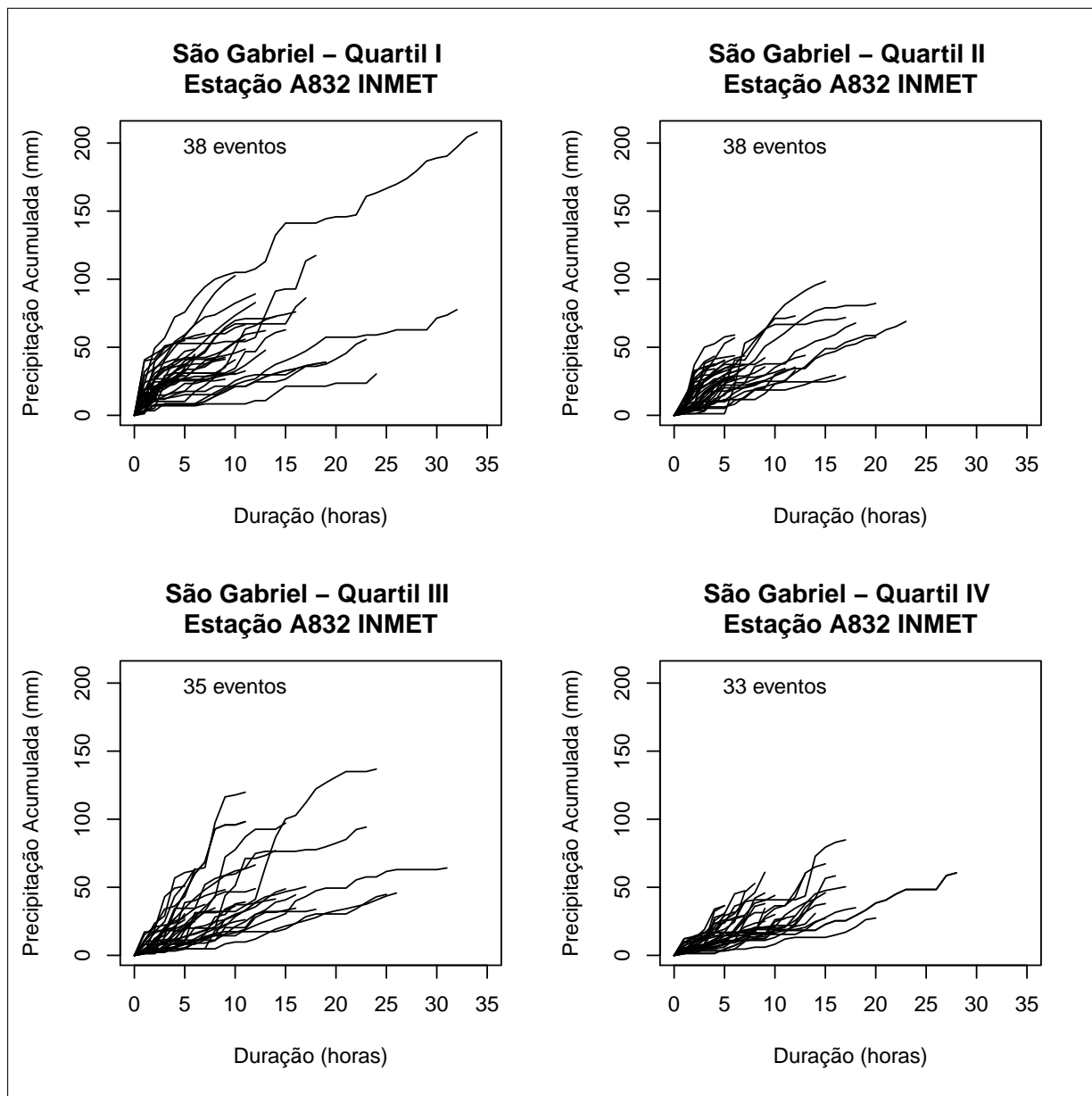
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.30 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São Borja



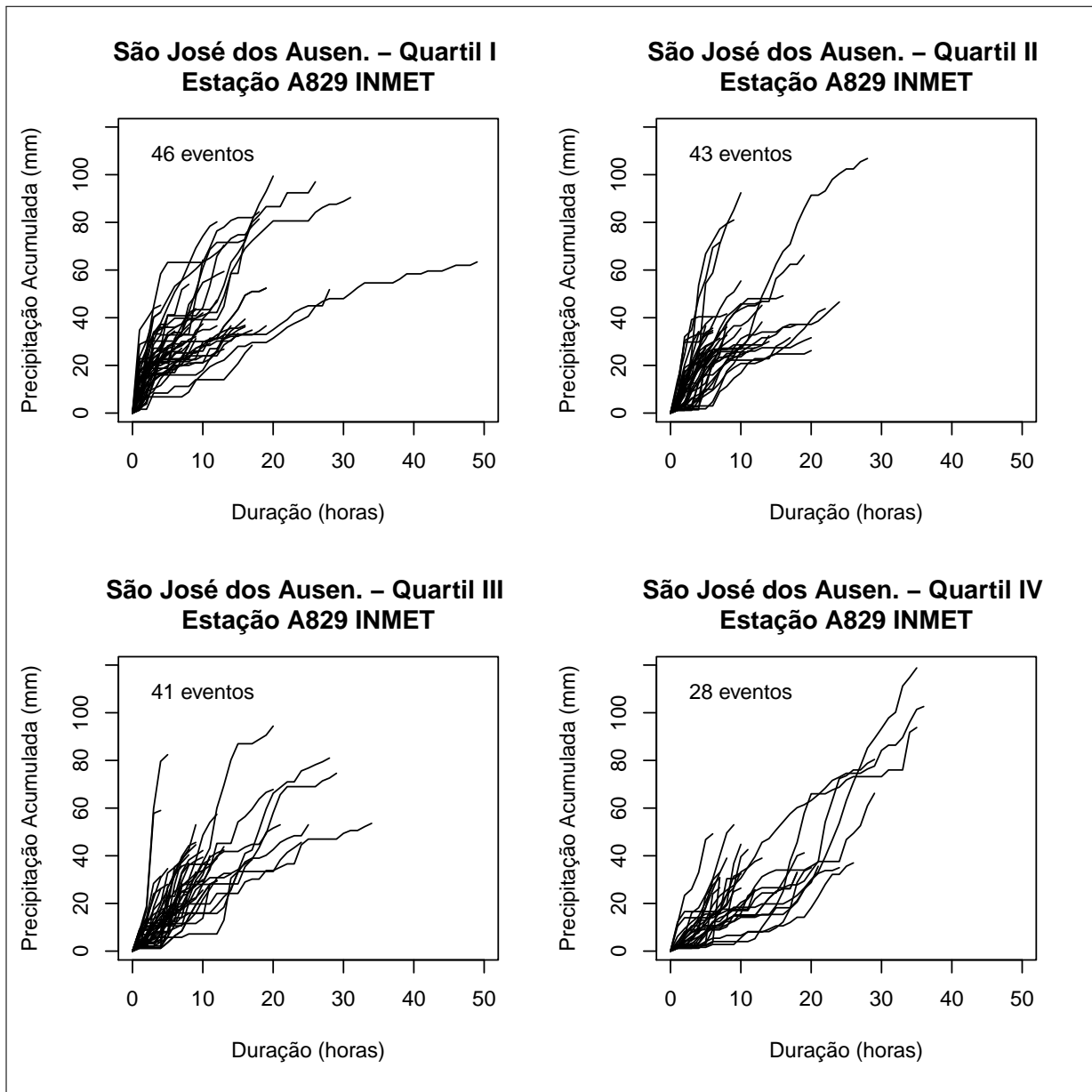
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.31 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Gabriel



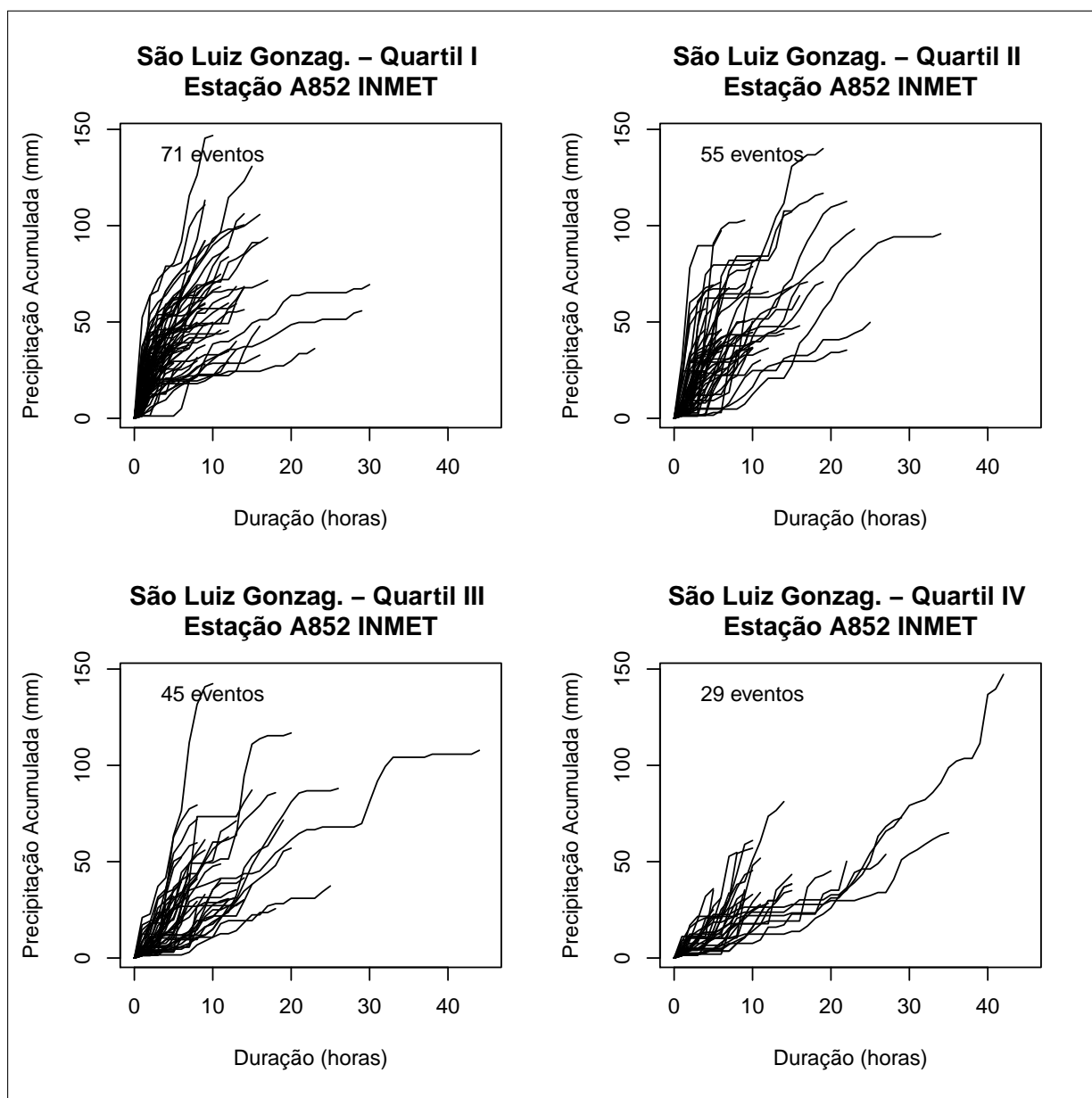
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.32 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São José dos Ausentes



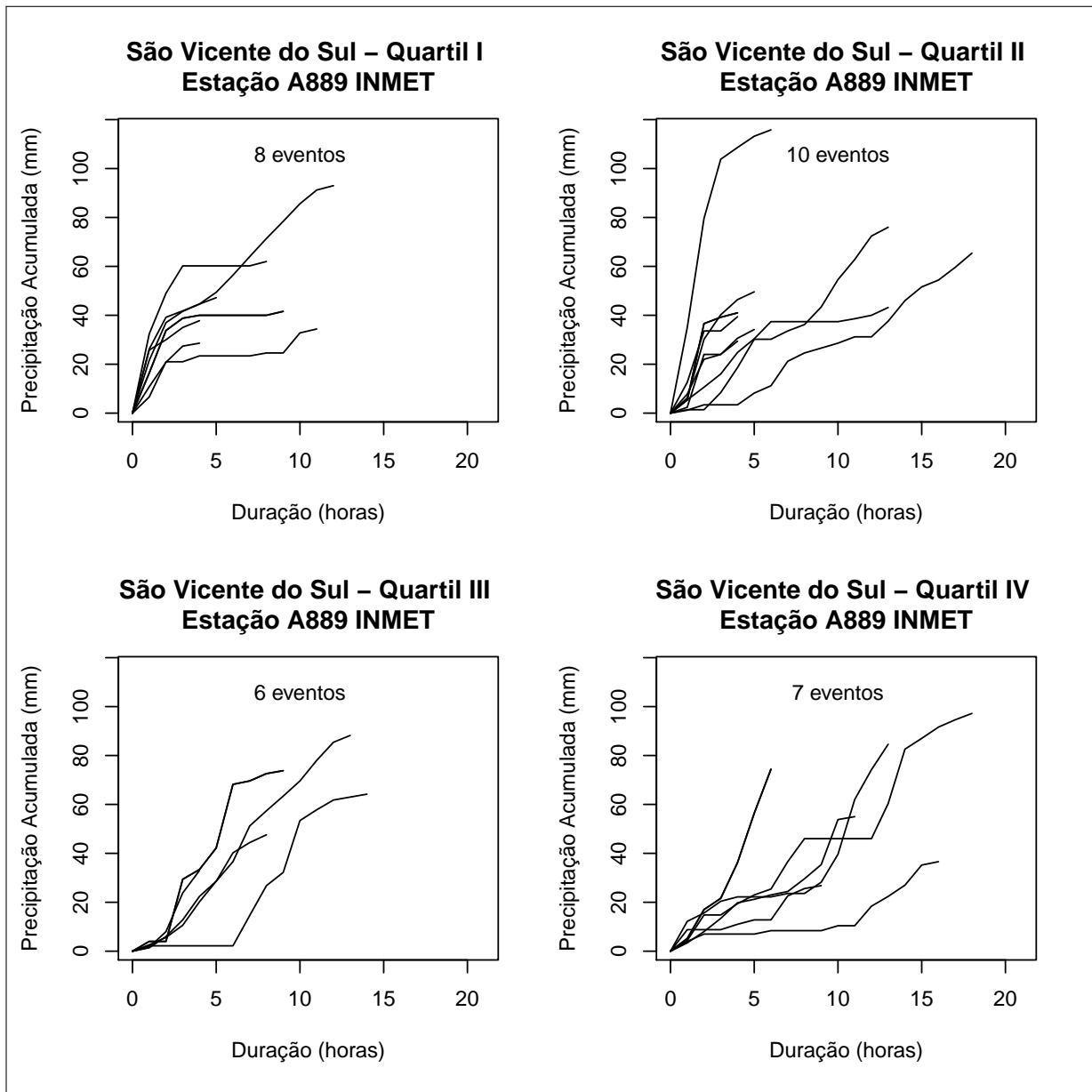
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.33 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São Luiz Gonzaga



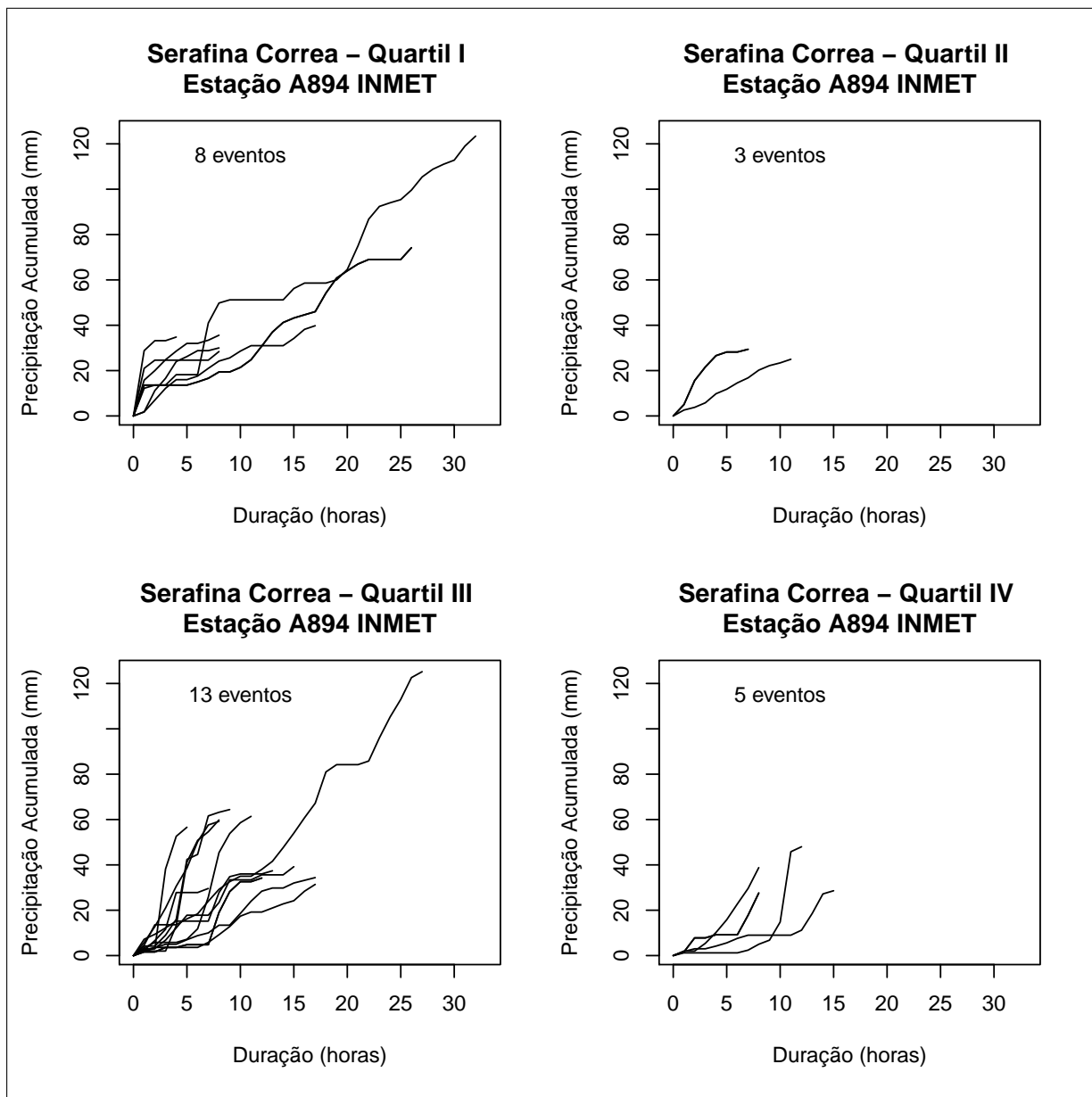
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.34 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em São Vicente do Sul



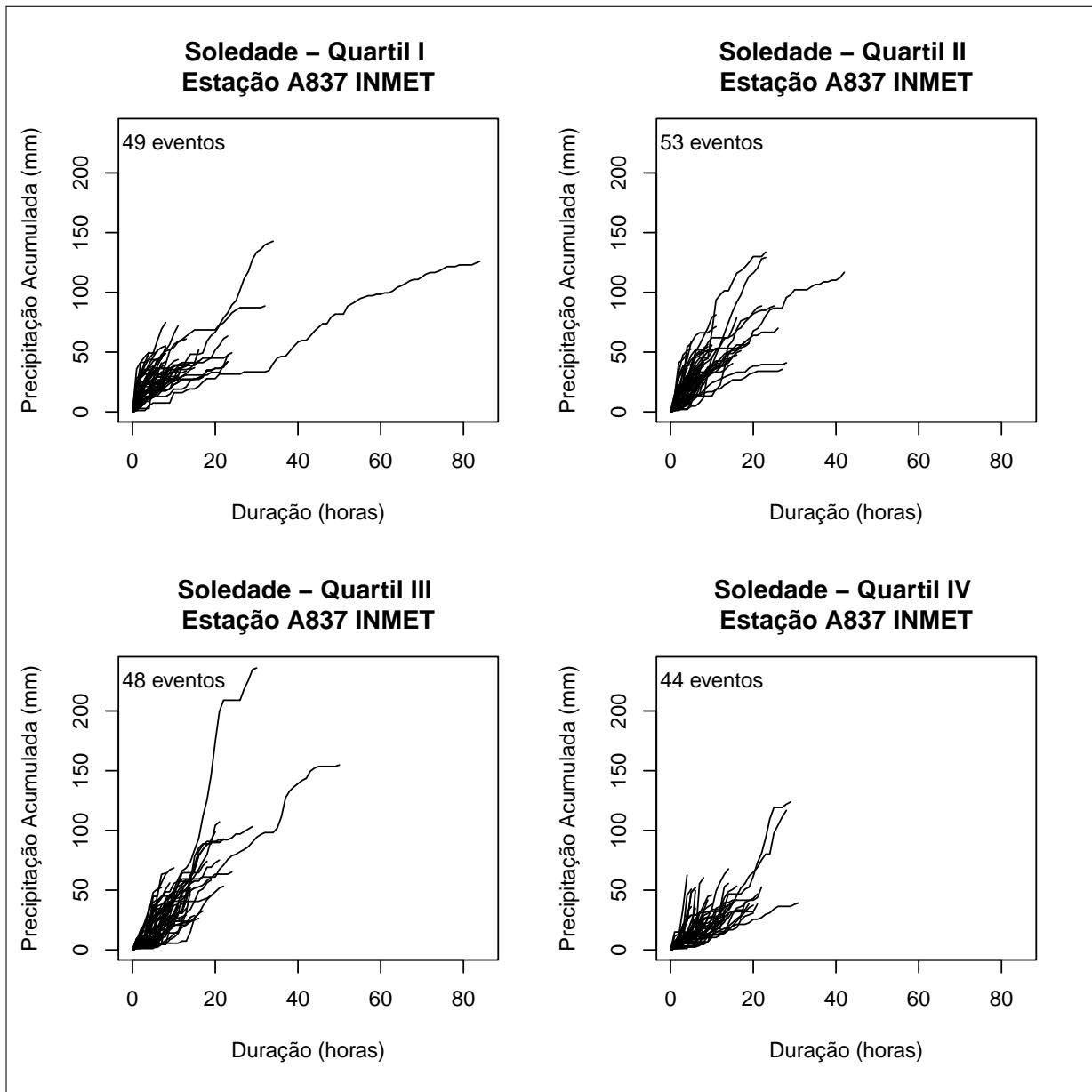
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.35 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Serafina Correa



Fonte: Elaborado pela autora.

