

**Avaliação de disdrômetro sônico para estudo do espectro de gotas
de chuva na cidade do Rio de Janeiro**

Haroldo Magano Júnior

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA
DO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE
MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA)

Orientador: Hugo Abi Karam, Prof. Dr.

Durante o desenvolvimento deste trabalho o autor recebeu auxílio financeiro na forma de uma bolsa de mestrado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal (CAPES/MEC/Brasil)

Rio de Janeiro, 17 de maio de 2017

**Avaliação de disdrômetro sônico para estudo do espectro de gotas
de chuva na cidade do Rio de Janeiro**

Esta dissertação trata-se da versão original
de Haroldo Magano Júnior.

Avaliação de disdrômetro sônico para estudo do espectro de gotas de chuva na cidade do Rio de Janeiro

Esta dissertação contém as correções e alterações sugeridas pela Comissão Julgadora durante a defesa realizada por Haroldo Magano Júnior em 17/05/2017.

O original encontra-se disponível na Biblioteca do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Comissão Julgadora

- Hugo Abi Karam (orientador) - Prof. Dr. - IGEO-UFRJ
- Ana Maria Bueno Nunes - Profa. Dra. - IGEO-UFRJ
- José Ricardo de Almeida França - Prof. Dr. - IGEO-UFRJ
- Otto Corrêa Rotunno Filho - Prof. Dr. - COPPE-UFRJ
- Augusto José Pereira Filho - Prof. Dr. - IAG-USP

Agradecimentos

Ao Prof. Hugo Abi Karam que me orientou durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que me acolheu como estudante.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ministério da Educação (CAPES-MEC-Brasil) pela concessão de auxílio financeiro na forma de uma bolsa de mestrado DS-PROAP.

Resumo

MAGANO Júnior, Haroldo, **Avaliação de disdrômetro sônico para estudo do espectro de gotas de chuva na cidade do Rio de Janeiro**. 2017. 101p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O objectivo do trabalho é obter a função densidade de probabilidade da dimensão das gotas de chuvas na Cidade do Rio de Janeiro da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), por meio de medição com um disdrômetro sônico, construído para esta finalidade. O princípio de funcionamento do disdrômetro é a medição do impacto elástico de gotas que caem sobre uma superfície plana e sua associação com o diâmetro das gotas obtido por uma função potência. Os momentos estatísticos associados às propriedades microfísicas da precipitação e da água líquida na nuvem foram obtidos a partir das distribuições de tamanho de gotas medidas. Os resultados obtidos indicam que a escala de tempo de medição pode determinar a forma da distribuição espectral das gotas, podendo-se obter uma monodistribuição para períodos de amostragem inferiores a 1 minuto, enquanto que espectros exponenciais podem ser obtidos para períodos de amostragem entre 1 e 10 minutos, com distribuições exponenciais do tipo Marshall-Palmer para períodos de amostragem de 1 minuto e distribuição do tipo Gama para amostragem mais longas.

Palavras-chave: Microfísica da precipitação tropical; Distribuição do espectro de dimensão de gotas; Hidrometeorologia urbana; Risco natural.

Abstract

MAGANO Júnior, Haroldo, **Evaluation of a sonic dysdrometer for the study of the rain drops spectrum in the city of Rio de Janeiro**. 2017. 101 pages. Master's Thesis - Postgraduate Program in Meteorology, Institute of Geosciences, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2017.

The objective of this work is to obtain the probability density function of rainfall in the city of Rio de Janeiro in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ), by means of measurements with a sonic dysdrometer built for this purpose. The operating principle of the dysdrometer is the record of the elastic impact of drops falling on a flat surface and its association with the drops diameter obtained by a power function. The statistical moments associated to the microphysical properties of precipitation and liquid water in the cloud were obtained from the derived drop size distribution. Results indicate that the measurements time scale can determine the shape of the observed spectral distribution, and monodistributed distribution can be obtained for scales less than 1 minute, so while exponential spectra can be obtained for sampling periods between 1 and 10 minutes, distributions similar to the Marshall-Palmer for sampling periods of 1 minute, and Gamma distributions for longer sampling windows.

Keywords: Microphysics of tropical precipitation; Distribution of droplet size spectrum; Urban hydrometeorology; Natural risk.

Conteúdo

Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Revisão bibliográfica de aplicações do disdrômetro	3
2 Fundamentação teórica	5
2.1 Disdrômetros	5
2.1.1 Disdrômetro Óptico por modulação da intensidade do feixe de luz	5
2.1.2 Disdrômetro sônico	6
2.1.3 Unidade de medição (dB)	7
2.2 Espectro de gotas - DSD	11
2.2.1 Frequência absoluta	11
2.3 Modelos de DSD	14
2.4 Momentos estatísticos	15
2.5 Velocidade terminal	18
3 Metodologia	19
3.1 Área de estudo	19
3.2 Material utilizado no disdrômetro sônico	19
3.2.1 Descrição do sensor de impacto	20
3.2.2 Preparação do áudio para análise	20
3.2.3 Outras considerações instrumentais	20
3.3 Desenvolvimento de um sensor para capturar a acústica da precipitação	21
3.4 Calibração do disdrômetro sônico de impacto	22
3.5 Variação temporal da DSD empírica	24
3.6 Precipitação medida	25
3.7 Implementação numérica	25
4 Resultados	27
4.1 Métodos de calibração	27

4.1.1	Curva de calibração	28
4.2	DSD estimada da precipitação medida em pluviômetro	30
4.3	DSD modelada para 04/11/2015	32
4.4	Experimentos	34
4.5	Análise de sensibilidade à duração das subamostras	81
4.5.1	Simulação de chuvisco: duração total 600 s, 600 subamostras de 1 s	81
4.5.2	Simulação de chuvisco: duração total 600 s, 10 subamostras de 60s (SIM02)	83
4.6	Considerações finais	92
5	Conclusões	93
5.1	Sugestões	93
A		95
	Bibliografia	97
	Índice	101

Lista de Abreviaturas

FFT	Rápida transformada de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
LWC	Conteúdo de água líquida (<i>Liquid Water Content</i>)
DSD	Distribuição de dimensão de gotas (<i>Drop Size Distribution</i>)
fdp	Função densidade de probabilidade
fda	Função distribuição acumulada (de probabilidade)
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
MARJ	Metropolitan Area of Rio de Janeiro

Lista de Símbolos

- Λ Parâmetro de forma da distribuição de Marshall e Palmer (1948)
- μ Parâmetro de escala da distribuição de Ulbrich (1983)
- ρ_w Densidade da água líquida, 1000 kg m^{-3}
- v_t Velocidade terminal de queda de gotas (m s^{-1})
- D Diâmetro da gota de precipitação (m)

Lista de Figuras

2.1	Disdrômetro acústico de reservatório de água proposto por Winder (2010)[1], em primeiro plano. Um disdrômetro óptico Thies usado na verificação de resultados também foi instalado para obter medidas simultâneas (em segundo plano, à direita).	8
2.2	Resultado de comparação sistemática entre DSD obtida pelo disdrômetro sônico de tanque proposto por Winder (2010) em relação à DSD obtida por disdrômetro óptico comercial (marca Thies). Os pontos da DSD do disdrômetro sônico apresentam menor extensão e deslocamento para maiores dimensões de gotas. No eixo x, a variável é o diâmetro das gotas, em unidades de (mm). No eixo y, a variável é a DSD, sendo a unidade <i>correta</i> em $m^{-3} mm^{-1} min^{-1}$, i.e., $60 \times m^{-3} mm^{-1} s^{-1}$. Fig. original de Winder (2010)[1].	9
2.3	Distribuição de tamanho de gotas do modelo de distribuição Gama, para μ igual a -2, 0 e 2, conteúdo de água líquida $LWC = 1 g m^{-3}$ e diâmetro médio (ponderado pelo volume) das gotas $D_0 = 2 mm$. A tabela mostrada no gráfico, apresenta os valores correspondentes ao fator de refletividade do radar e a taxa de precipitação (ULBRICH, 1983)[2].	15
3.1	À esquerda, foto do exterior do disdrômetro sônico de baixo custo, desenvolvido no laboratório de hidrometeorologia do Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). À direita, vista interna dos componentes.	22
3.2	Amplificador Giannini (modelo G5+) utilizado na pré-amplificação do áudio observado na etapa anterior à gravação.	22
3.3	Mesa de gravação do som das gotas de chuva que impactam o sensor do disdrômetro sônico.	23
3.4	Este segmento de áudio com ruído ambiental de baixa intensidade. O trecho selecionado pode ser fornecido como amostra de ruído ao método de filtragem global disponível no software <i>Audacity</i> . Sinais de áudio com características similares àquele da amostra podem ser removidos ao longo de toda a série temporal. O resultado é uma série filtrada correspondente apenas aos impactos da queda das gotas sobre o sensor mais sons de alta intensidade associados a aviões e outros emissores potentes, que são removidos caso a caso, por recorde ao longo da série filtrada.	23

4.1	Fluxograma de calibração utilizado. O primeiro método é um ajuste interno das distribuições, realizado caso a caso, ou seja, aplica-se uma renormalização e ajustes da DSD até que a taxa de precipitação obtida da integração da DSD se aproxime suficientemente da taxa de precipitação medida por pluviômetro no período. Neste caso, a taxa de precipitação do pluviômetro deve ser fornecida pelo usuário. O segundo método é um ajuste não local, baseado em curva de calibração única, obtida em laboratório com a queda controlada de gotas de diâmetro conhecido no disdrômetro. Neste segundo método, não é requerida nenhuma informação externa, como a taxa de precipitação.	28
4.2	Distribuição de frequências absolutas em função da intensidade de áudio da queda livre de gotas de diâmetro conhecido sobre o sensor do disdrômetro sônico de impacto. Cada impacto gera um sinal caracterizado por uma distribuição de amplitudes que definem o som do impacto em (kHz).	29
4.3	Curva de calibração obtida a partir de queda livre de gotas de diâmetros conhecido sobre o sensor do disdrômetro sônico de impacto. Os pontos foram estimados a partir dos máximos locais da curva de frequência mostrada na Fig. 4.2.	30
4.4	Taxa de precipitação observada ($mm\ h^{-1}$) em função do tempo em ano decimal. . .	31
4.5	Taxa de precipitação R ($mm\ h^{-1}$) em função do ordem.	31
4.6	Isolinhas do logaritmo de N(D) plotado em função das classes de diâmetro (eixo x) e da ordem dos eventos de precipitação (eixo y).	32
4.7	Similar à Fig. 4.6 mas para diâmetros de gotas (mm) (eixo x).	33
4.8	Superfície tridimensional da DSD plotada em função da dimensão de gotas (mm) (eixo x) e da ordem para taxa de precipitação crescente.	34
4.9	Evolução temporal da taxa de precipitação observada durante o evento ocorrido no dia 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.	35
4.10	Diagrama de Hovmüller do logaritmo do espectro de diâmetros das gotas ($\log_{10}DSD$), em função do tempo (ano decimal), para um evento de precipitação de pequena duração observado no dia 04/11/2015 das 19h35min às 20h35min.	35
4.11	Evolução temporal dos momentos estatísticos de ordem 0 a 6, usando ano decimal no eixo x, para o evento de precipitação de 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.	36
4.12	Evolução temporal do fator de refletividade do radar (dBZ), estimado a partir da distribuição de Marshall-Palmer, para um evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.	36
4.13	Evolução temporal da dimensão média das gotas (mm), estimado a partir da distribuição de Marshall-Palmer, para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.	37
4.14	Evolução temporal do conteúdo de água líquida ($g\ m^{-3}$) para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.	37
4.15	Comparação das taxas de precipitação obtida da distribuição de Marshall-Palmer e medida pelo pluviômetro automático da estação do prédio do IGEO, ambas em $mm\ h^{-1}$, para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.	38
4.16	Velocidade terminal de gotas v_t ($m\ s^{-1}$) em função do diâmetro de gotas D (mm). . .	38
4.17	Carta das 12h UTC do dia 18/05/2016 do experimento EXP01. Fonte: REDEMETS/BR.	39

4.18	Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) às 2030 UTC para o dia 18/05/2016 [EXP01]. Nebulosidade associada à passagem da frente fria ocorre sobre o Centro Oeste e Sudeste brasileiro. Fonte: NASA e INPE/BR.	40
4.19	Evolução temporal do sinal de áudio filtrado referente ao impacto das gotículas (chuveisco) observado em 18/05/2016 às 17h 35min (TL) com duração de 10min (EXP01). As amplitudes associadas às gotas foram identificadas localizando-se uma rápida variação positiva do sinal e estão indicadas por pontos sobrepostos às oscilações de áudio. No mesmo gráfico estão plotados o sinal de áudio original (dB) e seu valor normalizado, abs(dB)/max(dB)	41
4.20	Evolução temporal da magnitude de áudio normalizado do impacto das gotículas (chuveisco) medida em 18/05/2016 às 17h35min (TL) (EXP01).	41
4.21	Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP01). As diferentes amostras foram identificadas com símbolos diferentes na legenda e sequenciadas de t1 a t8. A linha reta correspondente ao modelo de Mashall-Palmer (1948)[3].	43
4.22	Evolução temporal dos momentos estatísticos de primeira à sexta ordem, em função do tempo decorrido de medição em décimos de hora (EXP01).	43
4.23	Idem Fig. 4.22 para as estimativas de diâmetro de gotas.	44
4.24	Idem Fig. 4.22 para o conteúdo de água líquida (LWC).	44
4.25	Idem Fig. 4.22 para o fator de refletividade do radar (dBZ).	45
4.26	Idem Fig. 4.22 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada). . .	45
4.27	Carta das 12h UTC de 02/07/2016 do experimento EXP02. Fonte: REDEMET/BR.	46
4.28	Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 02/06/2016 às 12h (UTC) [EXP02]. Fonte: NASA e INPE/BR.	47
4.29	Sinal de áudio registrado correspondente ao impacto de gotas de chuva, por um período de 10min (EXP02).	48
4.30	Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuva observado com duração de 10min (EXP02).	49
4.31	Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP02). As diferentes amostras foram identificadas com símbolos diferentes na legenda e sequenciadas de t1 a t8. A linha reta correspondente ao modelo de Mashall-Palmer (1948)[3].	49
4.32	Momentos estatísticos de primeira a sexta ordem, em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP02).	50
4.33	Idem à Fig. 4.32 para as estimativas de diâmetro de gotas.	50
4.34	Idem à Fig. 4.32 para o conteúdo de água líquida (LWC).	51
4.35	Idem à Fig. 4.32 para o fator de refletividade (dBZ).	51
4.36	Idem à Fig. 4.32 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada). . .	52
4.37	Carta das 12h UTC de 07/07/2016 do experimento EXP03. Fonte: REDEMET/BR.	53

4.38 Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 07/07/2016 à 13h30min (UTC) [EXP03]. Fonte: NASA e INPE/BR.	54
4.39 Sinal de áudio correspondente ao impacto de gotas de um chuvisco observado (EXP03).	56
4.40 Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuvisco observado (EXP03).	56
4.41 Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP03).	57
4.42 Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP03).	57
4.43 Idem à Fig. 4.42 para estimativas de diâmetro médio de gota.	58
4.44 Idem à Fig. 4.42 para conteúdo de água líquida (LWC)	58
4.45 Idem à Fig. 4.42 para o fator de refletividade do radar (dBZ).	59
4.46 Idem Fig. 4.42 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada). . .	60
4.47 Carta das 12h UTC de 31/08/2016 do experimento EXP04. Fonte: REDEMET/BR.	62
4.48 Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 31/08/2016 à 19h (UTC) [EXP04]. Fonte: NASA e INPE/BR.	63
4.49 Sinal de áudio correspondente ao impacto de gotas de um chuvisco observado com duração de 10min (EXP04).	64
4.50 Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuvisco observado com duração de 10min (EXP04).	65
4.51 Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP04).	65
4.52 Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP04)	66
4.53 Idem à Fig. 4.52 para estimativas do diâmetro médio de gotas.	66
4.54 Idem à Fig. 4.52 para o conteúdo de água líquida (LWC).	67
4.55 Idem à Fig. 4.52 para o fator de refletividade (dBZ).	67
4.56 Idem à Fig. 4.52 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada). . .	68
4.57 Carta das 12h UTC de 19/09/2016 do experimento EXP05. Fonte: REDEMET/BR.	69
4.58 Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 20/09/2016 à 1h (UTC) [EXP05]. Fonte: NASA e INPE/BR.	70
4.59 Sinal de áudio correspondente ao impacto de gotas de um chuvisco observado com duração de 10min (EXP05).	71
4.60 Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuvisco observado com duração de 10min (EXP05).	71
4.61 Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP05).	72
4.62 Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP05)	72
4.63 Idem à Fig. 4.62 para estimativas de diâmetro médio de gota.	73

4.64	Idem à Fig. 4.62 para o conteúdo de água líquida (LWC).	73
4.65	Idem à Fig. 4.62 para o fator de refletividade (dBZ).	74
4.66	Idem à Fig. 4.62 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).	74
4.67	Carta das 12h UTC de 26/09/2016 do experimento EXP06. Fonte: REDEMETS/BR.	75
4.68	Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 27/09/2016 à 1h (UTC) [EXP06]. Fonte: NASA e INPE/BR.	76
4.69	Sinal de áudio normalizado referente ao impacto das gotas de chuva observada no dia 26/09/2016 às 21h50min (EXP06). As amplitudes associadas à identificação de gotas está indicado pelos pontos que sobrepõe as oscilações do áudio.	77
4.70	Amplitude absoluta do sinal de áudio normalizado referente ao impacto de gotas de chuva observada no dia 26/09/2016 às 21h50min (EXP06). As amplitudes associadas à identificação de gotas está indicado pelos pontos que sobrepõe as oscilações do áudio.	77
4.71	Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP06).	78
4.72	Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP06)	79
4.73	Idem à Fig. 4.72 para estimativas do diâmetro médio de gotas.	79
4.74	Idem à Fig. 4.72 para o conteúdo de água líquida (LWC).	80
4.75	Idem à Fig. 4.72 para o fator de refletividade (dBZ).	80
4.76	Idem à Fig. 4.72 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).	81
4.77	Sinal de áudio gerado pelo impacto de gotas simuladas para um chuvisco (SIM01).	83
4.78	Amplitude absoluta do sinal de áudio do impacto das gotas de um chuvisco simulado (SIM01).	83
4.79	Distribuição de diâmetros de gotas DSD para o chuvisco simulado em função do tempo decorrido da simulação, para 8 subamostras de 60s (SIM01).	84
4.80	Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (SIM01)	84
4.81	Idem Fig. 4.80 para estimativas da dimensão média das gotas.	85
4.82	Idem Fig. 4.80 para o conteúdo de água líquida (LWC).	85
4.83	Idem Fig. 4.80 para o fator de refletividade (Z).	86
4.84	Evolução temporal da taxa de precipitação recuperada (REC) por integração da DSD, em unidades ($mm h^{-1}$), plotada desde o início da simulação. Na legenda, OBS representa a taxa de precipitação de referência, igual a $2,2 mm h^{-1}$ (linha pontilhada), e M-P obtida pela aplicação da relação Z-R de Marshall-Palmer (linha contínua) (SIM01).	86
4.85	Sinal de áudio gerado pelo impacto de gotas simuladas para um chuvisco, para subamostras de 60 (s) (SIM02).	88
4.86	Amplitude absoluta do sinal de áudio do impacto das gotas de um chuvisco simulado, para subamostras de 60 (s) (SIM02).	88

4.87	Distribuição de diâmetros de gotas DSD para o chuvisco simulado em função do tempo decorrido da simulação, para 8 subamostras de 60s (SIM02).	89
4.88	Evolução temporal dos momentos estatísticos associados à DSD do chuvisco simulado, em função do tempo decorrido (h), para subamostras de 60s (SIM02).	89
4.89	Idem à Fig. 4.88 para as estimativas de diâmetro média de gotas.	90
4.90	Idem Fig. 4.88 para o conteúdo de água líquida (LWC).	90
4.91	Idem Fig. 4.88 para o fator de refletividade (Z).	91
4.92	Evolução temporal da taxa de precipitação recuperada (REC) por integração da DSD, em unidades de ($mm h^{-1}$), plotada desde o início da simulação. Na legenda, OBS representa a taxa de precipitação de referência, igual a $2,2 mm h^{-1}$ (linha pontilhada), e M-P obtida pela aplicação da relação Z-R de Marshall-Palmer (linha contínua) (SIM02).	91

Lista de Tabelas

2.1	Classificação de chuva. Referências: IMD[4]; WMO[5]. Para finalidades práticas de previsão de risco considera-se preferencialmente valores diários, i.e., apresentam-se taxas de precipitação diárias correspondentes, multiplicando-se a taxa horária (terceira coluna r) por 24, obtendo $mm\ dia^{-1}$	18
3.1	Precipitação medida com disdrômetro sônico. As taxas de precipitação (r) foram estimadas dos pluviômetros indicados, para servir de referência média no período da análise. <i>Ilha</i> se refere a Ilha do Governador na zona norte do Rio de Janeiro-RJ. . . .	25
4.1	Gotas utilizadas na etapa de calibração global, com N , número de gotas usadas na calibração e v_t , a velocidade terminal.	28
4.2	Tabela de pontos da curva de calibração estimados a partir da distribuição de frequências absolutas do impacto das gotas de volume conhecido. D é o diâmetro das gotas em (mm), dB é estimativa da intensidade de áudio associada ao impacto de cada classe de gota na etapa de calibração (em decibéis), dB_{min} é a correspondente intensidade mínima por classe de diâmetro, dB_{max} é a correspondente intensidade máxima e σdB é o intervalo de intensidade considerado para cada classe de diâmetro de gota.	29

Capítulo 1

Introdução

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas de maior variabilidade espacial e temporal, sendo de extrema importância para as atividades humanas. Sua distribuição no globo é bastante complexa devido não somente a circulação geral da atmosfera, responsável pela movimentação das massas de ar, como também a topografia da região (AYOADE, 1986)[6]. Logo, a caracterização da precipitação apresenta desafios que estão associados aos processos que abrangem todas as escalas atmosféricas relevantes ao tempo e clima (i.e., à grande-escala, escala sinótica, mesoescala e micro-escala).

A complexa topografia na América do Sul (AS) promove o desenvolvimento e atuação de sistemas atmosféricos associados aos regimes pluviométricos. No Brasil e em particular na região Sudeste, o total de precipitação é da ordem de 1500 mm ano^{-1} (REBOITA, 2010)[7]. Devido à sua complexa orografia, a distribuição pluviométrica espacial no município do Rio de Janeiro - RJ - Brasil é bastante heterogênea. De acordo com Dereczynski *et al.* (2009)[8], na RMRJ a precipitação máxima anual ocorre nas Serras da Carioca (2200 mm), Mendanha (1400 mm) e Guaratiba (1200 mm), sendo que na Baixada Fluminense Oeste tem-se 900 mm ano^{-1} . Na Zona Serrada do RJ, ao norte da RMRJ, ocorre o máximo estadual da precipitação anual (CEMADEN-RJ, 2017)[9].

Os instrumentos que medem a precipitação são simples reservatórios, tais como o pluviômetro e pluviógrafo automático. Radares e satélites meteorológicos também são muito utilizados. Menos conhecidos são os disdrômetros, que medem o espectro de tamanho de gotas.

As versões comerciais dos disdrômetros podem ser caras, não somente pelo hardware ótico e sônico elaborados, como também pelo software empregado para obtenção da distribuição de diâmetros das gotas. O disdrômetro sônico de impacto proposto por Joss e Waldvogel (1967)[10] custa dezenas de milhares de dólares. Neste instrumento, o espectro de gotas é obtido por contagem dos sinais elétricos em um circuito eletrônico especial. Na versão original deste disdrômetro, o espectro de gotas é obtido para 20 classes no intervalo de diâmetros entre 0,3 e 5,3 mm.

O número de disdrômetros construídos em laboratório das universidades é crescente (MANI, 2006)[11]. Em geral, protótipos de disdrômetro desenvolvidos em laboratório de pesquisa apresentam custo relativamente reduzido em comparação às versões comerciais, sobretudo quando aplicam peças de fácil aquisição e reposição. Um programa numérico pode substituir os circuitos eletrônicos com vantagens devido a facilidade de acesso a computadores pessoais. Entretanto, a criação de software específico deve ser considerada e naturalmente há um custo para o desenvolvimento do programa de análise. Neste caso, a utilização de plataforma linux e compiladores livres é recomendada para redução de custos.

Neste trabalho, propõe-se um disdrômetro sônico de impacto para observação do espectro de gotas de chuva na Cidade do Rio de Janeiro-RJ. Neste instrumento, o som do impacto de gotas

sobre uma placa plástica horizontal é captado por um microfone próximo.

A hidrometeorologia tem grande interesse no estudo e na pesquisa do ciclo da água na atmosfera e na superfície. Em particular, o conhecimento do espectro de gotas de precipitação é importante para o entendimento dos mecanismos físicos responsáveis pela precipitação. O espectro de gotas também é muito importante para a interpretação dos resultados obtidos por radar, dado que diferentes espectros de gotas podem produzir um mesmo valor do fator de refletividade (Z). Note-se que Z é definido pelo momento de sexta ordem da distribuição de diâmetro de gotas, portanto, da integração do espectro de gotas.

A distribuição de tamanho de gotas permite estudar mecanismos físicos responsáveis pelos estágios de desenvolvimento de tempestades e outros sistemas estratiformes sobre topografia complexo, como o da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), que inclui a cidade do Rio de Janeiro.

Considera-se também a importância dos processo microfísicos na produção de chuva. Centros locais de gestão de emergências consideram os tipos de riscos naturais associados ao ciclo da água na atmosfera e superfície. O impacto de grandes gotas de chuva, além de incrementar a erosão do solo pode levar à instabilização, ruptura e deslizamento da camada superficial de solo de encostas.

Saliente-se que o conhecimento detalhado do espectro de gotas pode ser relevante na ampliação do entendimento dos mecanismos desencadeados pelo impacto de gotas de chuva intensa. Neste caso, tais impactos sonoros podem levar a ruptura de camadas previamente colocadas em condição de risco de deslizamento. Isto é, o impacto de gotas grandes pode ser o gatilho necessário para a ruptura de camadas superficiais de encostas com solo saturado sob risco de ruptura iminente. Por outro lado, pode levar à erosão do solo, e aumento do transporte de sedimentos pelos rios, com consequências sobre a profundidade de estuários e a navegabilidade de embarcações.

Precipitações orográfica podem ser reforçadas por retroalimentação positiva (*feedback*). Por exemplo, quando um Nimbo-estrato frontal precipita sobre nuvens orográficas em encostas de morros ¹. Cristais de gelo descendo para uma camada de ar com temperatura acima de zero graus podem formar gotas frias de uma precipitação estratiforme (RUTLEDGE {et al., 1983}[12].

Nas encostas do Rio de Janeiro, uma intensa advecção de ar marítimo pós-frontal, com ventos de Sul, pode promover efetivamente a sementeira de aerossol marinho, a nucleação e a condensação de gotas de chuva. Um exemplo de sementeira intensa foi descrito por Souza e Karam (2014)[13].

A cidade do Rio de Janeiro com população superior a 6 milhões ocupa uma área territorial de 1197,463 km^2 (IBGE, 2010). Trata-se de uma das cidades mais densamente povoadas do Brasil. Uma parte significativa da população do Rio de Janeiro e da RMRJ habita em áreas de urbanização incompleta, incluindo encostas de morros sujeitos à deslizamentos de terra e várzeas inundáveis.

A mitigação dos riscos de deslizamento, enchentes e epidemias em áreas montanhosas escarpadas da Zona Serrana do Estado do Rio de Janeiro é limitada. O estudo dos mecanismos físicos da precipitação, associados à formação e distribuição de gotas é relevante. O radar meteorológico é essencial à gestão de emergências local e regional. O conhecimento dos mecanismos físicos responsáveis pelas chuvas é também importante.

¹Mecanismo de alimentação de nuvens com núcleos de condensação em nuvens estratiformes. Em inglês chamado *seeder-feeder* ou *seed feeding mechanism in stratiform clouds*

1.1 Revisão bibliográfica de aplicações do disdrômetro

O primeiro estudo da distribuição de tamanho de gotas foi realizado por Marshall e Palmer (1948)[3], por meio de amostras de dimensões associadas aos borrões em um papel de titulação ácido-base. Os tamanhos de gotas observadas foram correlacionados com o fator de refletividade (Z). Obtiveram assim, a função densidade espectral de *distribuição de dimensão de gotas (DSD)*, a derivada local do número de gotas por unidade de volume e intervalo de diâmetro (*gotas $m^{-3} mm^{-1}$*). Neste trabalho, utiliza-se o acrônimo DSD (*Drop Size Distribution*) para a função distribuição de diâmetro de gotas.

Wagner e Massambani (1986)[14] foram pioneiros em estudar o espectro de gotas (DSD) na Cidade de São Paulo - SP. Particularmente, modelaram a DSD usando um modelo de distribuição Gama (JOSS e GORI, 1978)[15]. A partir de três eventos de chuva durante o verão de 1985 seus resultados indicaram que o parâmetro de forma do modelo Gama era menor que 0,5 associada à distribuição fortemente assimétrica em direção às pequenas gotas. Neste caso, trata-se de uma DSD assimetricamente positiva. Além disso, mostraram que para amostragem menor que 1 minuto, a distribuição não é exponencial, enquanto para períodos de amostragem maiores que 1 min, a distribuição mostra-se exponencial e similar a de Marshall e Palmer (1948)[3].

Massambani e Morales (1988)[16] ajustaram parâmetros do modelo de distribuição Gama para melhorar a representação da DSD para região de clima tropical de altitude do Estado de São Paulo. Esses pesquisadores analisaram um conjunto de 533 DSD para a cidade de Bauru-SP, onde está instalado o radar meteorológico da UNESP. Concluíram que o modelo de distribuição Gama-2 de Olsen é o que melhor se ajusta aos dados. O uso do modelo Gama permitiu reduzir os erros na determinação da taxa de precipitação do radar e de variáveis associadas obtidas da integração da DSD.

Rodrigues (1990)[17] analisou a DSD, também com medições em Bauru-SP, apresentando um novo ajuste de parâmetros do modelo de distribuição Gama. m relação à proposição de Massambani e Morales (1988)[16], o novo ajuste permitiu uma melhor aderência do modelo à DSD medida, apresentando erro relativo da ordem de 5% para taxas de precipitação superiores a $70 mm h^{-1}$. O novo modelo Gama apresenta a seguinte expressão (RODRIGUES, 1990)[17],

$$N(D) = 290.86R^{0.0524}D^2exp(-1.41R^{-0.287}D^2) \quad (1.1)$$

onde $N(D)$ é a função de densidade de probabilidade de dimensão de gotas por unidade de volume e diâmetro de gota, em (*gotas $m^{-3} mm^{-1}$*); R a taxa de precipitação ($mm h^{-1}$) e D diâmetro de gota (mm).

Justo e França (2016)[18] analisaram dados obtidos pelo satélite CloudSat, no período Jun/2006 a Abr/2011 e mostraram as propriedades microfísicas de diferentes tipos de nuvens em duas regiões tropicais, continental e marinha, da America do Sul. O satélite CloudSat leva a bordo um radar banda-W operando em micro-ondas na frequência de 94 GHz, com detecção de gotículas, gotas e cristais de gelo. Concluíram que o raio médio das gotas em nuvens marinhas e continentais medido pelo Cloudsat para os eventos analisados está entre $12,4 \mu m$ ($0,012 mm$) e $11,0 \mu m$ ($0,011 mm$), respectivamente, característicos de chuvisco, na classificação de Rogers e Yau (1989)[19].

As chuvas associadas à tempestades na Região Metropolitana de São Paulo tem sido estudadas com radar meteorológico, satélite e disdrômetro (PEREIRA FILHO *et al.*, 2008[20]; SILVA Jr., 2016[21]). Estes estudos tem mostrado que espectros de tamanho de gotas são diferentes para diferentes tipos de precipitação. Além disso, a integração dos espectros diferentes pode conduzir a parâmetros de refletividade do radar similares. Isto indica a importância do uso combinado de disdrômetros e radares meteorológicos para análises mais detalhadas da precipitação atmosférica.

Justificativa

Frequentes eventos de risco de deslizamento de encostas e enchentes na RMRJ e Zonas Serranas adjacentes justificam estudos microfísicos de gotas e precipitação em conexão com:

1. Modelos de previsão da precipitação tropical em alta resolução espaço-temporal (i.e., de 500 m a 2 km e de minutos a horas);
2. Obtenção de equações e taxa de precipitação para calibração de radares meteorológicos;
3. Estudos dos processos microfísicos associados aos sistemas precipitantes intensos sobre terrenos complexos urbanos e periurbanos de cidades tropicais e subtropicais.
4. Conhecimento das características da distribuição de gotas responsável pela potência retroespalhada medida pelo radar;
5. Melhoria do conhecimento dos processos microfísicos associados às chuvas intensas sobre terrenos complexos da cidade do Rio de Janeiro.

Este trabalho pode contribuir no desenvolvimento de centros de gestão de emergências locais, uma vez que apresenta detalhes do espectro de gotas de chuva, que quando intensa é associada aos riscos de deslizamentos e enchentes.

Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho foram:

- Construir um protótipo de disdrômetros sônico baseado no impacto de queda de gotas de precipitação sobre uma pequena superfície horizontal, com materiais de fácil aquisição e reposição;
- Criar um software de cálculo do espectro a partir de séries temporais de tamanho de gotas;
- Caracterizar a DSD para diferentes precipitação.

A seguir, descreve-se a fundamentação teórica aplicada ao desenvolvimento do disdrômetro sônico proposto (capítulo 2). O capítulo 3 detalha o protótipo construído. Os resultados obtidos a partir de medições com disdrômetro sônico na cidade do Rio de Janeiro são discutidos no capítulo 4. As conclusões do estudo estão no capítulo 5.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

2.1 Disdrômetros

O disdrômetro é um instrumento que mede a DSD e a velocidade terminal de gotas.

Atualmente, existem vários tipos de disdrômetro por:

- Absorção de gotas em um papel de filtro de titulação química de pH (MASHALL e PALMER, 1948[3], RINEHART, 1988)[22]);
- Vibração sônica por impacto, como o disdrômetro de Joss e Waldvogel (1967)[10] que será referido como disdrômetro JW. Este tipo analisa a primeira amplitude do impacto de cada gota;
- Acústico em tanque de água (WINDER, 2010[1], MANI e PILLAI, 2006[11]) que requer a transformada de Fourier (TF) da frequência de oscilação de bolhas de ar, inversamente proporcional ao diâmetro das gotas;
- Óptico com redução da intensidade de um feixe de luz (laser ou não) pela passagem de gotas transversalmente ao caminho óptico (LÖFFLER e JOSS, 2000[23], TESTIK e GEBREMICHAEL, 2013[24], BARTHAZY *et al.*, 2004[25] e KRUGER e KRAJEWSKI, 2002[26]);
- Fotografias de gotas por uma cortina de luz (SALINAS-TAPIA *et al.*, 2016)[27];
- Interferometria de gotículas de nevoeiro (SILVERMAN *et al.*, 1964)[28];
- Holográfico digital com arranjo óptico alinhado de Franhofer (GARCIA, 2010)[29];
- Holográfico micrométrico (KAIKKONEN *et al.*, 2016)[30].

2.1.1 Disdrômetro Óptico por modulação da intensidade do feixe de luz

No disdrômetro óptico, um feixe fino de luz laser é emitida em gotas que atravessam o caminho óptico do laser, com diminuição da intensidade de luz e na duração da passagem do hidrometeoro (gota). Esta atenuação da luz e o tempo exposição das gotas ao feixe de luz permite inferir o diâmetro médio da gota e a velocidade terminal (TESTIK e GEBREMICHAEL, 2013)[24].

Löffler e Joss (2000)[23] construíram um disdrômetro óptico em laboratório, composto por uma fonte fotodiodo de 780 nm emitindo um feixe horizontal de luz de largura 30 mm e espessura 1 mm ao longo de um caminho óptico de 16 cm, com potência de 3 mW. O instrumento de Löffler e Joss detecta gotas de diâmetro entre 0,3 mm e 30 mm, velocidade terminal de até 20 $m s^{-1}$. Seus resultados foram comparados às medições de um disdrômetro comercial JW e de um pluviômetro Hellmann. O desvio padrão obtido foi inferior a 5% para gotas de diâmetro entre 1,4 e 8,0 mm.

Barthazy *et al.* (2004)[25] também construíram um disdrômetro óptico composto por dois feixes de luz paralelos e horizontais, arranjados com um pequeno deslocamento angular em direção a dois fotodiodos receptores. O hidrometeoro ao cruzar os feixes de luz é medido, assim como o intervalo de tempo entre as passagens nos dois feixes. O intervalo de tempo é função da velocidade terminal e diâmetro médio do hidrometeoro (gota, neve, cristal de gelo etc). Este instrumento permite medições mais precisas em comparação ao disdrômetro sônico JW.

Um disdrômetro de video bidimensional DVD foi proposto por Kruger e Krajewski (2002)[26]. Neste instrumento, as gotas passam ortogonalmente através de planos horizontais iluminados na zona de detecção do instrumento. As fontes emissoras iluminam a área de detecção com dois feixes ortogonais de luz. A imagem é projetada sobre a placa sensível de uma câmera eletrônica com 512 fotodetectores para a frequência da onda eletromagnética de 34,1 kHz. Quando uma gota atravessa a zona de medição obtém-se imagens tridimensionais da mesma, e obtém-se desta imagem o diâmetro, o volume e velocidade terminal média.

Borrmann e Jaenicke (1993)[31] que realizaram 19 horas de medições holográficas de aerossóis e gotas de precipitação nas proximidades de Frankfurt na Alemanha, evidenciando o processo evolutivo da distribuição de tamanho de gotas e do vetor velocidade terminal. Em sua pesquisa, sumarizaram exemplos da dinâmica da DSD e da velocidade terminal.

2.1.2 Disdrômetro sônico

O avanço da ciência e da tecnologia no século XX permitiu o estudo detalhado da distribuição do diâmetro de gotas (DSD, do inglês *drop size distribution*). Joss e Waldvogel (1967)[10] propuseram um disdrômetro para medir continuamente a DSD. A base física desse equipamento é o impacto das gotas de chuva sobre um sensor sônico. O instrumento é composto por um indutor eletromagnético (i.e., um ímã permanente) que oscila dentro de uma bobina elétrica cilíndrica quando recebe o impacto de uma gota, assim produzindo uma Força Eletromotriz (FEM) oscilante. Uma segunda bobina permite a transformação da voltagem oscilante ao nível apropriado do circuito operacional que calcula o espectro. O transformador de voltagem é composto por duas bobinas espirais concêntricas. O sinal elétrico é analisado por 20 circuitos operadores em paralelo, que separam e classificam os valores de voltagem em 20 classes. Em tempo real, outros circuitos fazem a integração temporal na janela de amostragem para obter concomitantemente as variáveis taxa de precipitação (R), conteúdo de água líquida por unidade de volume (W), e refletividade efetiva (Z). Um esquema de chaveamento dos circuitos operadores lógicos é utilizado na classificação do sinal. Obtém-se ao final do período de amostragem, em geral 10 minutos, a DSD, além de variáveis obtidas por integração da DSD como: taxa de precipitação (R), conteúdo de água líquida (LWC) e parâmetro de refletividade do radar (Z). A medição se estende para diâmetros entre 0,3 mm e 5,0 mm. Gotas menores que 0,3 mm não tem força de impacto suficiente para impulsionar o eletroímã de forma a gerar uma força eletromotriz (sinal elétrico) por indução eletromagnética. A pronta resposta dos circuitos elétricos do disdrômetro JW para análise do espectral e integração fazem do JW um instrumento de referência em disdrometria a superfície.

Giesen *et al.* (2010)[32] desenvolveram um disdrômetro de baixo custo para medir o número de gotas de chuva. Eles fundamentaram o trabalho nas ideias do disdrômetro de impacto de Joss e Waldvogel (1967)[10]. O sistema consiste de uma placa piezoelétrica (PE) que produz um pulso elétrico (i.e., tensão elétrica) sempre que a PE é comprimida pelo impacto da gota. O grau de deformação da placa é associado ao tamanho da gota.

Lane e Kasparis (1997)[33] desenvolveram um pluviômetro acústico de baixo custo com materiais de fácil obtenção. Nesse disdrômetro, um microfone de baixo custo é utilizado como sensor de som de gotas. Um programa numérico foi usado para interpolação dos dados do espectro de subamostras para obter a DSD da amostragem. Eles concluíram que o disdrômetro proposto pode

ser utilizado para obtenção de DSD de tempestades de curta duração.

Mani (2006)[11] criou um outro disdrômetro acústico usando um reservatório de água em forma de funil com a boca para cima e um microfone no vértice, para medir o som gerado pela chuva. A área de amostragem é definida pela superfície de água na boca do cone. O impacto das gotas produz uma rápida variação da amplitude do som seguida por oscilação secundária associada à oscilação da bolha de ar, cuja frequência é inversamente proporcional ao diâmetro da gota. Aplica-se a escala logarítmica (dB) na análise. Mani utilizou a técnica para determinar a dimensão das gotas a partir da análise da variação do sinal inicial de impacto. As oscilações secundárias associadas à oscilação da bolha de ar e reflexões nas paredes foram desconsideradas por apresentarem menores amplitudes em relação à primeira variação do sinal do impacto.

Considerando 8000 gotículas em 10 minutos, estima-se a frequência de gotas típica, 13,3 gotas s^{-1}) e o intervalo de tempo de amostra de cada gota, $13,3^{-1} = 0,075$ s. Mani (2006)[11] considerou o intervalo de tempo de 0,1 s para separar os sinais de gotas individuais a partir da localização de cada variação brusca do sinal acima de um valor limiar. A oscilação devido a pressão dinâmica da bolha de ar formada por impacto da gota apresenta a seguinte frequência (f_D).

$$f_D = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_w}} \quad (2.1)$$

sendo que D é o diâmetro da bolha, P_0 é a pressão hidrostática local, ρ_w é a densidade da água e $\gamma = 1,4$ é a relação dos calores específicos. A frequência de oscilação para uma bolha de ar produzida por uma gota esférica de 3 mm é de aproximadamente 20 kHz, enquanto a frequência de oscilação do impacto é relativamente menor (1 kHz).

Winder (2010)[1] desenvolveu um disdrômetro sônico em um tanque de água (Acoustic Water Tank Disdrometer - *AWTD*) (Fig. 2.1). Nesse sistema utilizou um tanque de água e um conjunto de hidrofones colocados no fundo para captar o som produzido pela queda de gotas de chuva na superfície livre de água. As reflexões do som nas paredes do reservatório também foram consideradas. O princípio do instrumento baseia-se na relação entre a energia cinética (KE) da queda da gota e a energia acústica da onda de pressão transmitida no tanque de água. Um disdrômetro óptico (marca Thies) foi usado por Winder (2010)[1] para a avaliação do disdrômetro sônico.

Winder (2010)[1] elaborou uma técnica de determinação da localização do impacto e da dimensão das gotas mais precisa que a técnica usada por Mani (2006). A precisão aumentou com a recomposição do sinal por transformada de ondeleta inversa, usada para excluir oscilações não desejadas associadas às oscilação das bolhas. Os resultados de Winder (2010)[1] foram verificados com tabelas de contingência contra um disdrômetro óptico Thies.

Winder (2010)[1] aplicou um pré-amplificador do sinal da pressão dinâmica medida por transdutores piezoelétricos submersos no fundo do tanque, o que resultou em superestimativa do tamanho de gotas menores (0,0 e 1,0 mm), como o ganho G não foi considerado nas equações.

2.1.3 Unidade de medição (dB)

Áudio é medido em decibéis (dB), adimensional, definido por:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (2.2)$$

onde A é igual a intensidade do som e A_0 é amplitude de referência (i.e., o mínimo detectável) A intensidade do áudio depende de perdas e também do ganho do amplificador, ou seja, da potência de saída em relação à potência de entrada do sinal. Em geral, amplificadores têm ganhos de



Figura 2.1: *Disdrômetro acústico de reservatório de água proposto por Winder (2010)[1], em primeiro plano. Um disdrômetro óptico Thies usado na verificação de resultados também foi instalado para obter medidas simultâneas (em segundo plano, à direita).*

10 a 1000 vezes, de acordo com o circuito de transistores usados na amplificação ou pré-amplificação.

A intensidade de áudio do impacto de gotas (A) é pequena em comparação com o som de outras fontes urbanas. Portanto, há necessidade de filtragem dos ruídos.

Após amplificação a intensidade do sinal é $Ganho \times A$. Note-se que o dB é mantido após a amplificação, desde que o ruído A_{min} também é amplificado, simultaneamente.

No caso de propagação do sinal do impacto diretamente entre a placa de impacto e o microfone posicionado abaixo dela, i.e., em meio sólido, o sinal das gotas apresentará, em geral, uma amplitude maior que a observada para o ruído ambiental, salvos os casos que ocorrem simultaneamente à passagem de grandes automóveis nas ruas vizinhas e de aviões acima do prédio.

A DSD obtida a partir da análise de um áudio pré-amplificado será também relativa. Consequentemente, para que a integração da DSD corresponda aos momentos estatísticos da precipitação medida, usa-se a taxa de precipitação medida em pluviômetro para ajustar a DSD iterativamente, até que a DSD recuperada corresponda exatamente à precipitação pluviométrica, dada que a intensidade do som é sempre relativa (dB).

Winder (2010)[1] discutiu a física do impacto de gotas de chuva na superfície de um tanque de água. Também projetou e construiu um disdrômetro sônico com um tanque de água, com um conjunto de sensores piezoelétricos para medição da pressão associada aos impacto superficial das gotas no fundo do tanque. Obteve assim muitas horas de medição da DSD. Ao fazer a comparação da DSD do disdrômetro sônico de tanque com a DSD obtida por um disdrômetro óptico comercial

(marca Thies) verificou um deslocamento sistemático da DSD sônico de tanque em relação à DSD do disdômetro óptico (Fig. 2.2), porque Winder (2010)[1] não considerou explicitamente o ganho do pré-amplificador em suas equações, com desvio de todo o DSD do tanque em direção à gotas de diâmetros maiores. De fato, as formas dos espectros do disdrômetro sônico e do óptico são iguais, apenas deslocadas.

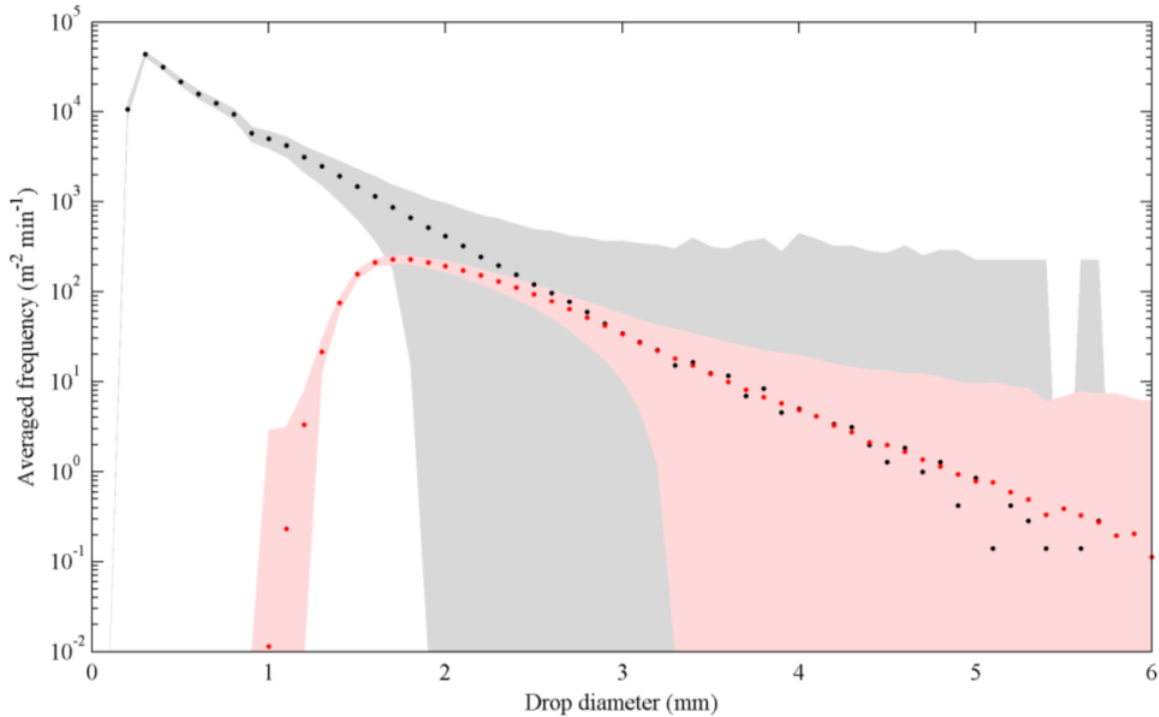


Figura 2.2: Resultado de comparação sistemática entre DSD obtida pelo disdrômetro sônico de tanque proposto por Winder (2010) em relação à DSD obtida por disdrômetro óptico comercial (marca Thies). Os pontos da DSD do disdrômetro sônico apresentam menor extensão e deslocamento para maiores dimensões de gotas. No eixo x , a variável é o diâmetro das gotas, em unidades de (mm). No eixo y , a variável é a DSD, sendo a unidade correta em $m^{-3} mm^{-1} min^{-1}$, i.e., $60 \times m^{-3} mm^{-1} s^{-1}$. Fig. original de Winder (2010)[1].

No presente trabalho, aplica-se uma iteração no programa numérico *analysis_áudio* para ajustar a DSD empírica obtida dos impactos das gotas para recuperar o valor da precipitação média observada com incerteza de $\pm 0,1 mm h^{-1}$.

Microfísica de precipitação

A formação de gotas ocorre naturalmente por nucleação heterogênea na atmosfera (WALLACE e HOBBS, 2006[34]; PRUPPACHER, 2004[35]). A forma das gotas de chuva é objeto de estudo em aplicações com radares meteorológicos. Medidas experimentais em laboratórios simulam condições atmosféricas, considerando-se a velocidade terminal da gota de chuva em um túnel de vento vertical (SZAKÁLL, 2010)[36]. A forma de gotas grandes dependem de diversos fatores físicos, tais como a tensão superficial, a pressão hidrostática, pressão aerodinâmica externa e a carga eletrostática. Entretanto, na maioria das vezes somente os três primeiros fatores são responsáveis pela produção da forma das gotas de chuva (MACDONALD, 1954)[37].

Na atmosfera existem diversos tipos aerossóis oriundos de processos naturais e/ou antrópicos. A maior parte dos aerossóis são higroscópicos e servem como núcleos de condensação de gotas (CCN). O CCN originam gotículas de diâmetro entre 0,01 e 0,1 μm pela nucleação heterogênea.

A equação de crescimento de gotículas é dada por:

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma_{vl} - \frac{4}{3}\pi R^3 \eta_l (\mu_v - \mu_l) \quad (2.3)$$

onde $4\pi R^2$ é a área da gota e σ_{vl} é a tensão superficial da água (Pa). O primeiro termo do lado direito da equação é o trabalho necessário para formar uma superfície de vapor-liquido em torno da gota.

O segundo termo da equação do lado direito é a transformação da energia relacionada com as moléculas de vapor que fluem para dentro das gotículas na fase líquida; com μ_v os potenciais químicos associados à energia livre de Gibbs das moléculas de vapor; μ_l os potenciais químicos corresponde ao liquido; η_l é a massa molar da água e $\frac{4}{3}\pi R^3$ o volume das gotículas.

Quando o primeiro termo do lado direito da Eq. 2.3 é maior que o segundo termo, obtém-se ($\Delta E > 0$). Neste caso, a tensão superficial da gota é maior que a transferência de energia necessária para ocorrer nucleação. Essa transferência de energia não ocorre espontaneamente.

Quando o segundo termo da equação é maior que o primeiro ($\Delta E < 0$), há uma transferência de energia para dentro da gotículas, com nucleação da gotícula e posteriormente formação de gotas (HOUZE, 1993)[38].

Quando as moléculas de água envolvem completamente uma CCN, uma gotícula é formada e seu processo de crescimento se dá por difusão de vapor.

Considerando-se que o crescimento de gotículas está sujeito a força gravitacional, sendo atenuada em grande parte pela resistência do ar. A massa da gotícula também tende a aumentar por colisão e coalescência, e o raio aumenta consideravelmente, assim também a velocidade terminal. Gotas maiores tendem a ser achatadas em virtude do aumento da velocidade terminal e resistência do ar em sua superfície (HOUZE, 1993)[38].

A distribuição de massa de gotas (N_M) é obtida por

$$N_M(D_i) = \frac{\pi}{6} D_i^3 N(D_i) \quad (2.4)$$

onde N_M é a quantidade de massa por unidade de volume e intervalo de diâmetro de gota, em $kg\ m^{-3}\ mm^{-1}$.

Processo de colisão e coalescência em nuvens quentes

O processo mais eficiente na formação de gotas de chuva em nuvens quentes ($T > 0C$) é a colisão-coalescência. Neste processo gotas relativamente maiores em diâmetro colidem com gotas relativamente menores, ao longo das trajetórias de queda. A eficiência do processo da colisão-coalescência depende da diferença dos raios das gotas e do ângulo de incidência do choque (ROGERS e YAU, 1989[19]; PRUPPACHER e KLETT, 2004[35]). A seguinte expressão permite calcular a eficiência do processo de colisão-coalescência de forma simplificada, por uma função parabólica,

$$E(r_1, r_2) = \frac{y^2}{(r_1 + r_2)^2} \quad (2.5)$$

onde E é a eficiência de colisão; r_1 é o raio da gota de maior diâmetro; r_2 é o raio da gota de menor diâmetro e y é a distância entre a linha central da maior gota e o centro da menor. Logo, a

eficiência do processo é uma função da razão entre os raios das gotas, do ângulo de incidência, das forças aerodinâmicas inerciais (i.e., da turbulência) e da distância entre os baricêntricos das gotas. A eficiência é máxima a certa distância e , reduzindo-se quadraticamente para $y > r_1$.

Modelo de Bowen

Bowen estudou o desenvolvimento de chuva em nuvens quentes. Ele supôs que em uma nuvem, gotículas de mesma dimensão inicial subam com a corrente de ar ascendente constante e cresçam por condensação. Simultaneamente, uma gota com o dobro da massa das demais também ascende na corrente de ar. Esta gota maior cresce tanto por condensação de vapor quanto por colisão-coalescência com as demais (ROGERS e YAU, 1989)[19].

Conforme Rogers e Yau (1989)[19], as correntes ascendentes elevam as gotas até o topo da nuvem seguindo trajetórias parabólicas. A coalescência é lenta no início, mas após atingido o máximo da trajetória, ambas a velocidade terminal de queda das gotas (u) e a eficiência de coleta-coalescência (E) aumentam rapidamente com o tamanho de gota, na trajetória descendente. As gotas de nuvem permanecem crescendo por colisão-coalescência na corrente descendente e emergem na base da nuvem como gotas de chuva.

Nuvens quentes

Nuvens quentes são aquelas que apresentam temperaturas acima de 0°C . No estudo dos processos de formação de nuvens quentes há um grande interesse no estudo do conteúdo de água líquida (LWC), o número total de gotículas de água (concentração de gotículas em nuvens) e a distribuição de dimensões de gotas (DSD) (WALLACE e HOBBS, 2006)[34].

Regiões onde o LWC é maior, acabam sendo correspondente há regiões de correntes de ar ascendente intensa. Em geral, nas nuvens quentes que são caracterizadas por temperaturas internas acima de zero grau, o LWC aumenta com a altura, desde a base da nuvem até sua metade superior (WALLACE e HOBBS, 2006)[34].

Processo de Bergeron

O processo de Bergeron ocorre em nuvens com temperatura abaixo de zero, onde o crescimento dos cristais de gelo ocorre a dispensa da evaporação de gotas de água líquida super-resfriadas. O processo se dá em regiões da nuvem onde a pressão de vapor de equilíbrio sobre a superfície das gotas de água líquida é maior que a pressão de vapor de equilíbrio sobre a superfície dos cristais de gelo. Nestas condições, ocorre rápida evaporação das gotas e crescimento dos cristais, através da difusão de vapor e deposição em suas superfícies.