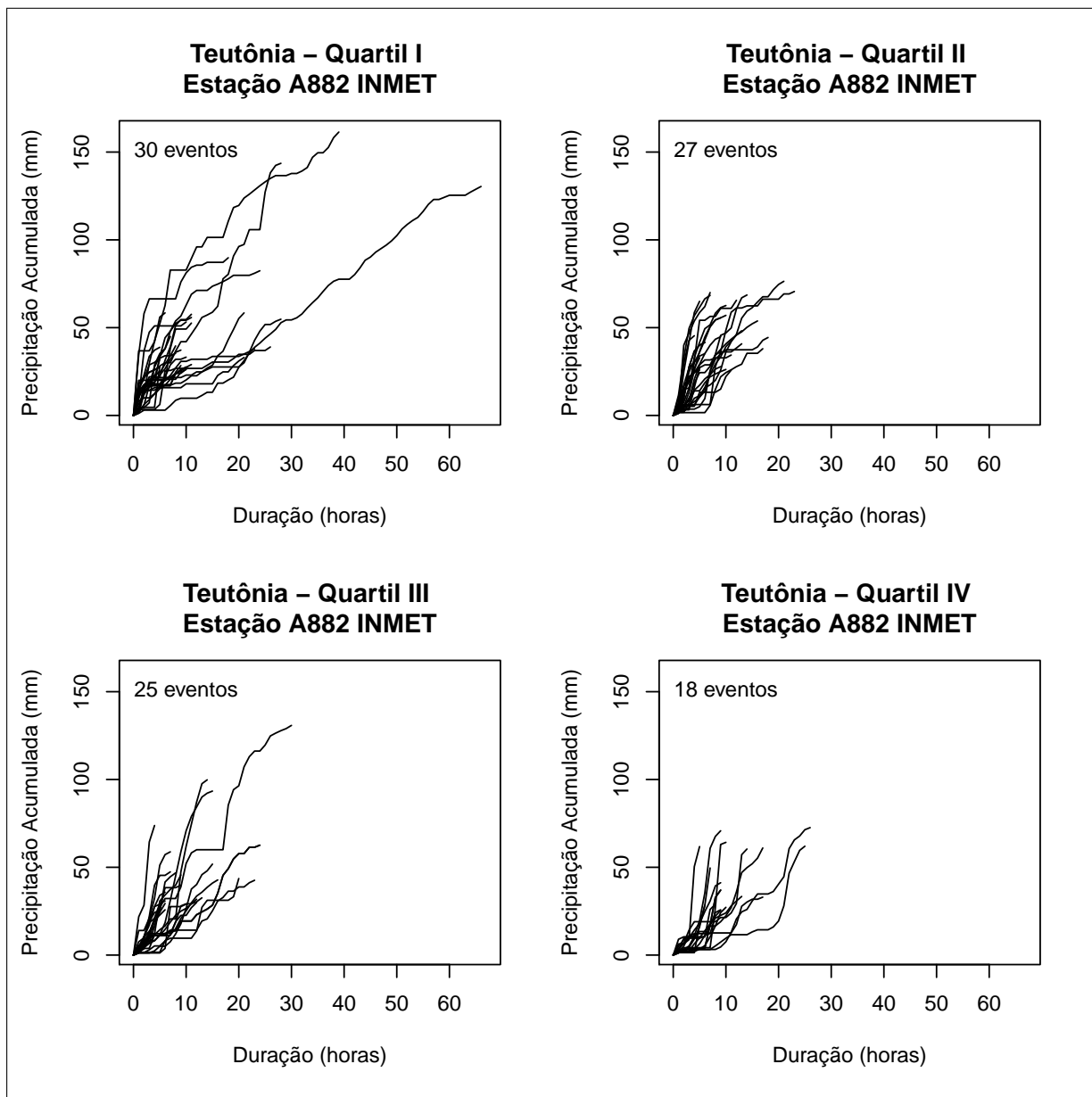
Figura C.36 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Soledade



Fonte: Elaborado pela autora.

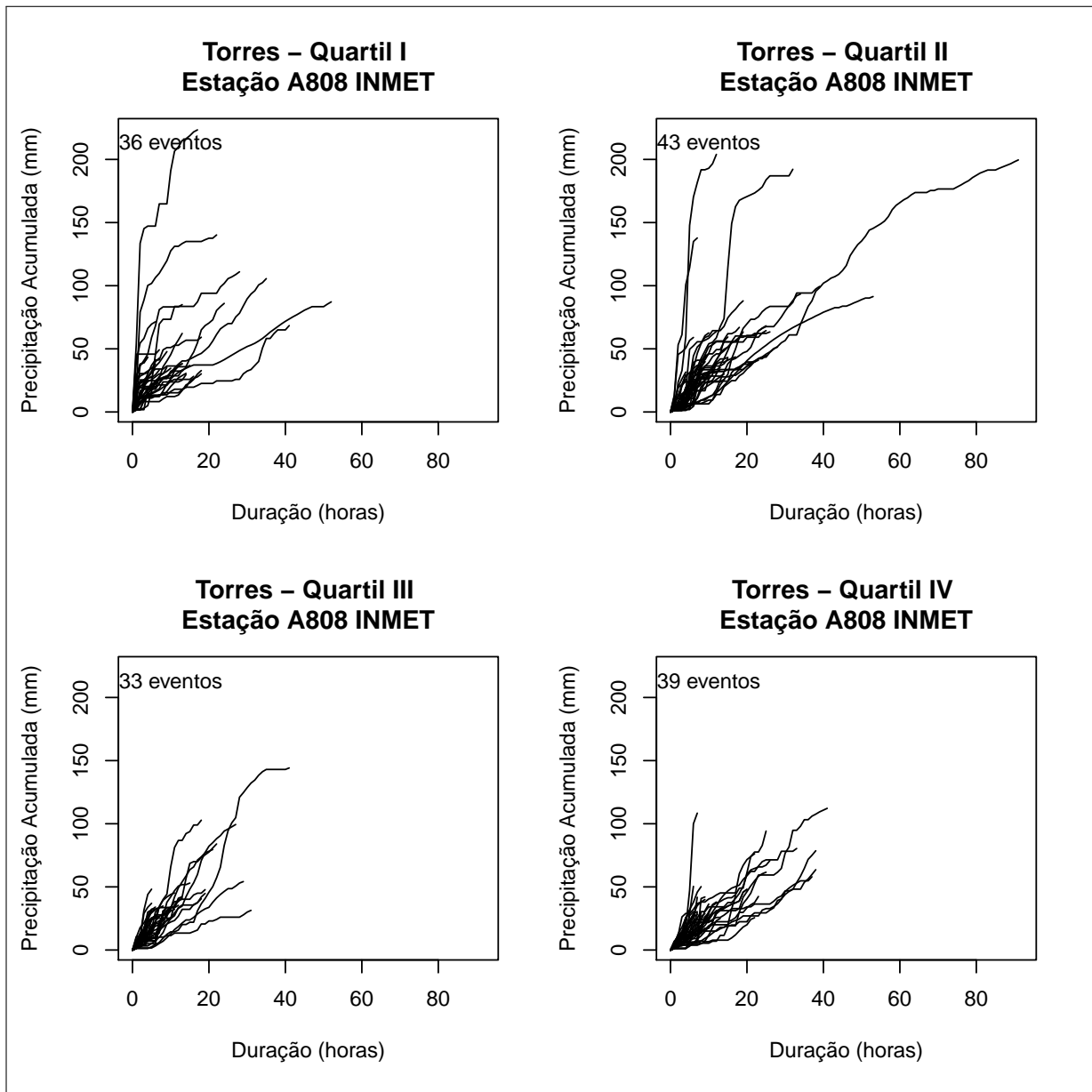


Figura C.37 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Teutônia



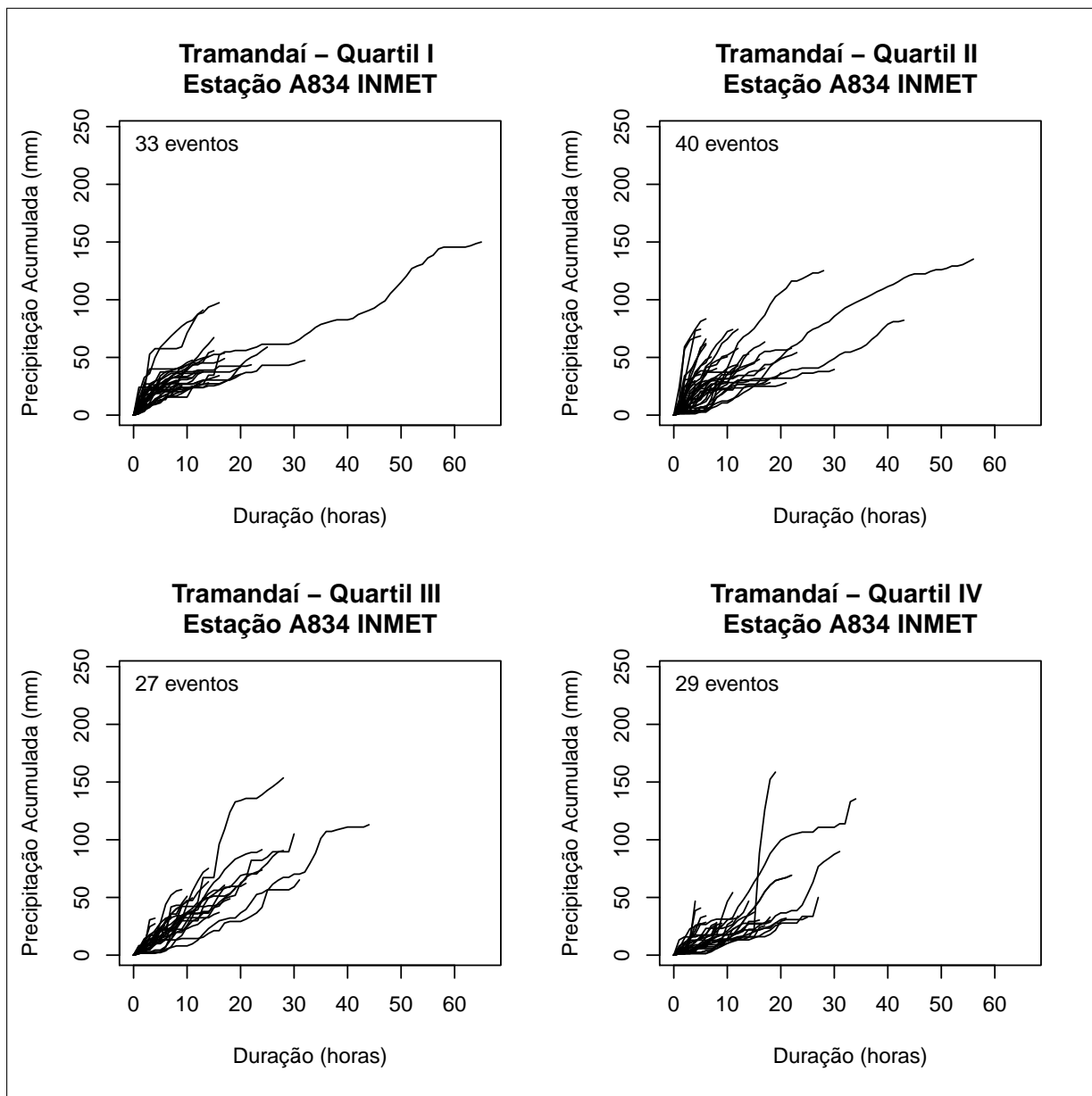
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.38 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Torres



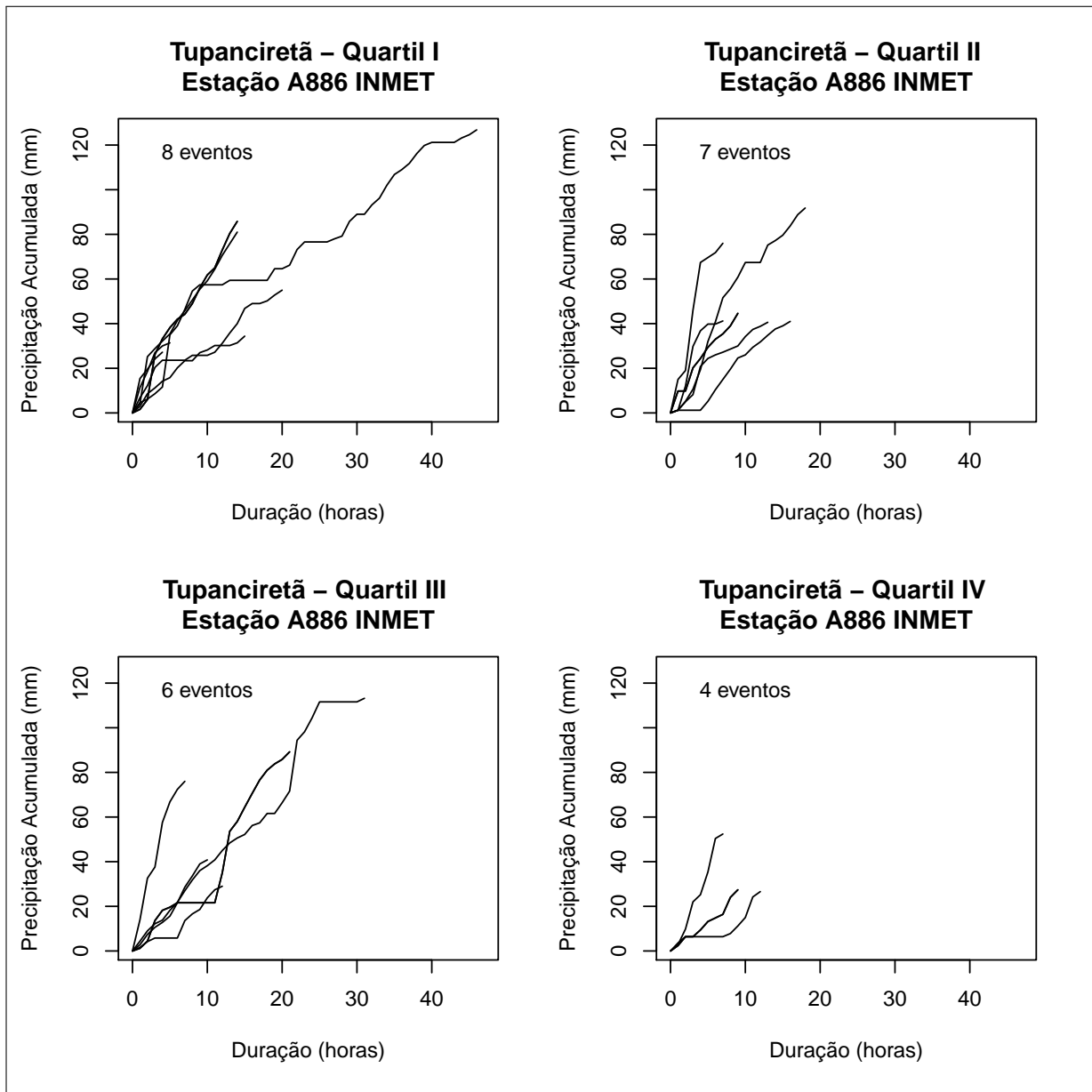
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.39 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Tramandaí



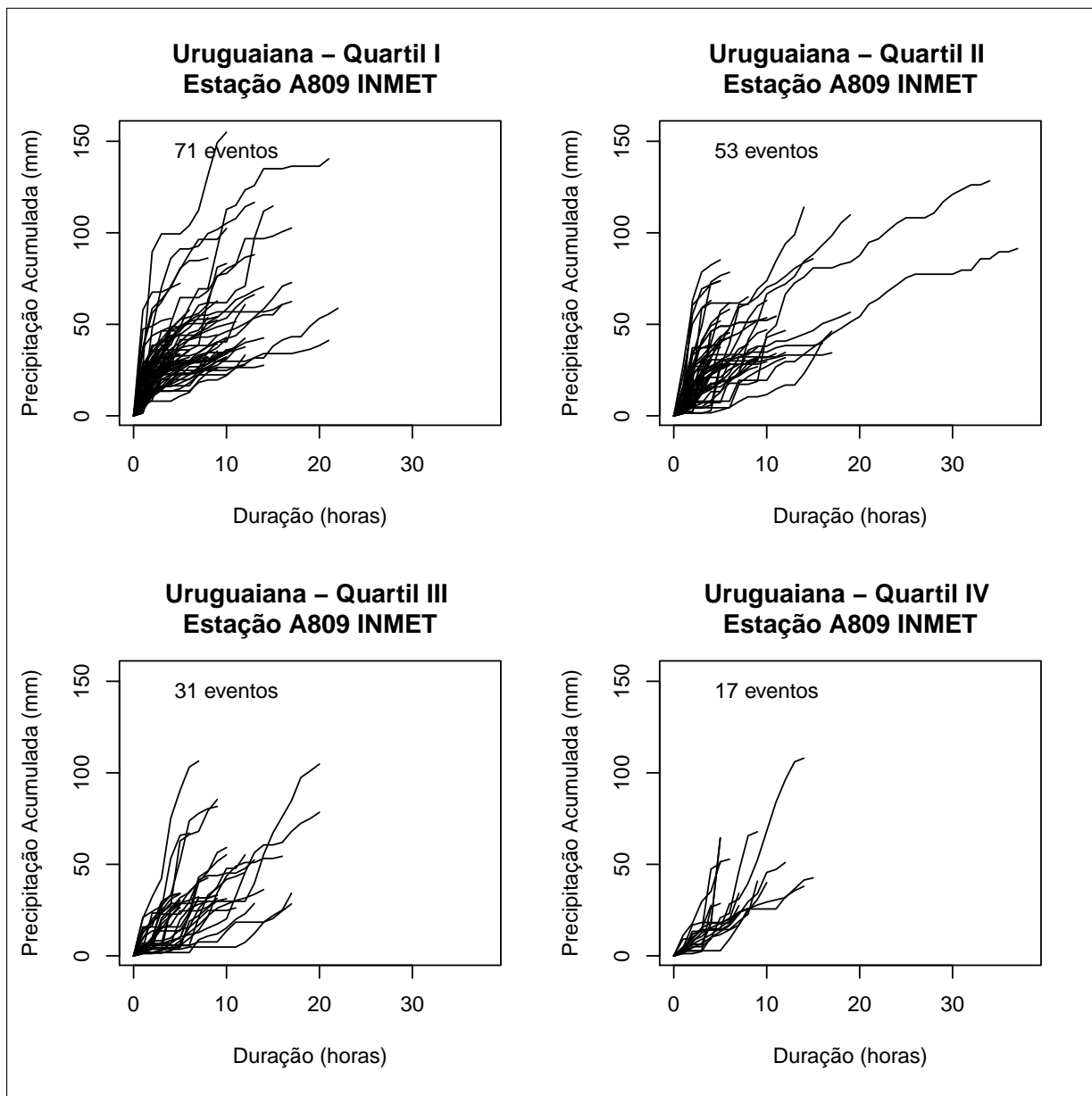
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.40 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Tupanciretã



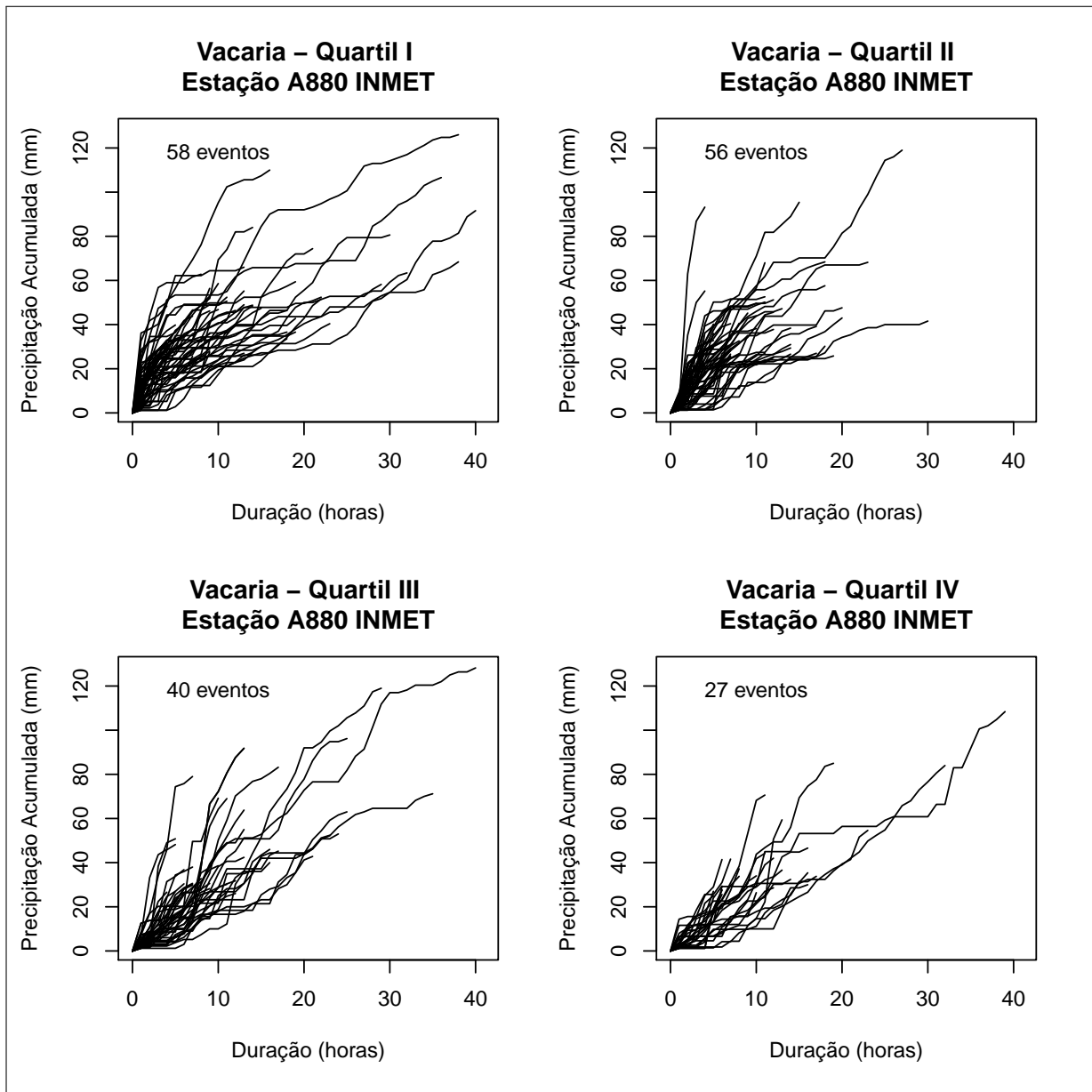
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C.41 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Uruguaiana



Fonte: Elaborado pela autora.

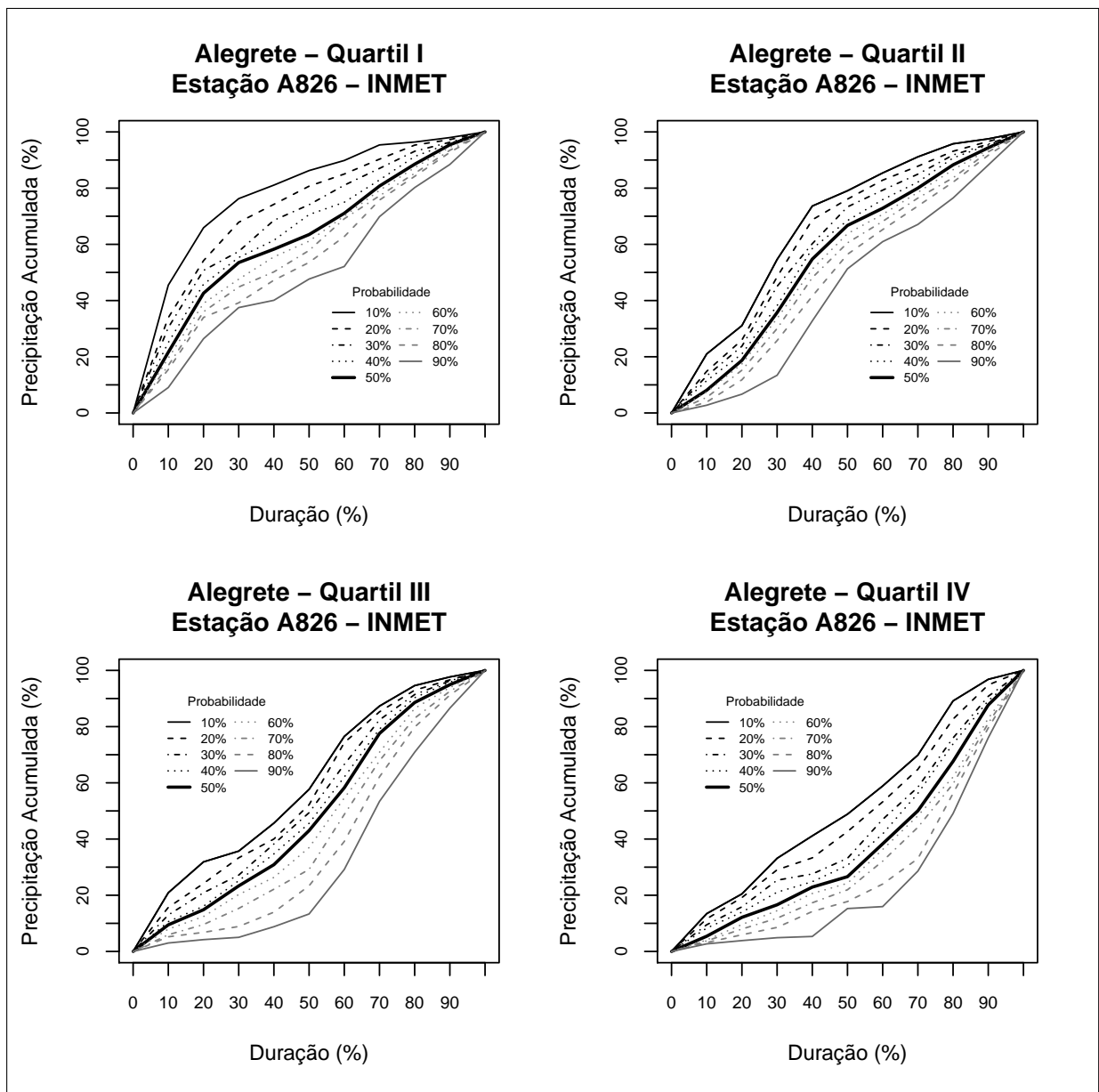
Figura C.42 – Curvas de massa dos eventos significativos individualizados da série histórica de precipitação da estação INMET localizada em Vacaria



Fonte: Elaborado pela autora.