2.2 Espectro de gotas - DSD

2.2.1 Frequência absoluta

a) Disdrômetro sônico

Em um disdrômetro sônico, a distribuição do número de gotas pode ser determinada por contagem do sinal sônico correspondente ao primeiro aumento de intensidade por intervalo de duração do sinal. A série temporal de áudio, quando a variação local da amplitude excede um limiar maior que o módulo da amplitude da vibração de fundo (ruído), considera-se o impacto de uma gota. O número total de gotas é simplesmente a soma das frequência absoluta de cada classe. Como o impacto de cada gota gera uma oscilação evanescente de duração τ_g , somente a primeira variação

positiva significativa do sinal é considerada em cada intervalo τ_g . O período de amostragem de áudio para medição de gotas individuais τ_g pode ser estimado, em (s), da razão entre o número total de gotas pequenas e o tempo de amostragem total. No caso de 8000 gotas em 10 minutos obtém-se 13 gotas s^{-1} , que resulta $\tau_g = 1/13 \approx 0,077 s \text{ gota}^{-1}$.

b) Disdrômetro óptico

Para um disdrômetro óptico, a DSD é obtida pela somatória

$$N(D) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{v_t A_p} \frac{1}{\Delta D} \right] \quad (2.6)$$

Sendo $N(D)$ a função densidade de gotas de diâmetro entre D e $D + \Delta D$, i é o índice de contagem de gotas, n é o número de gotas de diâmetro entre D e $D + \Delta D$ medidas no intervalo de tempo Δt , ΔD é o intervalo de classe de diâmetros, v_t é a velocidade terminal de queda de gotas ($m s^{-1}$), em função do diâmetro das gotas, Δt o intervalo de tempo de medição (s) e A_p é a área de medição, equivalente à área de abertura de um pluviômetro. $N(D)$ é expresso em *gotas* $m^{-3} mm^{-1}$ ou por seu logaritmo.

Distribuição de superfície de gotas

O formato da superfície da gota de chuva depende de seu tamanho. Gotas de diâmetros (D_0) menores que 0,280 mm são esféricas. Gotas de diâmetro no intervalo entre 0,280 e 1 mm tendem a ser achatadas. Gotas de diâmetros maiores que 1 mm são elipsoidais e achatados na base (PRUPACHER e KLETT, 2004)[35]. Desta forma, há necessidade de se estudar as dimensões de gotas de chuva, dada que a área, massa e volume, associadas a velocidade terminal, produzem diferentes tamanhos de gotas. A área superficial de gotas esféricas é:

$$N_A(D_i) = \pi D_i^2 N(D_i) \quad (2.7)$$

onde $N_A(D_i)$ é igual ao número de gotas de diâmetro entre D e $D + \Delta D$ por unidade de volume de ar, em unidades de ($mm^2 m^{-3} mm^{-1}$). A área da gota é πD_i^2 .

Refletividade de gotas de precipitação

A refletividade é devido ao espalhamento da radiação eletromagnética incidente sobre moléculas, aerossóis, gotículas de água. O espalhamento varia com a radiação incidente e a diversidade de tamanhos. Os aerossóis de tamanho de 1 μm e as gotículas de água com tamanhos de 10 μm retroespalham diferentes comprimentos de ondas a radiação incidente (LIOU e YAU, 2002)[40].

Quando o diâmetro médio dos hidrometeoros é ao menos dez vezes menor que o comprimento de onda da radiação incidente, o espalhamento é não isotrópico, chamado de espalhamento Rayleigh. Por outro lado, quando o diâmetro médio dos hidrometeoros é maior ou igual ao comprimento de onda da radiação incidente, o espalhamento torna-se isotrópico, sendo conhecido por espalhamento Lorenz-Mie.

A equação do espalhamento Rayleigh usada para obter a refletividade Z ($mm^6 m^{-3}$), é expressa por

$$Z = \frac{1}{Vol} \sum_i D_i^6 N(D_i) \Delta D \quad (2.8)$$

onde D_i é o diâmetro das gotas de i -ésima classe, Vol é o volume amostrado (m^3).

O espalhamento é proporcional à sexta potência do diâmetro das gotas (ROGERS e YAU, 1989[19]; PRUPPACHER e KLETT, 2004[35]).

Joss e Gori (1978)[15] com medições mais precisas obtiveram a DSD com grande resolução das classes de diâmetro de gotas. Eles mostraram que a função de distribuição (DSD) não é exponencial para amostras de duração 1 minuto, mas uma função de distribuição uniforme.

Em geral, o modelo de distribuição Gama apresenta somente 2 parâmetros, determinados a partir das estimativas da média e variância (WILKS, 2011)[41]. JOSS e GORI, 1978[15]) determinaram os parâmetros da distribuição Gama a partir do diâmetro médio e variância de amostras de 1 minuto do período total da chuva.

Na distribuição exponencial, os diâmetros fazem parte da contribuição máxima de gotas para o coeficiente de extinção óptica (σ) e a refletividade do radar (Z), mostradas abaixo com o fator de forma de Joss e Gori (1978)[15].

$$\sigma(mm^2m^{-3}) = \left(\frac{\pi}{4}\right) \int_0^{\infty} N(D)D^2dD \quad (2.9)$$

$$Z(mm^6m^{-3}) = \int_0^{\infty} N(D)D^6dD \quad (2.10)$$

$$D(\sigma)(mm) = \int_0^{\infty} N(D)D^2dD / \int_0^{\infty} N(D)DdD \quad (2.11)$$

$$D(Z)(mm) = \int_0^{\infty} N(D)D^6dD / \int_0^{\infty} N(D)D^5dD \quad (2.12)$$

$$S(Z_\sigma) = 2 \left| \frac{D(Z) - D(\sigma)}{D(Z) + D(\sigma)} \right|_{observado} \quad (2.13)$$

Posteriormente Joss e Gori (1978)[15] notaram que:

Se $S(Z_\sigma) \approx 0$, a distribuição monodispersiva é uma aproximação da região de tamanho de gotas no qual contribui para o Z e para a superfície σ por unidade de volume.

Se $S(Z_\sigma) < 1$, as gotas responsáveis pela principal contribuição de Z e σ estão mais juntas em diâmetro do que a distribuição exponencial.

Se $S(Z_\sigma) = 1$, a distribuição exponencial de gotas contribuem para Z e σ .

Se $S(Z_\sigma) > 1$, as gotas responsáveis pela principal contribuição de Z e SIGMA estão mais afastadas do diâmetro do que em uma distribuição exponencial.

Joss e Gori (1978)[15] mostraram que o aumento de número de gotas no primeiro minuto de precipitação pode implicar na distribuição exponencial como a determinada por Marshal e Palmer, anteriormente.

Posteriormente, Ulbrich (1983)[2] mostrou que as variações naturais dos tipos de precipitação podem determinar relações de dependência entre os parâmetros.

2.3 Modelos de DSD

Modelo de Marshall-Palmer

Laws and Parsons (1943)[42] foram pioneiros ao estudar a relação de distribuição de número de gotas com seus diâmetros. Marshall and Palmer (1948)[3] corroboraram com os resultados apresentados anteriormente. O espectro de gotas é dado por

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (2.14)$$

onde $N(D)$ é o número de gotas por unidade de volume, com diâmetro entre D e $D + dD$, em geral apresentado em unidades de *gotas* $m^{-3} mm^{-1}$, $N_0 = 8000 m^{-3}$ é o valor inicial de $N(D)$, no limite $D = 0$ mm e Λ é o parâmetro de curvatura em função da taxa de precipitação R , obtido por

$$\Lambda = 4.1R^{-0.21} \quad (2.15)$$

Modelo exponencial

A distribuição de gotas de Marshall e Palmer (1948)[3] serve para aprimorar os estudos do espectro de gotas, mas Joss e Gori (1978)[15] apresentaram resultados diferentes. A distribuição exponencial é descrita por dois parâmetros, N_0 e Λ em função do conteúdo de água líquida W e refletividade de gota Z , dessa forma pode ser obtido as equações referente a N_0 e Λ (WALDEVOGEL, 1974)[43]:

$$N_0 = 446 \left(\frac{W}{Z} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.16)$$

$$\Lambda = 6.12 \left(\frac{W}{Z} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

A variação de N_0 em uma série temporal pode indicar variações do tipo de precipitação, estratiforme e convectiva. As variáveis N_0 e Λ variam em função do conteúdo de água líquida W e do fator de refletividade Z . Assim obtém-se a distribuição de número de gotas a partir da equação (WALDEVOGEL, 1974)[43]:

$$N(D) = N_0 (W/Z) e^{-\Lambda (W/Z) D} \quad (2.18)$$

Sendo $N(D)$ o número de gotas por unidade de volume com diâmetros entre D e $D + dD$, em *gotas* $m^{-3} mm^{-1}$. N_0 é o valor inicial de $N(D)$ para $D = 0$ mm e Λ é o parâmetro de curvatura, ambos calculados a partir do conteúdo de água líquida W em $mm^3 m^3$ e do fator de refletividade Z em $mm^6 m^{-3}$.

Modelo Gama

Waldevogel (1974)[43] propôs um modelo onde N_0 e Λ variam com os eventos de precipitação. Já Ulbrich (1983)[2] apresentou um modelo de três parâmetros para a distribuição de tamanho de gotas de chuva. Quando um parâmetro pode ser obtido dos demais parâmetros, o modelo se reduz ao modelo de dois parâmetros. Esta simplificação ocorre quando se conhece a relação entre os momentos estatístico, para diferentes tipos de precipitação.

O modelo da distribuição de três parâmetros é dado por (ULBRICH, 1983)[2]:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (2.19)$$

onde $N(D)$ é o número de gotas por unidade de volume para gotas de diâmetro entre D e $d+dD$, em *gotas* $m^{-3} mm^{-1}$; N_0 é o valor de $N(D)$ no limite $D \rightarrow 0$; μ é o parâmetro de potência da escala e Λ é o parâmetro angular, em mm^{-1} (ULBRICH,1983)[2].

Segundo Ulbrich (1983)[2], a curvatura da DSD é determinada pelo expoente μ . Para μ de valor positivo (negativo), a DSD torna-se convexa (concava). No caso de $\mu < 0$ há um incremento simultâneo das quantidades de gotas muito pequenas e grandes, como mostra a figura 2.3 de Ulbrich (1983)[2].

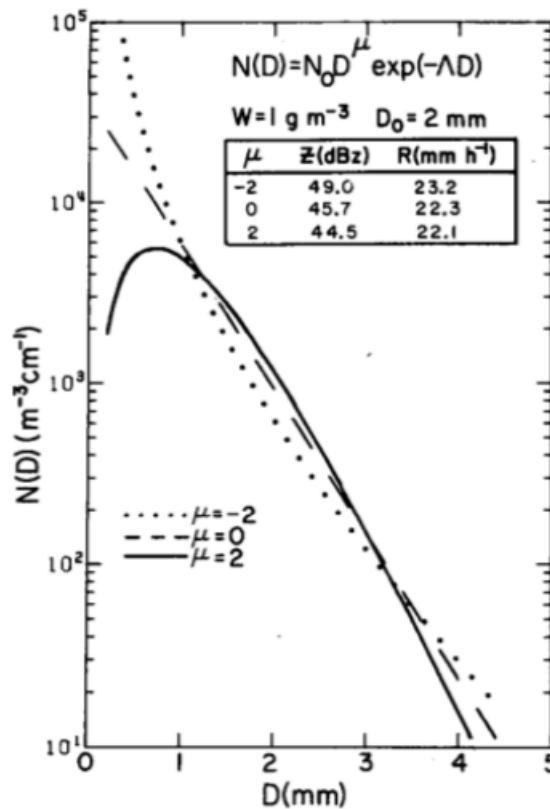


Figura 2.3: Distribuição de tamanho de gotas do modelo de distribuição Gama, para μ igual a -2, 0 e 2, conteúdo de água líquida $LWC = 1 g m^{-3}$ e diâmetro médio (ponderado pelo volume) das gotas $D_0 = 2 mm$. A tabela mostrada no gráfico, apresenta os valores correspondentes ao fator de refletividade do radar e a taxa de precipitação (ULBRICH, 1983)[2].

2.4 Momentos estatísticos

O impacto das gotas permite avaliar a erosão de solos e a estabilidade quanto a ruptura. Daí a importância de conhecer-se a distribuição de dimensão das gota.

A distribuição de tamanho de gotas pode ser descrita pelos momentos estatísticos de ordem- n (M_n). A descrição dos momentos estatísticos pode ser vista em Maibaum (1985)[44]. Uma aplicação dos momentos estatísticos no estudo da distribuição de tamanho de gotas de chuva pode ser encontrada em Garcia (2013)[45]. A equação dos momentos estatístico é

$$M_n = \int_{-\infty}^{+\infty} D^n N(D) dD \quad (2.20)$$

Número total de gotas na amostra

O número total de gotas por unidade de volume (N_t), em *gotas* m^{-3} , ou concentração total de gotas, é obtido pelo cálculo do momento de ordem zero (M_0),

$$N_t = M_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} D^0 N(D) dD = \int_{-\infty}^{+\infty} N(D) dD \quad (2.21)$$

Conteúdo de água líquida

O conteúdo de água líquida (LWC) é obtido do momento estatístico de terceira-ordem (M_3). Isto é,

$$LWC = \frac{\pi}{6} \rho_w \int_{-\infty}^{+\infty} D^3 N(D) dD = \frac{\pi}{6} \rho_w M_3 \quad (2.22)$$

onde ρ_w é a densidade da água líquida ($10^3 \text{ kg } m^{-3}$). Expressando $N(D)$ em $m^{-3} \text{ mm}^{-1}$ e D em m obtém-se LWC em $\text{kg } m^{-3}$.

Fator de refletividade

Os hidrometeoros variam de cristais microscópicos, passando por uma variedade de diâmetros de gotas de nuvem e de chuva, agrupamentos de cristais, neve, até granizo de grande dimensão. As gotas de chuva podem atingir de diâmetros de até 15 mm. O fator de refletividade (Z) varia proporcionalmente, dado por (ROGERS e YAU, 1989)[19],

$$Z = M_6 = \int_{-\infty}^{+\infty} D^6 N(D) dD \approx \frac{1}{Vol} \sum_{i=1}^n D_i^6 \quad (2.23)$$

onde n é o número de hidrometeoros no volume de ar amostrado Vol . Desde que a variação de Z é grande, utiliza-se uma escala logarítmica (dBZ), expressa como

$$dBZ = 10 \log_{10}(Z) = 10 \log_{10}(10^{18} \times M_6) \quad (2.24)$$

onde M_6 é o momento de sexta-ordem, em *gotas* $m^6 m^{-3}$ (PRUPPACHER e KLETT, 2004[35]; BRINGI e CHANDRASEKAR, 2004[46]). O tempo de amostragem recomendado para se obter o espectro de gotas com disdrômetros sônicos é de 1 minuto.

Taxa de precipitação

A taxa de precipitação R é definida por

$$R = \frac{\pi}{6} \rho_w \int_{-\infty}^{+\infty} D^3 v_t(D) N(D) dD \quad (2.25)$$

onde R é a taxa de precipitação em $m \text{ s}^{-1}$ e $v_t(D)$ é velocidade terminal de queda de gotas, em $m \text{ s}^{-1}$ (BRINGI, 2004[46]; GARCIA, 2013[45]).

Em primeira aproximação, $v_t(D) = \kappa D$, onde κ é uma contante da ordem de 4000 s^{-1} e D em (m) (ROGERS e YAU, 1989)[19]. Neste caso, R pode ser escrita em função do momento de quarta-ordem (M_4), isto é,

$$R \approx \frac{\pi}{6} \kappa \rho_w \int_{-\infty}^{+\infty} D^4 N(D) dD = \frac{\pi}{6} \kappa \rho_w M_4 \quad (2.26)$$

Classificação da precipitação

De acordo com a World Meteorological Organization, chuvisco é uma precipitação praticamente uniforme na forma de gotas pequenas. O diâmetro das gotas é normalmente menor que 0,5 mm. As gotas flutuam tornando visível os menores movimentos do ar. Para propósitos de codificação da WMO, chuvisco precisa ser categorizado como fraco (*slight*), moderado (*moderate*) ou pesado (*heavy*). Na prática, a classificação do chuvisco depende da visibilidade. Tem-se chuvisco fraco quando a visibilidade supera 800 m; moderado para visibilidade entre 400 e 800 m e pesado para visibilidade inferior a 400 m (WMO, 2008)[5].

Chuva é uma precipitação de gotas de água, que caem de uma nuvem. O relatório da WMO explica que o diâmetro e concentração das gotas de chuva varia consideravelmente em função da intensidade e especialmente da natureza da precipitação (chuva contínua, pancada de chuva (*rain shower*), açaieiro (*downpour*), etc). Chuva contínua usualmente cai de uma ou mais camadas de nuvem estratiforme espessa. Para propósito de codificação da WMO, a chuva precisa ser classificada como segue: ligeira (*slight*), moderada (*moderate*) ou pesada (*heavy*). Esses termos são definidos como segue, no contexto de meteorologia marítima (WMO, 2008)[5]:

- Chuva ligeira constituída por gotas grandes esparsas. A razão de acumulação sobre superfícies planas horizontais (ou convés) é pequena, os charcos formam-se muito lentamente;
- Chuva moderada constituída por gotas individuais que não são facilmente identificáveis. Borrifo de chuva é observado. Poças se formam rapidamente. Sons oriundos de telhados comutam a um suave bramido;
- Chuva pesada produz aguaceiro com barulho de rugido nos toldos e telhados, com borrifos de gotas finas na forma de névoa.

Em resumo, para a WMO, chuvisco é uma precipitação de água líquida com gotas de diâmetro igual ou inferior a 0,5 mm. Consistentemente, chuva apresenta gotas com diâmetro superior a 0,5 mm.

Em geral valores acumulados de precipitação são usados em classificação da intensidade da chuva, por exemplo, a precipitação acumulada em 24 horas.

A precipitação à superfície pode ser classificada em estratiforme ou convectiva. Por exemplo, Araújo (2015)[47] propôs os seguintes critérios baseados na análise de dados de radar a bordo do satélite TRMM:

- Precipitação estratiforme - caracterizada pela Banda Brilhante e refletividade máxima $Z_{max} < 40 \text{ dBZ}$;
- Precipitação convectiva rasa - caracterizada pela refletividade $Z_{max} > 40 \text{ dBZ}$ com topo da nuvem apresentando temperatura $> 0^\circ\text{C}$;
- Precipitação convectiva profunda - caracterizada por refletividade $Z_{max} > 40 \text{ dBZ}$ com topo da nuvem apresentando temperatura $< 0^\circ\text{C}$.

A refletividade do radar mínima associada a uma chuva leve é de 30 dBZ (BRINGI e CHANDRA-SEKAR, 2001)[46].

Tabela 2.1: Classificação de chuva. Referências: IMD[4]; WMO[5]. Para finalidades práticas de previsão de risco considera-se preferencialmente valores diários, i.e., apresentam-se taxas de precipitação diárias correspondentes, multiplicando-se a taxa horária (terceira coluna r) por 24, obtendo mm dia^{-1} .

Nome	Prec. acumul. (R) (mm) em 24h	Taxa de prec. (r) (mm h^{-1})
Sem chuva	$R = 0$ [4]	
Chuva traço	$0,01 < R \leq 0,04$ [4]	
Chuva muito fraca	$0,1 < R \leq 2,4$ [4]	
Chuva fraca (Slight ou Light rain)	$2,5 < R \leq 7,5$ [4]	$2,5 \leq r$ [5]
Chuva moderada (Moderate rain)	$7,6 < R \leq 35,5$ [4]	$2,5 < r \leq 7,5$ [5]
Chuva quase pesada (Rather heavy)	$35,6 < R \leq 64,4$ [4]	
Chuva pesada	$64,5 < R \leq 124,4$ [4]	$7,5 < r$ [5]
Chuva muito pesada	$124,5 < R \leq 244,5$ [4]	
Chuva extremamente pesada	$244,5 \leq R$ [4]	

2.5 Velocidade terminal

A velocidade terminal proposta por Atlas (1973) é mais adequada para gotas com pequenos diâmetros e moderadas, pois gotas maiores tendem a diminuir sua velocidade de queda. O modelo de Atlas e Ulbrich (1977), apresenta um estimativa ponderada, mostrando menor erro de estimativa ao longo do intervalo de medições (*range*). O método de Stokes também é adequado para gotículas. Diferentemente, o método de Reynolds é adequado para gotas de maior dimensão, quando em geral o arrasto aerodinâmico se torna independente do número de Reynolds. Logo, não há uma formulação única da velocidade terminal para todas as condições de escoamento.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Área de estudo

Um conjunto experimental disdrômetro sônico de impacto foi desenvolvido pelo laboratório de Hidrometeorologia Experimental, instalado na plataforma de monitoramento meteorológico sobre telhado do prédio do IGEO-CCMN-UFRJ.

3.2 Material utilizado no disdrômetro sônico

Construiu-se um disdrômetro sônico baseado no impacto das gotas sobre uma superfície plana horizontal.

O hardware do disdrômetro é constituído de:

- Microfone comum (sensor);
- Envólucro impermeável do sensor composto por um recipiente feito de plástico tipo 5 (copo). O recipiente é colocado sobre um microfone envolvido em uma espuma de borracha macia. O cabo de áudio sai por baixo do recipiente. O fundo plano no recipiente exposto horizontalmente recebe o impacto de gotas e produz um som que é captado pelo microfone posicionado justamente abaixo dentro do recipiente;
- Cabo de áudio de 25 m de comprimento com conectores nas extremidades;
- Mini-amplificador de áudio de 20 W;
- Computador Laptop com processador Pentium i5, placa de áudio inboard e microfone interno.

O software básico do disdrômetro é constituído de um:

- Sistema operacional linux *Ubuntu 14*;
- Software de áudio *Audacity* (livre);
- Software *analysis_audio* criado pelo Laboratório de Hidrometeorologia Experimental do IGEO-CCMN-UFRJ, em Fortran 90.
- Software de visualização científica *gnuplot* (livre).

3.2.1 Descrição do sensor de impacto

O impacto da gota ocorre sobre uma placa horizontal de plástico. Esta placa é que o fundo de um recipiente (um copo) plástico. O material do recipiente é o polímero tipo PP (5), *polietileno de baixa densidade*.

Um microfone foi inserido no recipiente abaixo da placa de impacto, cuja parede lateral além de manter o microfone fixo, comprimido por uma espuma de borracha, serve também para isolá-lo da água da chuva, poeira e poluição. Outrossim, a espuma ajuda a reduzir o ruído ambiente.

Empiricamente, verificou-se que o ruído ambiente na maior parte do tempo apresenta amplitude menor que do áudio do impacto de gotas. A exceção ocorre quando da passagem de aviões e veículos pesados, o áudio tende a se saturar (i.e., acima de 80 dB).

O áudio do impacto de uma gota sobre a placa plástica tem a forma de uma oscilação caracterizada por um início abrupto (i.e., uma primeira elevação positiva de dB, definindo o máximo inicial), seguido por uma sequência de oscilações evanescentes, para as quais uma envoltória exponencial (envelope) pode ser ajustado de forma conveniente.

Winder (2010)[1] construiu um disdrômetro baseado em um tanque de água. O impacto de gotas sobre a superfície de água produziu um som de frequência da ordem de 50 *kHz*, com amplitude evanescente de duração de 2 a 6 μs , dependendo da presença de material absorvedor na parede interna do tanque.

3.2.2 Preparação do áudio para análise

O áudio pré-amplificado foi gravado no laptop com o software *Audacity* (livre) em linux.

O áudio original pré-amplificado contém ruídos (e.g., vento, vozes, etc). Os ruídos mais significativos foram produzidos por veículos que passam nas ruas adjacentes e por aviões trafegam sobre a estação meteorológica.

Em seguida, o software *Audacity* foi utilizado no recorte do sinal (*clipping*), entre -15 e +15 *dB* para um nível médio em 0 *dB*.

O som associado ao ambiente foi removido a partir de uma amostra de áudio do ambiente selecionada com aplicação de convolução entre o sinal e o reverso da amostra. A remoção do ruído ao longo de toda a série de dados foi feita com o aplicativo *Audacity*.

O software em Fortran 90 chamado *analysis_audio* foi desenvolvido para o trabalho, usando como entrada o arquivo filtrado, com capacidade de detectar o sinal inicial (amplitude) dos impacto de gotas individuais.

Este programa numérico foi inspirado na ideia de Mani (2006)[11] que propôs usar variações do sinal para detectar o impacto inicial das gotas. Interessante notar que alguns algoritmos para detecção de raios atmosféricos também empregam o primeiro impacto positivo da oscilação eletromagnética como critério (ORVILLE, 2008)[48].

3.2.3 Outras considerações instrumentais

Um cabo leva o sinal do microfone até o interior do *laboratório de hidrometeorologia experimental* (sala H1-0013) onde é pré-amplificado e emitido de forma audível por uma caixa acústica. O áudio pré-amplificado então pode ser gravado pelo microfone interno de laptop posicionado a 20 cm do autofalante do pré-amplificador. A placa de áudio onboard do laptop serve como conversor

analógico-digital. O resultado é a gravação de um arquivo de áudio em formato (.wav) (i.e., um arquivo de dados em formato binário de *acesso direto*).

Inicialmente, a análise do sinal foi realizada com um script *octave*. À medida que a dimensão do arquivo de áudio aumentou, a análise passou para o programa Fortran 90 com saída gráfica *gnuplot*, proposto e codificado no laboratório de hidrometeorologia experimental do IGEO-CCMN-UFRJ.

No futuro, um cabo poderá ser ligado diretamente entre a saída do amplificador de áudio, que recebe o sinal primário do disdrômetro, e a entrada da placa de áudio do computador, como forma de eliminar por completo qualquer ruído ambiental secundário. Já os ruídos do ambiente primários reverberam na prática sobre o sensor do disdrômetro, apesar de parcialmente amortecidos. Por isto, as gravações das precipitações noturnas são mais recomendadas em áreas urbanas, porque em geral a noite há menos ruído e passagens de aviões e automóveis. Por outro lado, os registros de áudio de chuviscos e chuvas muito leves tomados em ambientes urbanos requerem filtragem do sinal indesejado e ou edição para remoção por partes quando necessário. Isto implica em uma montagem feita de recortes do áudio original, no qual o usuário precisa separar seletivamente o áudio correspondente a precipitação com níveis de ruído ambiental relativamente baixos.

3.3 Desenvolvimento de um sensor para capturar a acústica da precipitação

No desenvolvimento desse instrumento foi utilizado um microfone de áudio da marca Harmonics (modelo MDC-101). O microfone foi colocado dentro de um cilindro de PVC utilizado para proteção e isolamento acústico do microfone do vento exterior. Uma espuma de borracha foi colocada entre a parede interior do cilindro e exterior do microfone. Além de suporte, a espuma também funciona como amortecedor acústico do som que chega pela lateral do instrumento, como por exemplo, provocado pelo impacto do vento. O cone de observação do microfone é voltado para cima sobre o qual foi colocada uma tampa plástica (tipo 5), que funciona como placa elástica onde as gotas precipitam (Fig. 3.1).

Um cabo sp2 (2 x 0,14 mm²) de comprimento 20 m foi utilizado para interligar a saída do microfone na plataforma de monitoramento sobre o prédio do IGEO-CCMN-UFRJ e o amplificador localizado dentro do laboratório de hidrometeorologia na sala H2-013 do IGEO. A caixa amplificadora de áudio é da marca Gianini (Fig. 3.2). A saída de áudio da caixa amplificador não foi ligada diretamente ao computador por segurança em vista de tempestades com raios e surtos de corrente elétrica que poderiam danificar o computador.

A figura 3.3 ilustra o arranjo no qual o som amplificado das gotas é finalmente convertido de sinal analógico para digital pela placa de som do computador. O áudio em formato digital é salvo em um arquivo de áudio binário, tipo wav. O arquivo de áudio é carregado no software (*Audacity*), onde o trabalho de filtragem foi realizado.

Os sons de impacto de gotas produzem um som oscilante, com frequência de *kHz*, sendo suas amplitudes máximas proporcionais ao diâmetro das gotas que impactam sobre o microfone durante o registro. Em geral, esta proporcionalidade não é linear.

O áudio das gotas (*dB*) com remoção de ruídos de veículos, vento, pássaros, aviões, etc, está mostrado na figura 3.4.

A primeira medição realizada com o disdrômetro sônico foi de chuvisco pós-frontal em 18/05/2016 entre 10h 55min e 13h 45min. Uma subamostra de 10 minutos foi preparada para análise após remoção do ruído ambiental.

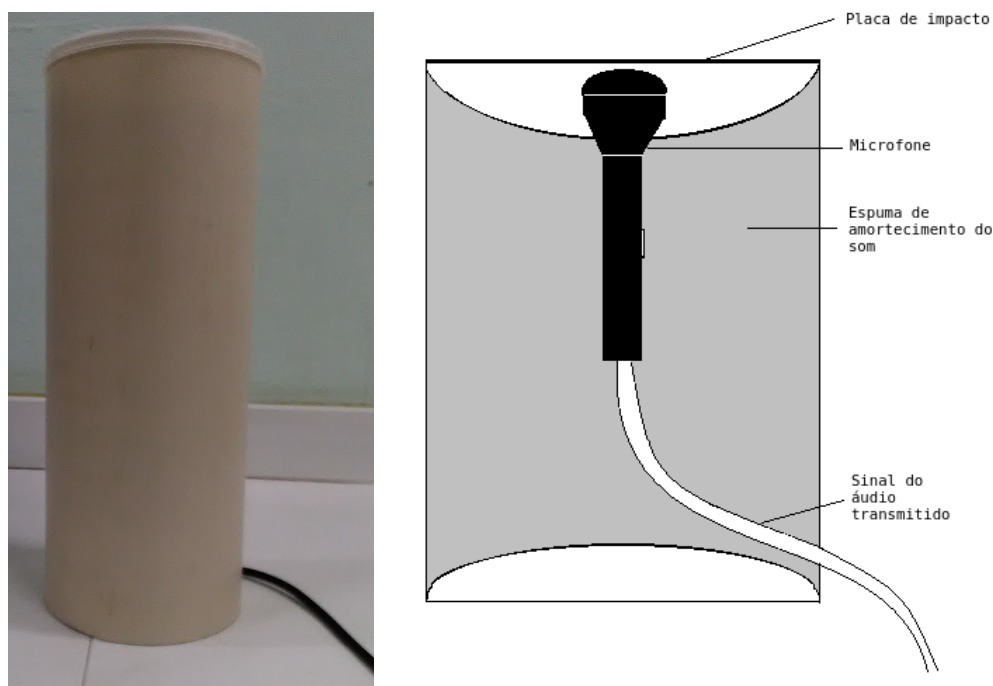


Figura 3.1: À esquerda, foto do exterior do disdrômetro sônico de baixo custo, desenvolvido no laboratório de hidrometeorologia do Departamento de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). À direita, vista interna dos componentes.



Figura 3.2: Amplificador Giannini (modelo G5+) utilizado na pré-amplificação do áudio observado na etapa anterior à gravação.

3.4 Calibração do disdrômetro sônico de impacto

O disdrômetro sônico de impacto requer calibração. Há duas possibilidades de calibração:

1. Interna e iterativa. Neste caso, a DSD é ajustada a partir do momento estatístico associado à precipitação observada. Portanto, a DSD é re-escalada pouco a pouco (de forma suave) até que a DSD obtida produza por integração do momento de quarta-ordem a precipitação média observada durante o período de medição. Logo, usuário deve fornecer caso a caso a



Figura 3.3: Mesa de gravação do som das gotas de chuva que impactam o sensor do disdrômetro sônico.

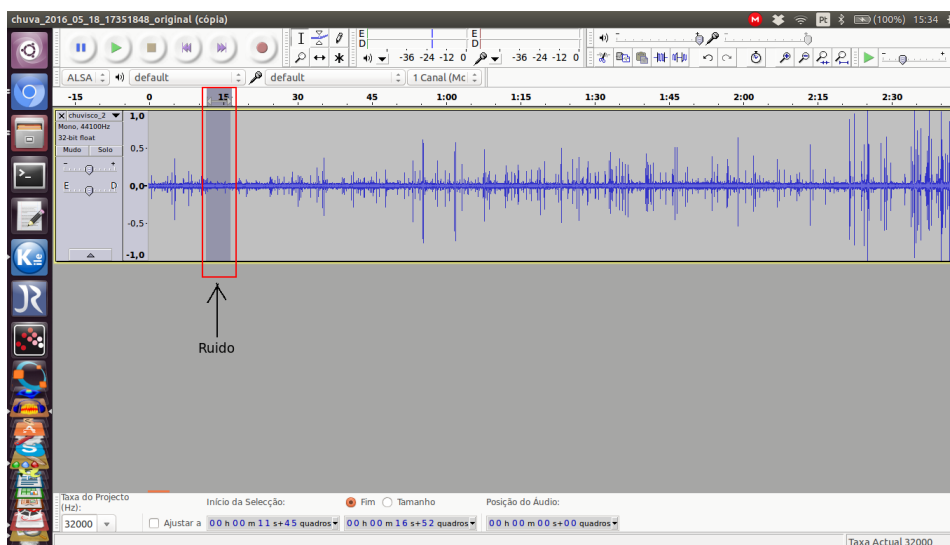


Figura 3.4: Este segmento de áudio com ruído ambiental de baixa intensidade. O trecho selecionado pode ser fornecido como amostra de ruído ao método de filtragem global disponível no software Audacity. Sinais de áudio com características similares àquele da amostra podem ser removidos ao longo de toda a série temporal. O resultado é uma série filtrada correspondente apenas aos impactos da queda das gotas sobre o sensor mais sons de alta intensidade associados a aviões e outros emissores potentes, que são removidos caso a caso, por recorde ao longo da série filtrada.

precipitação observada como parâmetro de entrada do aplicativo de análise.

2. Global. Neste caso, estabeleceu-se uma curva de calibração única a partir de medições realizadas no laboratório de hidrometeorologia experimental do IGEO-CCMN-UFRJ. Ensaios experimentais foram realizados, nos quais o disdrômetro foi arranjado sobre um fluxo de go-

tas de volumes conhecidos. Desta forma, o áudio do impacto de gotas de diâmetros médios conhecidos foi obtido. A velocidade terminal média também pode ser conhecida a partir da razão entre o espaço percorrido e o tempo decorrido na queda livre das gotas. O diâmetro das gotas foi obtido pela divisão do volume de água recolhido após impacto pelo número total de gotas de cada ensaio.

A curva de calibração corresponde à curva de ajuste de pontos em um gráfico de dispersão onde no eixo x tem-se a variável de entrada (diâmetro médio das gotas em queda livre) e no eixo y, a variável de saída (amplitude de áudio, dB).

Testes com distribuição teórica

Para testar os métodos de estimativa da DSD foram utilizados dados de precipitação observados no período entre 27/11/2014 e 19/01/2016 pelo pluviômetro da estação meteorológica instalado no prédio do IGEO-CCMN-UFRJ. A partir da precipitação observada, a *DSD* é modelada com distribuição de Marshall e Palmer (1948)[3]. N_0 e foram estimados da taxa de precipitação observada (R_{obs}). A DSD assim obtida foi integrada para se obter os momentos de ordem zero a seis.

DSD acústica simulada pelo método de Monte Carlo

O programa *analysis_audio* gera números pseudo-aleatório correspondente ao sinal de áudio de impacto da queda de gotas de precipitação com distribuição exponencial de Marshall-Palmer.

O método de Monte Carlo considera a transformação de dados de distribuição uniforme em dados correspondentes da distribuição exponencial de Marshall-Palmer.

Quando a distribuição de probabilidade de variáveis é parametrizada, matemáticos frequentemente usam a amostragem de Monte Carlo da cadeia de Markov (MCMC) (METROPOLIS et al., 1953; HASTINGS, 1970)[49][50]. A ideia central do *algoritmo de Metropolis-Hastings* é considerar um modelo de cadeia de Markov discriminante de uma distribuição de probabilidade estacionária. Isto é, no limite de grandes números, as amostras são geradas pelo método MCMC serão amostras da distribuição (alvo) desejada. Por meio do teorema ergódico, a distribuição estacionária é aproximada pelas medições empíricas do estado randômico do amostrados MCMC ¹.

Neste trabalho, o *algoritmo de Metropolis-Hastings* foi utilizado para gerar uma série de amostras pseudo-aleatórias com distribuição de Marshall-Palmer estacionária. A partir do arquivo de áudio simulado, as rotinas de cálculo do programa *analysis_audio* foram testadas para a consistência física.

3.5 Variação temporal da DSD empírica

O áudio do impacto da precipitação é registrado, filtrado e analisado para se obter a DSD empírica. A distribuição obtida é comparada com a DSD de Marshall-Palmer, além disso é empregada para se obter momentos estatísticos, taxa de precipitação, diâmetro médio das gotas, conteúdo de água líquida, velocidade terminal e fator de refletividade.

Neste trabalho, as séries temporais do sinal filtrado tem duração entre 5 e 10 minutos, dependendo da quantidade de ruído ambiental removido. Na prática, o período total é subdividido em 30

¹Para um informação geral sobre o algoritmo vide https://pt.wikipedia.org/wiki/Método_de_Monte_Carlo, https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method#cite_ref-3 e https://en.wikipedia.org/wiki/Metropolis-Hastings_algorithm

e 60 s. Para períodos totais de 10 minutos (600 s) escolheu-se 60 s ou 10 amostras. No caso de séries de 5 minutos escolheu-se 30 s. A análise da evolução temporal das DSD das amostras ao longo do período total permite a caracterização da evolução temporal das variáveis ao longo do período de amostragem. Isto permite a análise de variações internas de 30 e 60 s.

3.6 Precipitação medida

O conjunto de áudios de precipitação medidos sobre o prédio do IGEO-CCMN-UFRJ estão na Tab. 3.1. Os arquivos foram selecionados usando um critério pragmático de discernibilidade do áudio de impacto de gotas. De um total de 7 arquivos, seis foram selecionados, como listados na Tab. 3.1. um arquivo foi excluído porque mostrava contaminado por ruídos ambientais ou interferências de rádio. Após seleção, os arquivos foram filtrados para remoção de ruídos dispersos e localizados, para obter-se somente o áudio de impacto de gotas.

As taxas de precipitação (r) indicadas na Tab. 3.1 foram estimadas dos pluviômetros indicados, como referência média no período da análise na vizinhança do ponto de observação da DSD. Os eventos selecionados foram caracterizados por variação temporal e espacial da chuva na cidade do Rio de Janeiro-RJ. Portanto os valores de r devem ser considerados apenas como valores típicos medidos nos eventos e não como variáveis determinísticas. Mais adiante, as análises das DSD mostrarão um grande dinamismo da variação da chuva, em cada evento.

Tabela 3.1: *Precipitação medida com disdrômetro sônico. As taxas de precipitação (r) foram estimadas dos pluviômetros indicados, para servir de referência média no período da análise. Ilha se refere a Ilha do Governador na zona norte do Rio de Janeiro-RJ.*

Medição	Data	Início (HL)	Duração (min)	r ($mm\ h^{-1}$)	Fonte da precip. CEMADEN
Exp01	18/mai/2016	17:35	10	2.2	Ilha
Exp02	02/jun/2016	09:25	5	30.0	Ilha
Exp03	07/jun/2016	10:35	7	6.6	Penha, Ilha, Catete
Exp04	31/ago/2016	16:33	10	20.0	Ilha
Exp05	19/set/2016	22:17	5	26.0	Penha, Ilha, Catete
Exp06	26/set/2016	21:50	5	20.0	Ilha

3.7 Implementação numérica

No Anexo A apresenta-se detalhes sobre a instalação do programa numérico.

Capítulo 4

Resultados

A primeira etapa de construção do aplicativo de análise do disdrômetro consistiu em testar as sub-rotinas usadas na determinação da DSD. Portanto, inicialmente foram realizados testes dos subprogramas, aqui considerada como etapa preparatória, usual na construção de aplicativos numéricos. Cada subprograma foi testado em separado e em conjunto na análise de dados observados.

O aplicativo numérico para análise do áudio do impacto de gotas no sensor do disdrômetro, emprega um programa principal e sub-programas auxiliares para a determinação da distribuição de dimensão, por unidade de volume e por classe de dimensão de gotas.

O primeiro teste realizado consistiu em obter modelar a DSD com o modelo proposto por Marshall-Palmer (1948)[3], a partir da precipitação atmosférica realmente observada sobre o prédio do IGEO-CCMN-UFRJ, por um pluviômetro, usando a série temporal, de frequência de amostragem de 5min, para todo o ano de 2015.

Os objetivos específicos foram: 1) construir os métodos numéricos do aplicativo do disdrômetro, em linguagem, fortran 90 (gfortran); 2) estimar a DSD conforme proposição de Marshall-Palmer, a partir da taxa de precipitação observada (R) pelo pluviômetro da estação meteorológica localizada sobre o telhado do IGEO-CCMN-UFRJ, durante o 2015 e 3) verificar a consistência física dos subprogramas individualmente e em conjunto. 4) qualificar os subprogramas para sua utilização no aplicativo de análise do disdrômetro proposto.

A seguir, em uma segunda etapa, utilizar o aplicativo numérico obter a DSD empírica a partir do áudio gravado durante períodos de amostragem de eventos de precipitação na cidade do Rio de Janeiro, a partir do sensor do disdrômetro sônico construído e instalado na estação meteorológica sobre o telhado do IGEO-CCMN-UFRJ, em 2016.

O aplicativo para análise do áudio do impacto de gotas foi codificado, empregando-se os *métodos* construídos na etapa anterior, i.e, acessados pelo programa principal chamado programa *drop_sound*.

4.1 Métodos de calibração

Dois métodos de calibração estão disponíveis para o sistema disdrométrico proposto (Fig. 4.1). O primeiro é feito por ajustes internos da escala da distribuição, i.e., obtido por renormalização das DSD empíricas, usando informação externa da taxa de precipitação medida em pluviômetro, fornecida pelo usuário. O segundo procedimento, o ajuste não é local, baseado em uma curva de calibração única obtida em laboratório a partir da queda de gotas de dimensão controlada.

1. O primeiro método de calibração - Considera a precipitação média observada correspondente ao registro do disdrômetro sônico como informação adicional necessária à calibração local. Esta precipitação é usada em um ajuste sequencial da DSD, de forma que a estimativa final esteja associada aos momentos estatísticos que correspondam a precipitação observada. Trata-se de normalização da DSD por uma escala única. Normalmente, as DSD são normalizadas ou por um momento estatístico único ou por dois momentos estatísticos, como discutido por Lee *et al.* (2004)[51].
2. O segundo método corresponde a curva de calibração. Neste caso não há nenhuma iteração. Uma mesma curva de calibração é usada para todos os casos, portanto a curva de calibração é global e independe da precipitação observada pelo pluviômetro caso a caso. A curva de calibração foi obtida em laboratório a partir do impacto de gotas de diâmetro conhecido.

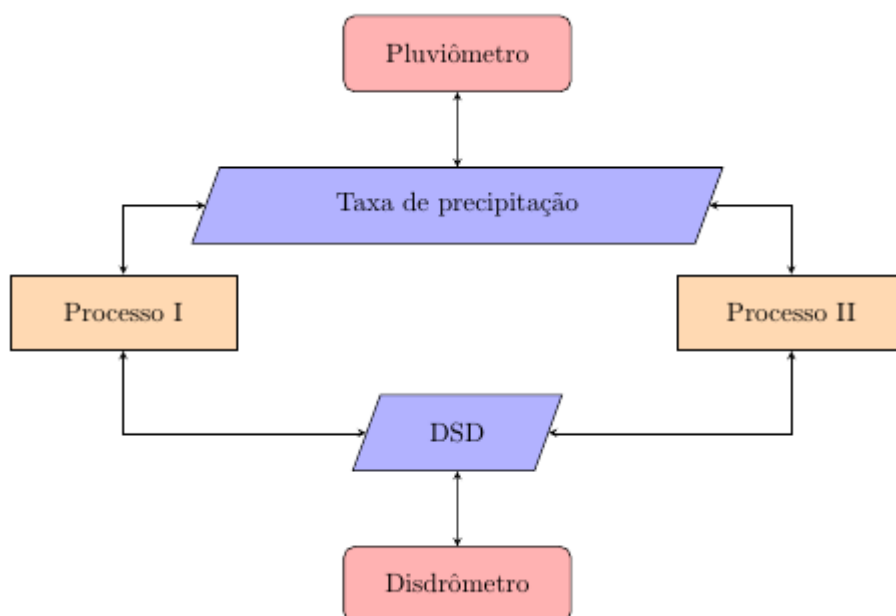


Figura 4.1: Fluxograma de calibração utilizado. O primeiro método é um ajuste interno das distribuições, realizado caso a caso, ou seja, aplica-se uma renormalização e ajustes da DSD até que a taxa de precipitação obtida da integração da DSD se aproxime suficientemente da taxa de precipitação medida por pluviômetro no período. Neste caso, a taxa de precipitação do pluviômetro deve ser fornecida pelo usuário. O segundo método é um ajuste não local, baseado em curva de calibração única, obtida em laboratório com a queda controlada de gotas de diâmetro conhecido no disdrômetro. Neste segundo método, não é requerida nenhuma informação externa, como a taxa de precipitação.

4.1.1 Curva de calibração

Quatro classes de diâmetro de gotas foram usadas na etapa de calibração global (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Gotas utilizadas na etapa de calibração global, com N , número de gotas usadas na calibração e v_t , a velocidade terminal.

D (mm)	N	v_t ($m s^{-1}$)
2,00	10	6,50
3,81	184	8,60
4,11	91	8,78
4,16	75	8,80

A obtenção da curva de calibração considerou a distribuição de frequências absolutas em função das intensidades de áudio (dB) de impacto de gotas de diâmetro conhecido sobre o sensor do

disdrômetro sônico (Fig. 4.2).

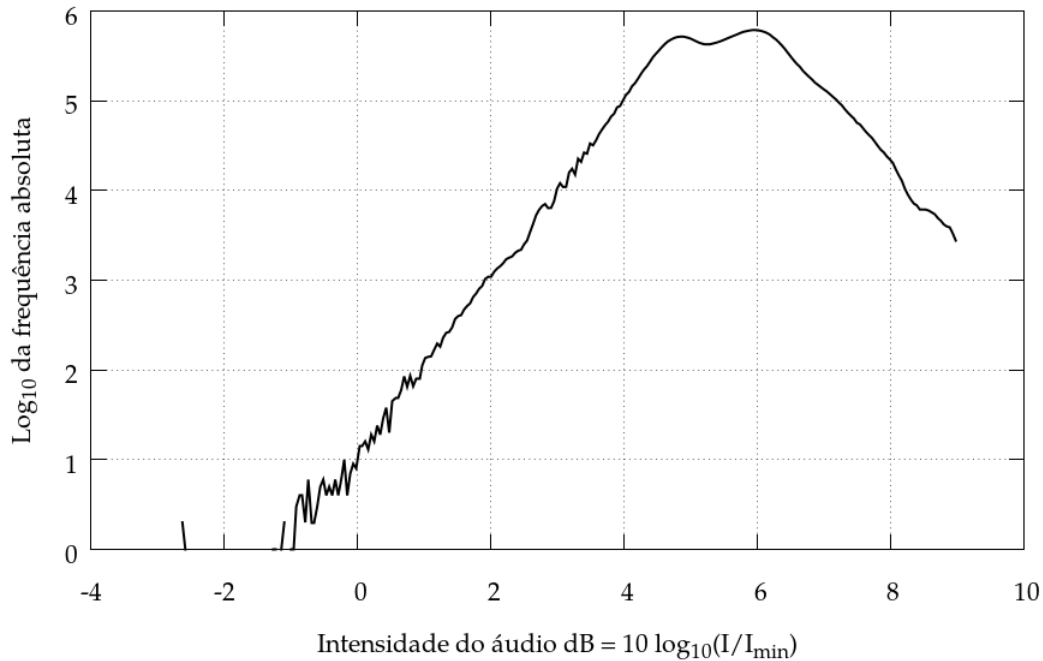


Figura 4.2: Distribuição de frequências absolutas em função da intensidade de áudio da queda livre de gotas de diâmetro conhecido sobre o sensor do disdrômetro sônico de impacto. Cada impacto gera um sinal caracterizado por uma distribuição de amplitudes que definem o som do impacto em (kHz).

Os máximos locais de frequência foram localizados. Segundo, estimou-se a região de vizinhança destes máximos para avaliar-se a variância e desvio padrão associados a cada máximo. Tarefa não trivial, porque o impacto de cada gota produz uma distribuição de intensidades de áudio que diminui com o tempo, o que é característico do som de impacto de gotas. As estimativas numéricas são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tabela de pontos da curva de calibração estimados a partir da distribuição de frequências absolutas do impacto das gotas de volume conhecido. D é o diâmetro das gotas em (mm), dB é estimativa da intensidade de áudio associada ao impacto de cada classe de gota na etapa de calibração (em decibéis), dB_{min} é a correspondente intensidade mínima por classe de diâmetro, dB_{max} é a correspondente intensidade máxima e σdB é o intervalo de intensidade considerado para cada classe de diâmetro de gota.

D (mm)	dB	dB_{min}	dB_{max}	σdB
0.00	0.0	1.0	1.0	1.0
2.00	2.0	0.0	4.0	2.0
3.81	4.8	3.8	4.8	1.0
4.11	6.0	5.0	7.0	1.0
4.16	8.0	6.0	10.0	2.0

Uma função exponencial é usada para ajustar a distribuição empírica dos pontos de calibração, obtendo

$$D(mm) \approx 1,9(\gamma dB)^{(2/5)} \quad (4.1)$$

onde γ é um fator de absorção, que depende do material, espessura e forma da placa de impacto do disdrômetro. A curva correspondente a $\gamma = 1$ é mostrada na Fig. 4.3.

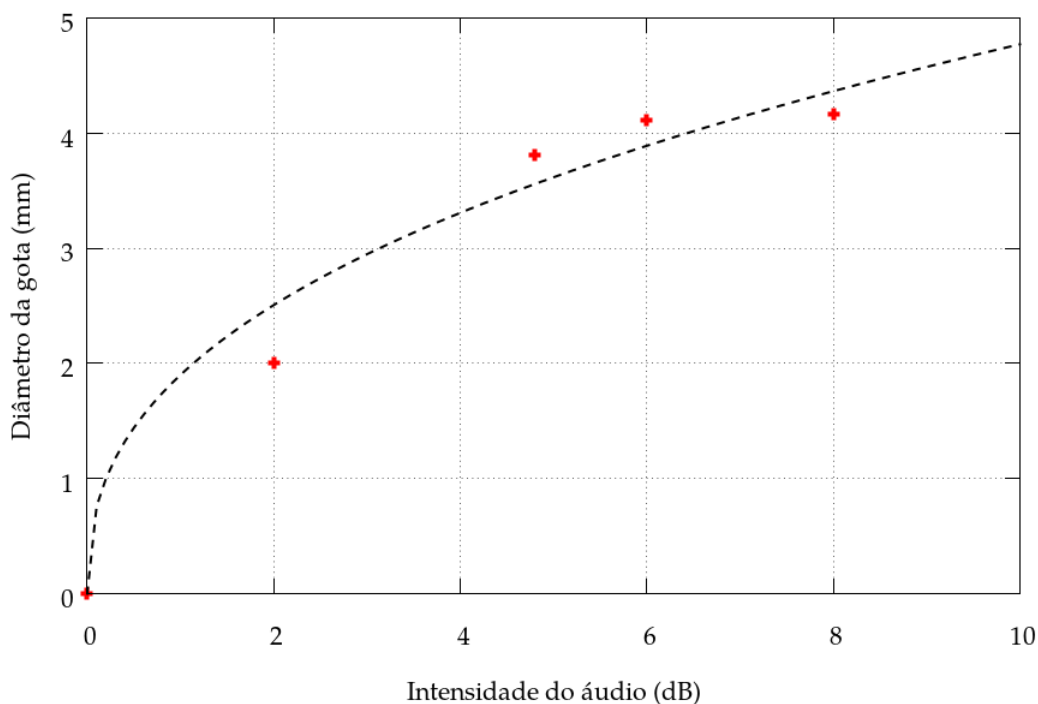


Figura 4.3: Curva de calibração obtida a partir de queda livre de gotas de diâmetros conhecido sobre o sensor do disdrômetro sônico de impacto. Os pontos foram estimados a partir dos máximos locais da curva de frequência mostrada na Fig. 4.2.

4.2 DSD estimada da precipitação medida em pluviômetro

Os dados de precipitação a cada 15min foram obtidos de um pluviômetro automático - *tip-bucket* automático instalado na estação meteorológica situada em cima do Departamento de Meteorologia do IGEO-CCMN-UFRJ, entre 27/11/2014 e 19/01/2016. Estes dados foram usados na estimativa do espectro de dimensão de gotas de precipitação, para obter-se os parâmetros do modelo teórico proposto por Marshall e Palmer (1948)[3] e modificado por Ulbrich (1983)[2].

A Figura 4.4 apresenta a evolução temporal da taxa de precipitação R ($mm h^{-1}$) em função do ano decimal, entre 27/11/2014 e 19/01/2016. As maiores taxas ocorreram no verão. Precipitações acima de $0,1 mm h^{-1}$ foram ordenadas para permitir uma estimativa de quantis (Fig. 4.5). Nota-se o predomínio de baixa taxa de precipitação, com moda de $0,5 mm h^{-1}$.

Do total de 627 eventos no período de 1 ano, 43% estão associados à taxa de precipitação igual ou menor a $0,5 mm h^{-1}$.

Intensidades maiores são encontrados no final da série, por causa de sua baixa frequência. Aproximadamente, um terço das amostras apresentam taxas maiores que $1 mm h^{-1}$. Apenas 1% das precipitações estão acima de $9 mm h^{-1}$.

Em geral na análise da cauda de distribuições de precipitação diária consideram-se os 3 valores (diários) mais intensos observados a cada ano ao longo de uma série temporal de 30 anos. Para observações sub-horárias, como as disponíveis neste trabalho, é mais razoável a utilização de quantis altos da distribuição para separar os eventos extremos (i.e., da cauda), por exemplo, 99,9%, mas o quantil pode ser específico do clima local, podendo ser definido caso a caso.

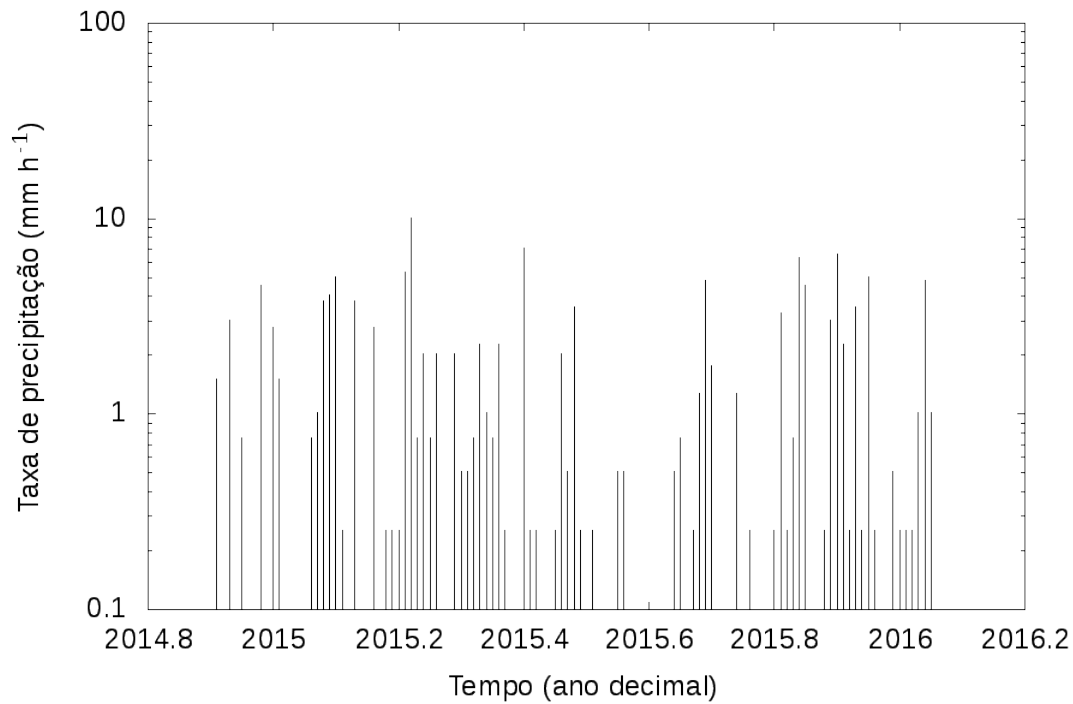


Figura 4.4: Taxa de precipitação observada (mm h^{-1}) em função do tempo em ano decimal.