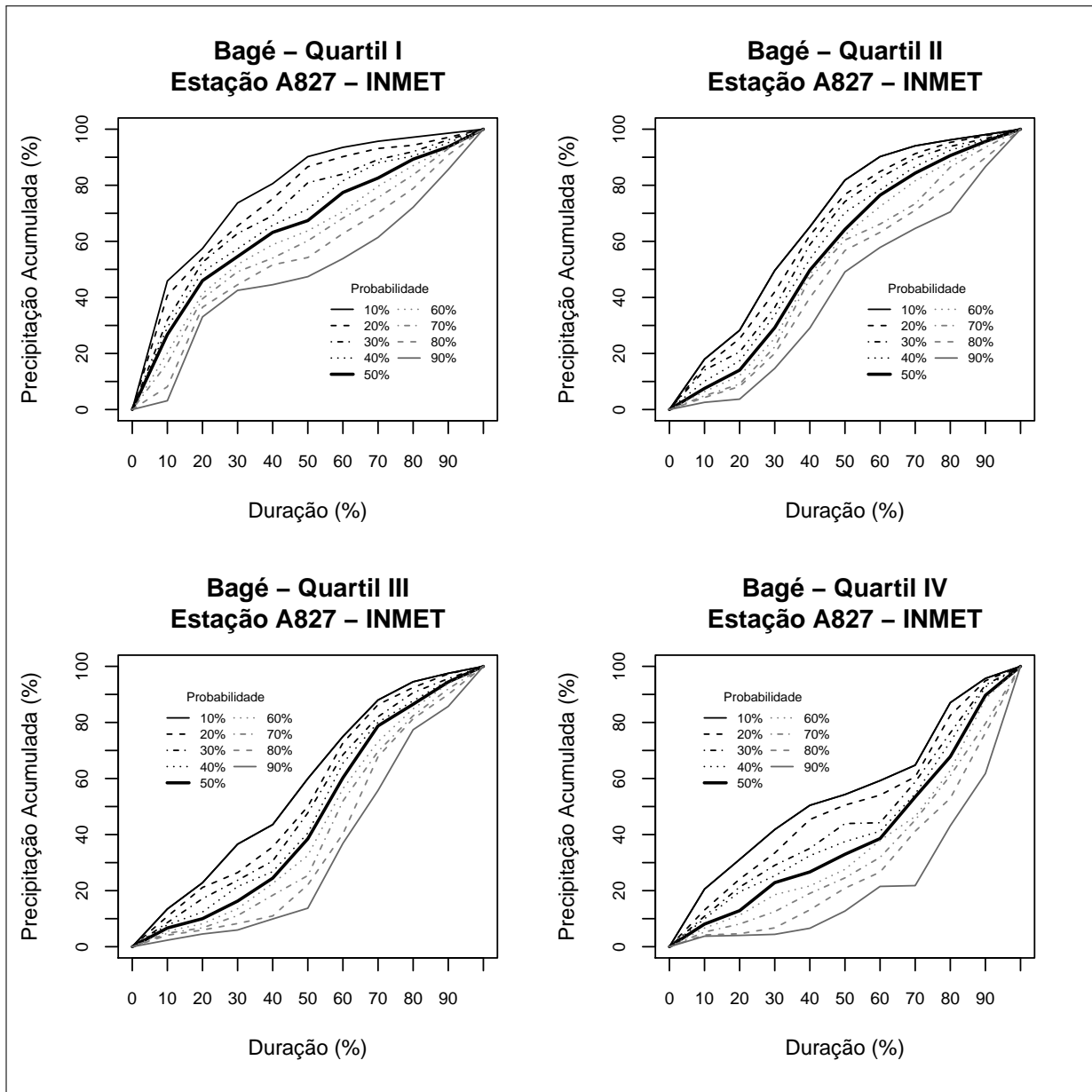
## APÊNDICE D – CURVAS PONTUAIS PARA AS ESTAÇÕES INMET DO RS

Figura D.1 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Alegrete



Fonte: Elaborado pela autora.

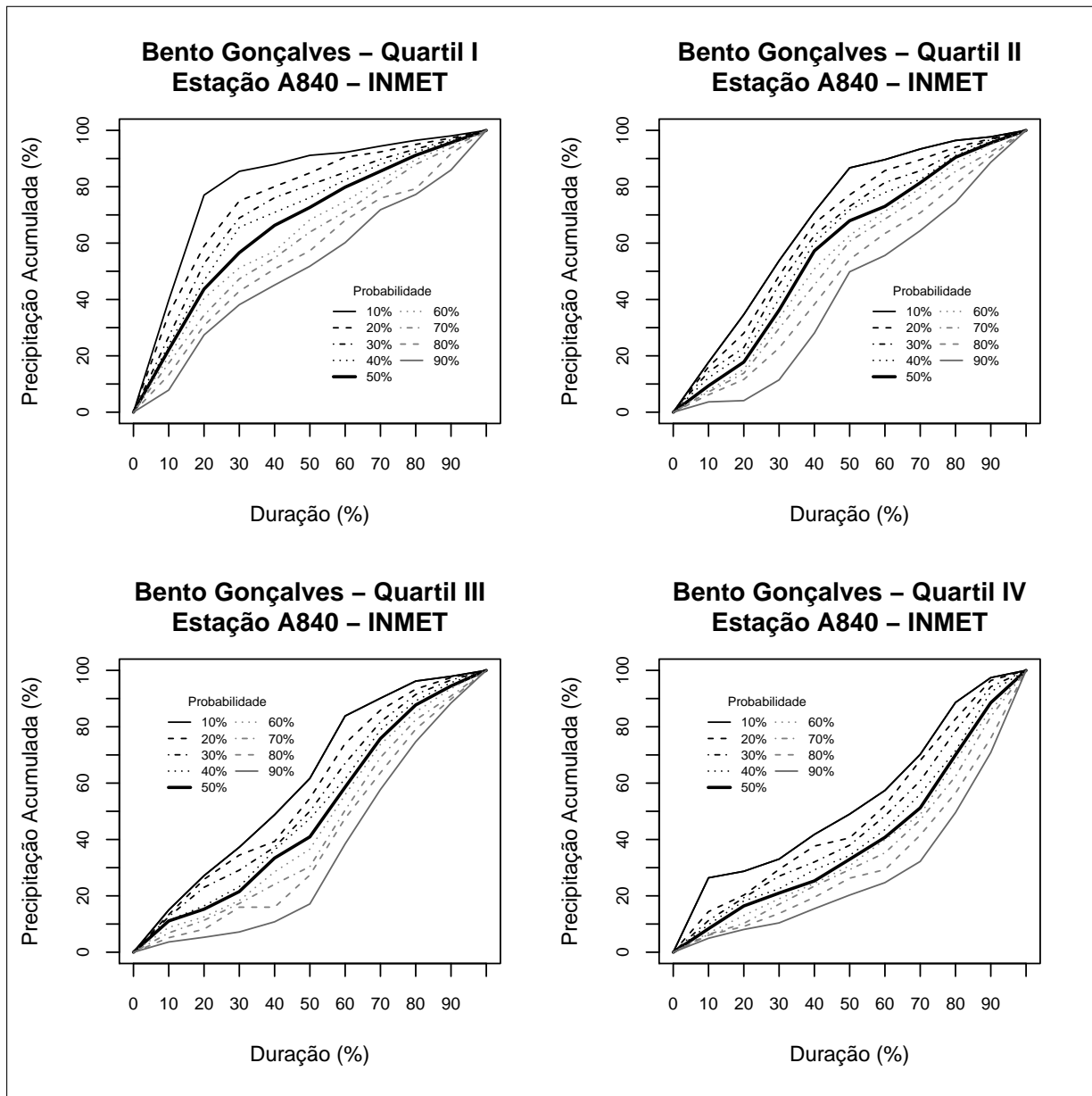
Figura D.2 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Bagé



Fonte: Elaborado pela autora.

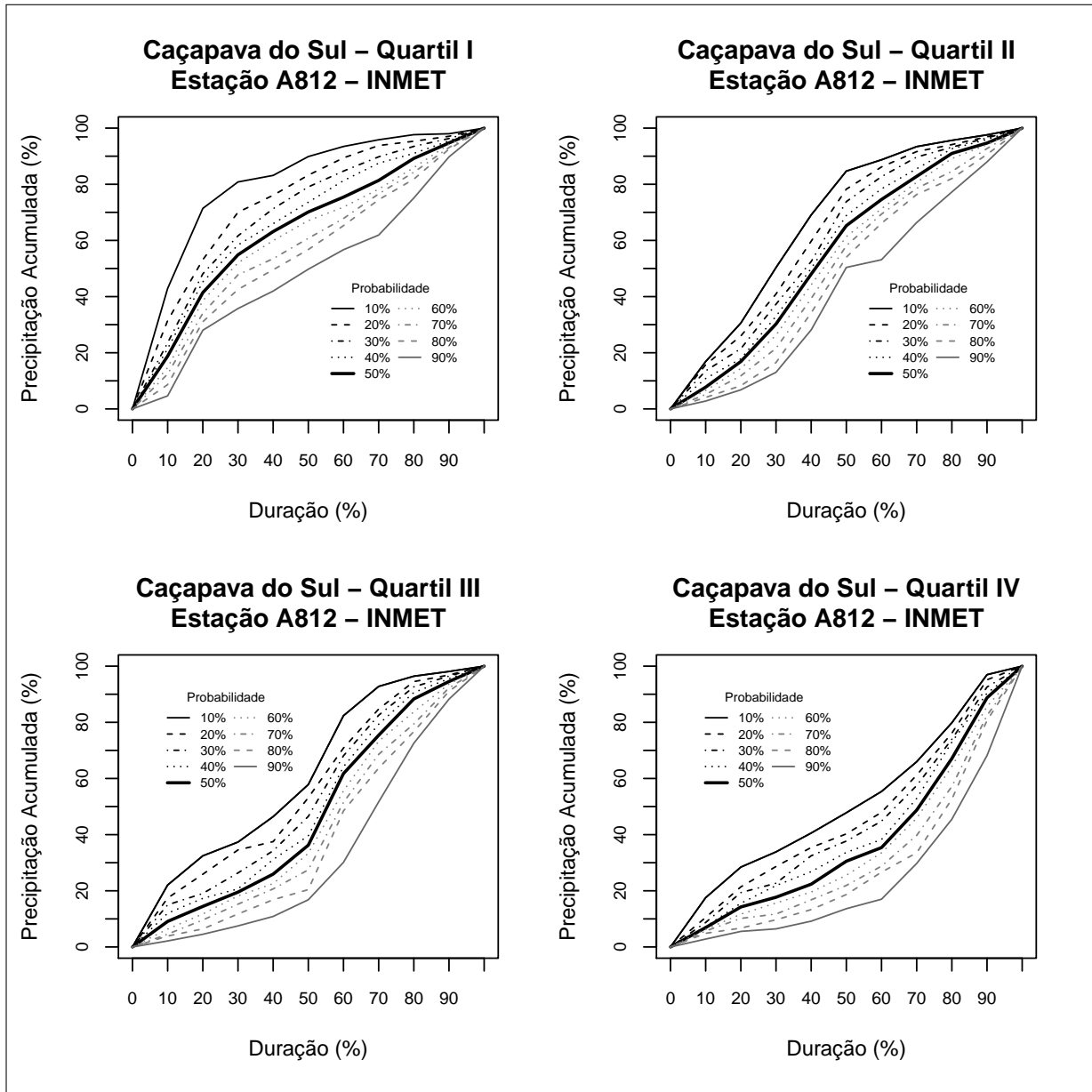


Figura D.3 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Bento Gonçalves



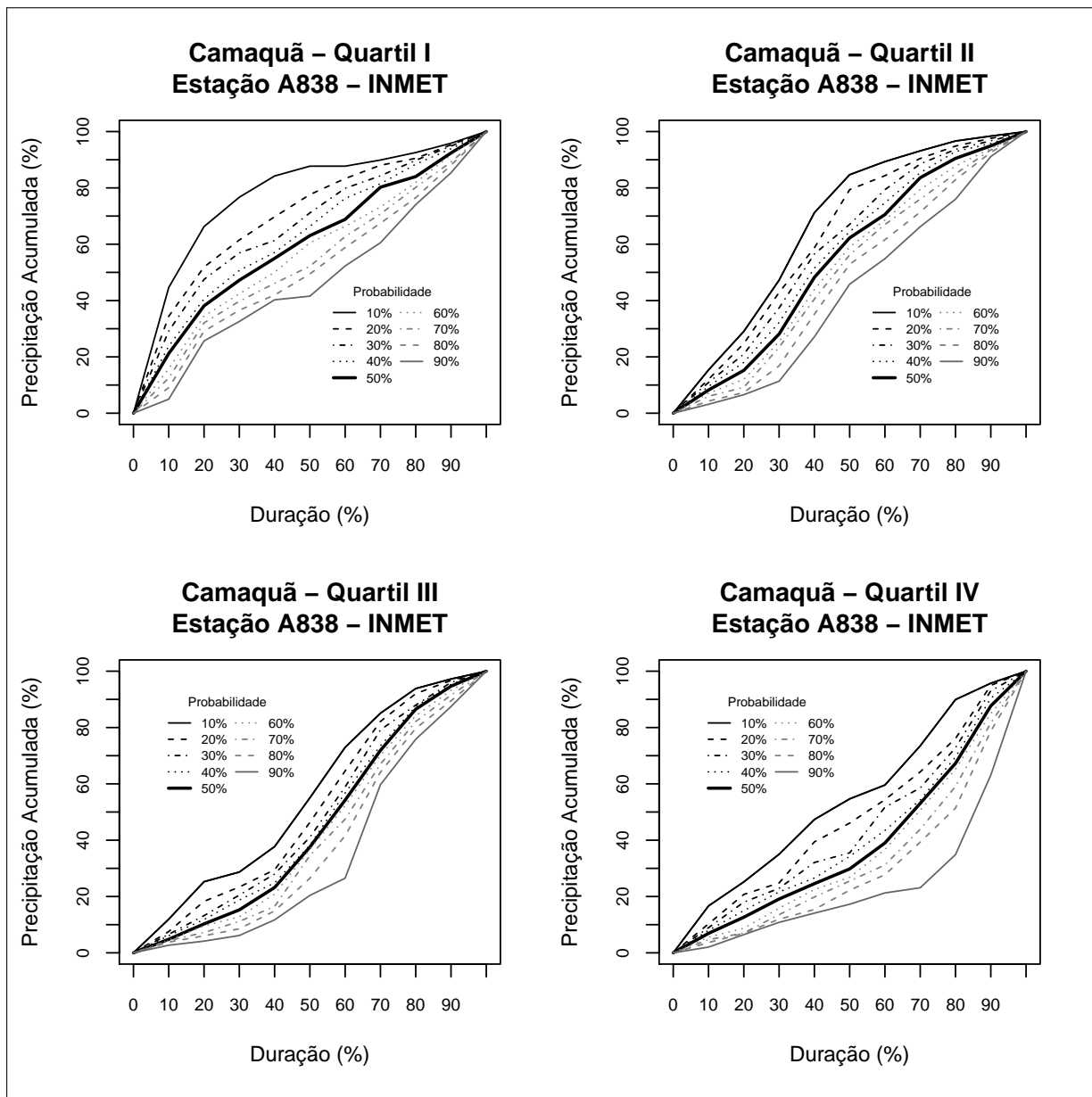
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.4 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Caçapava do Sul



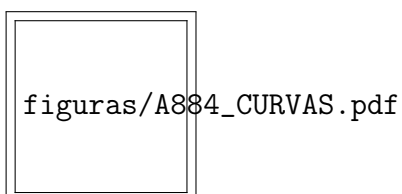
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.5 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Camaquã



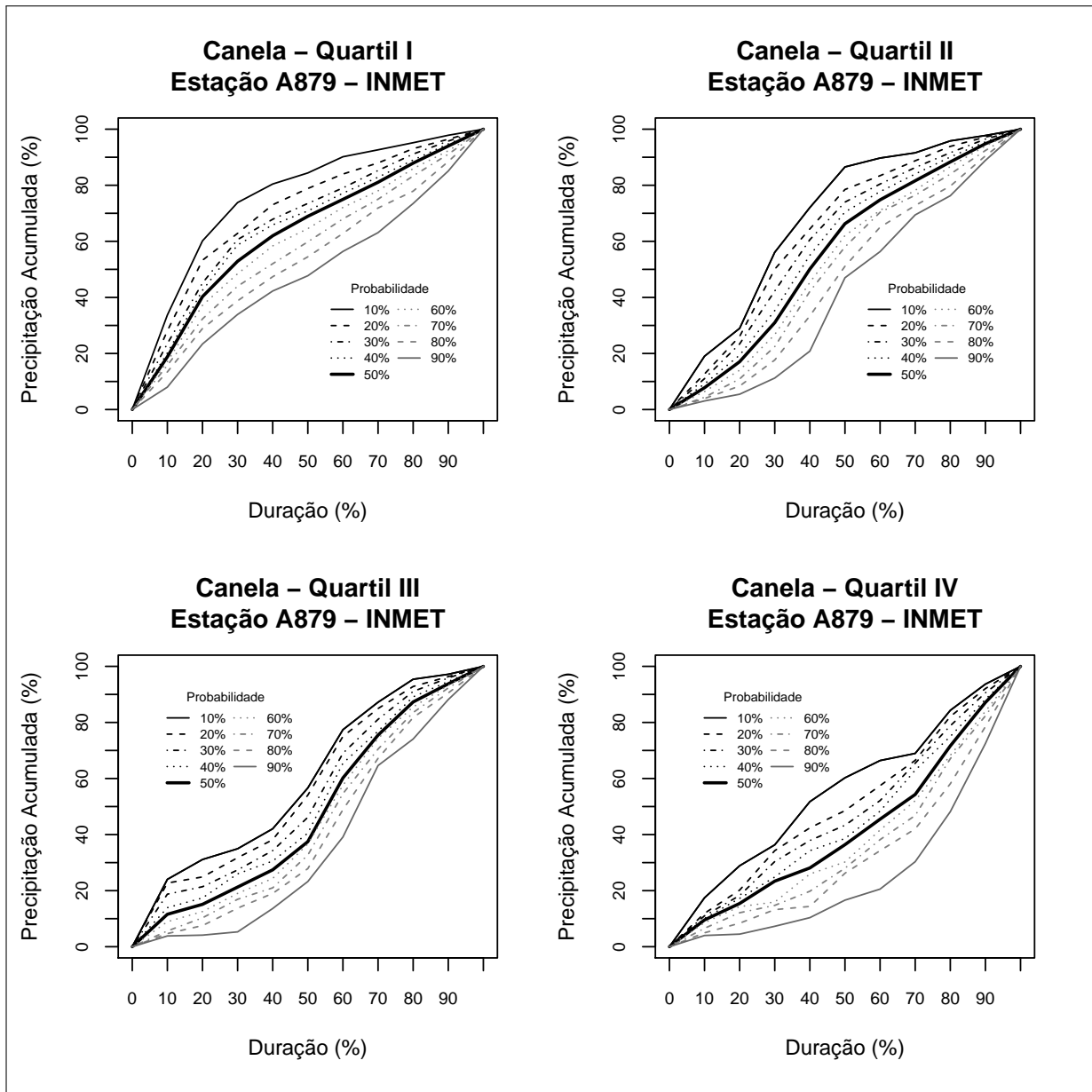
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.6 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Campo Bom



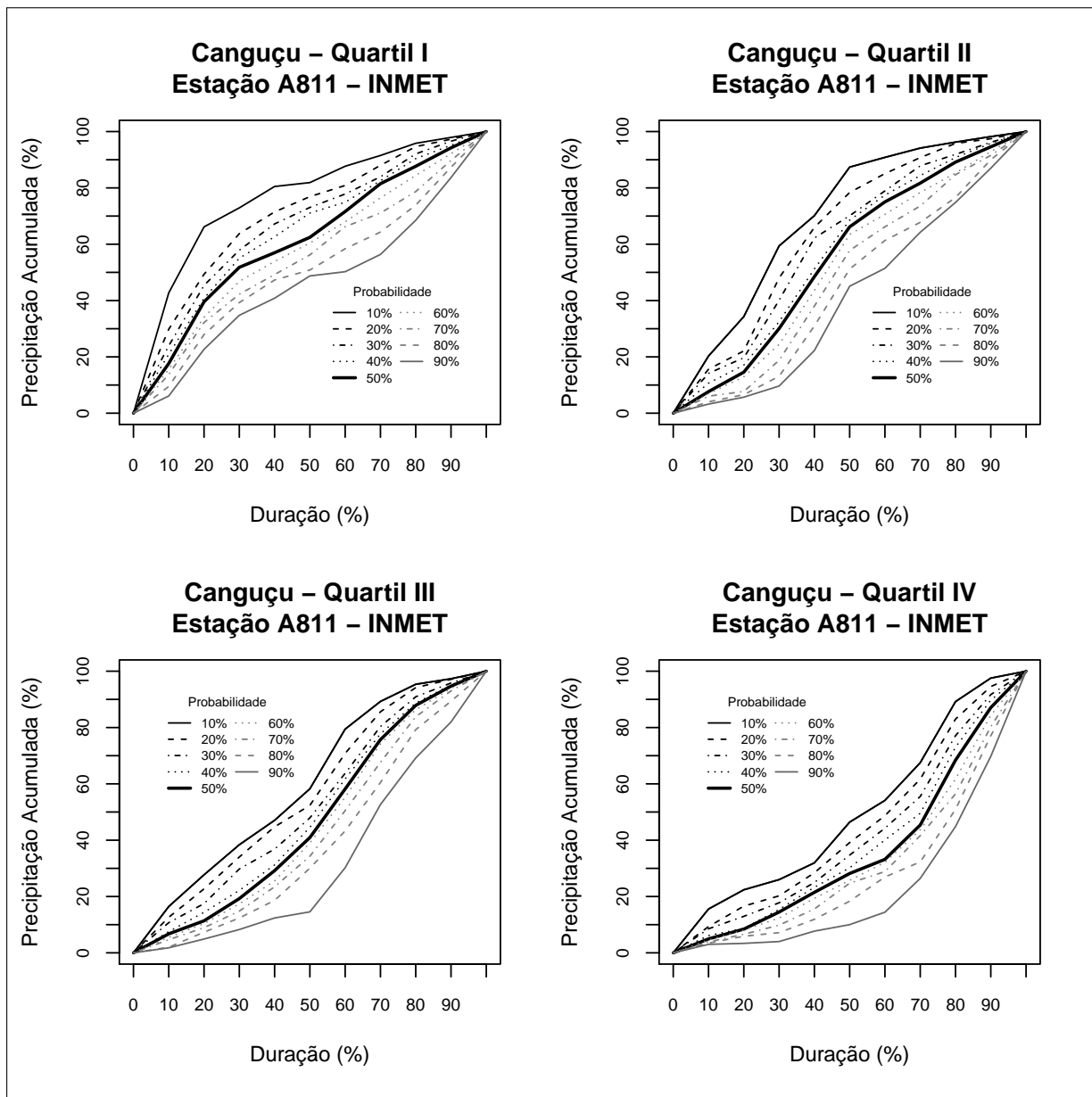
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.7 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Canela