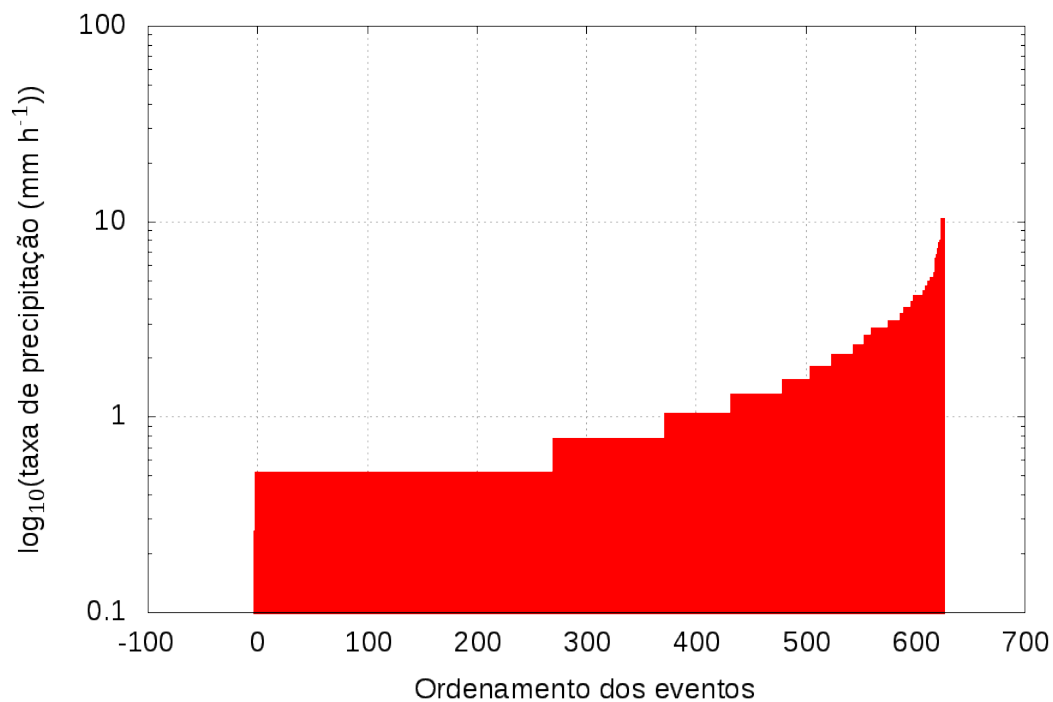


Figura 4.5: Taxa de precipitação R (mm h^{-1}) em função do ordem.

A Fig. 4.6 mostra linhas de contorno da DSD em função dos eventos ordenados (eixo y) e dos diâmetros de gotas (eixo x). No modelo de MP, o parâmetro N_0 é constante e independente da taxa de precipitação. Nota-se que a maioria dos eventos apresenta taxas de precipitação inferiores a 2 mm h^{-1} .

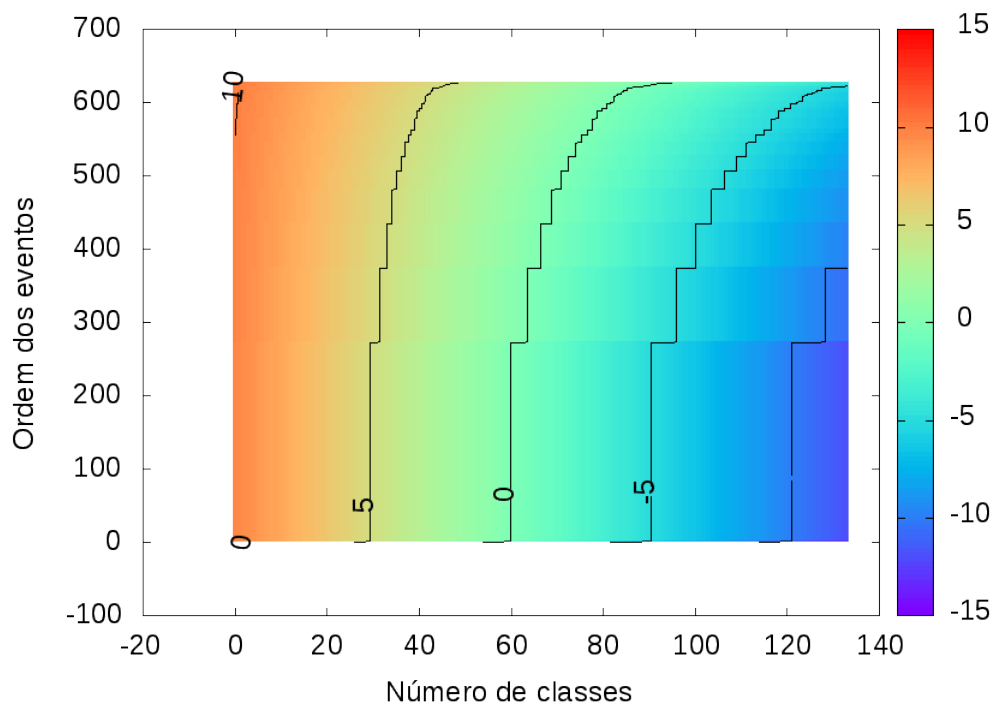


Figura 4.6: Isolinhas do logaritmo de $N(D)$ plotado em função das classes de diâmetro (eixo x) e da ordem dos eventos de precipitação (eixo y).

A Fig. 4.7 é similar à Fig. 4.6, para a classe de diâmetros de gotas (eixo x). Gotas de diâmetros menor que 2 mm são mais frequentes.

A superfície 3D da modelagem da DSD é mostrada na fig. 4.8 em função do diâmetro de gotas (eixo x) e da ordem dos eventos de precipitação (eixo y). As precipitações mais intensas correspondem aos maiores números da ordem no eixo y . A superfície 3D apresenta uma curvatura positiva na direção das maiores taxas de precipitação para o modelo de MP utilizado.

4.3 DSD modelada para 04/11/2015

A variação da DSD modelada para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min está na Fig. 4.9. A Fig. 4.10 mostra o diagrama de Hovmüller em escala logarítmica da função distribuição espectral de diâmetros das gotas ($\log_{10} DSD$) em função do tempo (ano decimal), para o evento de precipitação em 04/11/2015 das 19h35min às 20h35 min.

A Fig. 4.11 mostra a evolução temporal dos momentos estatísticos da DSD e a Fig. 4.12 a correspondente variação do fator de refletividade (dBZ). O dBZ máximo calculado a partir da integração numérica do momento de sexta-ordem foi 8 dBZ associado à taxa de precipitação máxima de 6,3 $mm h^{-1}$; este valor é baixo em comparação ao obtido da relação Z-R usual dos radares meteorológicos, $Z = 200R^{1,4}$, da qual se obtém 24,2 dBZ para 6,3 $mm h^{-1}$. A diferença é atribuída ao erro de truncamento do método de integração numérica utilizado, provavelmente que não é suficientemente acurado para integração numérica de uma DSD similar a uma distribuição exponencial ou Gama. Outros métodos de integração devem ser investigados em estudos futuros.

A Fig. 4.14 mostra o conteúdo de água líquida LWC ($g m^{-3}$). Figs. 4.13 e 4.14 mostram que o aumento do LWC ocorre principalmente devido ao aumento do diâmetro médio das gotas. O máximo LWC foi estimado em 0,6 $g m^{-3}$. A Fig. 4.15 mostra uma comparação entre as taxas de

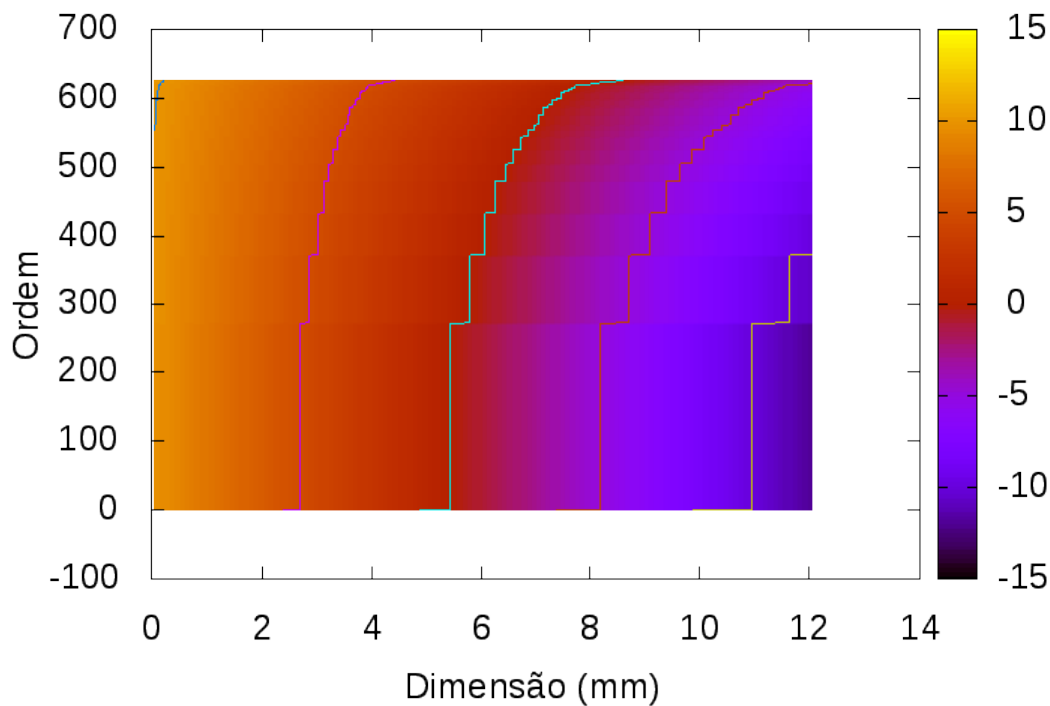


Figura 4.7: Similar à Fig. 4.6 mas para diâmetros de gotas (mm) (eixo x).

precipitação recuperada por integração e medida. O erro sistemático (bias) é nulo para o método de ajuste interno da DSD.

A Fig. 4.16 mostra a velocidade terminal em função do diâmetro de gotas para os vários métodos presentes na literatura. Neste trabalho, utiliza-se os métodos de Atlas e Ulbrich (1977) e Ulbrich (1984) para estimativa da velocidade terminal das gotas. Os resultados para DSD empírica se mostram pouco sensíveis à escolha do método para a velocidade de queda das gotas, por causa do ajuste iterativo da DSD em relação à precipitação medida.

A Fig. 4.13 apresenta a dimensão média das gotas em função do tempo. O máximo diâmetro médio estimado foi de 1,37 mm, a partir da razão dos momentos.

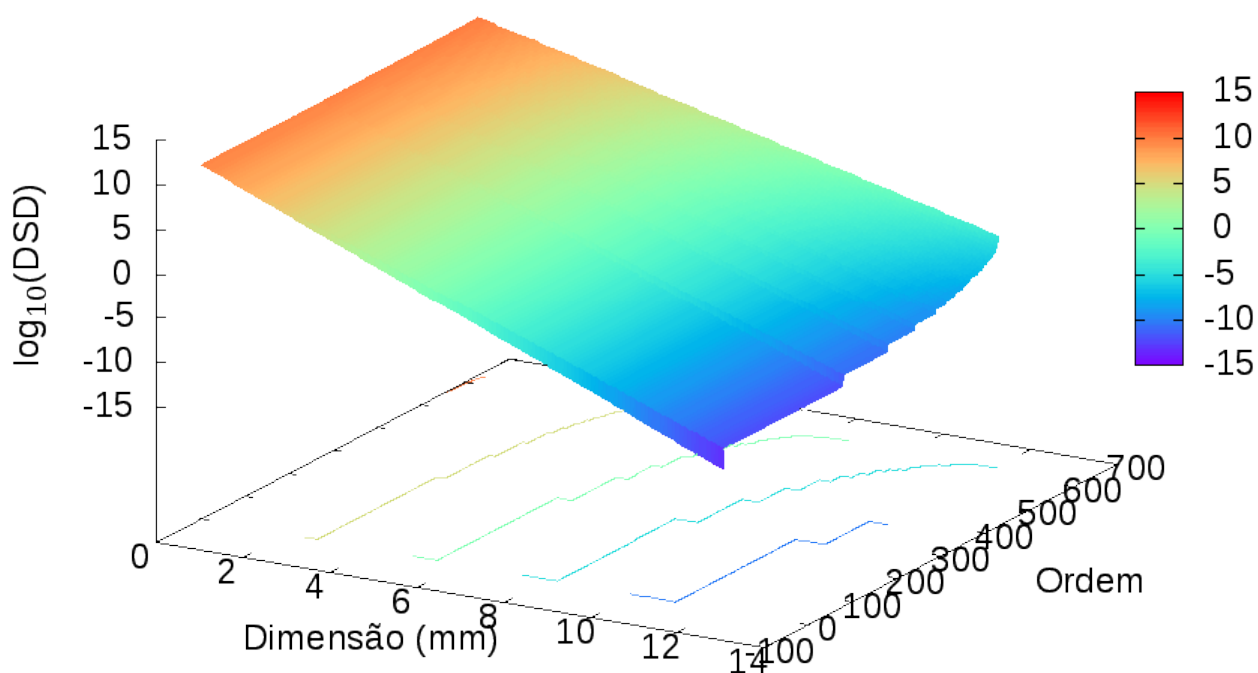


Figura 4.8: Superfície tridimensional da DSD plotada em função da dimensão de gotas (mm) (eixo x) e da ordem para taxa de precipitação crescente.

4.4 Experimentos

EXP01

EXP01 é a análise da DSD obtida para a chuva de $2,2 \text{ mm h}^{-1}$ ocorrida na tarde de 18/05/2016. Considerou-se o registro de áudio iniciado às 17h35min (TL) com duração de 10min.

O evento de precipitação foi escolhido para verificar a sensibilidade do disdrômetro sob condição de chuva fraca e gotas de menor diâmetro.

Análise sinótica

Havia escoamento pós-frontais predominam no RJ com uma frente fria em Sergipe (Fig. 4.17). Um ciclone extra-tropical com Baixa Pressão de 982 hPa na latitude 38S e longitude 45W, sobre o Atlântico na latitude de Mar del Prata. Uma Alta Pressão com máxima de 1026 hPa, na retaguarda frontal, permaneceu com seu centro sobre a Argentina, enquanto sua borda meridional tangencia sobre as Região Sul e Centro Oeste do Brasil. O ciclone extra-tropical sobre o oceano Atlântico desenvolve uma névum vírgula à Oeste do centro do centro de baixa pressão frontal. No Estado do RJ ocorreram ventos fracos e convergência na vizinhança da zona frontal orientada de SE à NW às 12h UTC. A crista de alta pressão penetrou pelo Sul e Centro Oeste brasileiro, com borda da massa de ar tropical com convergência e tempestades em MT, GO, MG e na faixa litorânea dos Estados do RJ e ES (Fig. 4.18). A imagem de satélite infravermelha termal (IR) indica o predomínio de nuvens quentes sobre todo o Estado do RJ, com algumas poucas espessas com topos frios com temperatura de -35C . Nestas condições, chuvas estratiformes e fracas caracterizaram o tempo no dia 18/05/2016 na cidade do Rio de Janeiro.

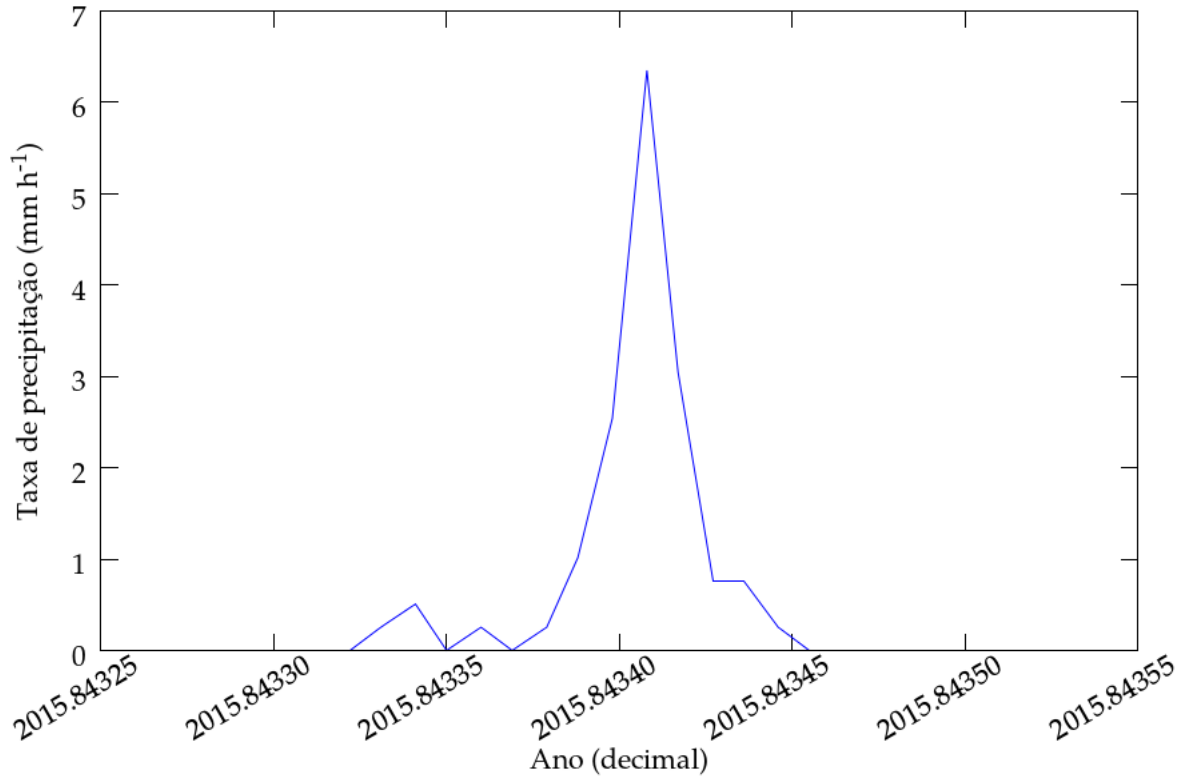


Figura 4.9: Evolução temporal da taxa de precipitação observada durante o evento ocorrido no dia 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.

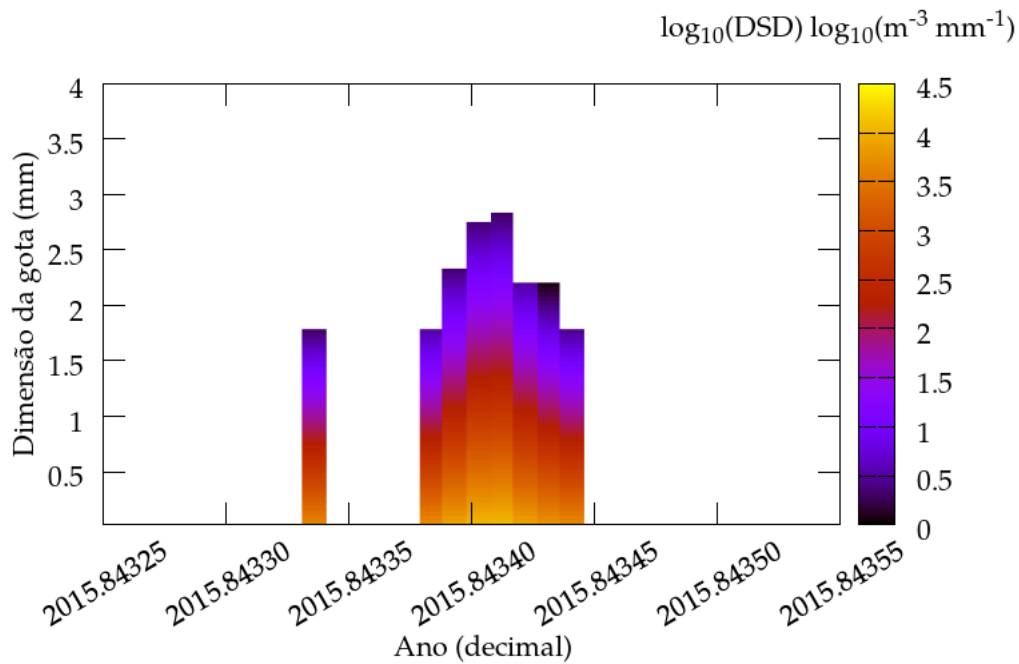


Figura 4.10: Diagrama de Hovmöller do logaritmo do espectro de diâmetros das gotas ($\log_{10}DSD$), em função do tempo (ano decimal), para um evento de precipitação de pequena duração observado no dia 04/11/2015 das 19h35min às 20h35min.

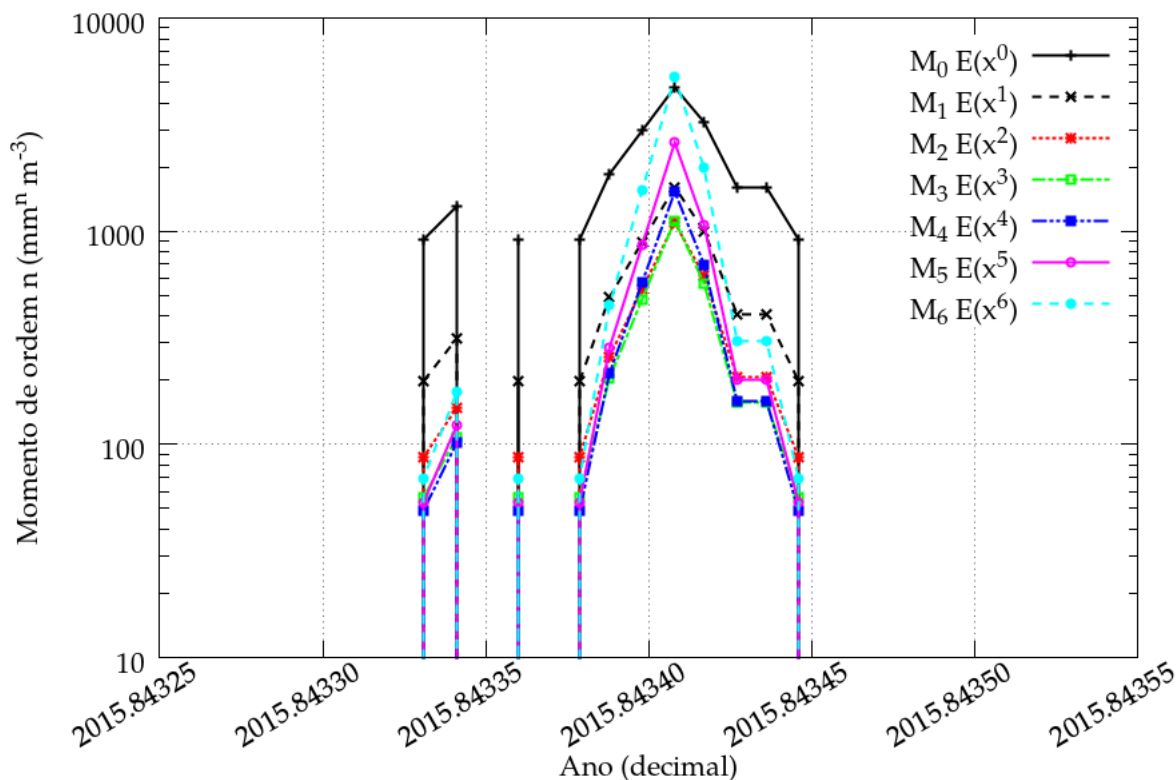


Figura 4.11: Evolução temporal dos momentos estatísticos de ordem 0 a 6, usando ano decimal no eixo x , para o evento de precipitação de 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.

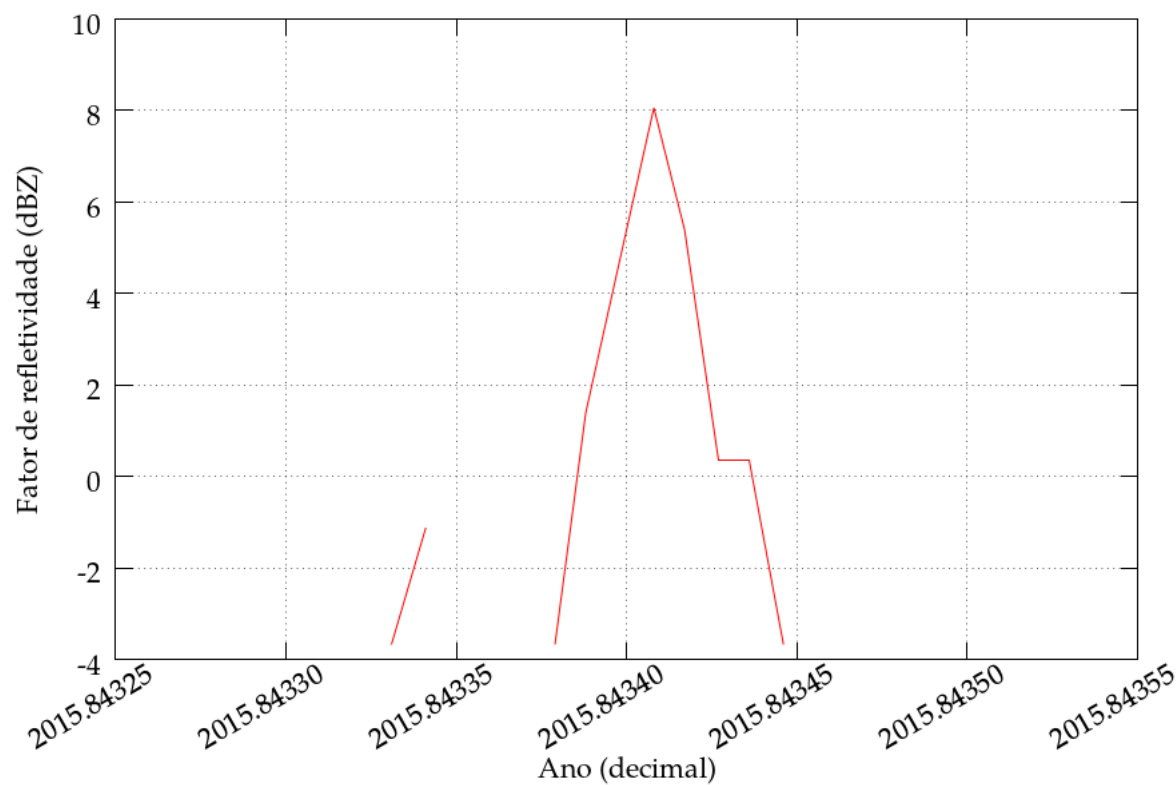


Figura 4.12: Evolução temporal do fator de refletividade do radar (dBZ), estimado a partir da distribuição de Marshall-Palmer, para um evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.

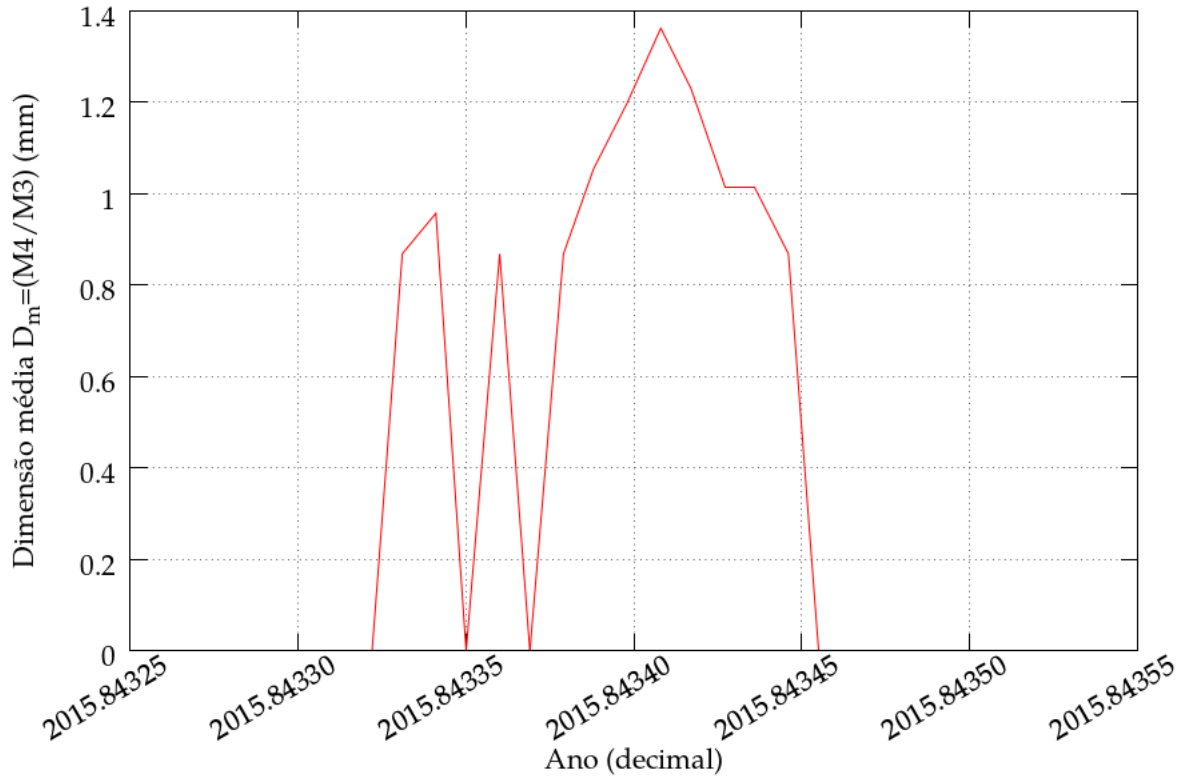


Figura 4.13: Evolução temporal da dimensão média das gotas (mm), estimado a partir da distribuição de Marshall-Palmer, para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.

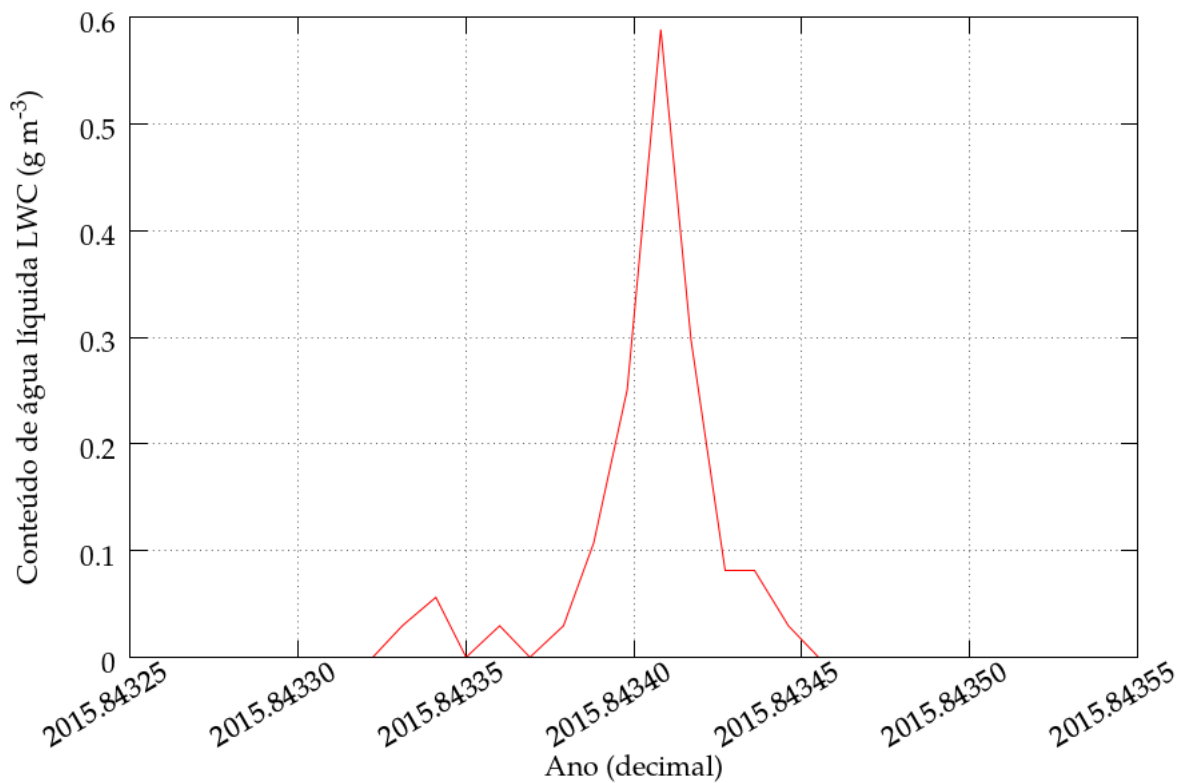


Figura 4.14: Evolução temporal do conteúdo de água líquida ($g\ m^{-3}$) para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.

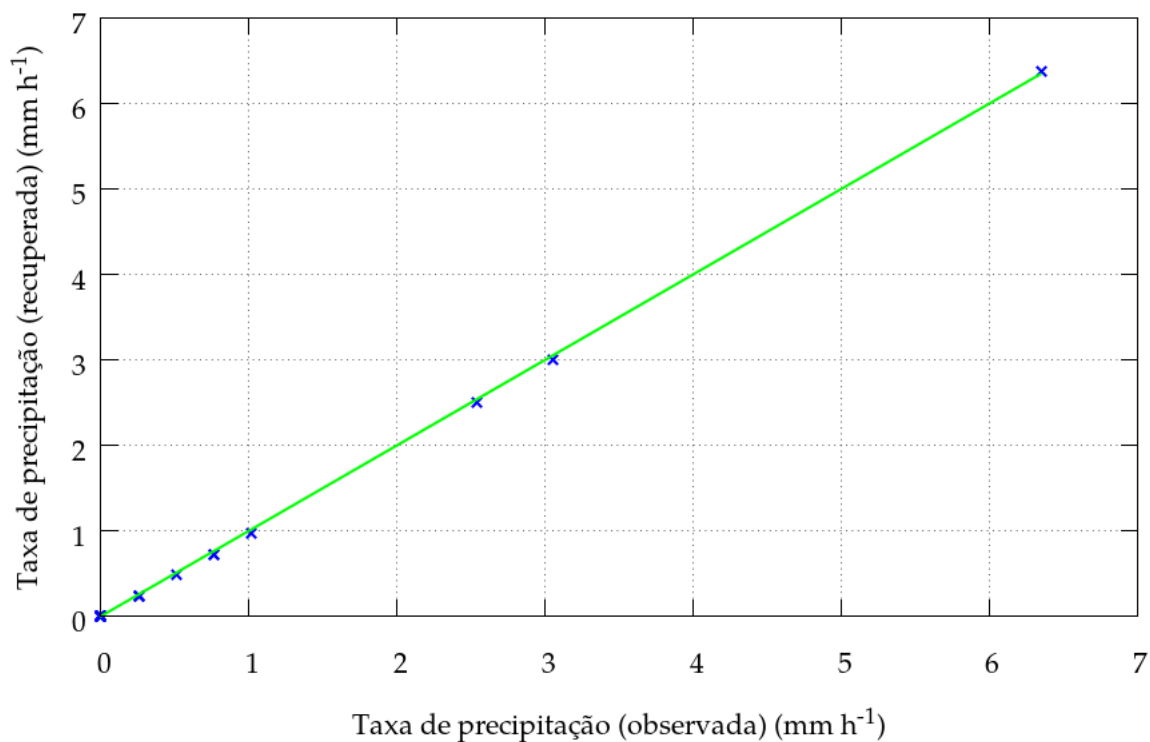


Figura 4.15: Comparação das taxas de precipitação obtida da distribuição de Marshall-Palmer e medida pelo pluviômetro automático da estação do prédio do IGEO, ambas em mm h^{-1} , para o evento de precipitação em 04/11/2015 entre 19h35min e 20h35min.

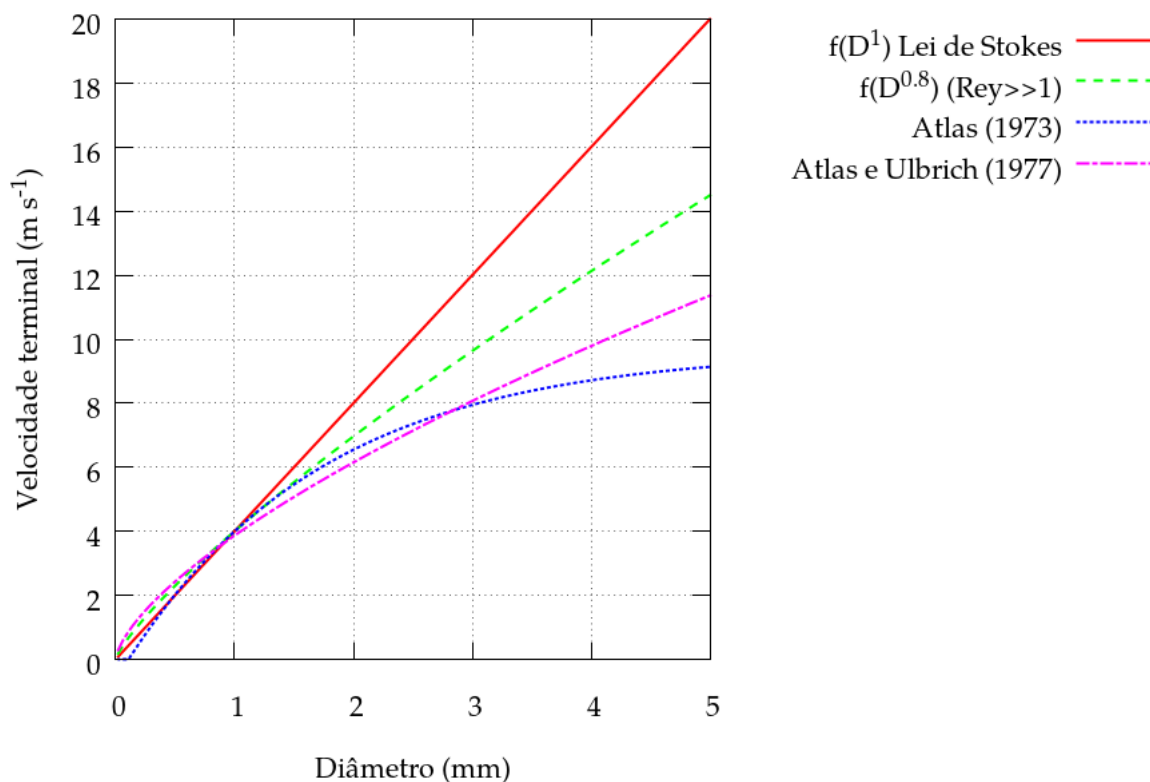


Figura 4.16: Velocidade terminal de gotas v_t (m s^{-1}) em função do diâmetro de gotas D (mm).

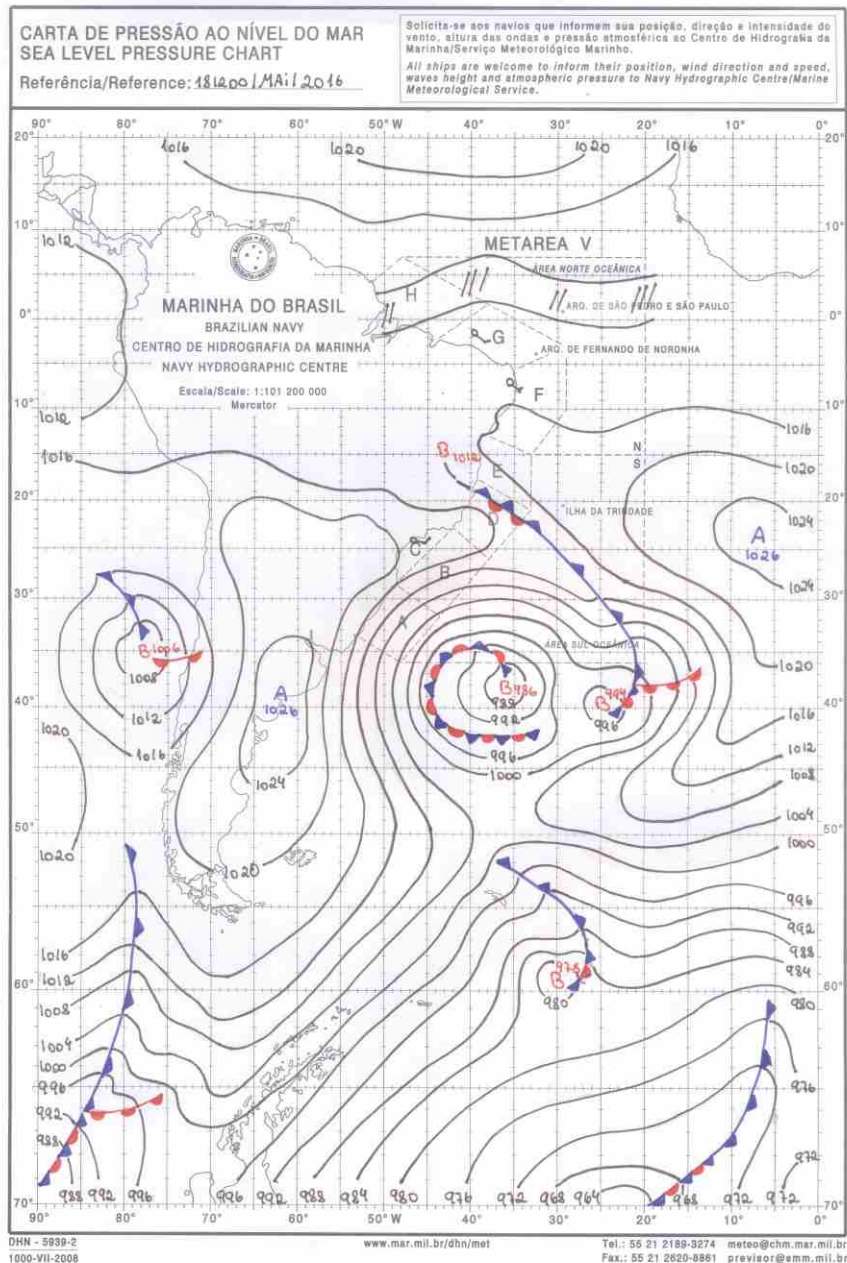


Figura 4.17: Carta das 12h UTC do dia 18/05/2016 do experimento EXP01. Fonte: REDEMET/BR.

Análise de áudio do EXP01

Para análise, o áudio filtrado do EXP01 com duração de 10min foi subdividido em 10 seqüências de 60s cada.

A Fig. 4.19 mostra impulsos positivos e negativos do sinal de áudio associados aos impactos das gotas de precipitação. Identificaram-se gotas ao longo da série temporal, indicadas na figura por pequenos pontos. A oscilação original de áudio (vibração sonora) foi normalizada pelo máximo positivo da série. As amplitudes de áudio são mostradas em escalas logarítmicas (dB).

A Fig. 4.20 mostra a magnitude de áudio normalizado (dB), sobreposto a amplitude relativa, $abs(dB)/max(dB)$. O gráfico foi produzido a partir do software desenvolvido neste trabalho.

Nota-se que o impacto das gotas apresenta três medições de maior intensidade, aproximada-

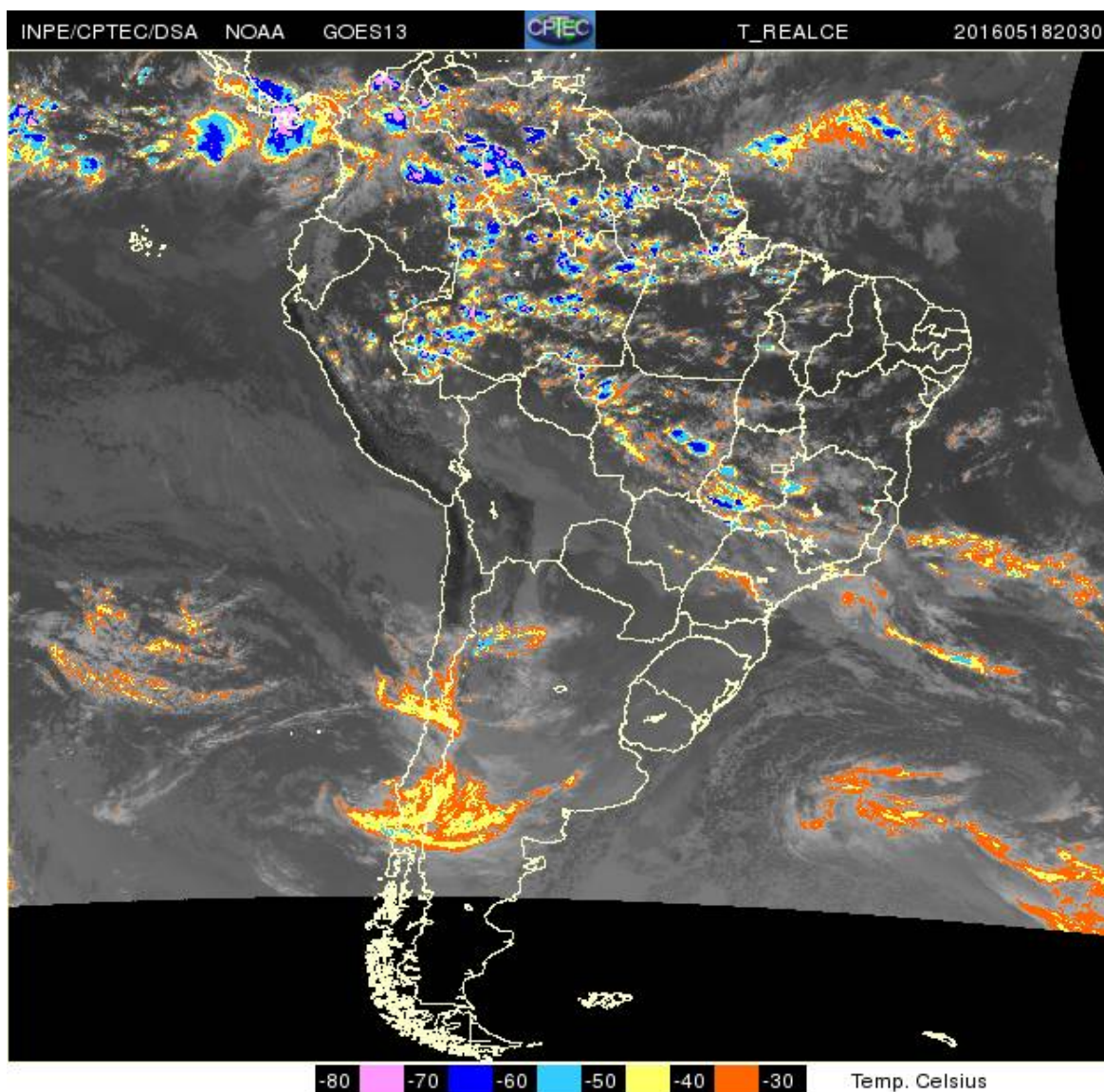


Figura 4.18: Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) às 2030 UTC para o dia 18/05/2016 [EXP01]. Nebulosidade associada à passagem da frente fria ocorre sobre o Centro Oeste e Sudeste brasileiro. Fonte: NASA e INPE/BR.

mente 20%, 40% e 60% do comprimento da série (Fig. 4.21).

A Fig. 4.21 mostra a evolução temporal da DSD estimada para o chuvisco em 18/05/2016 às 17h35min (TL) (EXP01), em 8 subamostras sequenciais ao longo da série. O modelo exponencial de Mashall-Palmer (1948)[3] foi plotado para referência.

Desvios da DSD em relação ao modelo de Mashall-Palmer indicam modificação da distribuição de referência por diferentes processos (ROSENFELD *et al.*, 2003)[52]:

- descréscimo do número de gotas pequenas por evaporação;
- descréscimo do número de gotas pequenas por coalescência;
- descréscimo do número de gotas grandes por quebra;
- decréscimo geral do número de gotas por levantamento da superfície (topografia);
- acréscimo geral do número de gotas por acreção;

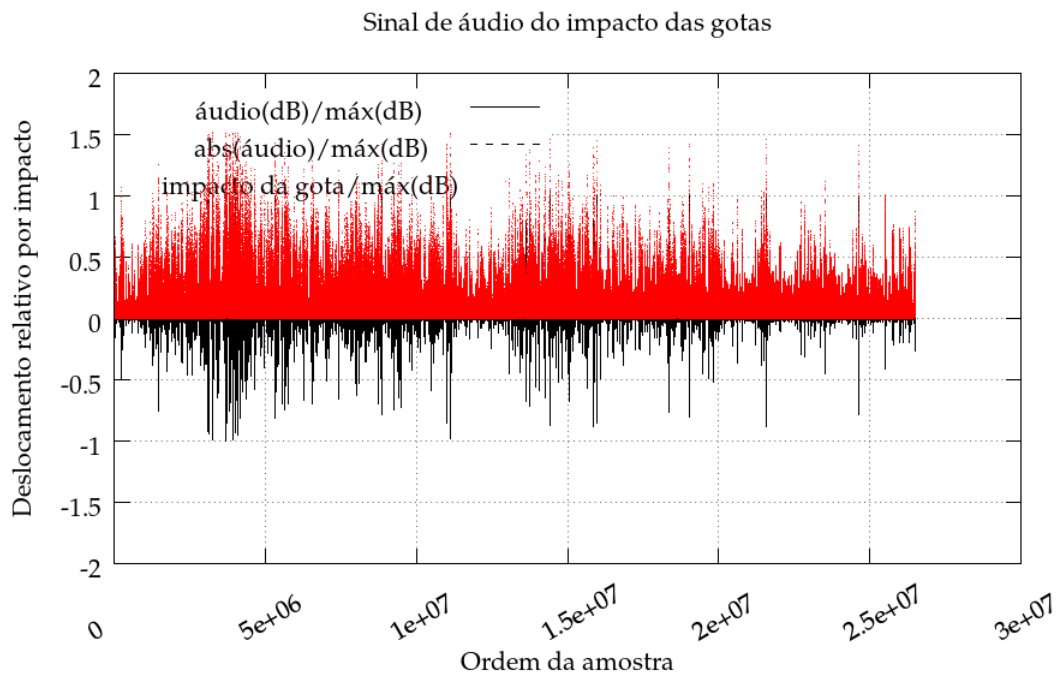


Figura 4.19: Evolução temporal do sinal de áudio filtrado referente ao impacto das gotículas (chuveiro) observado em 18/05/2016 às 17h 35min (TL) com duração de 10min (EXP01). As amplitudes associadas às gotas foram identificadas localizando-se uma rápida variação positiva do sinal e estão indicadas por pontos sobrepostos às oscilações de áudio. No mesmo gráfico estão plotados o sinal de áudio original (dB) e seu valor normalizado, $abs(dB)/max(dB)$.

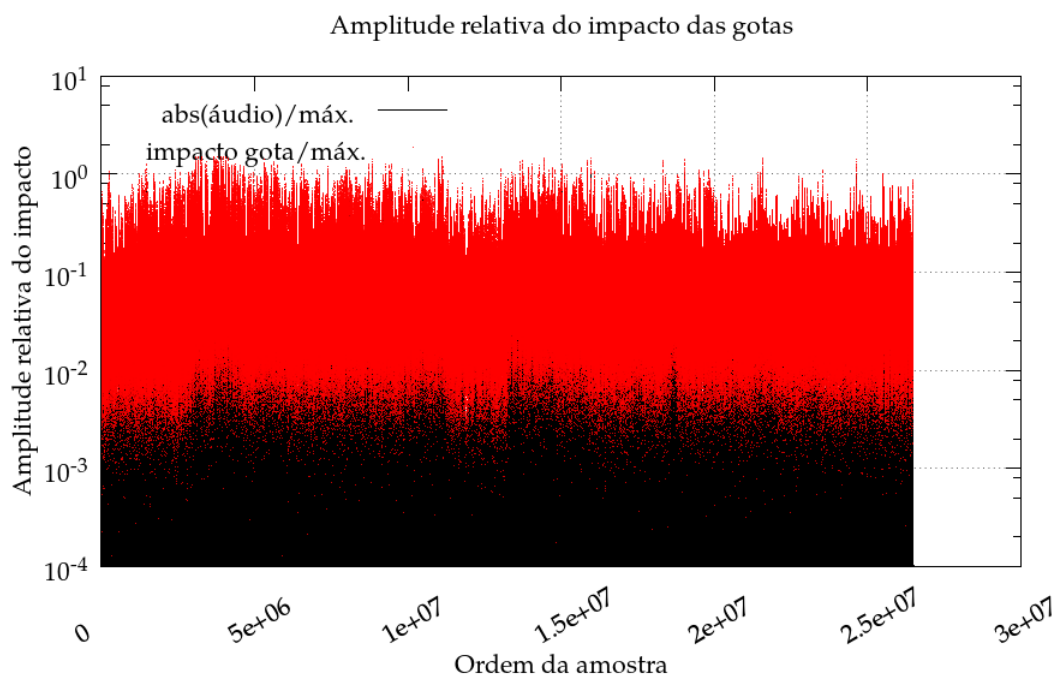


Figura 4.20: Evolução temporal da magnitude de áudio normalizado do impacto das gotículas (chuveiro) medida em 18/05/2016 às 17h35min (TL) (EXP01).

- acréscimo geral do número de gotas médias por coalescência;
- acréscimo geral do número de gotas (principalmente das menores) por aumento da corrente

descendente (downdraft); e

- acréscimo do número das gotas médias por aceleração da corrente descendente.

Nota-se que a precipitação tem um número maior de gotas pequenas (< 1 mm) e menor para gotas grandes em comparação com a DSD de Marshall-Palmer. As amostras de DSD 1, 3 e 4 da série aproximam da DSD de Marshall-Palmer. A distribuição Gama tem melhor aderência à DSD empírica medida para o chuvisco de 18/05/2016.

A evolução temporal dos momentos estatísticos de ordem zero a sexta ordem é mostrada função do tempo decorrido na Fig. 4.22. Nota-se que os momentos de ordem zero à três são muito sensíveis ao número de gotas. Portanto, apresentam um aumentam de valor quando predominam gotículas ou menores taxas de precipitação. Os momentos de quarta a sexta ordem tendem ao oposto, pois são obtidos por integração de potências dos diâmetros das gotas. As gotas grandes tem maior peso final, conforme o expoente aumenta. O aumento da frequência de gotas maiores do chuvisco ocorre em conjunto com o incremento da taxa de precipitação. Portanto, a interpretação não é trivial.

As estimativas de diâmetros obtidas a partir das razões dos momentos estatísticos é apresentada na Fig. 4.23. Como as razões são entre momentos estatísticos sequenciais, por exemplo, $D_4 = M_4/M_3$, resulta que as tendências de proporção são mantidas, mas não as magnitudes. O resultado é um conjunto de estimativas dimensionais, usadas para estimar o diâmetro médio ponderado representativo para as gotas da precipitação. No caso do chuvisco analisado, D_1 é da ordem de 0,25 mm, representativo da média aritmética dos diâmetros, e D_4 é da ordem de 0,7 mm, com variações associados àquelas da taxa de precipitação.

A Fig. 4.24 apresenta a evolução temporal do conteúdo de água líquida (LWC) ($g m^{-3}$), associada à precipitação do EXP01, a partir do início da medição em décimos de hora. Nota-se uma variação de aproximadamente 50% do valor durante o intervalo de medição de 10min. Essa variação rápida é mensurável com disdrômetro. Variações temporais da ordem de $0,01 g m^{-3} min^{-1}$ são muito pequenas ou encontram-se no limite de detecção de pluviômetro convencionais.

Ao fator de refletividade do radar (dBZ) também pode ser estimado a partir dos momentos estatísticos da DSD empírica (Fig. 4.25). Um valor médio da ordem de -8 dBZ e mínimo de -17 dBZ para o EXP01.

Uma comparação entre as taxa de precipitação 1) medida (fornecida pelo usuário no namelist do aplicativo numérico, 2) recuperada por integração da DSD empírica e 3) estimada pela relação Z-R ($Z = 200R^{1,6}$) está na Fig. 4.26.

O valor médio observado foi recuperado pela integração da DSD empírica dentro da margem de tolerância de mais ou menos $0,2 mm h^{-1}$. Por outro lado, o valor estimado a partir da relação Z-R derivada com a DSD de Marshal-Palmer, mostra valores até 50% inferiores. A causa mias provável é descalibração. Uma curva de calibração precisa deve ser buscada em futuros trabalhos.