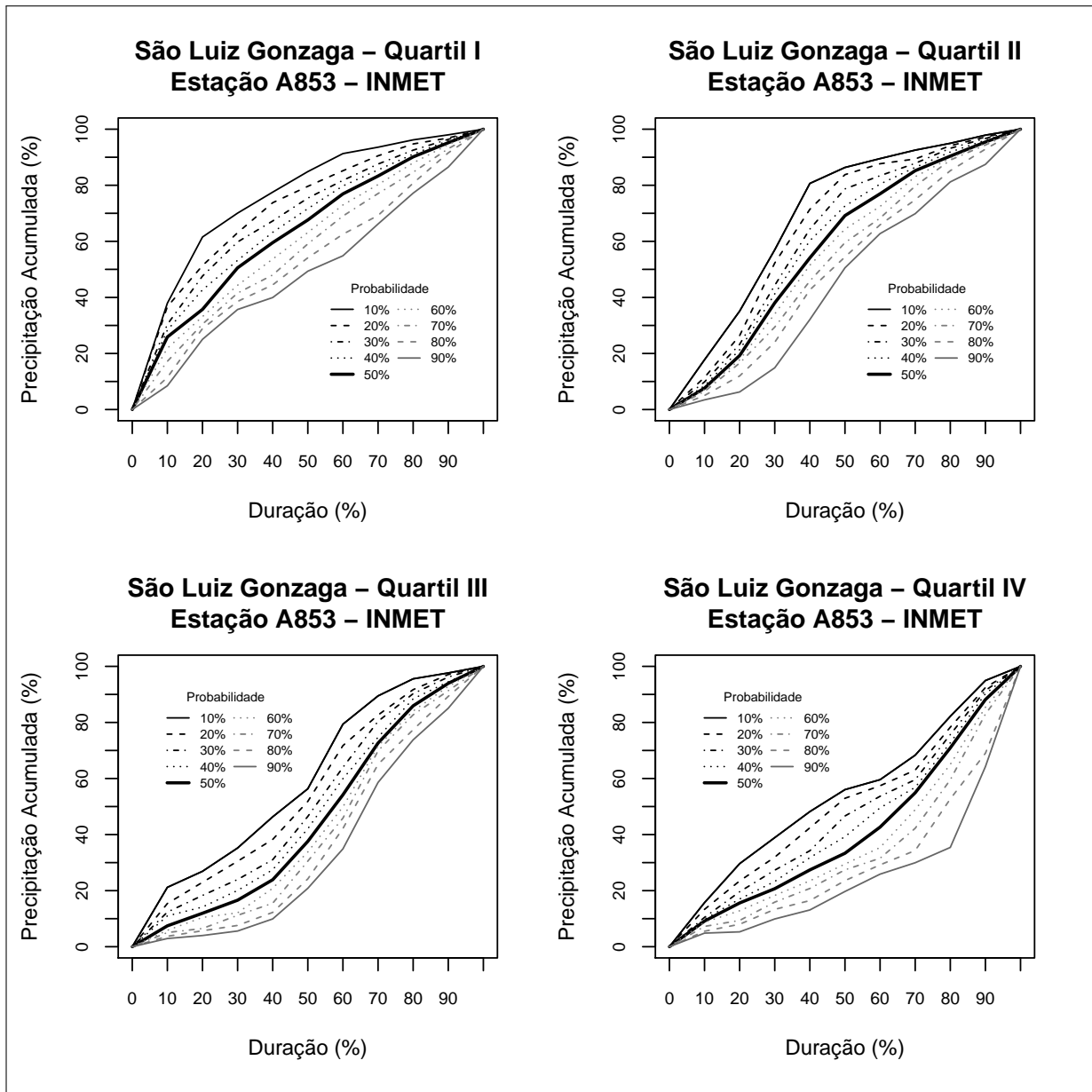
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.8 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Canguçu



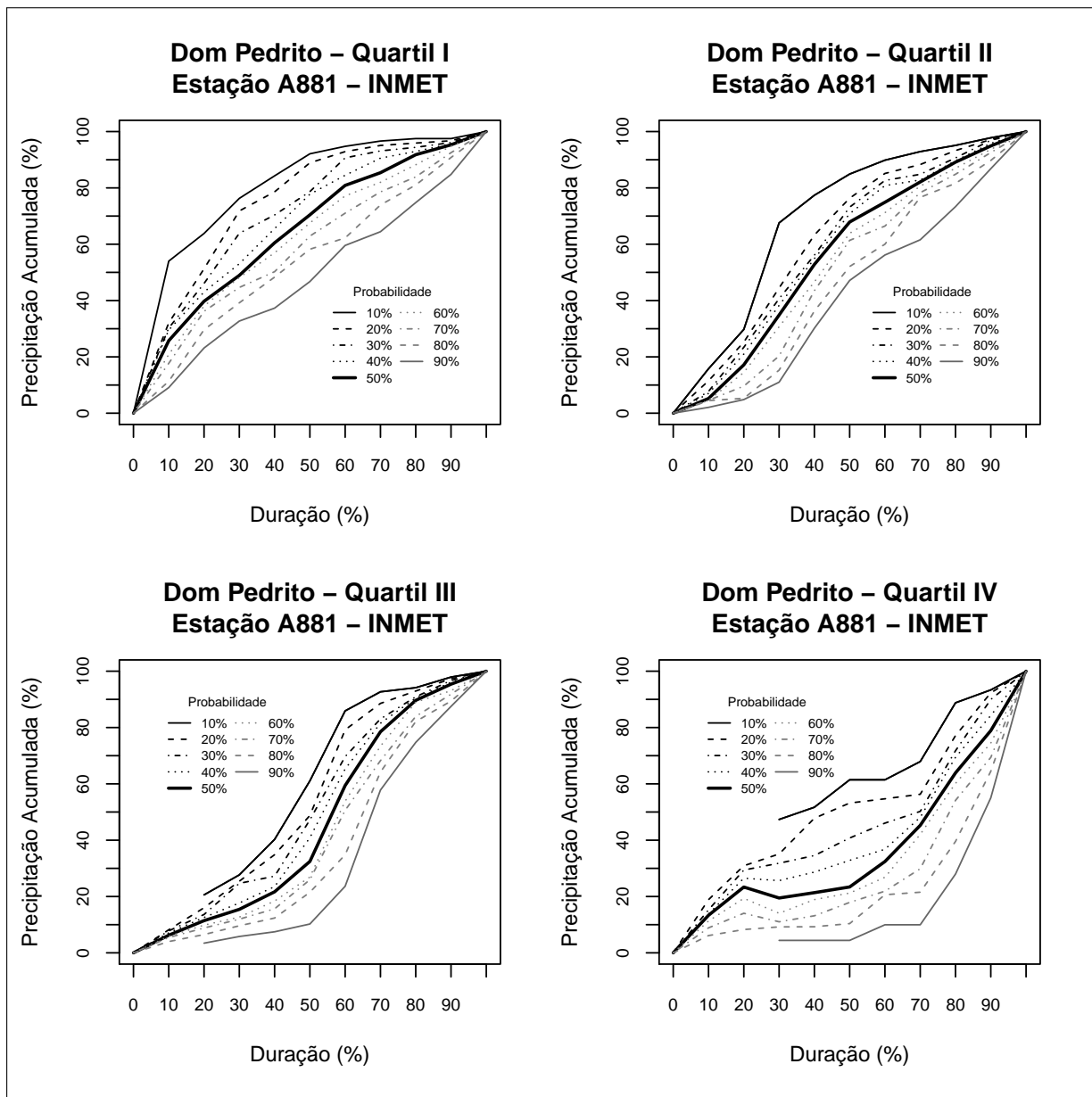
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.9 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Cruz Alta



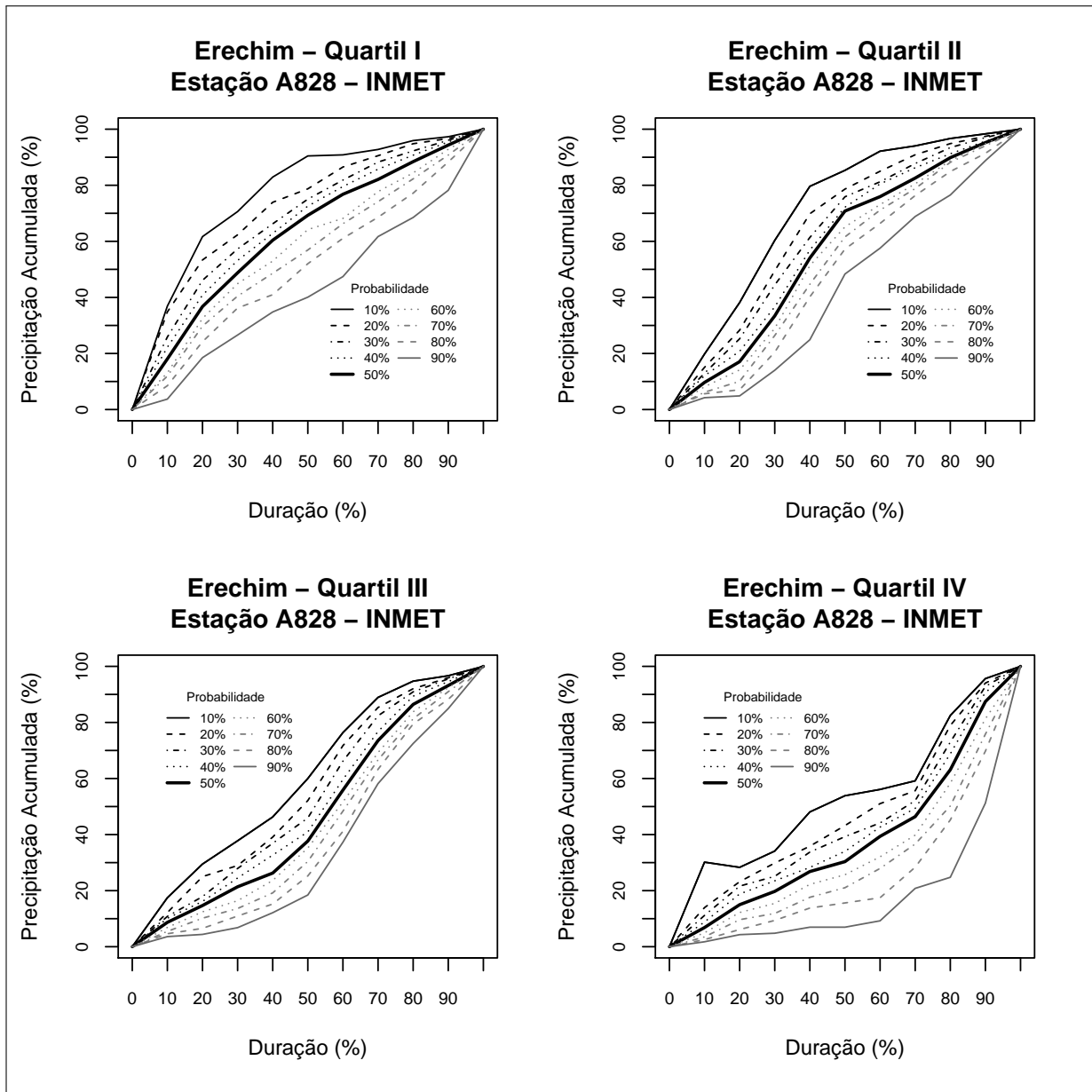
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.10 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Dom Pedrito



Fonte: Elaborado pela autora.

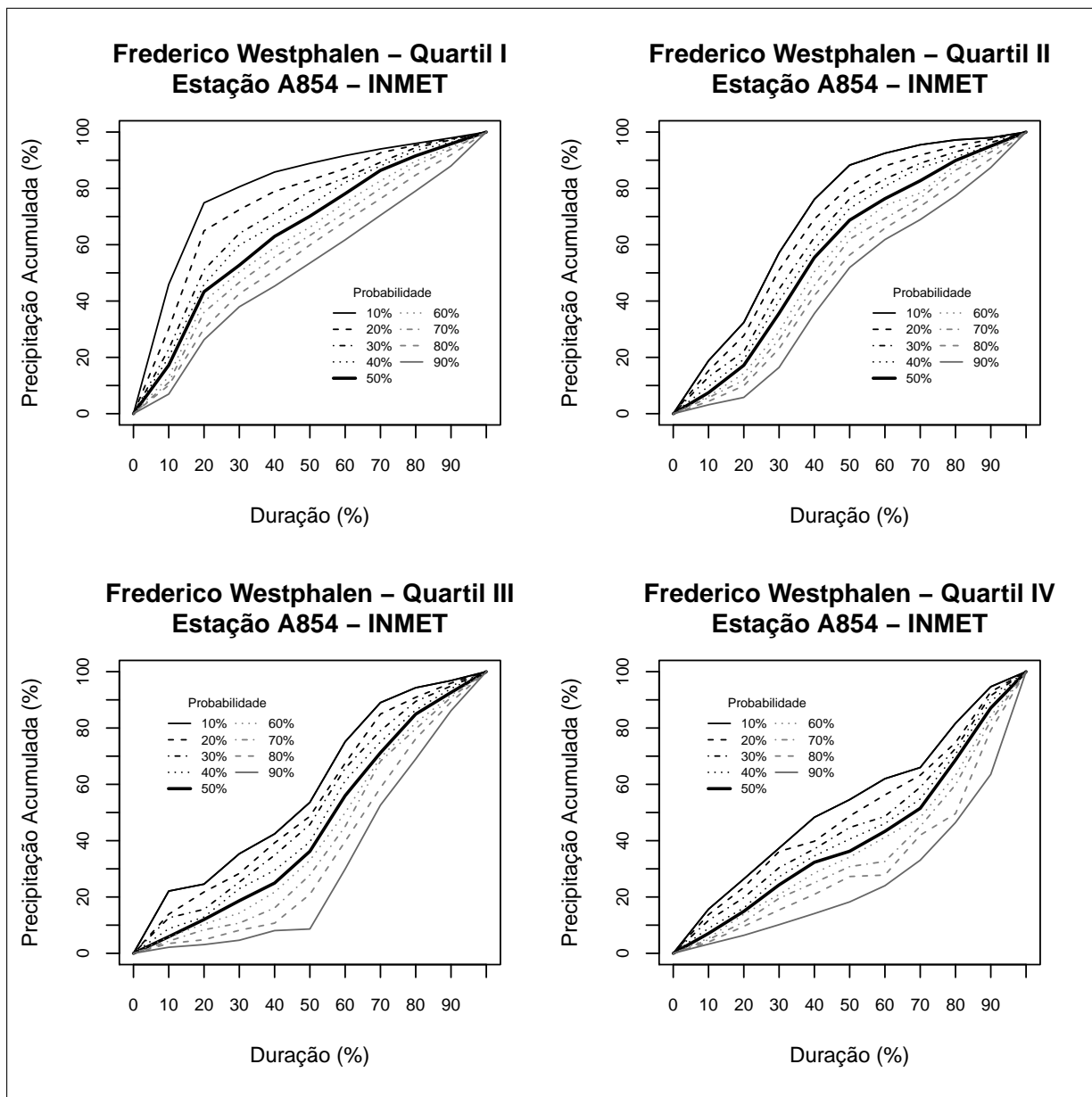
Figura D.11 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Erechim



Fonte: Elaborado pela autora.

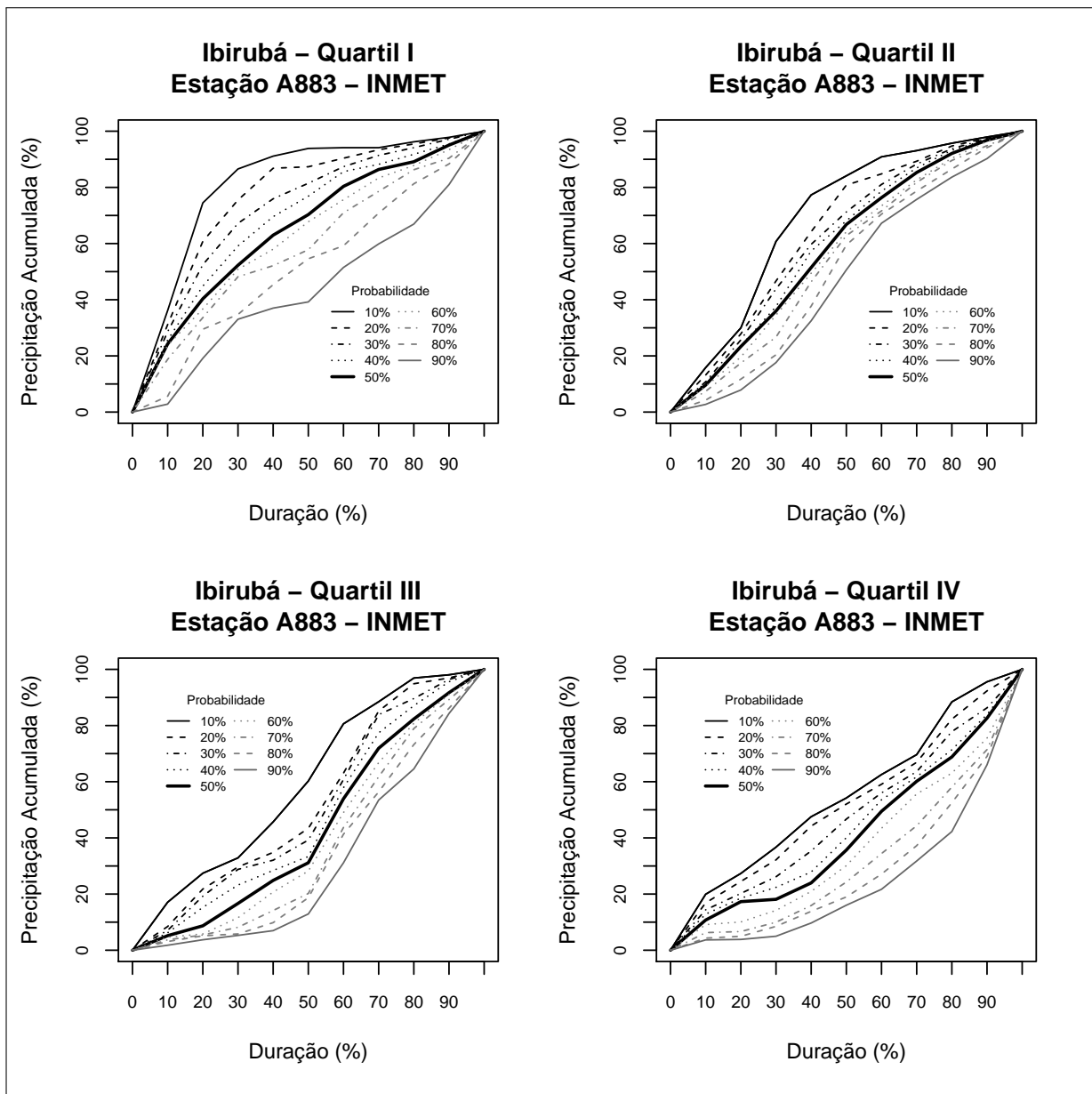


Figura D.12 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Frederico Westphalen



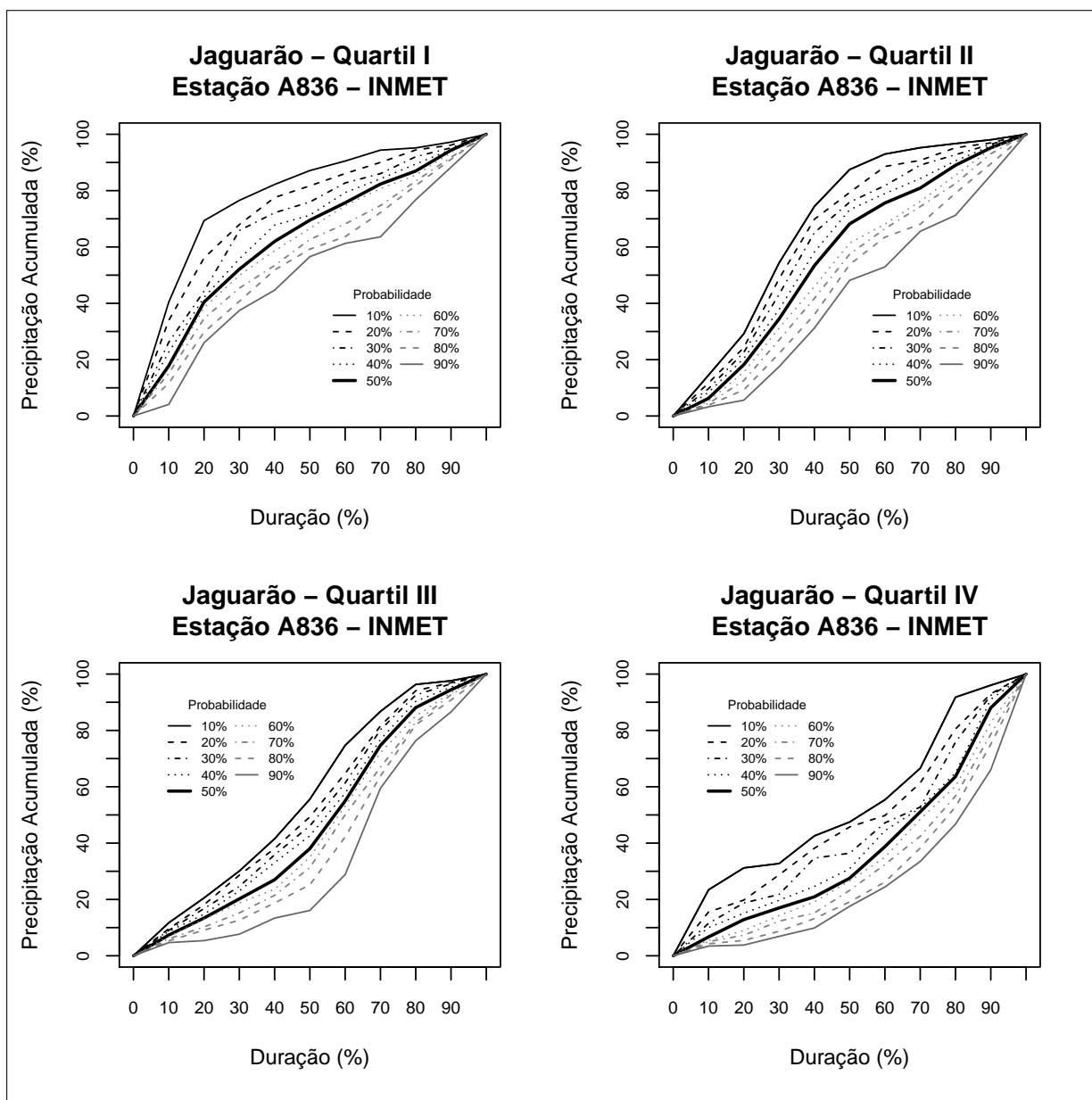
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.13 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Ibirubá



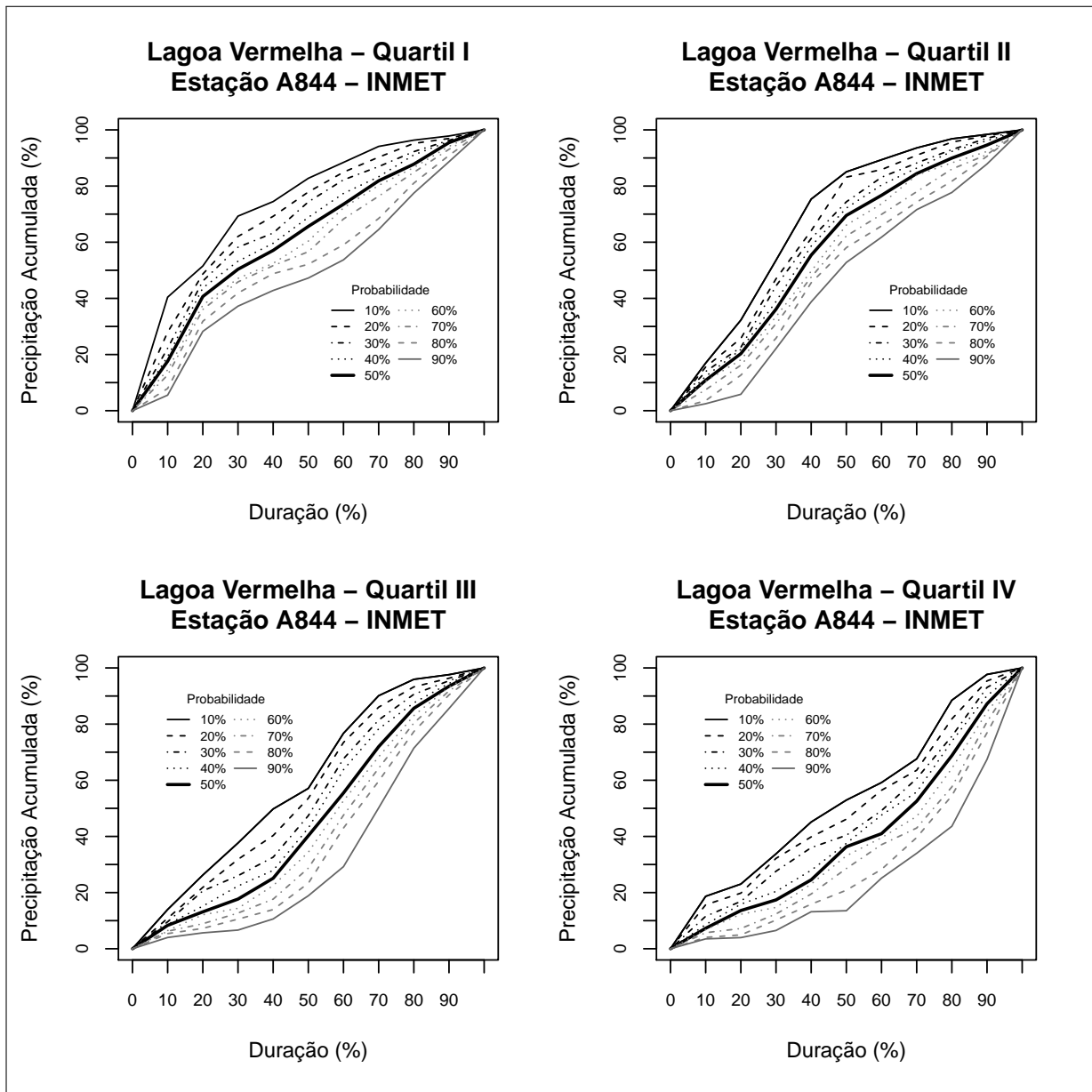
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.14 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Jaguarão



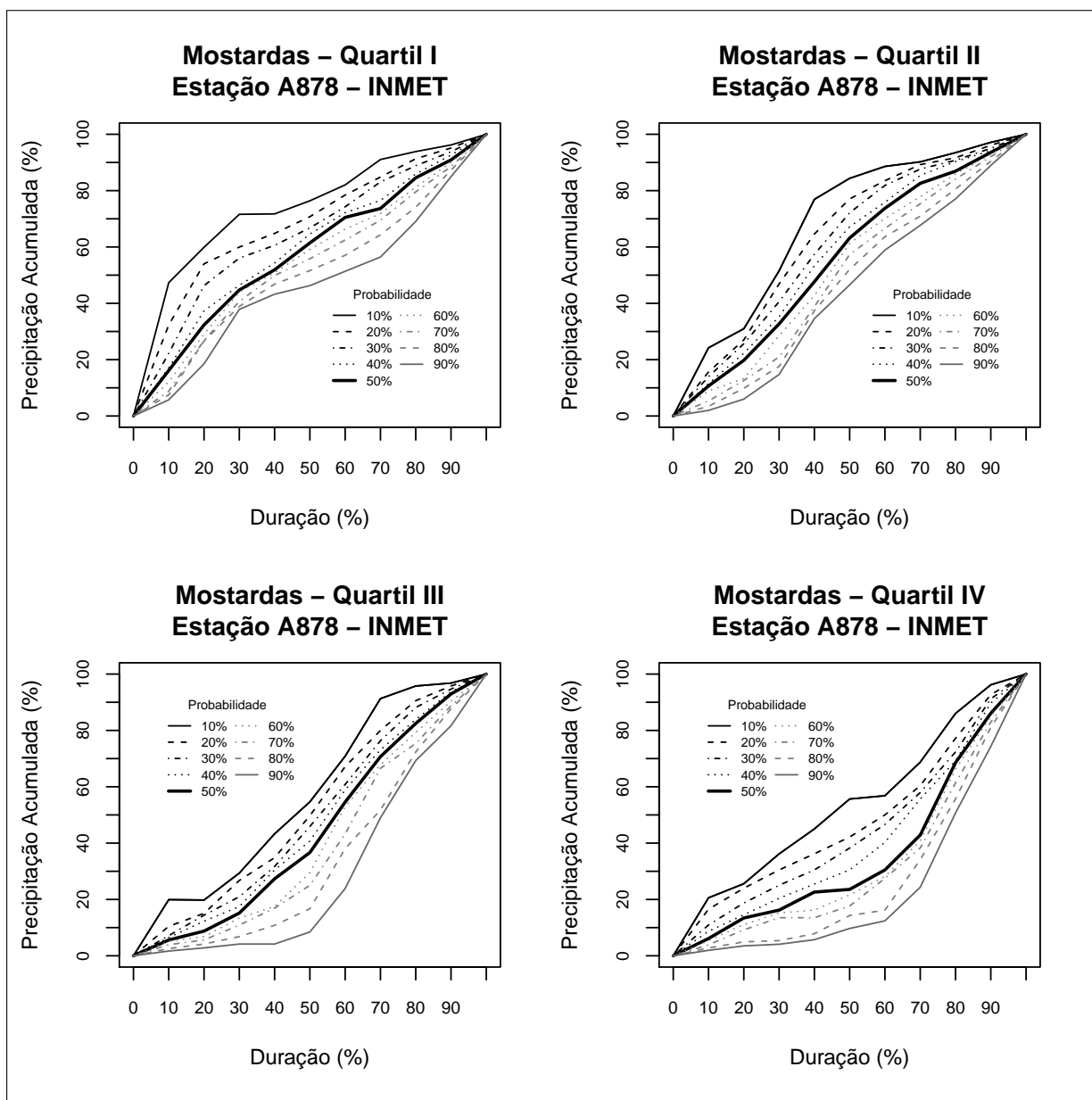
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.15 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Lagoa Vermelha



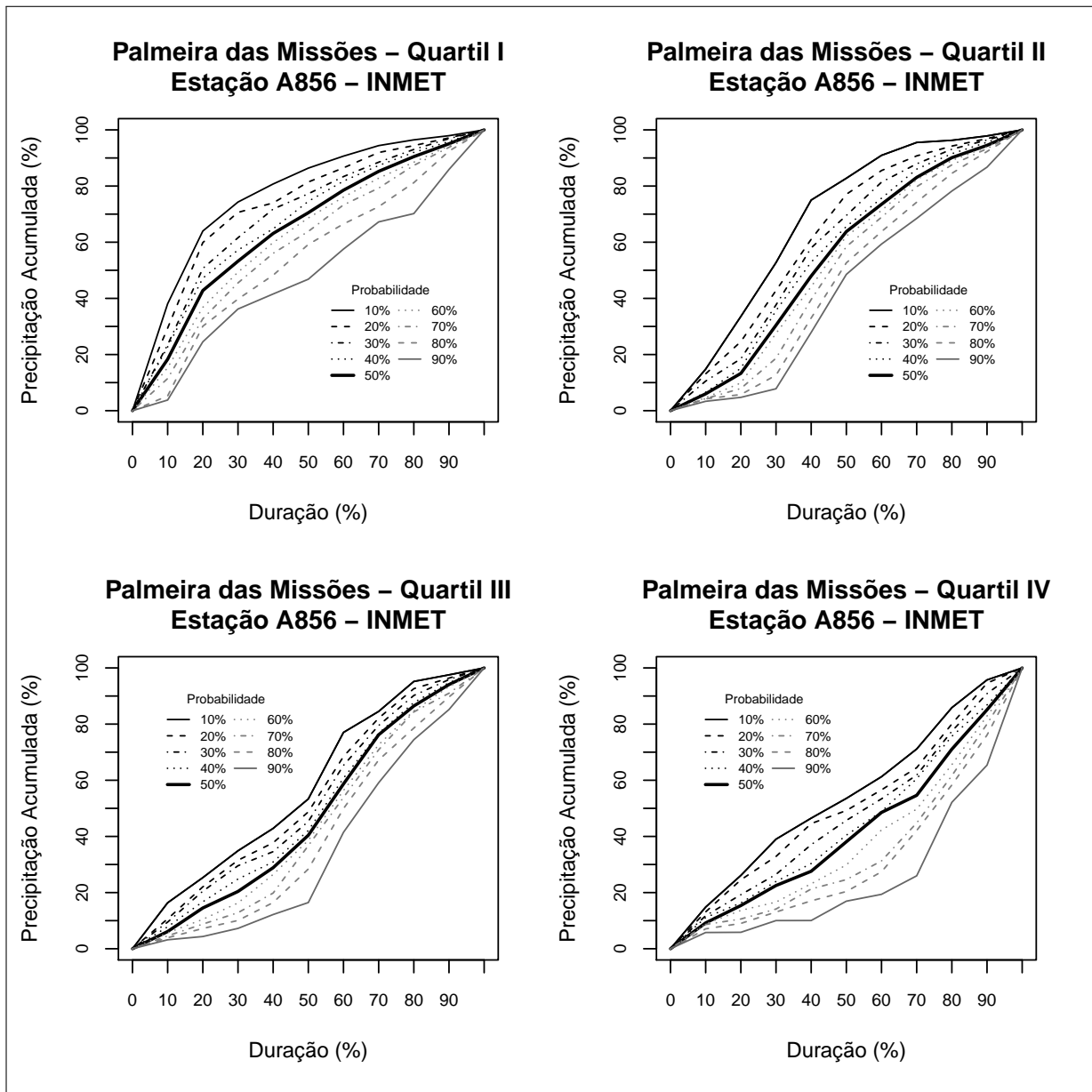
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.16 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Mostardas



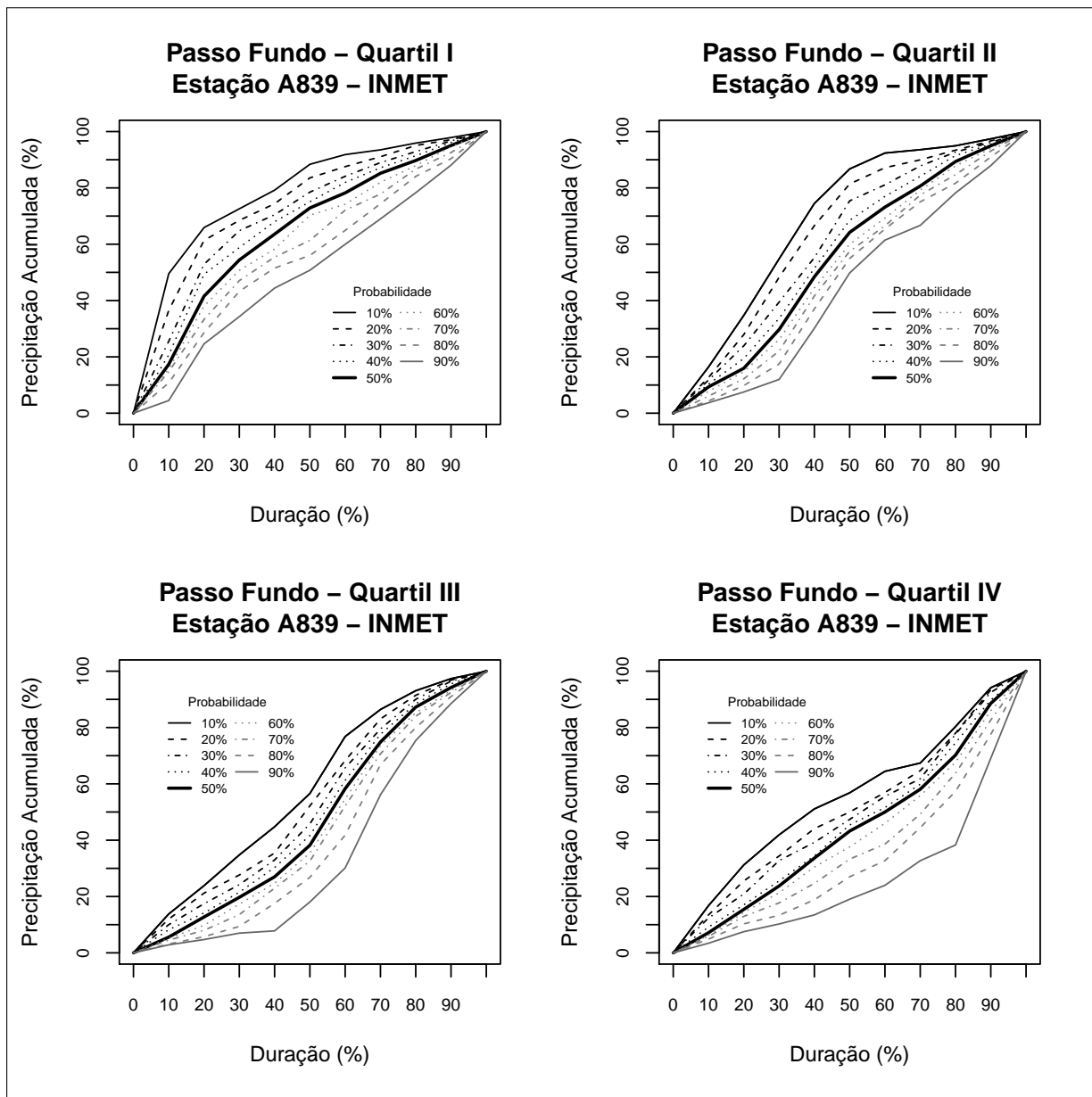
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.17 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Palmeira das Missões



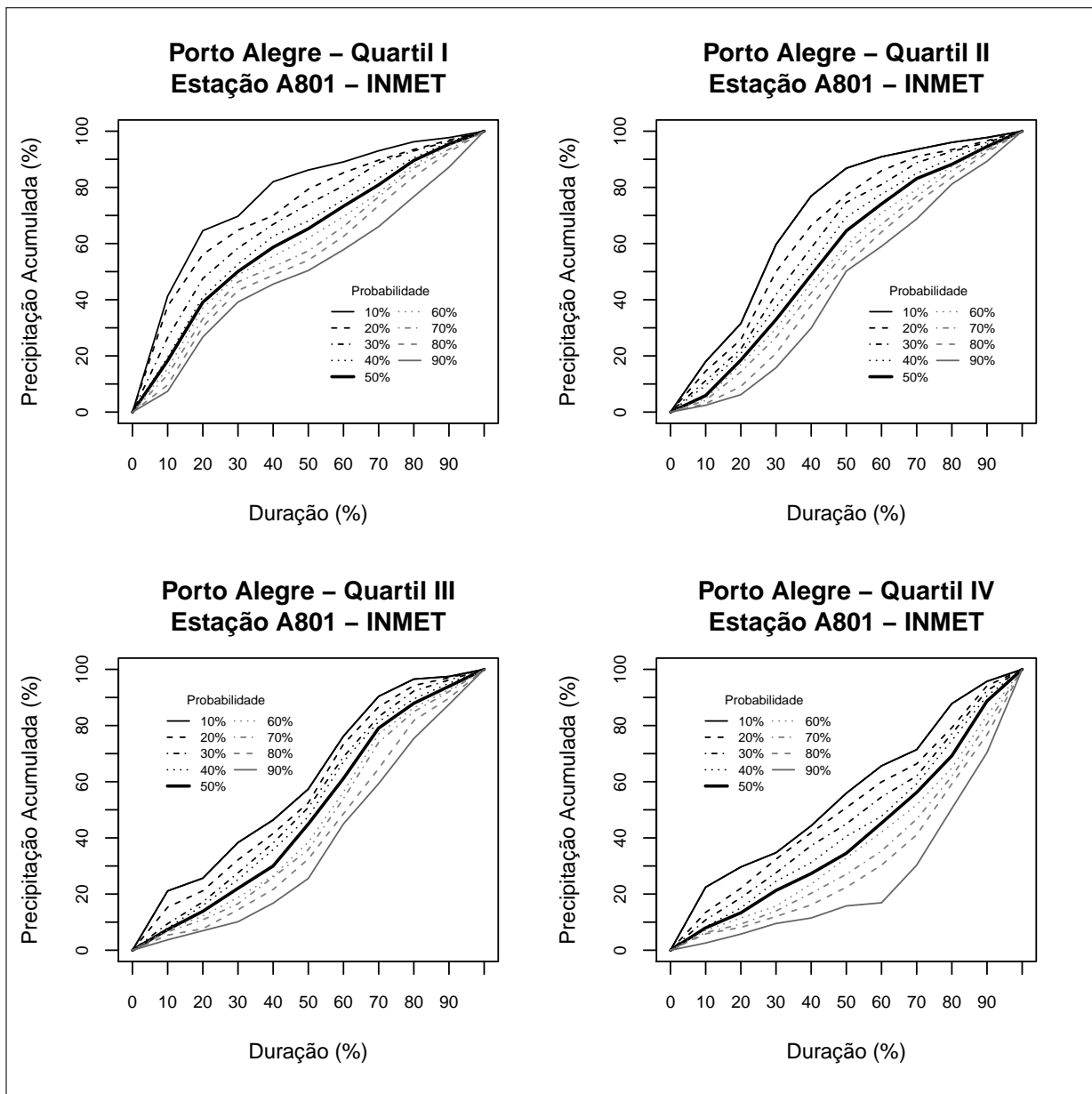
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.18 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Passo Fundo



Fonte: Elaborado pela autora.

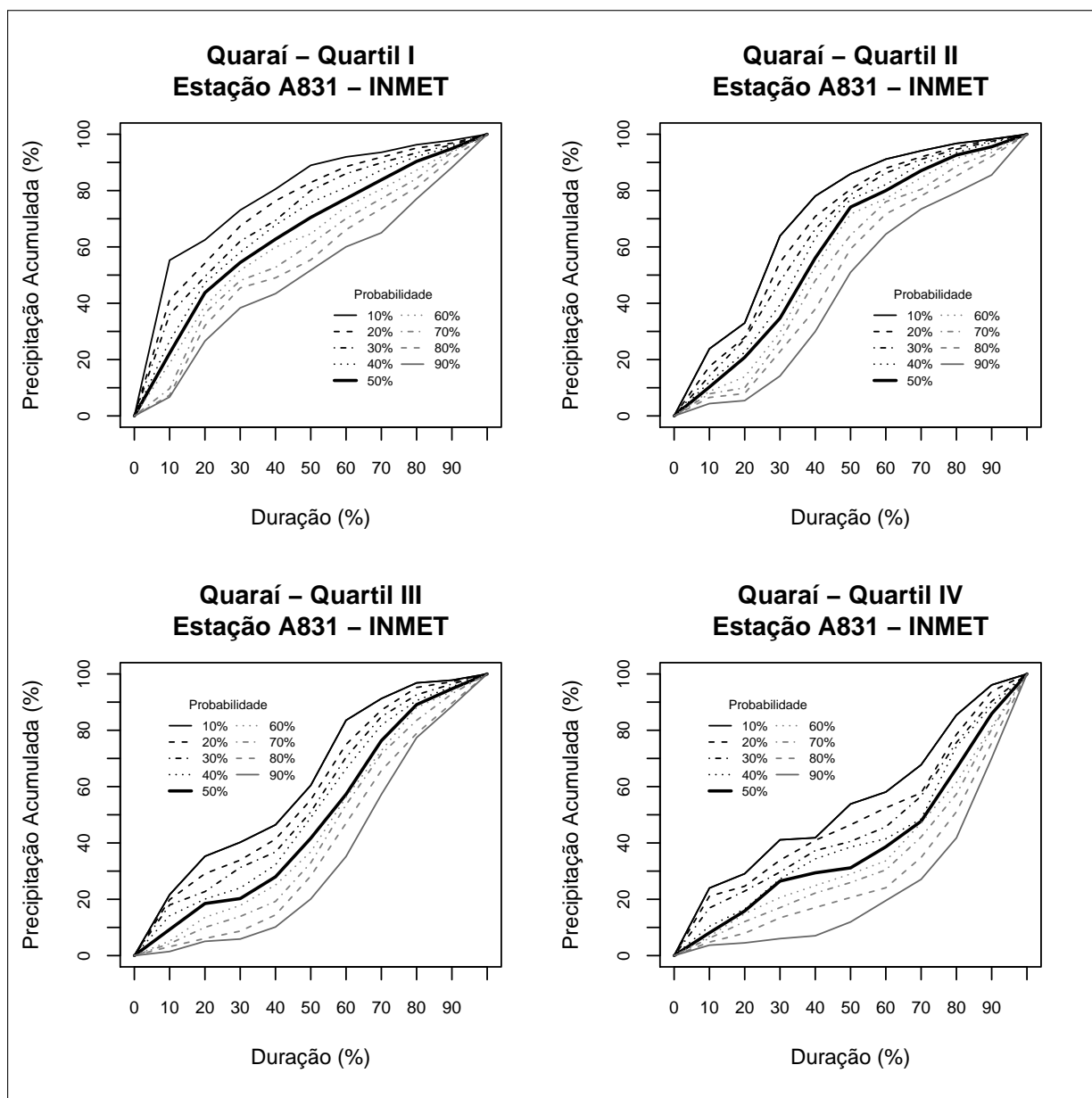
Figura D.19 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Porto Alegre



Fonte: Elaborado pela autora.