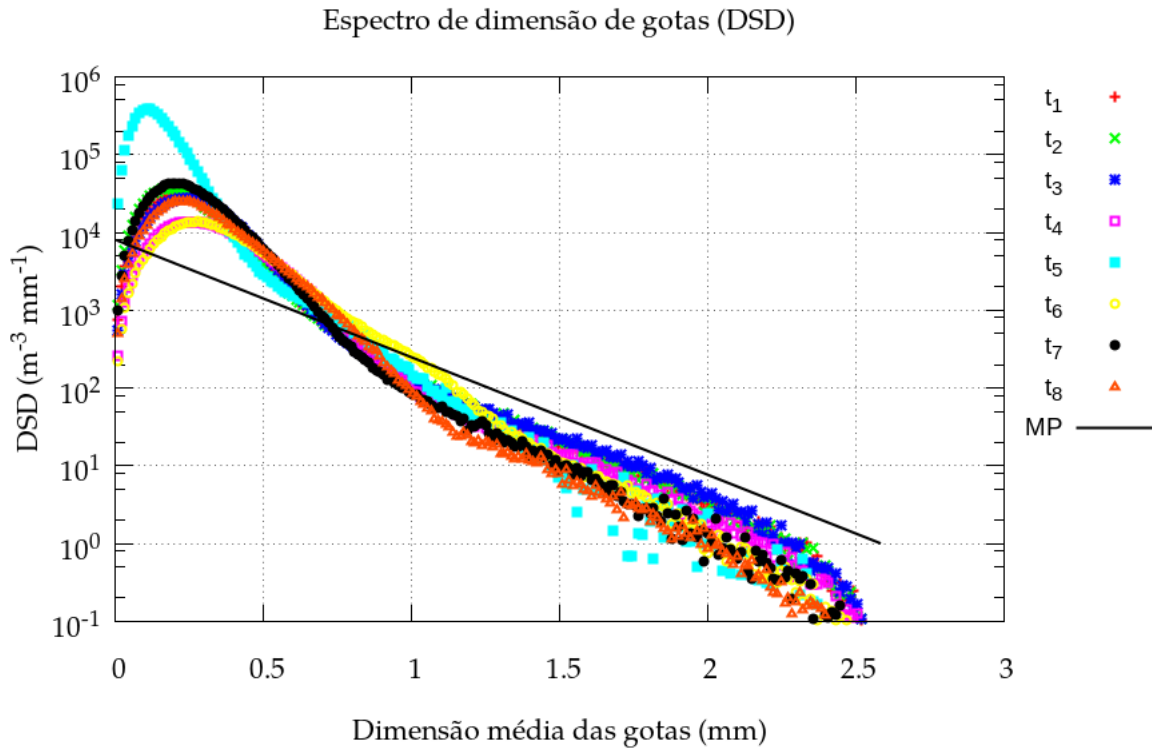


Figura 4.21: Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP01). As diferentes amostras foram identificadas com símbolos diferentes na legenda e sequenciadas de t_1 a t_8 . A linha reta correspondente ao modelo de Mashall-Palmer (1948)[3].

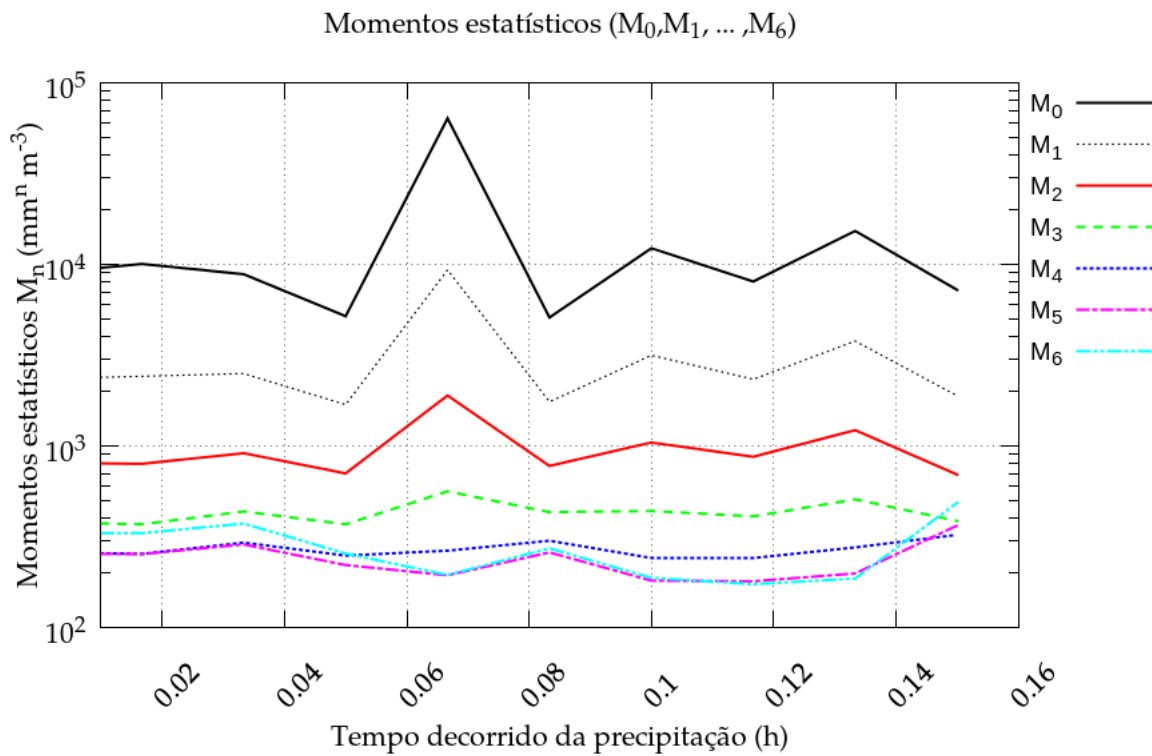


Figura 4.22: Evolução temporal dos momentos estatísticos de primeira à sexta ordem, em função do tempo decorrido de medição em décimos de hora (EXP01).

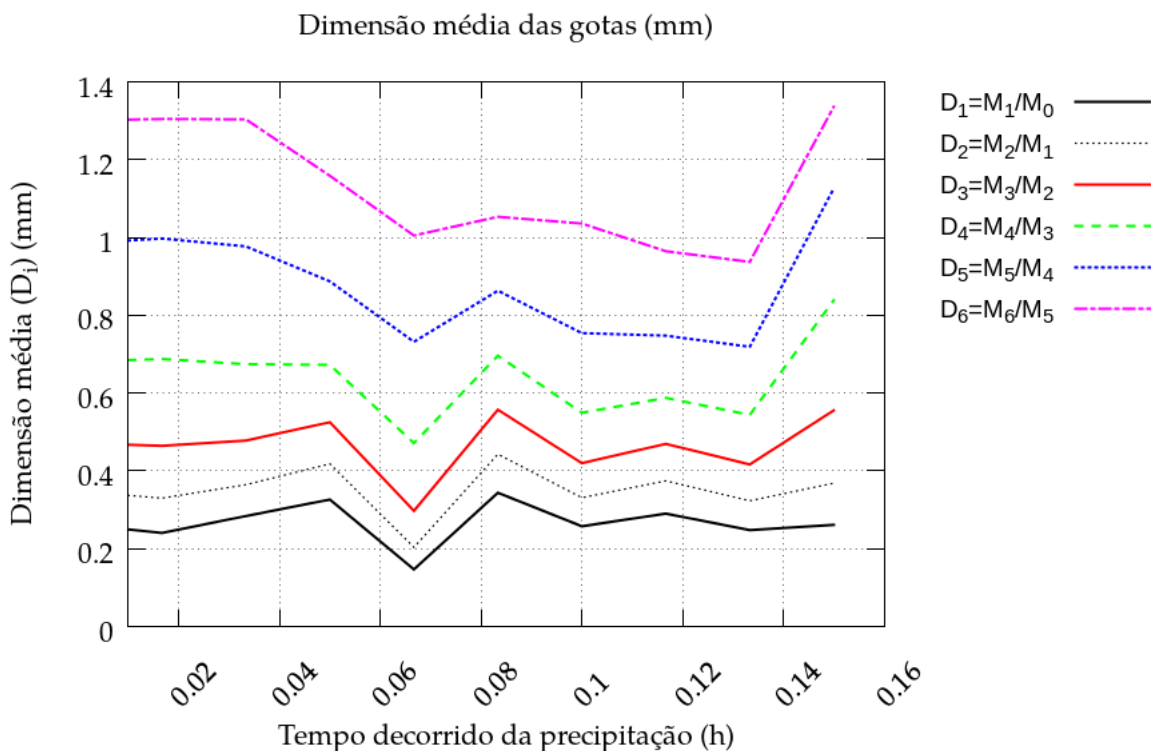


Figura 4.23: Idem Fig. 4.22 para as estimativas de diâmetro de gotas.

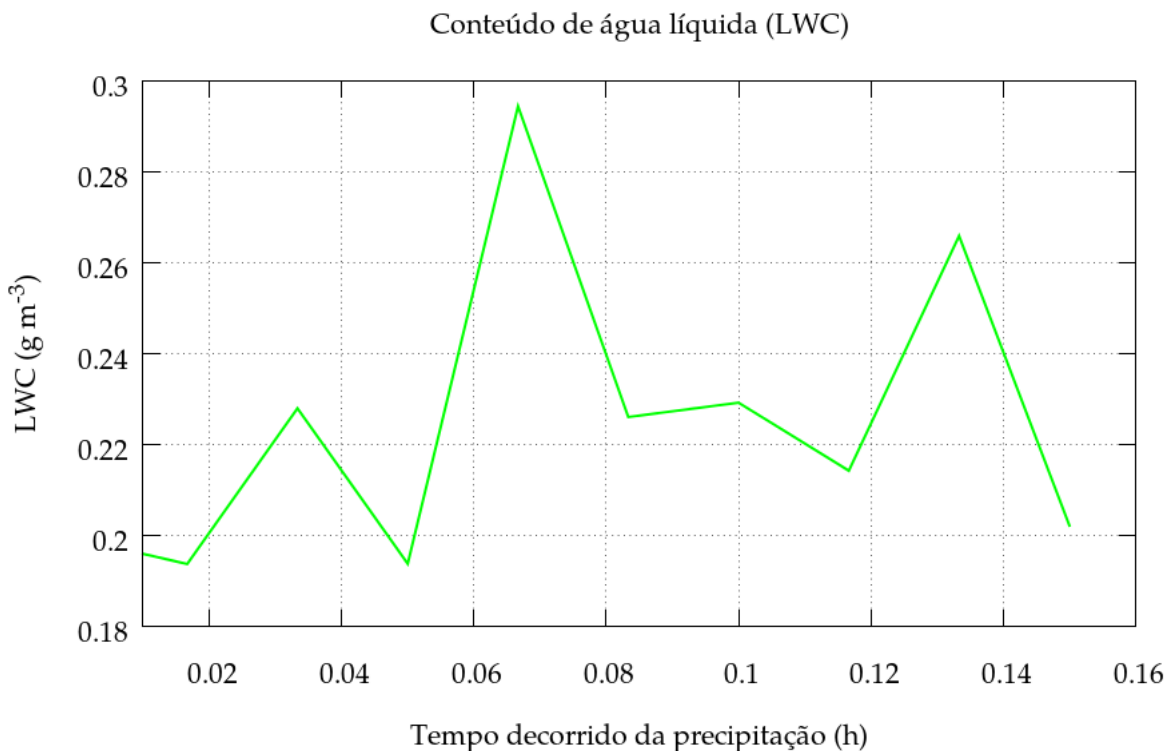


Figura 4.24: Idem Fig. 4.22 para o conteúdo de água líquida (LWC).

EXP02

EXP02 denomina a análise da DSD obtida para a chuva de $30,0\ mm\ h^{-1}$ ocorrida na manhã do dia 02/06/2016 durante uma passagem frontal. Para esta precipitação foi considerado um registro

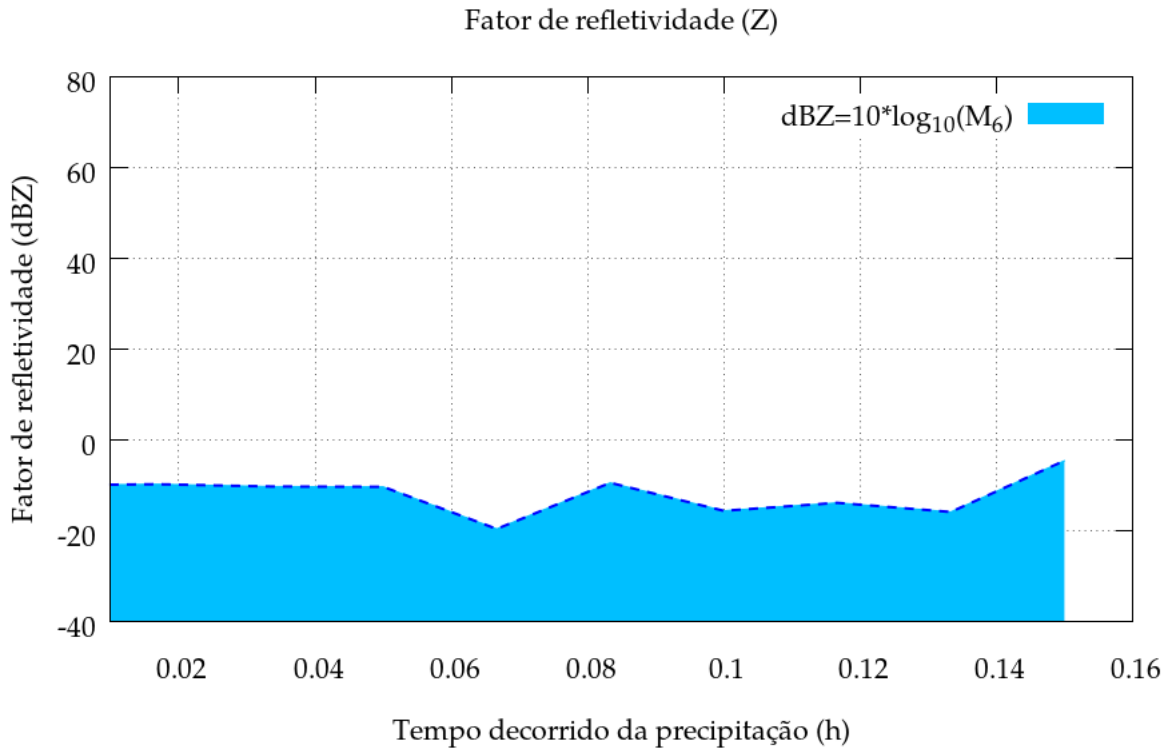


Figura 4.25: *Idem Fig. 4.22 para o fator de refletividade do radar (dBZ).*

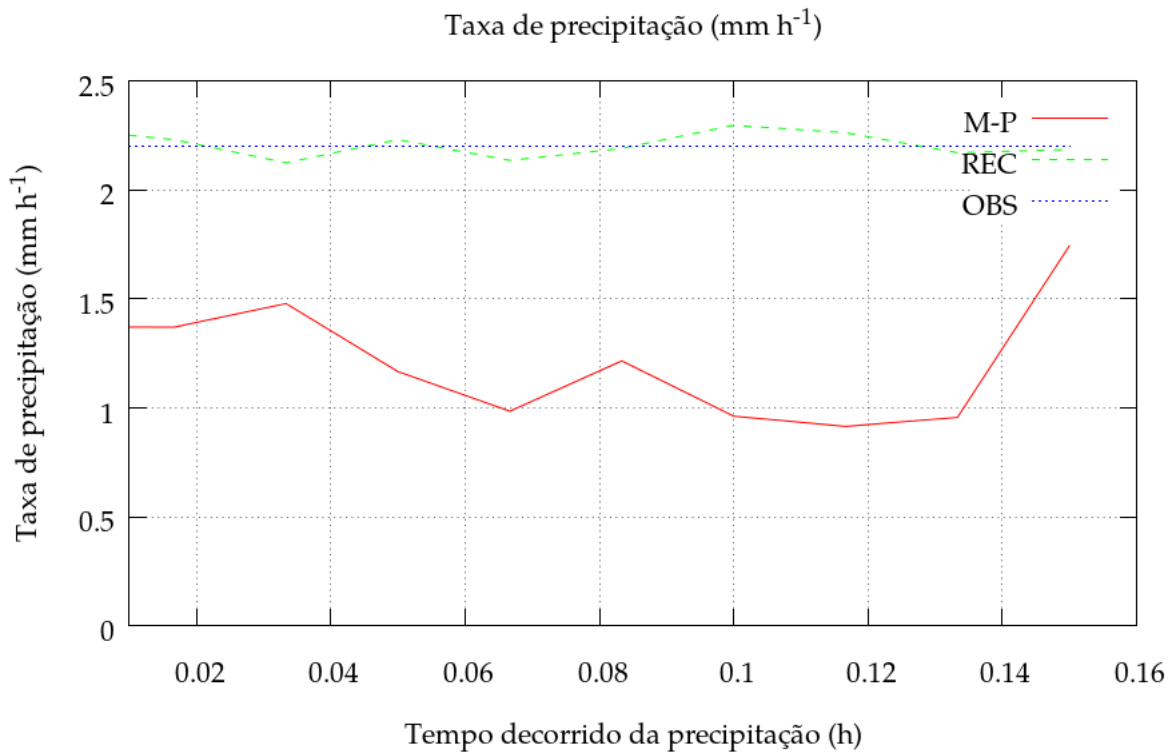


Figura 4.26: *Idem Fig. 4.22 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).*

de áudio iniciado às 9h25min (TL), com duração de 5min.

Análise sinótica

O áudio da chuva (EXP02) corresponde a uma chuva ocorrida durante a passagem frontal do dia 02/06/2016. A condição sinótica pode ser caracterizada por uma rápida ciclogênese ocorrida no costa no litoral Sul do Brasil, sobre o Atlântico, como indica a baixa pressão em oclusão mostrada na carta sinótica da Marinha (Fig. 4.27). A imagem de satélite mostra a passagem frontal associada ao desenvolvimento da oclusão ao Sul do RJ (Fig. 4.28). A passagem frontal induziu a formação de uma extensa área de desenvolvimento convectivo sobre RJ, ES, MG, GO e MS. Agrupamentos de tempestades se formaram ao longo de uma extensa faixa de convergência do fluxo de umidade do ar que ocorreu em associação à liberação de Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE) (perfil termodinâmico não mostrado aqui).

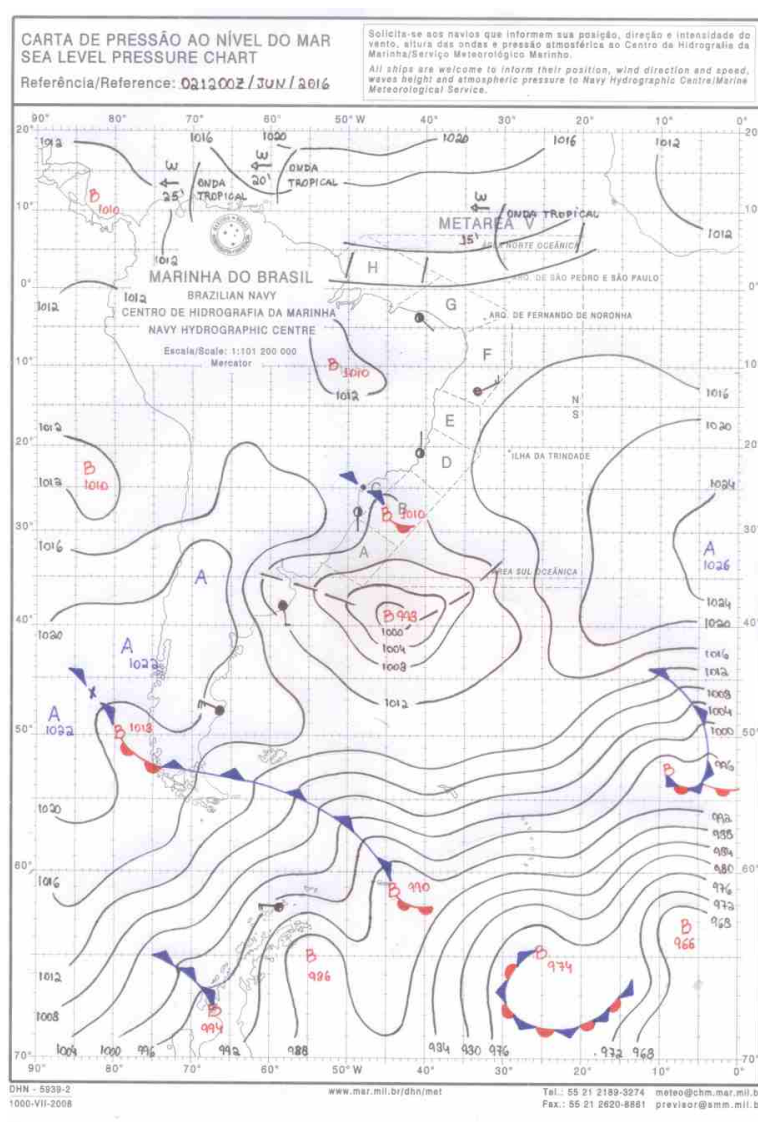


Figura 4.27: Carta das 12h UTC de 02/07/2016 do experimento EXP02. Fonte: REDEMET/BR.

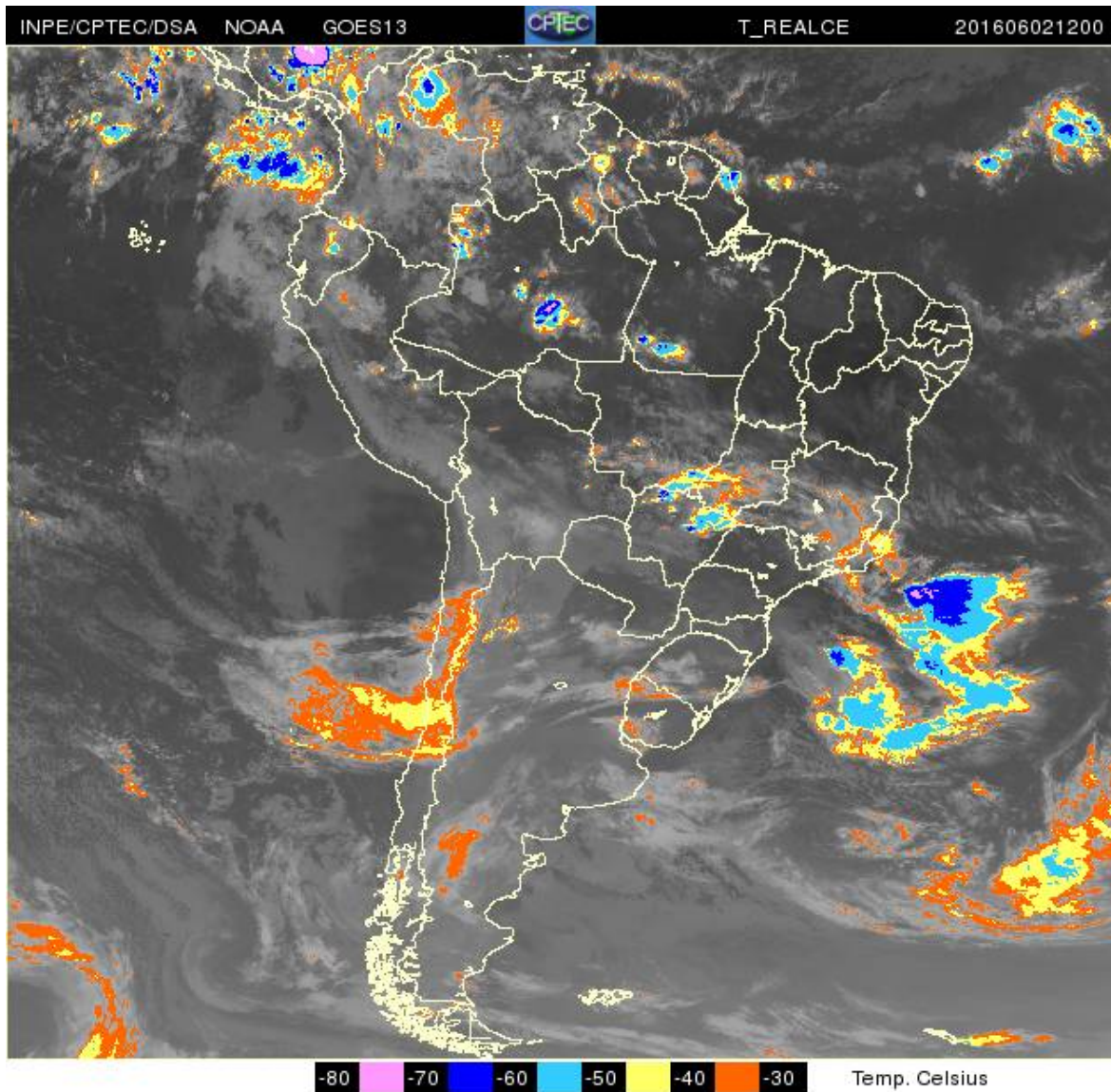


Figura 4.28: Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 02/06/2016 às 12h (UTC) [EXP02]. Fonte: NASA e INPE/BR.

Análise do arquivo de áudio

O período de análise do EXP02 (5 min) foi caracterizado uma taxa de precipitação maior observada durante os 2,5min iniciais do registro. Isto pode ser verificado no registro de áudio (Fig. 4.29).

Em associação, durante o período inicial do EXP02 também se constatou gotas maiores com impactos mais intensos (Fig. 4.30).

Uma mudança significativa do EXP02 ocorreu em relação às condições do chuvisco do EXP01. A DSD empírica do EXP02 mostra uma inclinação similar à inclinação esperada do modelo de DSD de Marshall-Palmer, com uma frequência ligeiramente maior para gotas grandes, i.e., para diâmetros entre 2,5 e 4,0 mm (Fig. 4.31).

O aumento da frequência absoluta de gotas menores que 1 mm pode ser associado à diminuição da taxa de precipitação na segunda metade do período amostral (Fig. 4.29).

Os momentos estatísticos estimados durante o período amostral mostram um ajuste dos momentos de ordem 0, 1 e 2 em associação à redução da taxa de precipitação. Os momentos que dependem mais de potências maiores do diâmetro das gotas não mostram grandes variações (Fig. 4.32).

A consequência da maior variação dos momentos estatísticos de menor ordem em relação aos de maior ordem no período amostral é que sua relação também apresenta a tendência de variação. Consequentemente, as estimativas dos diâmetros médios obtidas a partir das razões dos momentos de ordem $(n+1)$ pelos momentos de ordem (n) mostra a tendência de redução dos diâmetros a medida que a taxa de precipitação diminui, particularmente as estimativas D_1 , D_2 , D_3 e D_4 (Fig. 4.33).

A evolução temporal do LWC para a chuva do EXP02 mostra uma forma similar à do momento de terceira-ordem (Fig. 4.34). Os valores obtidos pertencem ao intervalo 1,3 e 1,85 $g\ kg^{-1}$, indicando a produção de grande quantidade de água líquida pela nuvem.

O parâmetro de refletividade do radar estimado da DSD empírica mostra uma variação de 20 a 18 dBZ durante o período amostral (Fig. 4.35), em correspondência à redução do diâmetro médio das gotas e à variação da DSD.

As comparações entre estimativas de precipitação no EXP02 e do valor médio observado por pluviômetro fornecido como parâmetro de entrada pelo usuário é mostrada na Figura 4.36. As estimativas podem ser consideradas mais próximas para a chuva do EXP02 em comparação ao chuvisco do EXP01.