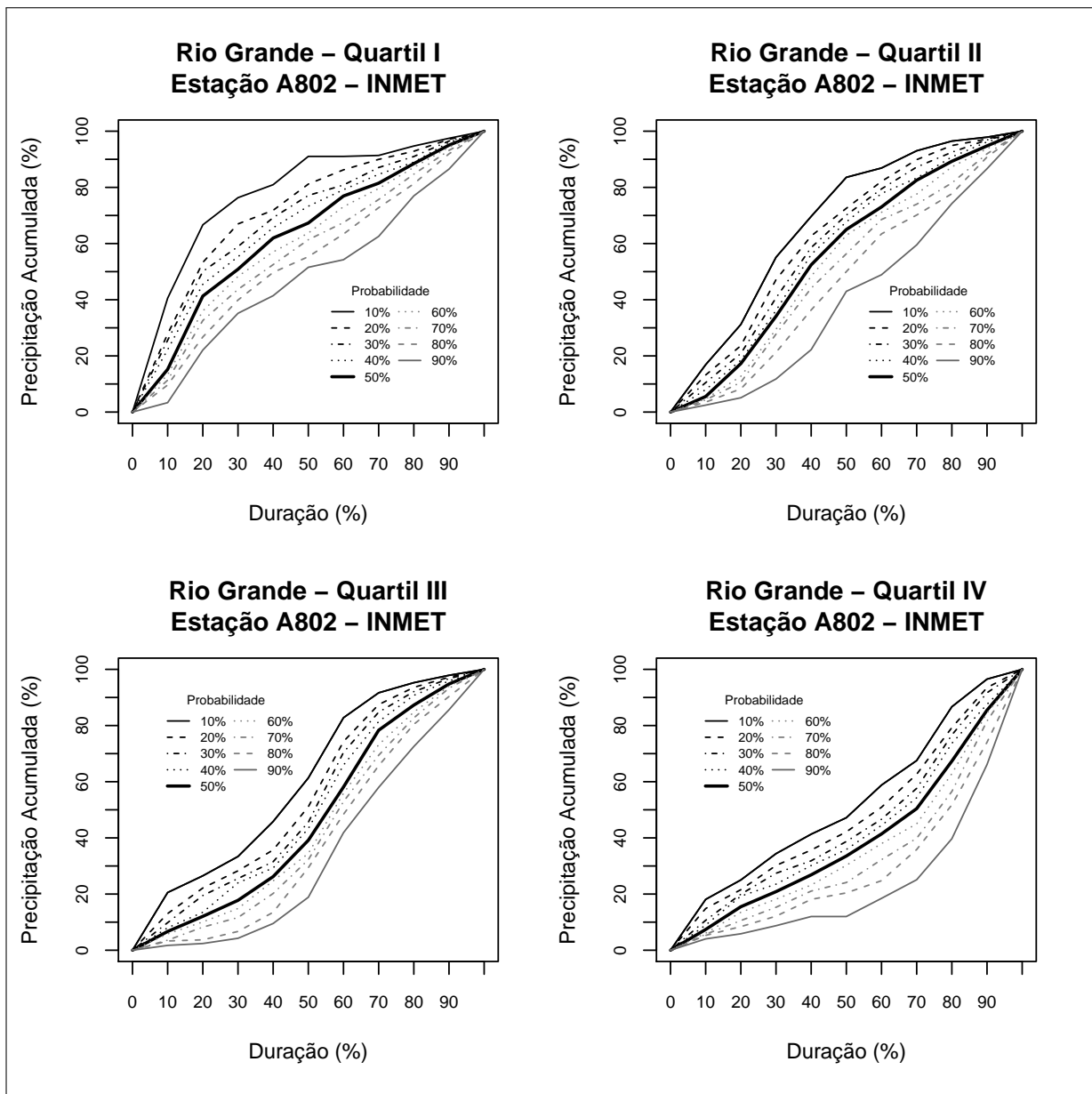


Figura D.20 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Quaraí



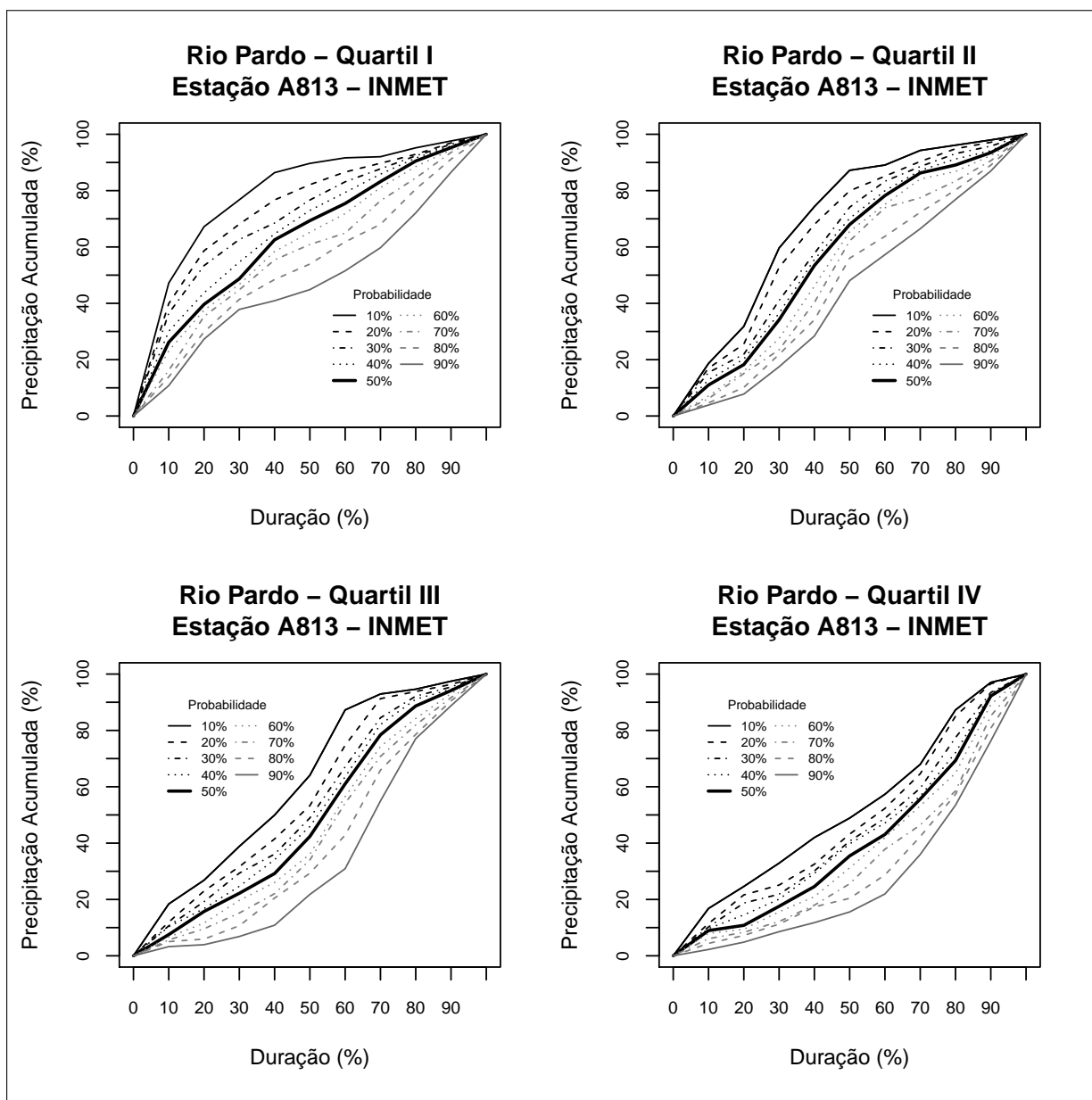
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.21 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Rio Grande



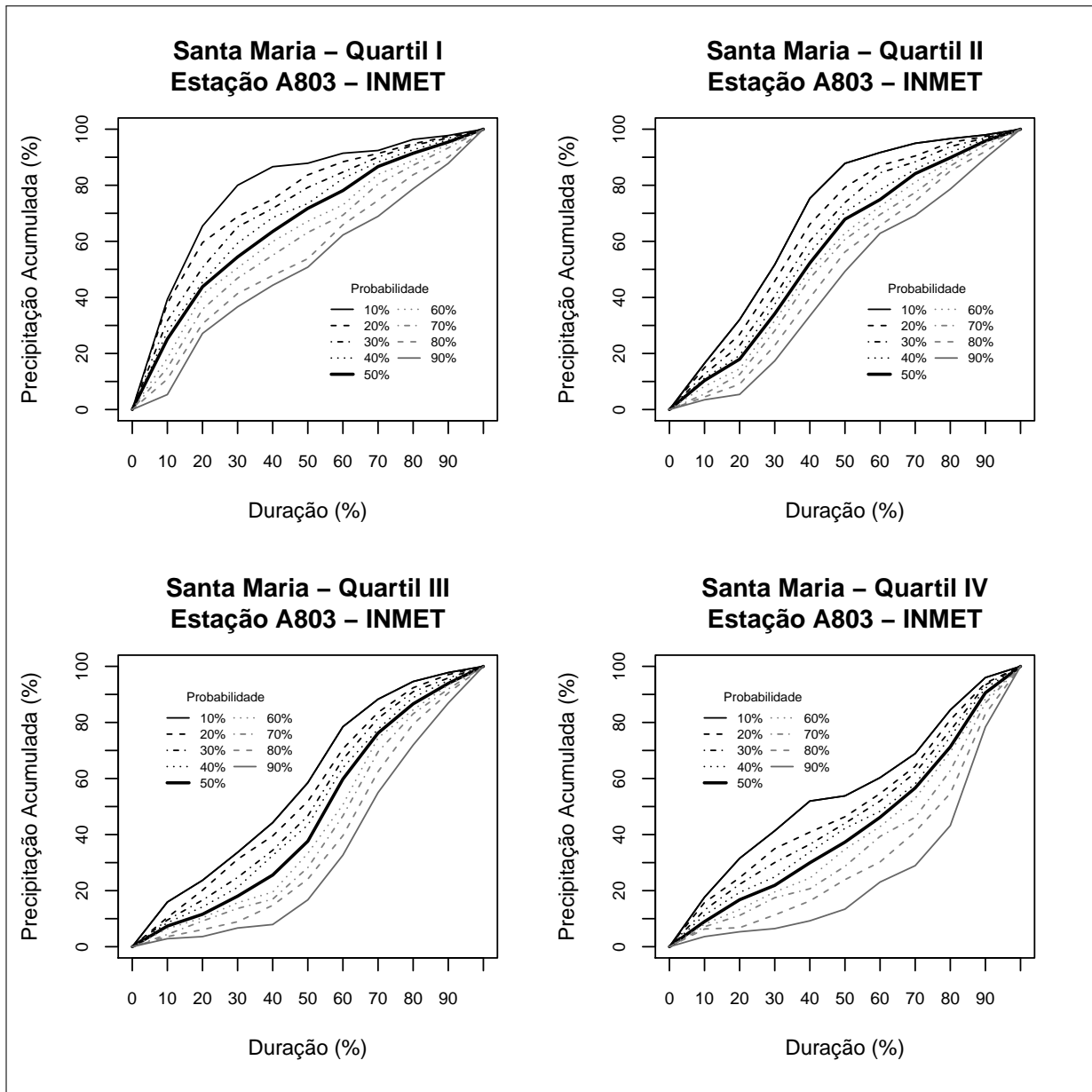
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.22 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Rio Pardo



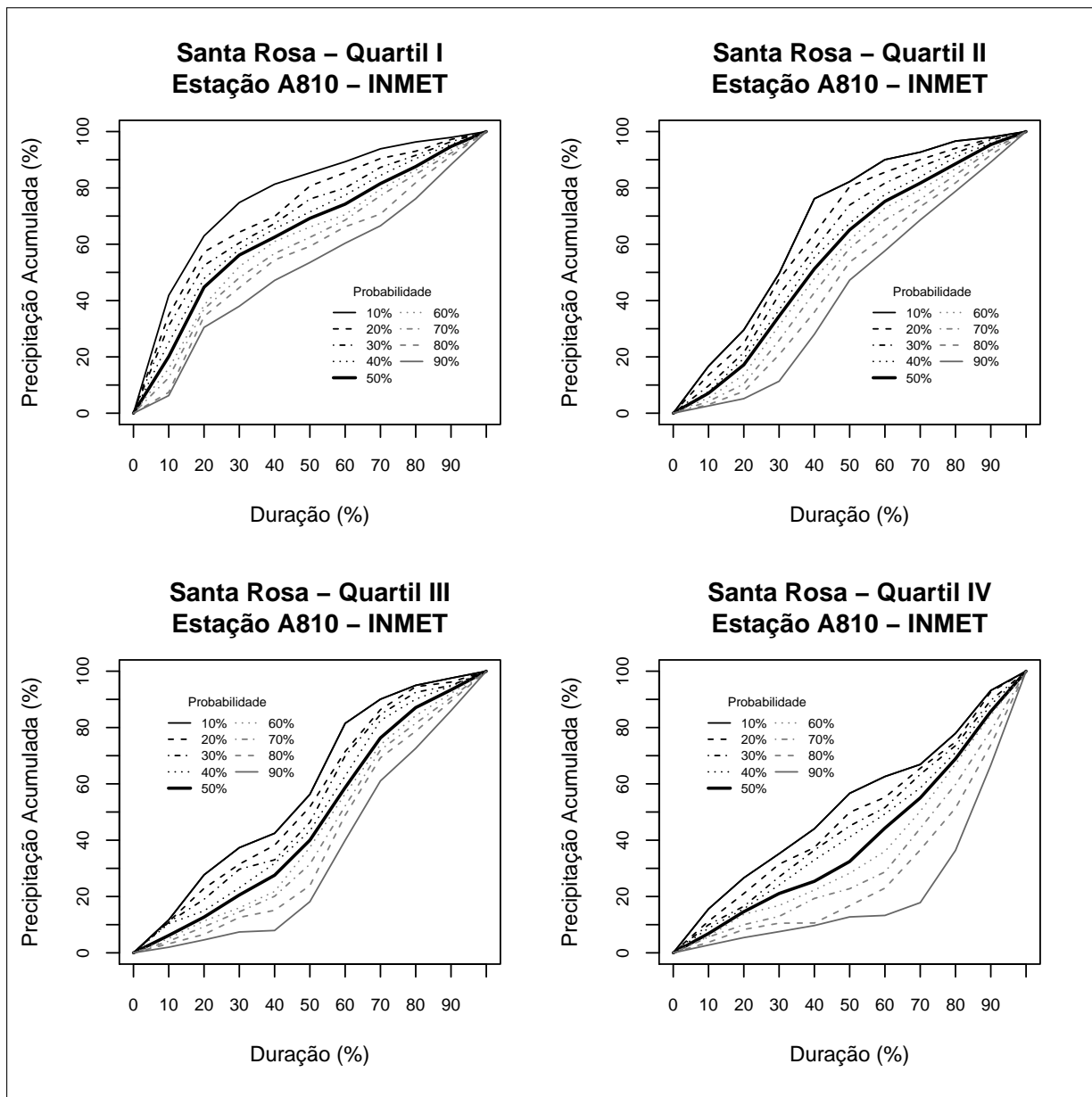
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.23 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santa Maria



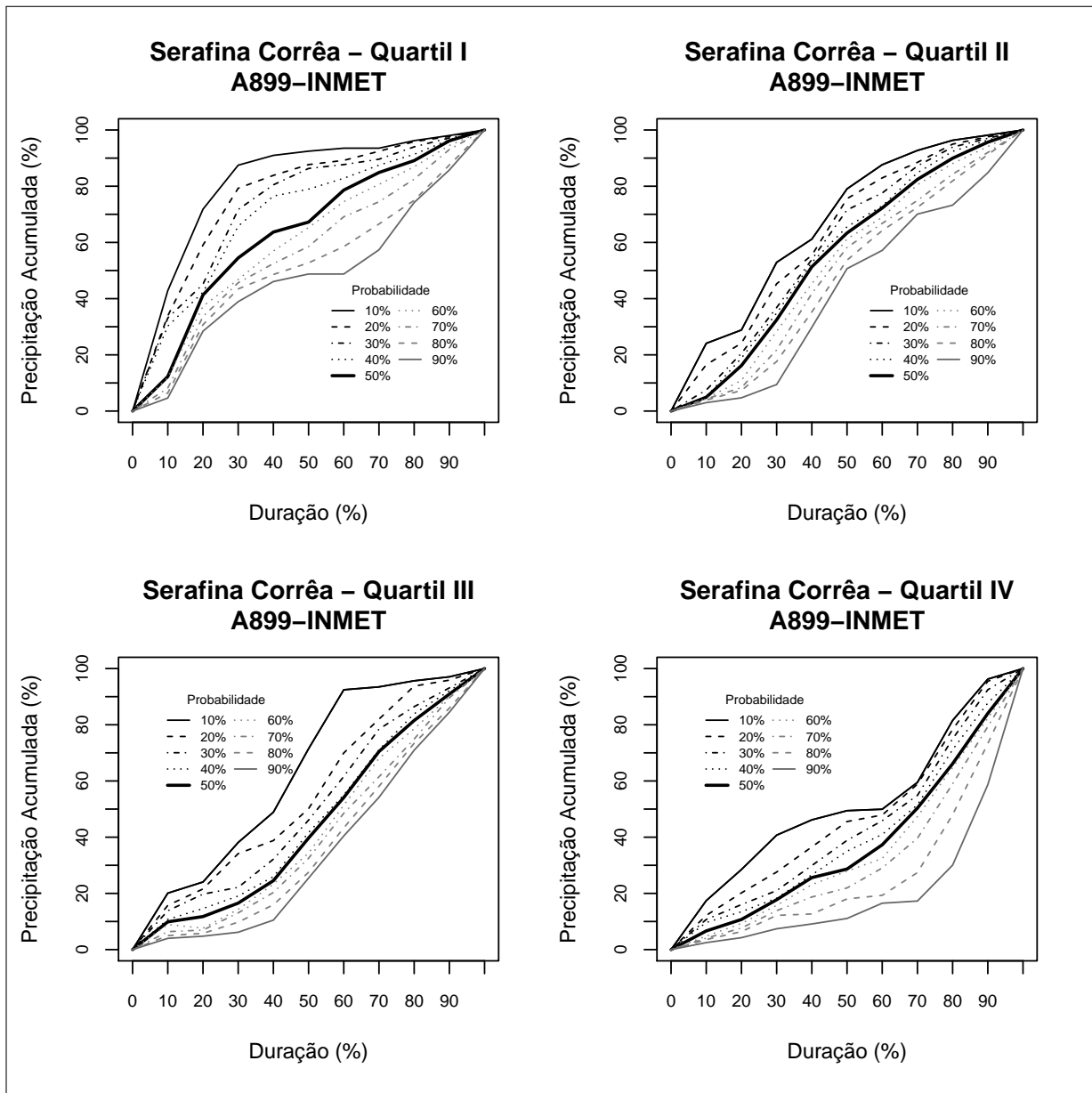
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.24 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santa Rosa



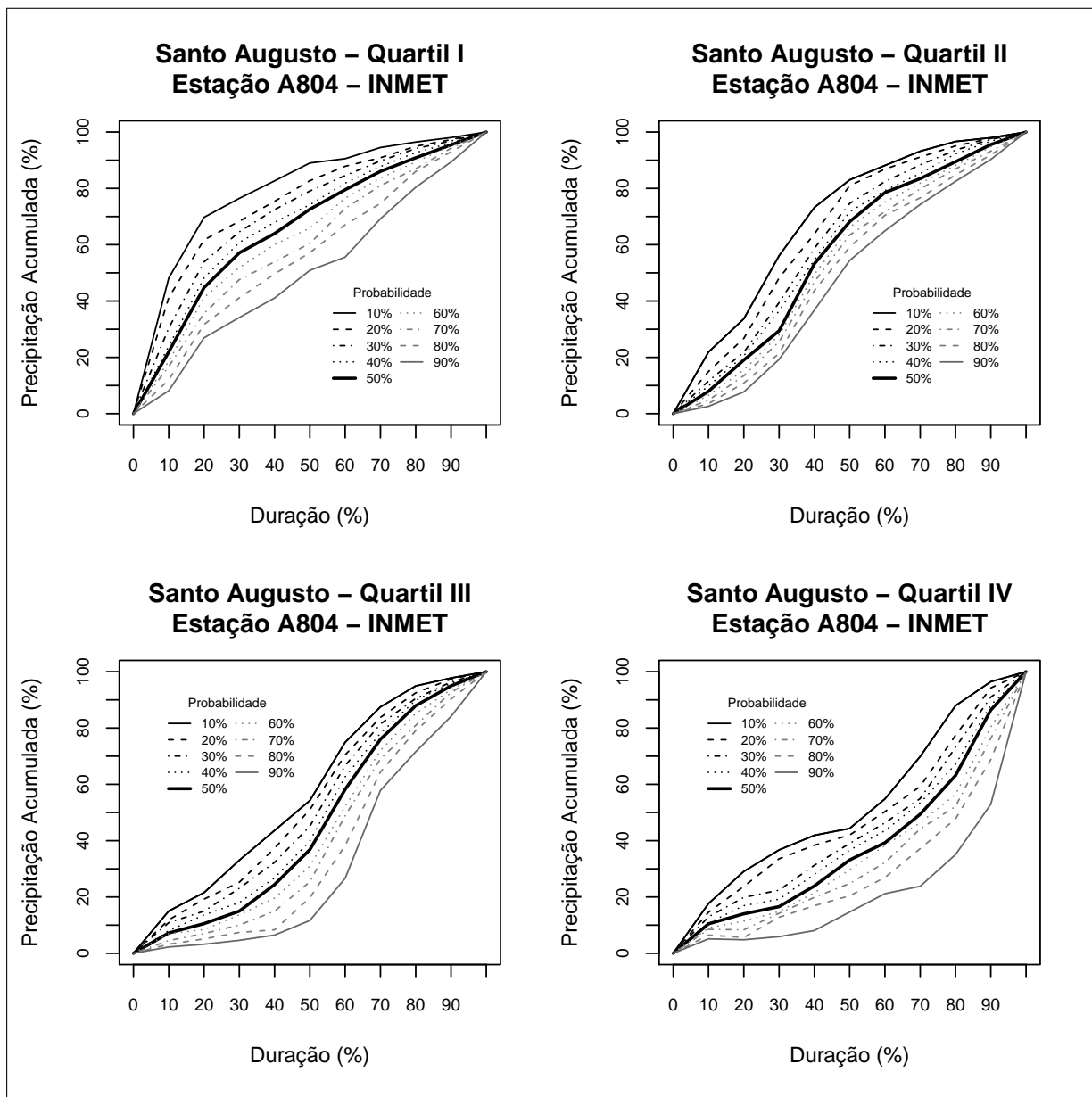
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.25 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santa Vitória do Palmar



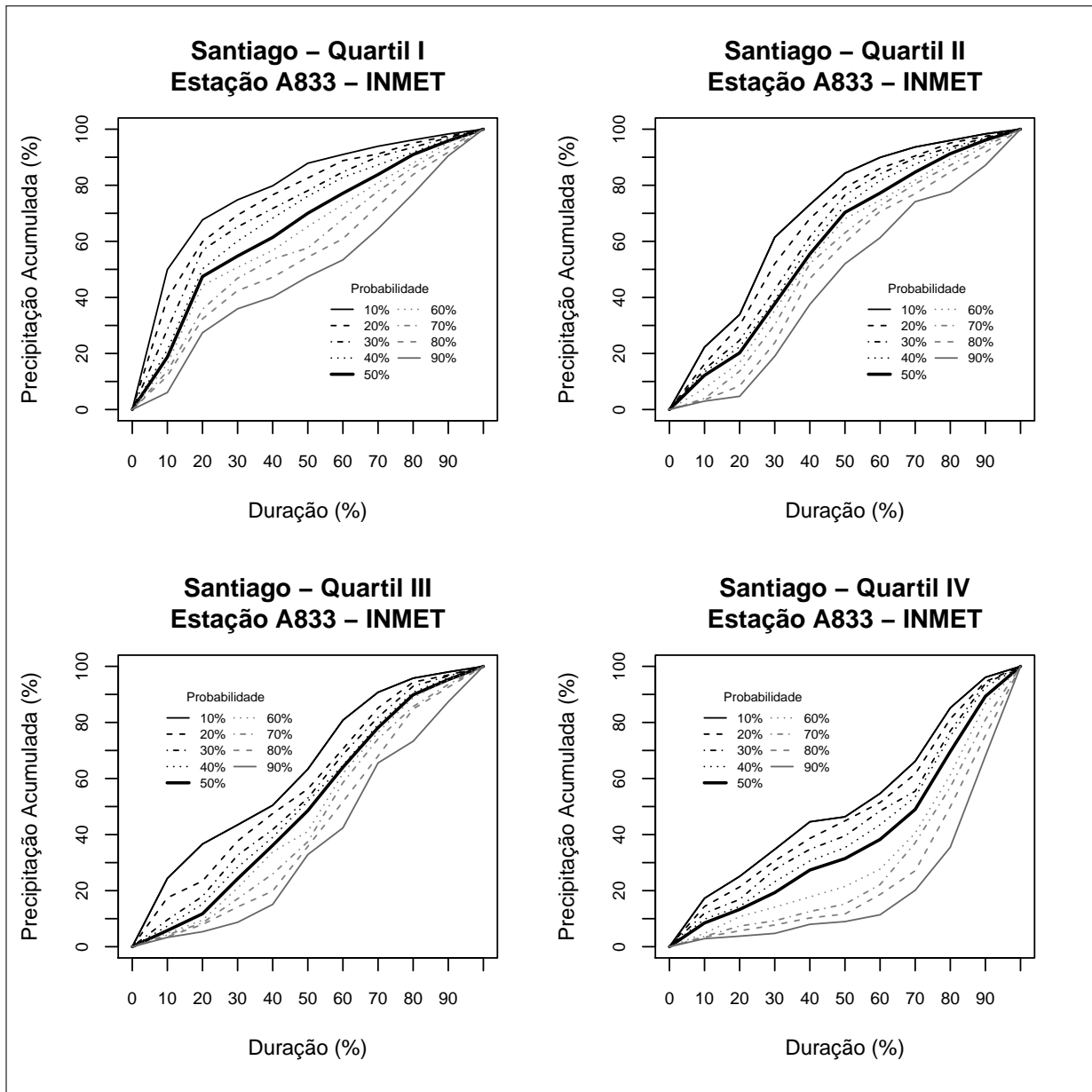
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.26 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santana do Livramento



Fonte: Elaborado pela autora.

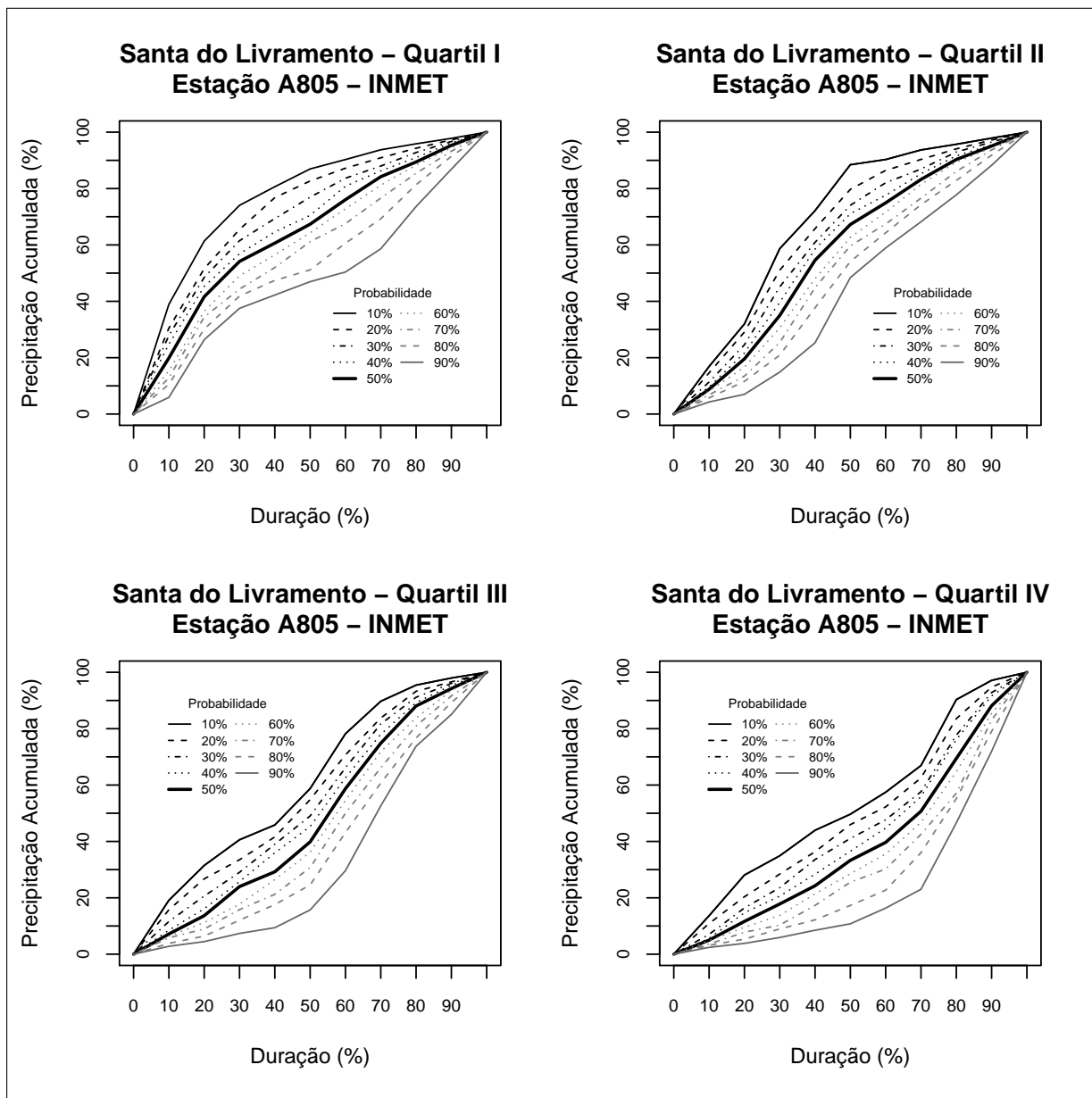
Figura D.27 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santiago



Fonte: Elaborado pela autora.

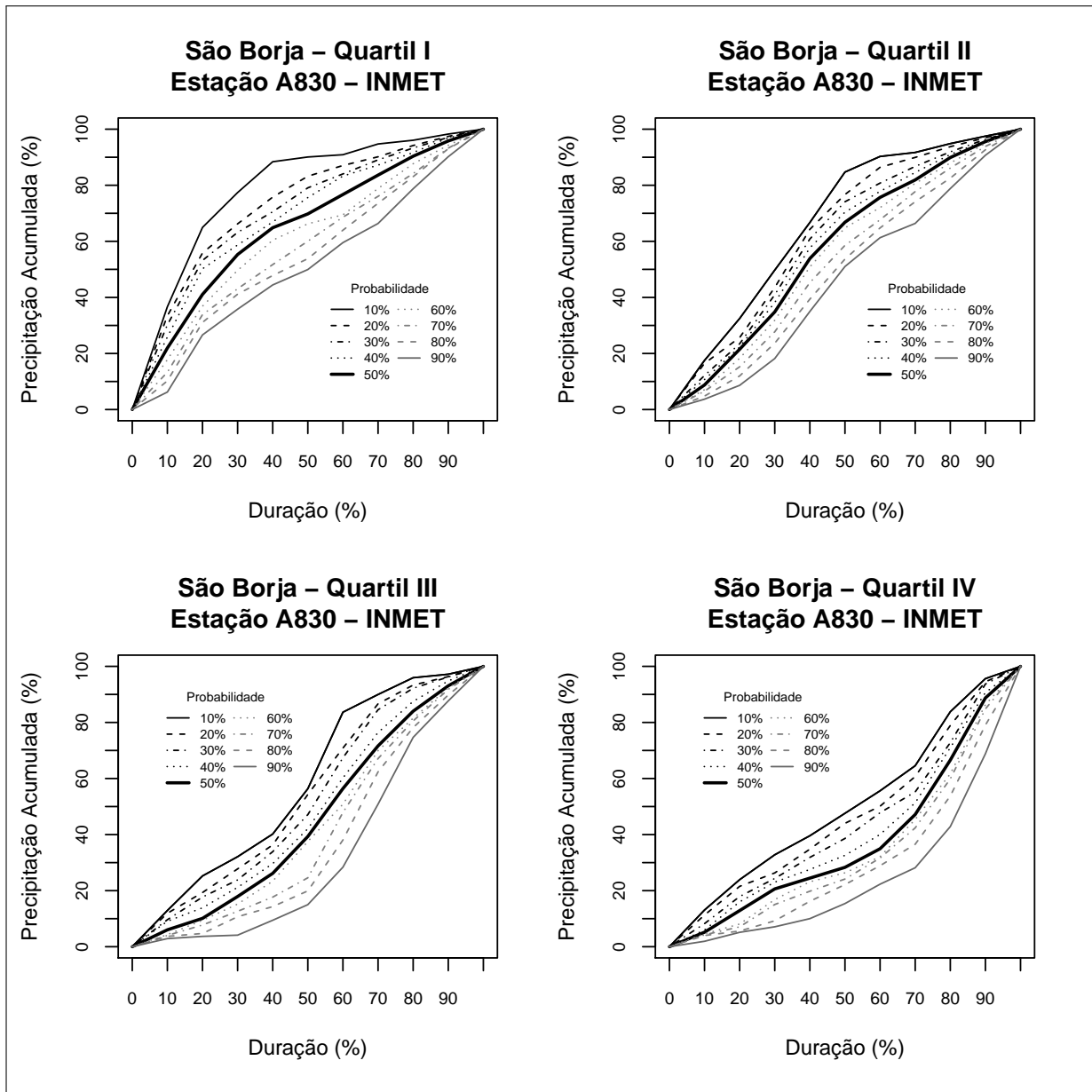


Figura D.28 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Santo Augusto



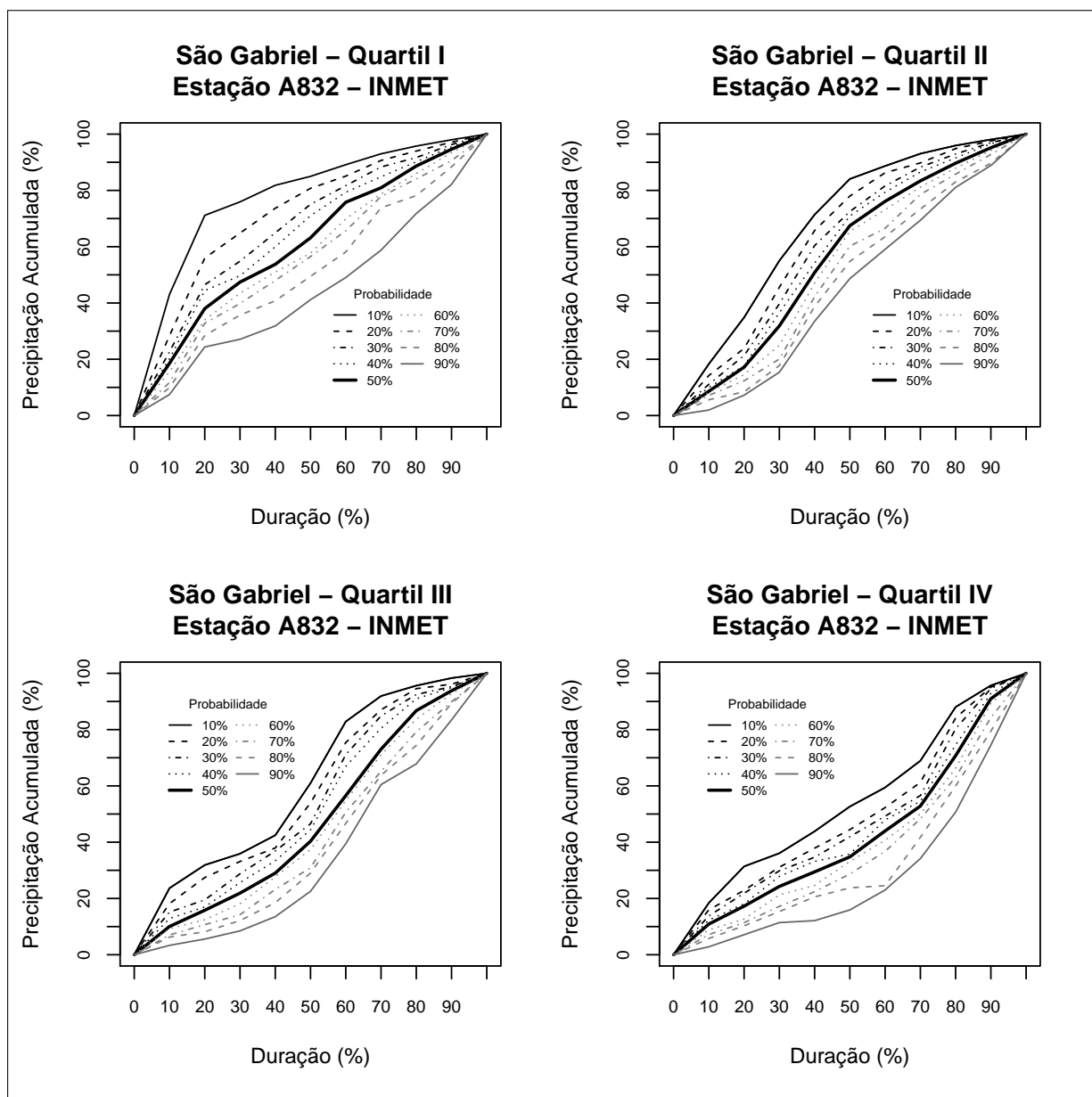
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.29 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Borja



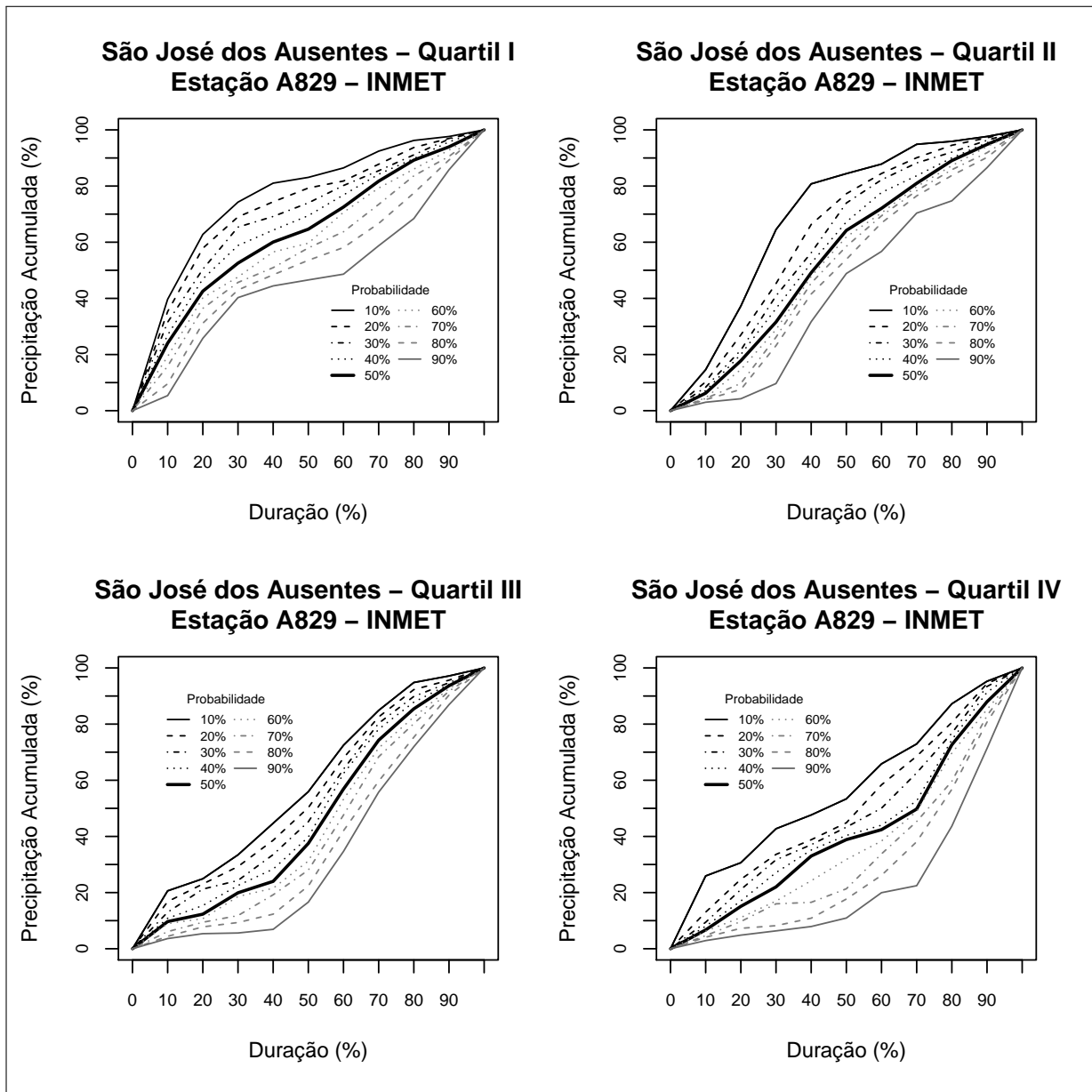
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.30 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Gabriel



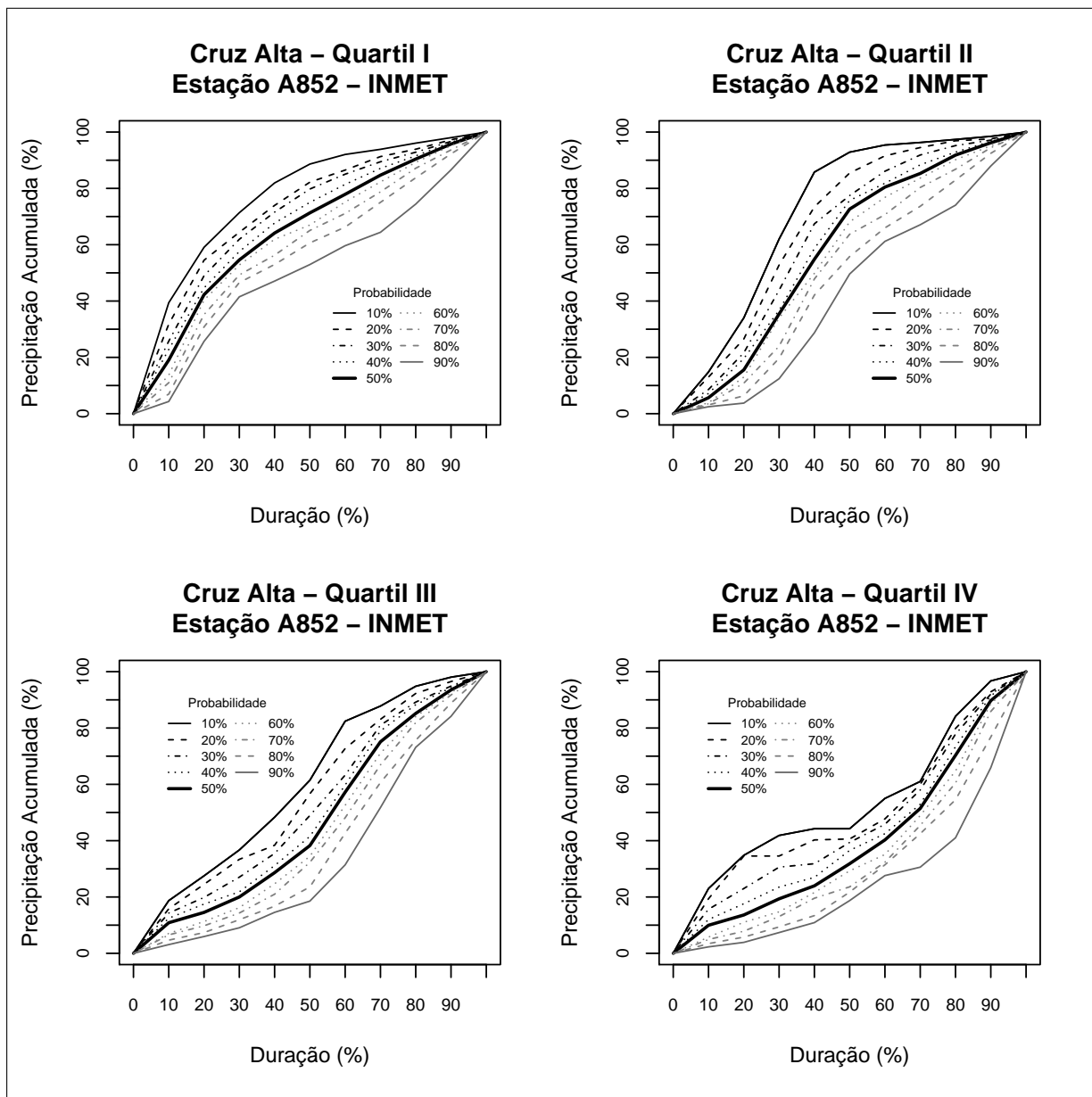
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.31 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São José dos Ausentes



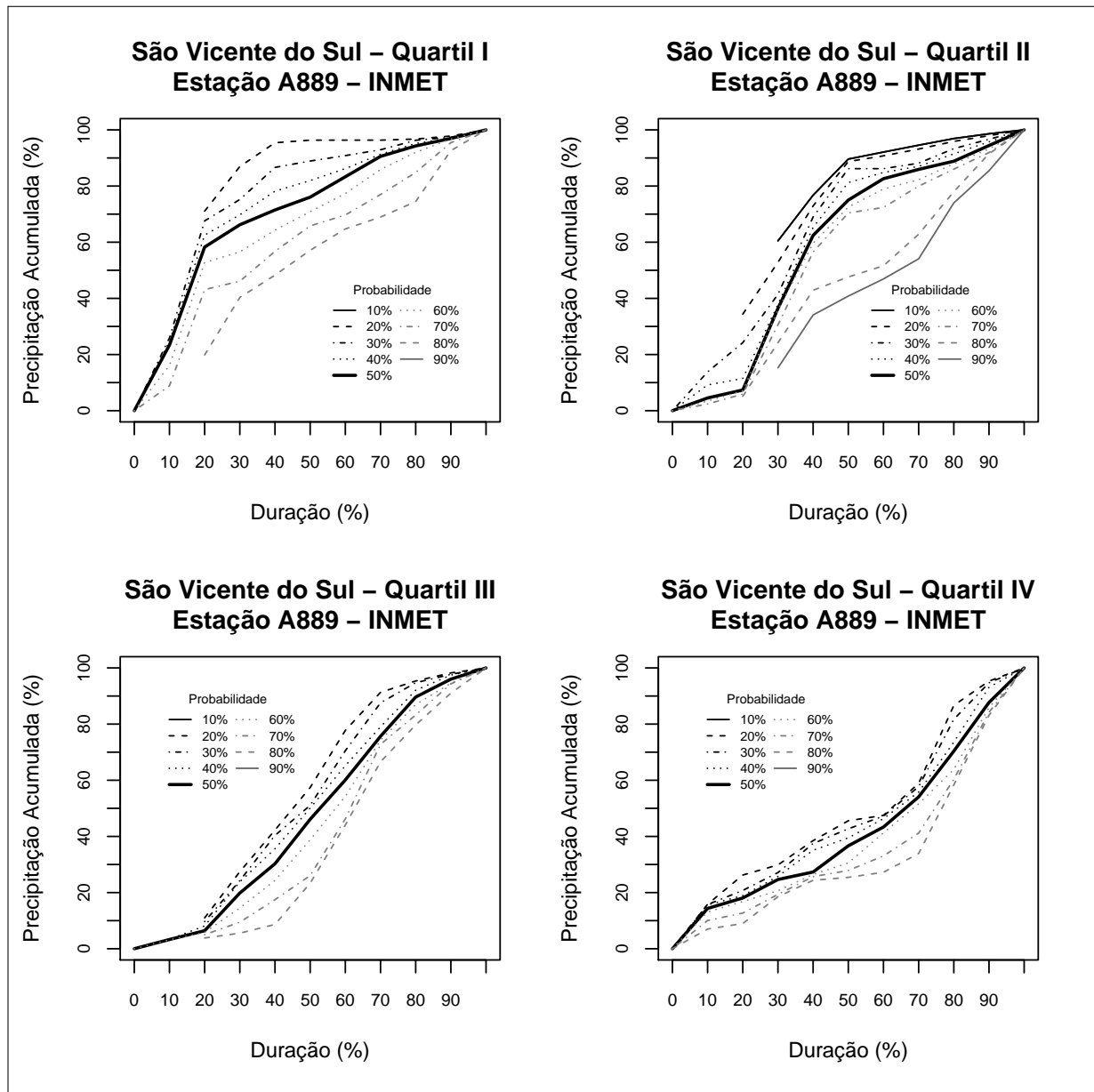
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.32 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Luiz Gonzaga



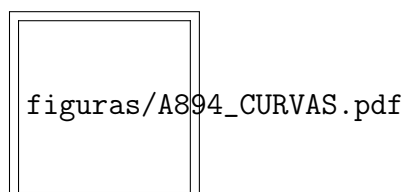
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.33 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação São Vicente do Sul



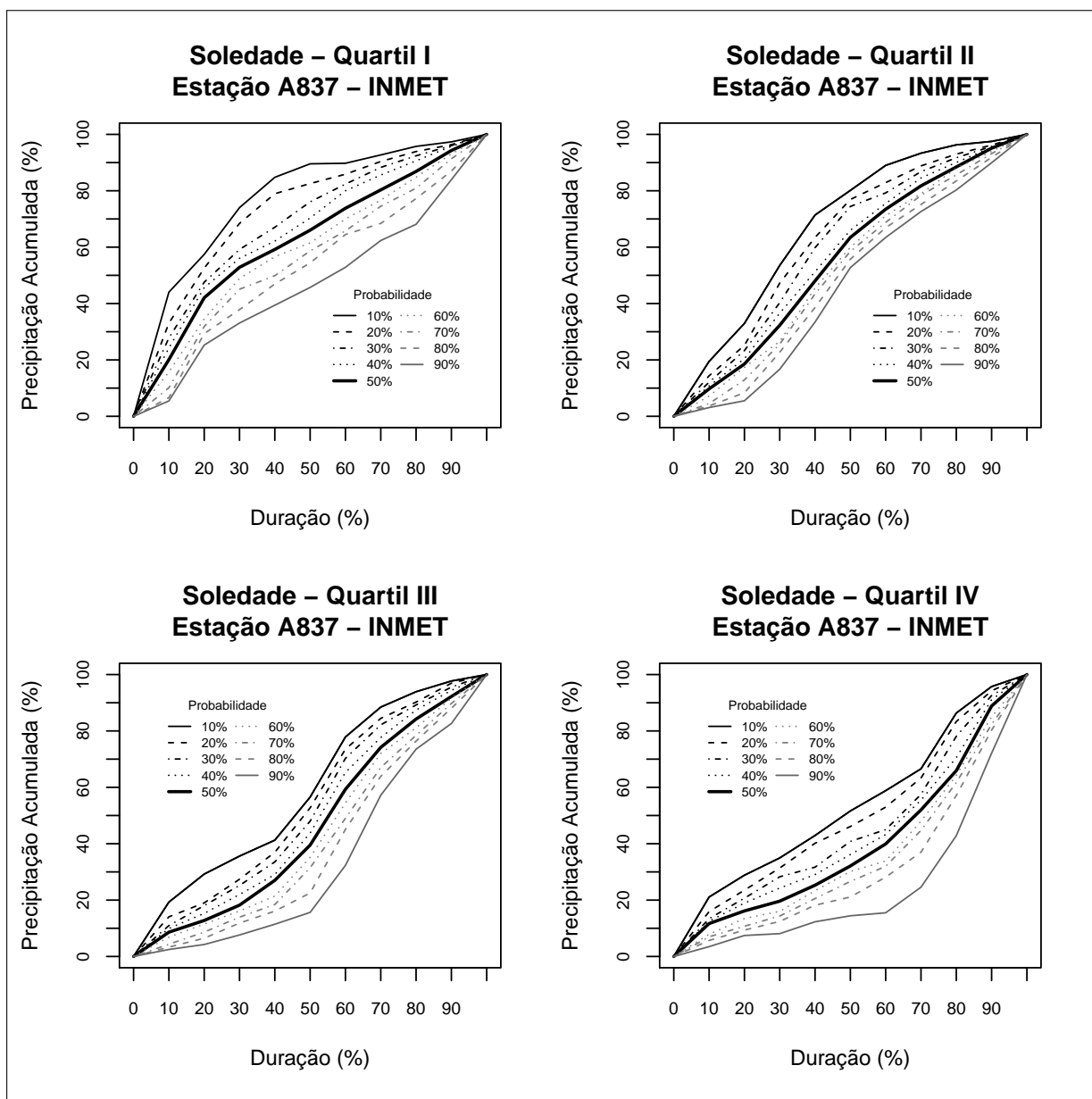
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.34 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Serafina Correa



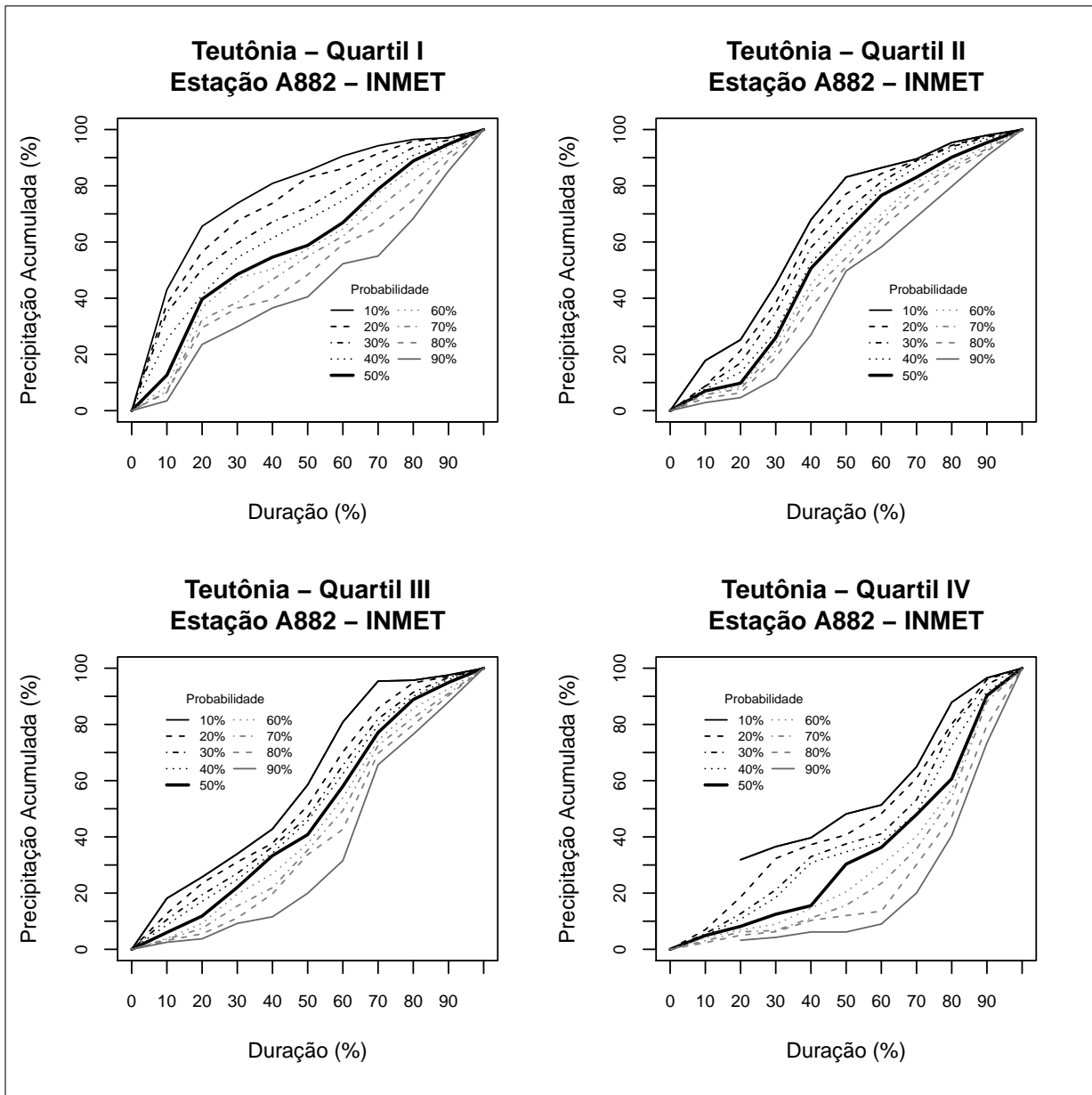
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.35 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Soledade



Fonte: Elaborado pela autora.

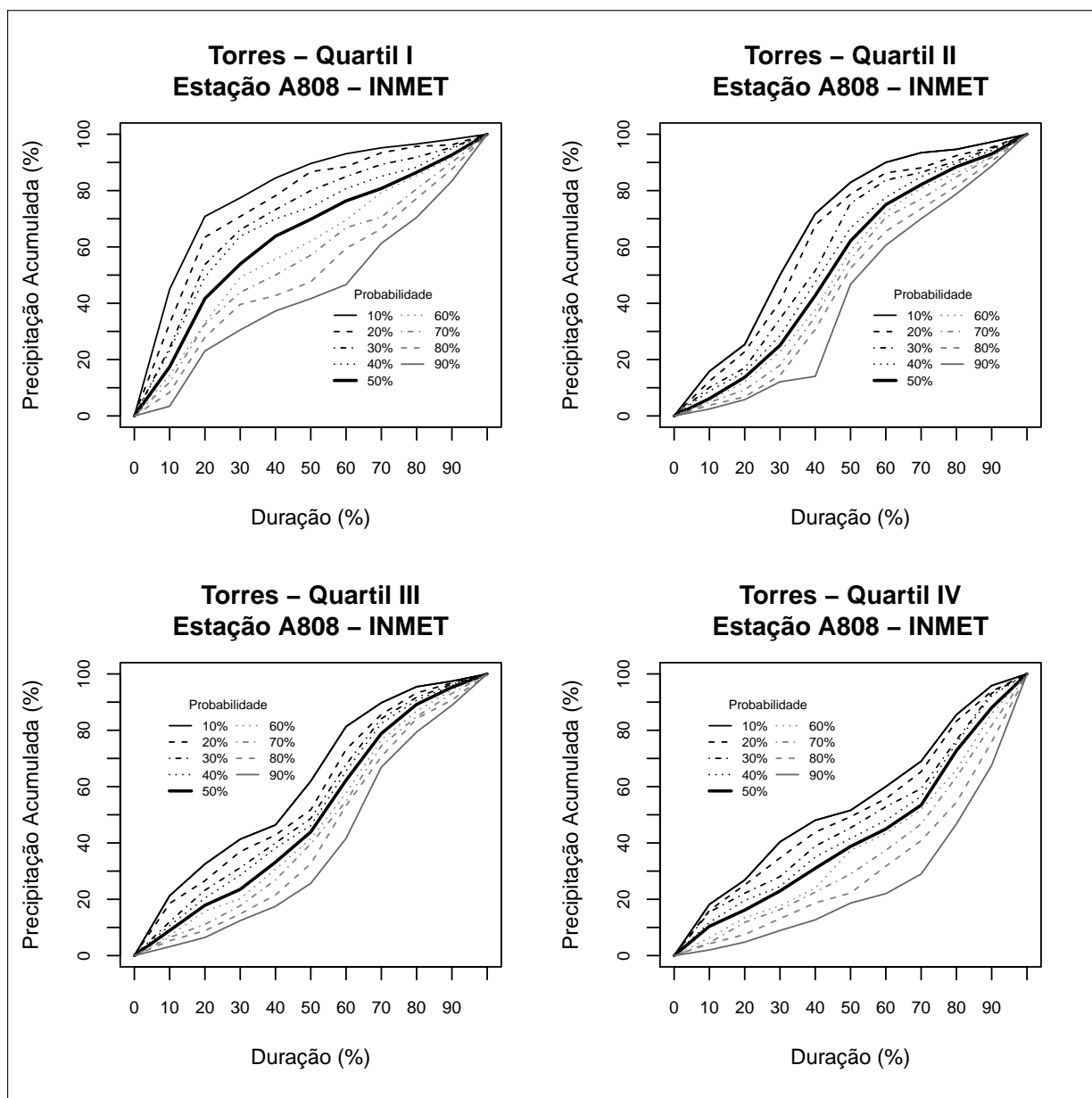
Figura D.36 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Teutônia



Fonte: Elaborado pela autora.

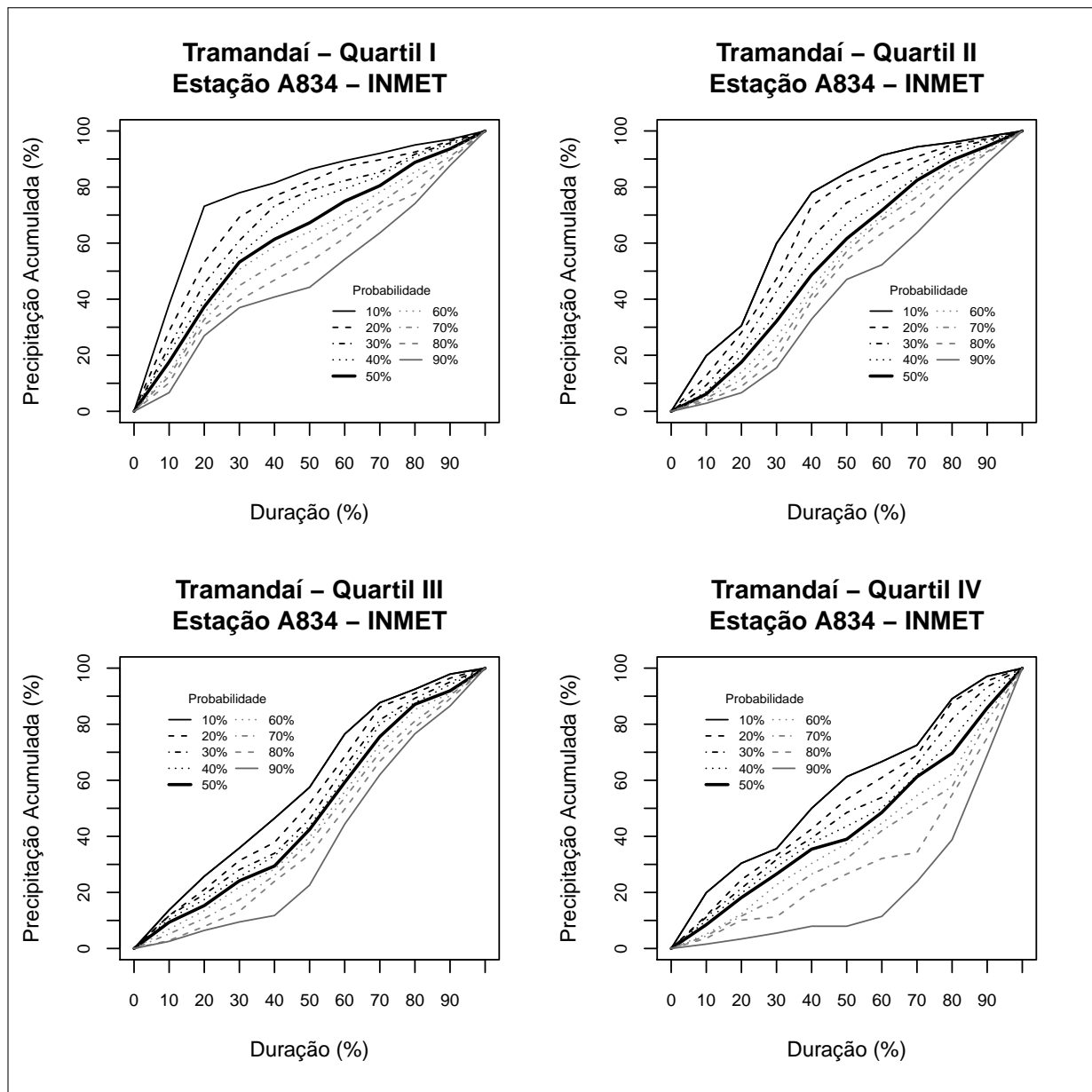


Figura D.37 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Torres



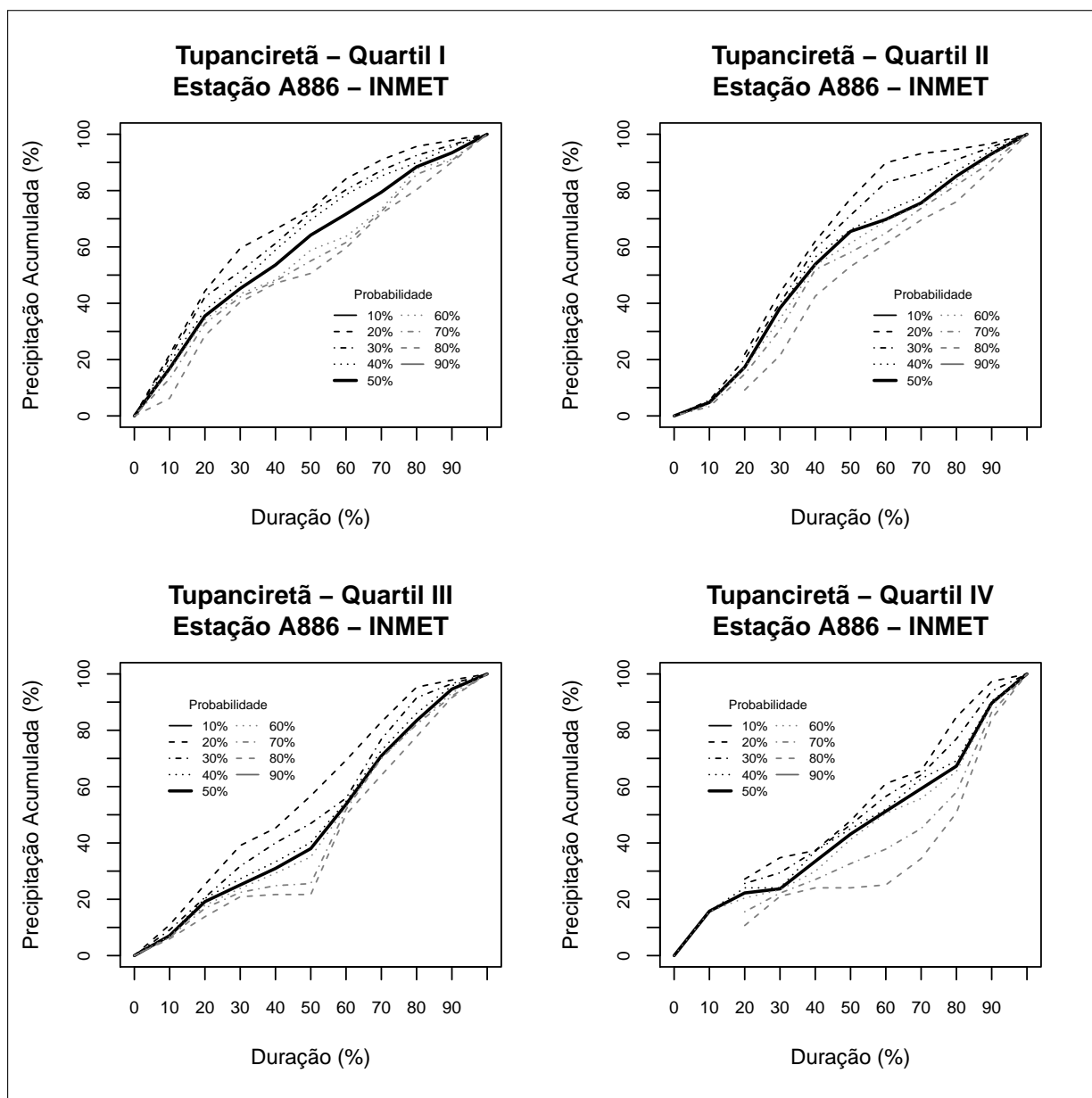
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.38 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Tramandaí



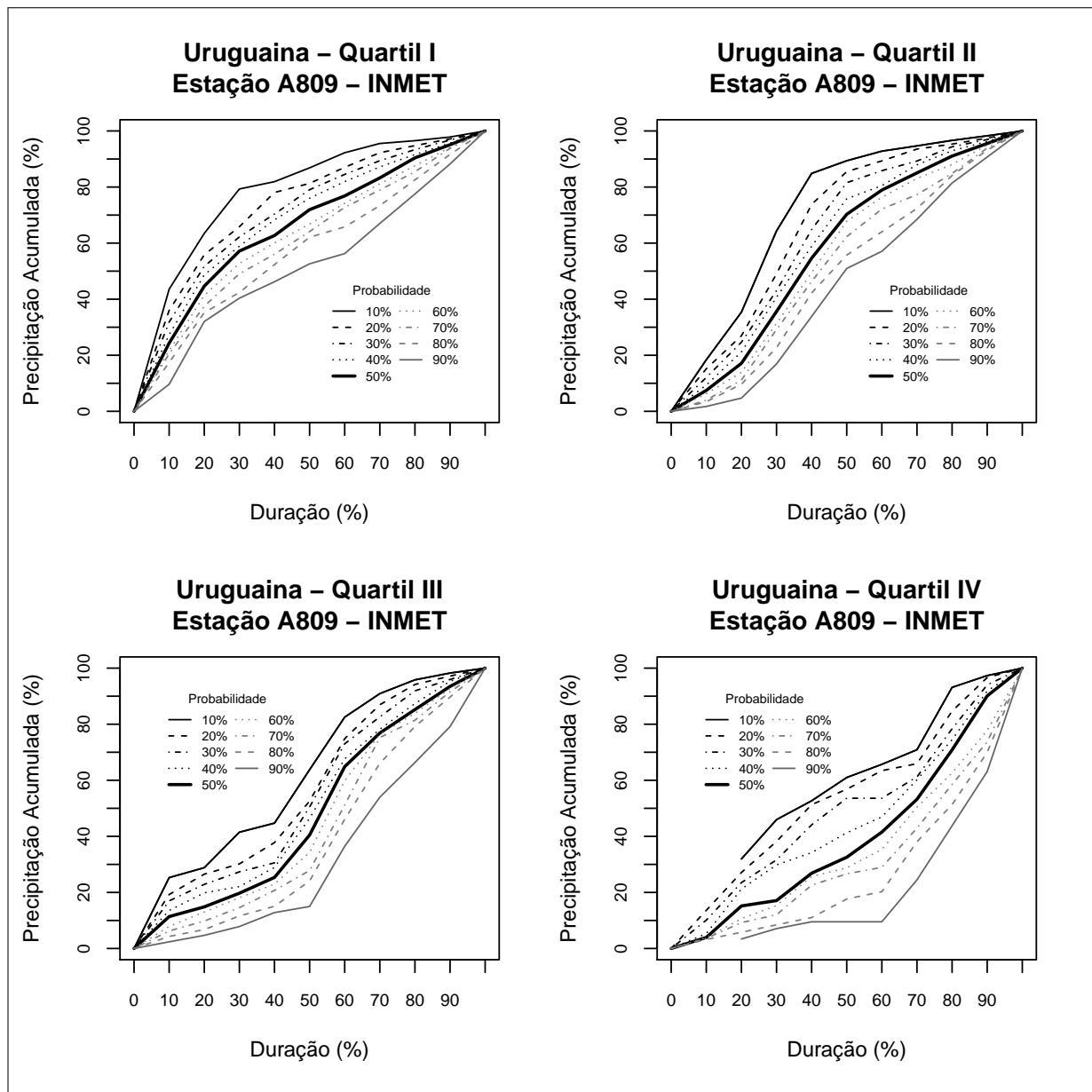
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.39 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Tupanciretã



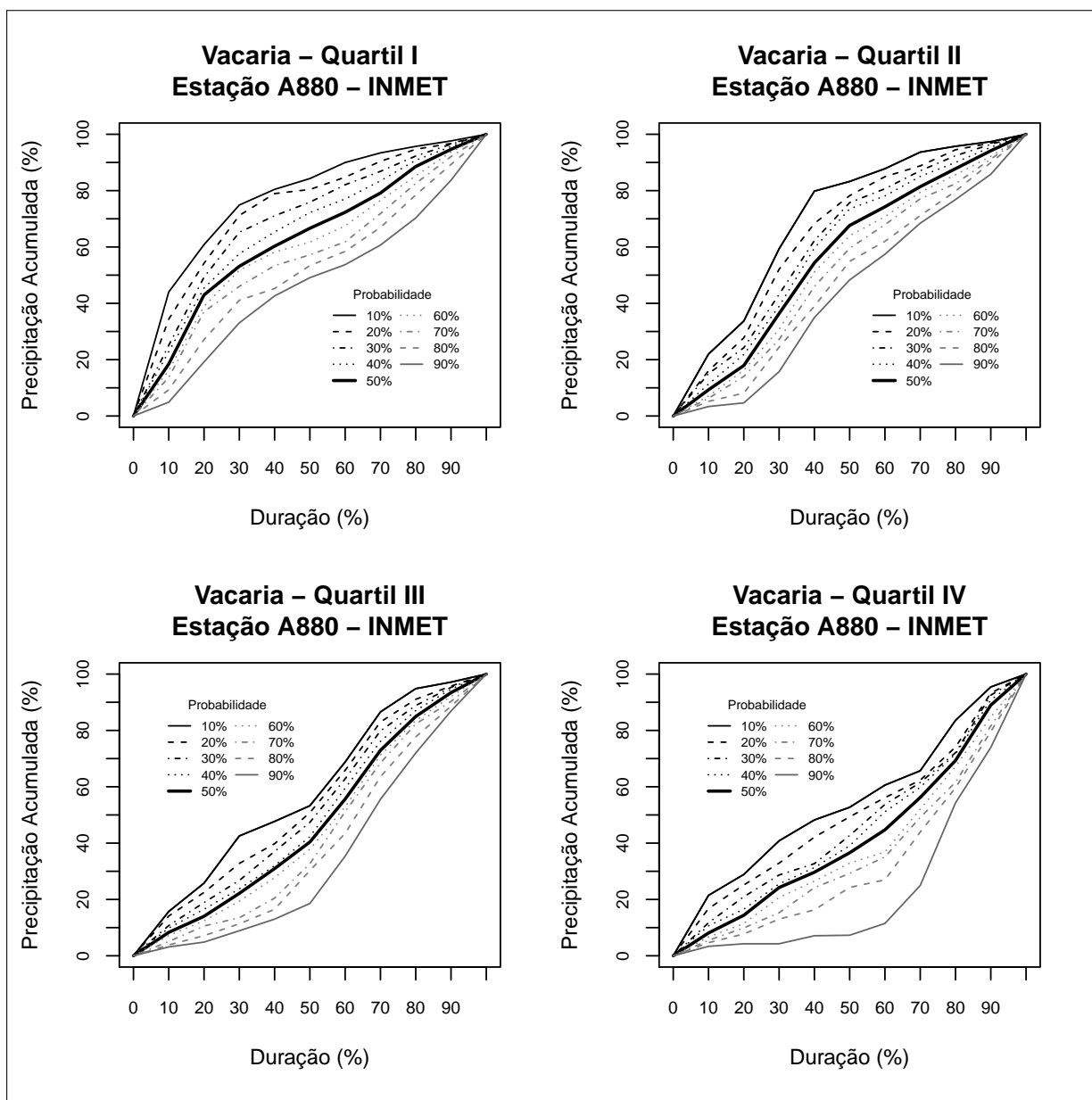
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.40 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Uruguiana



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D.41 – Curvas adimensionais de distribuição temporal da precipitação Vacaria



Fonte: Elaborado pela autora.



**APÊNDICE E – ORDENADAS DAS CURVAS PONTUAIS DAS ESTAÇÕES INMET DO  
RS**























































