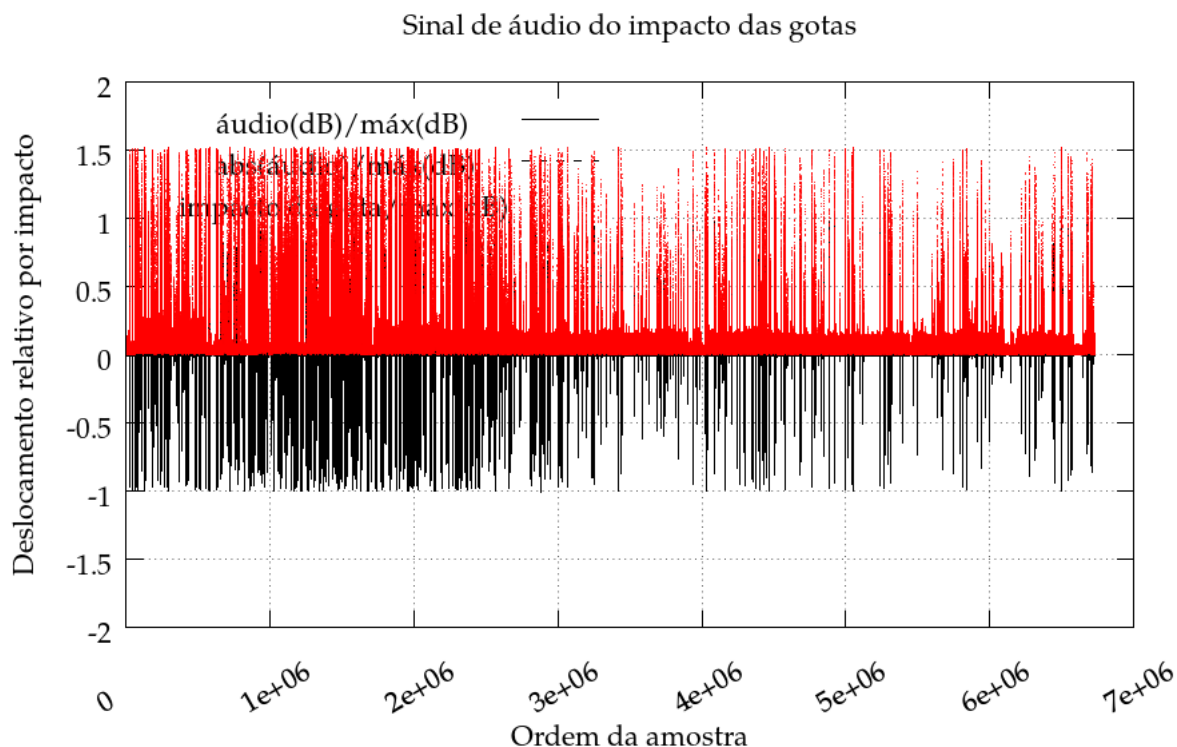


Figura 4.29: Sinal de áudio registrado correspondente ao impacto de gotas de chuvisco, por um período de 10min (EXP02).

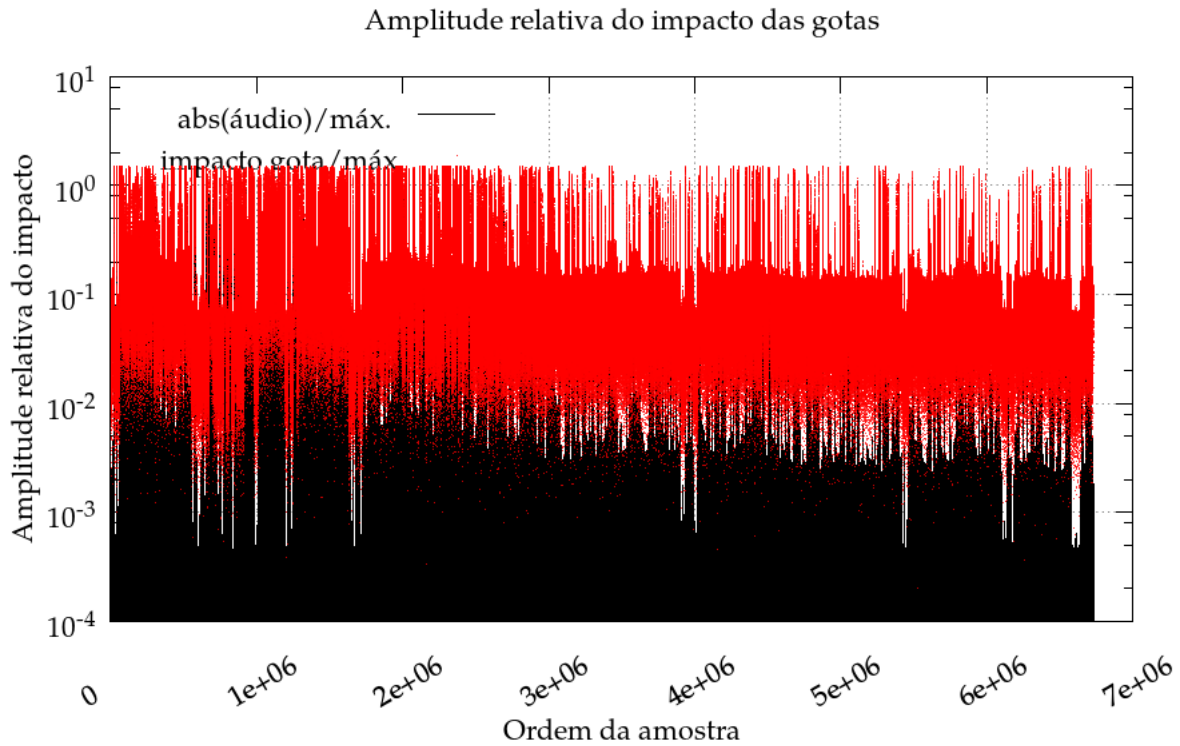


Figura 4.30: Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuva observado com duração de 10min (EXP02).

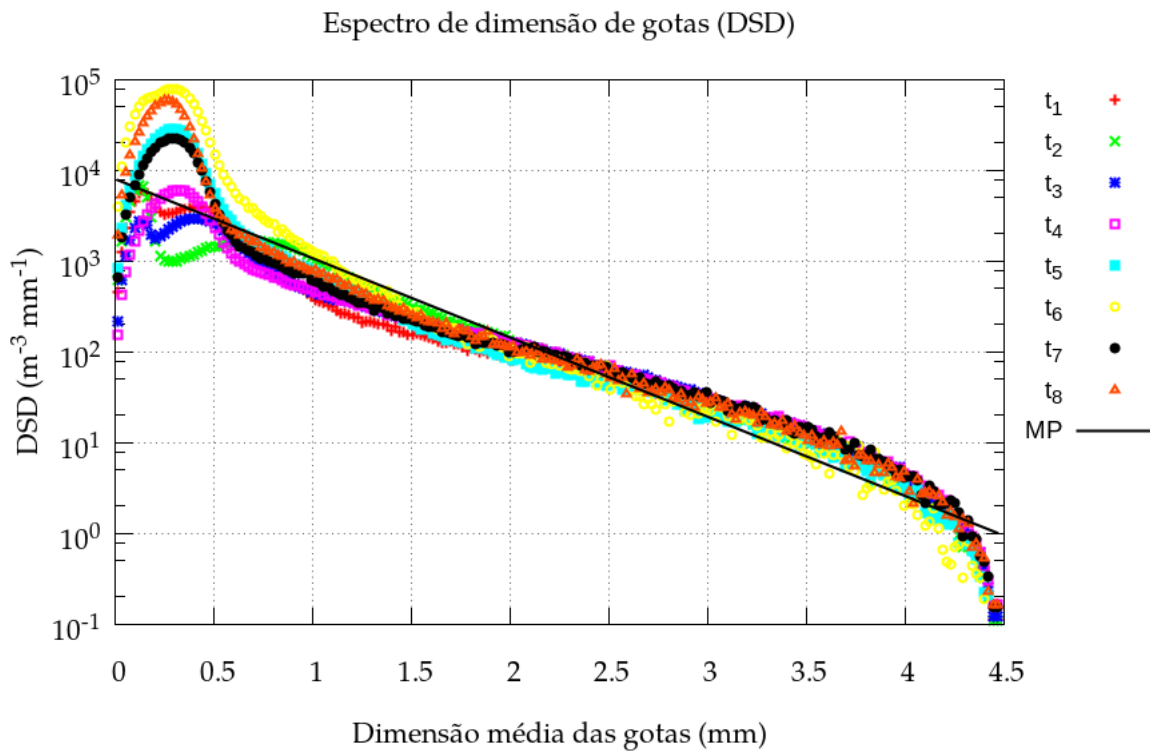


Figura 4.31: Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP02). As diferentes amostras foram identificadas com símbolos diferentes na legenda e sequenciadas de t_1 a t_8 . A linha reta correspondente ao modelo de Mashall-Palmer (1948)[3].

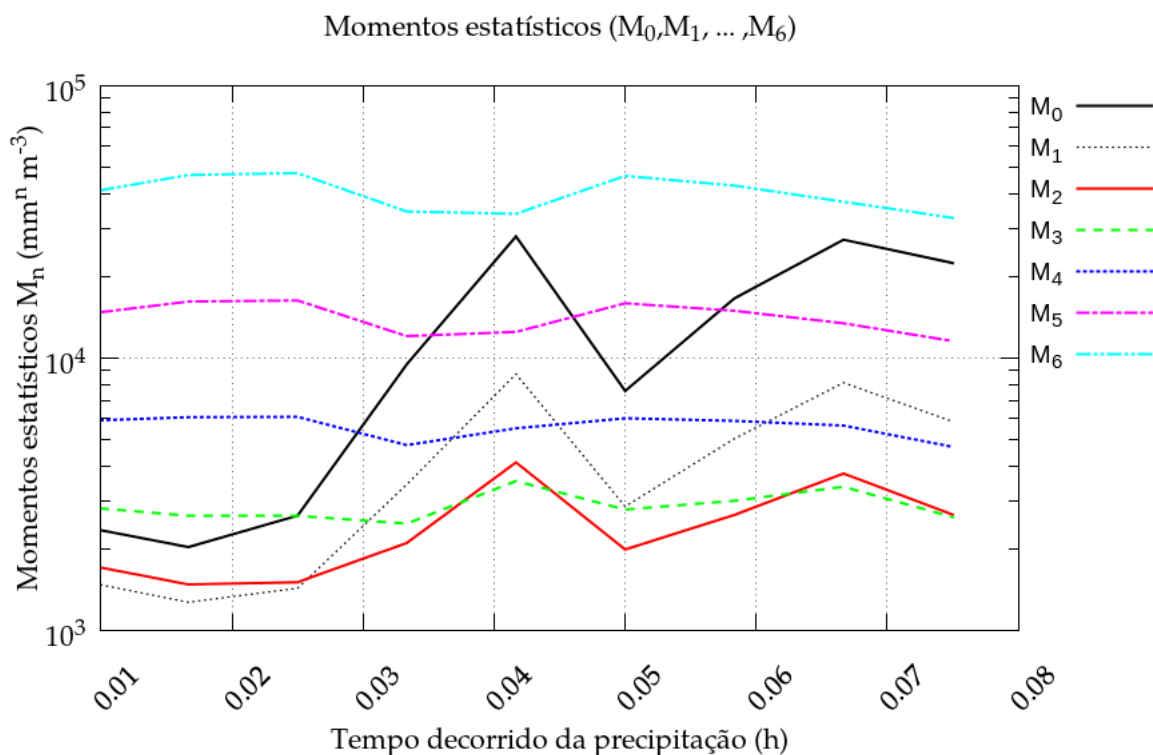


Figura 4.32: Momentos estatísticos de primeira a sexta ordem, em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP02).

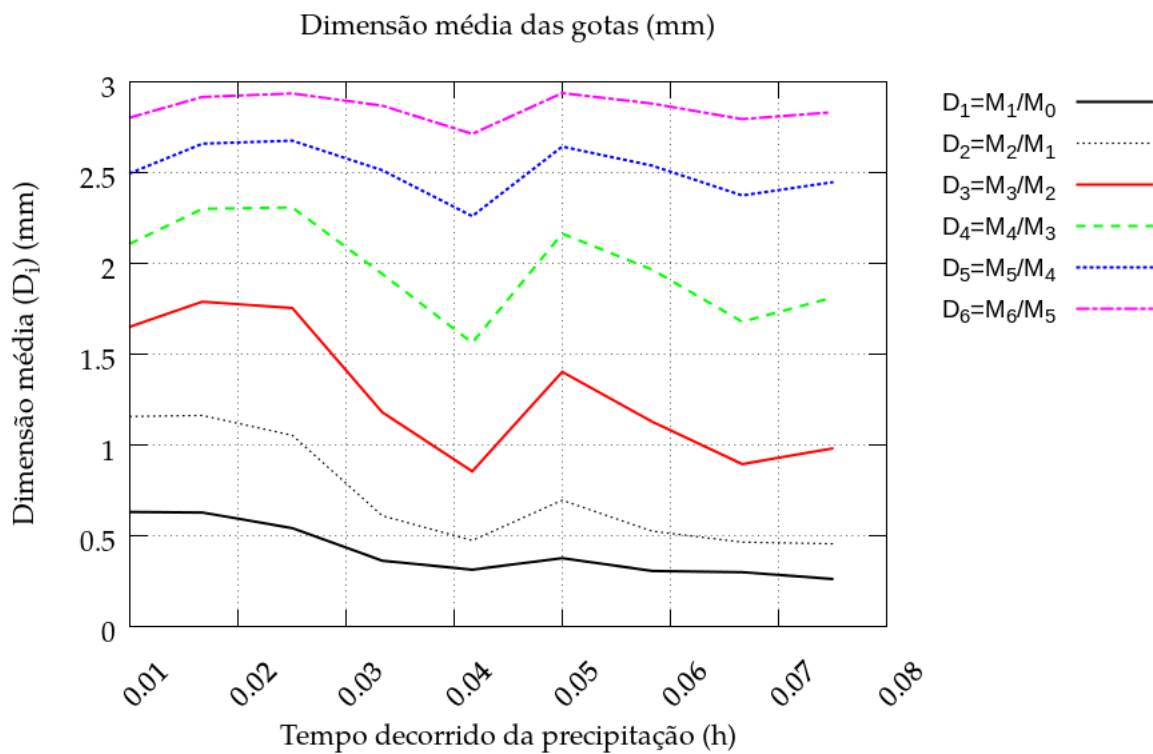


Figura 4.33: Idem à Fig. 4.32 para as estimativas de diâmetro de gotas.

EXP03

EXP03 denomina a análise da DSD obtida para a chuva pós-frontal de $6,6 \text{ mm h}^{-1}$ ocorrida na manhã do dia 07/06/2016. Para esta precipitação foi considerado um registro de áudio iniciado às

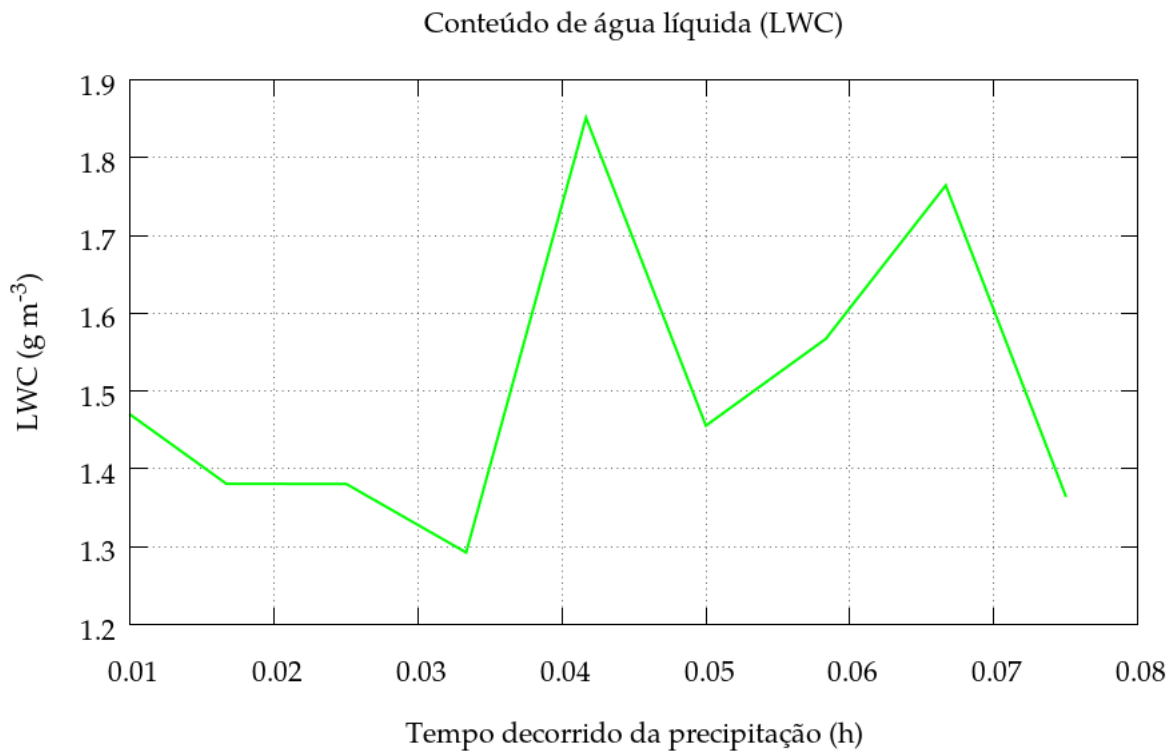


Figura 4.34: *Idem à Fig. 4.32 para o conteúdo de água líquida (LWC).*

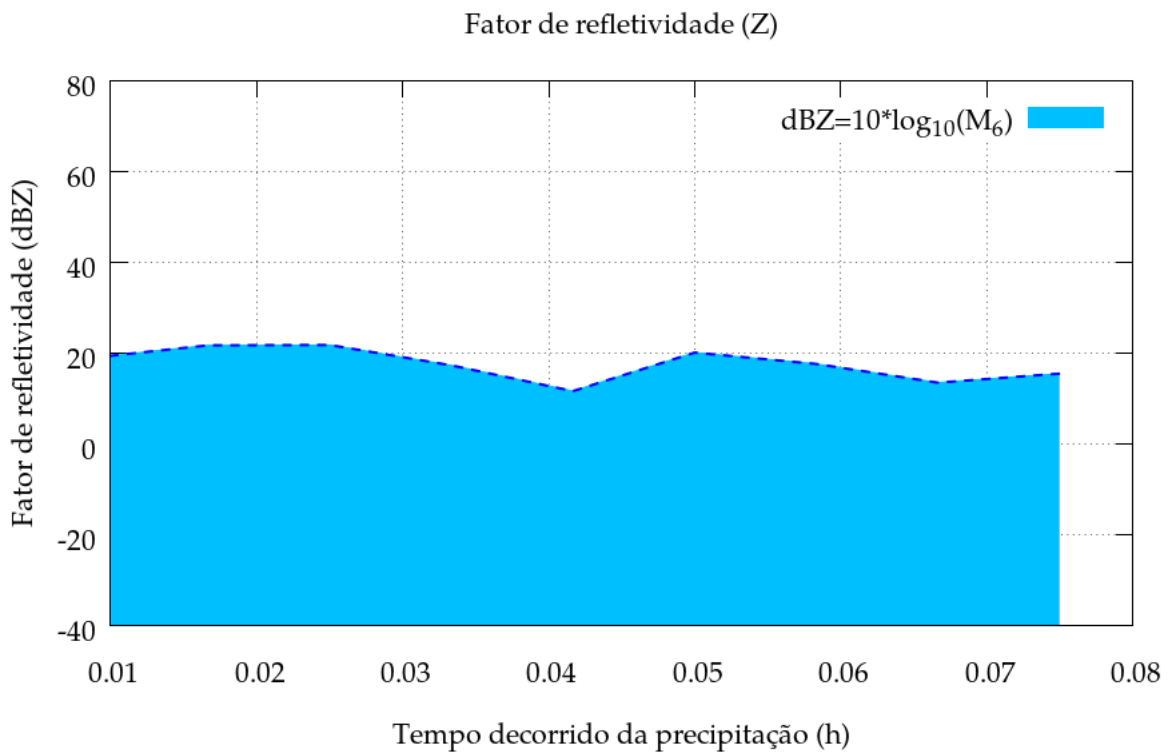


Figura 4.35: *Idem à Fig. 4.32 para o fator de refletividade (dBZ).*

10h35min (TL), com duração de 5min.

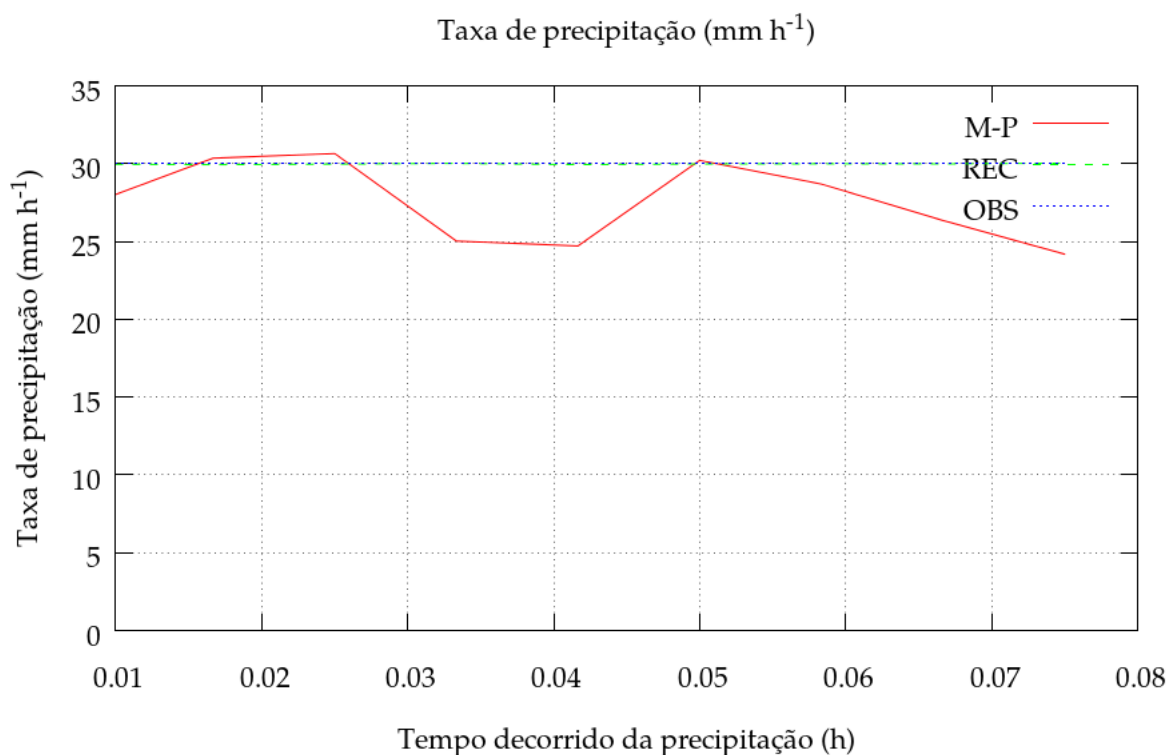


Figura 4.36: *Idem à Fig. 4.32 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).*

Análise sinótica

A condição sinótica é caracterizada no dia 07/06/2015 pela presença de duas frentes frias. A primeira passando pelo litoral do Estado do RJ. A segunda, passando sobre Mar del Plata em associação a um ciclone extratropical no Atlântico, à leste da costa da Argentina (Fig. 4.37).

Um terceiro ciclone extratropical associado a uma frente fria, localizada no Pacífico Sul, se aproxima do litoral sul do Chile, vinda de oeste (Fig. 4.38).

Uma sequência de ciclones extra-tropicais associados à frentes frias podem ser observados em formação mais ou menos alinhada na imagem de satélite. Isto pode configurar um arranjo dos ciclones formado a partir do suporte de uma onda baroclínica extensa.

Ventos fracos de W foram observados à superfície no RJ em associação à passagem frontal. As tempestades mais intensas podem ser observadas sobre o Atlântico Sul, à leste da região Sudeste do Brasil, em associação à maior convergência do escoamento nesta área e levantamento do ar na zona frontal. Sobre o Estados RJ predominaram chuvas esparsas, fracas e ou moderadas.

Análise do arquivo de áudio

O áudio de impacto das gotas de uma chuva com taxa de precipitação média de $6,6 \text{ mm h}^{-1}$ ocorrido no dia 18/05/2016 das 10h55min às 13h45min foi registrado para análise, referido por EXP03.

Durante o período de amostragem da precipitação, observou-se uma grande variação da intensi-

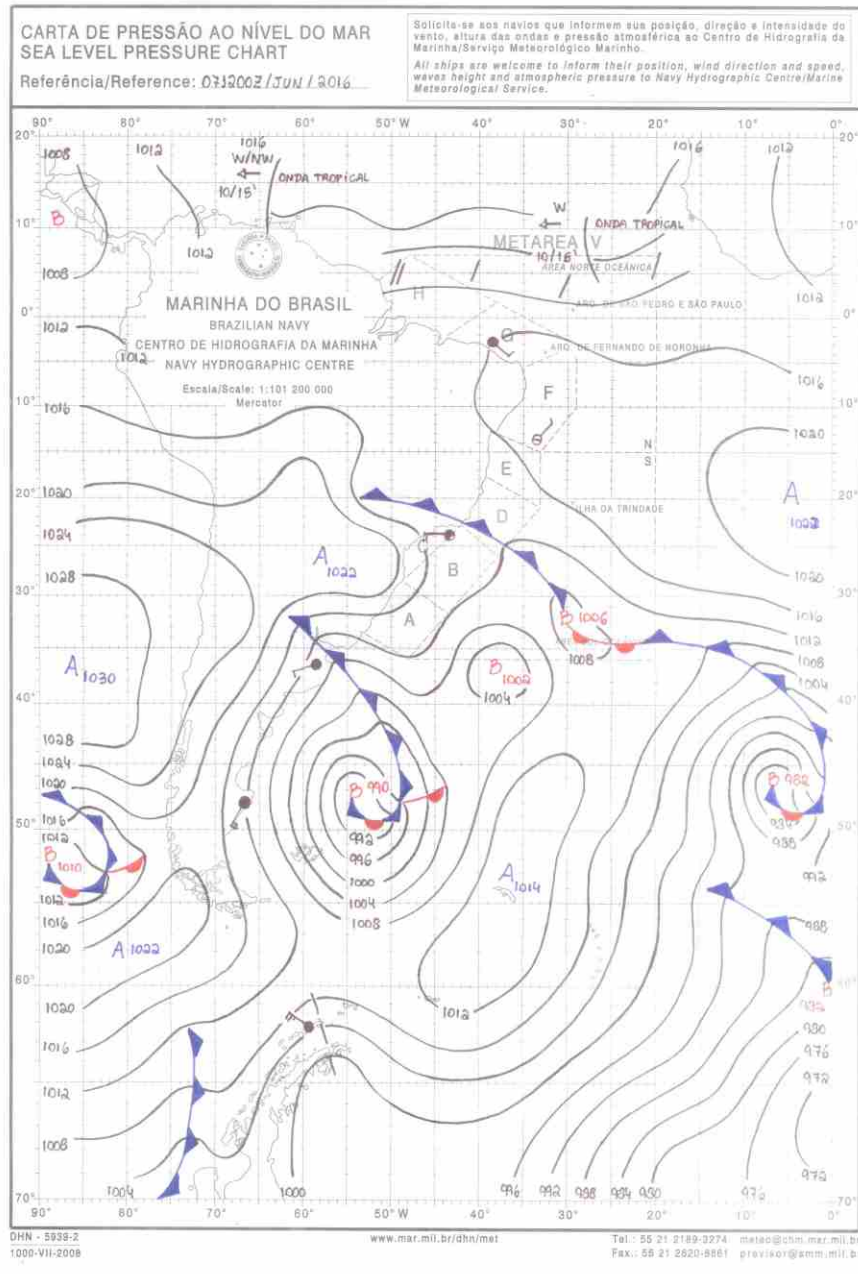


Figura 4.37: Carta das 12h UTC de 07/07/2016 do experimento EXP03. Fonte: REDEMETS/BR.

dade da taxa de precipitação da chuva, incluindo um subperíodo, iniciado aproximadamente à 6/8 do tempo decorrido desde o início, no qual a intensidade da taxa precipitação se reduziu sensivelmente (Fig. 4.39).

A intensidade dos impactos de gotas apresentou diminuição acompanhando a diminuição da intensidade do áudio ocorrida próximo ao final do período amostral (Fig. 4.40).

A Figura 4.41 apresenta as DSDs obtidas de 8 amostras sequenciais tomadas ao longo série. As diferenças são maiores entre os resultados das subamostras do início e final da série. Assim, o EXP03 é uma oportunidade de avaliar a capacidade do sistema instrumental de realizar análises de eventos no quais a taxa de precipitação varia ao longo período amostral.

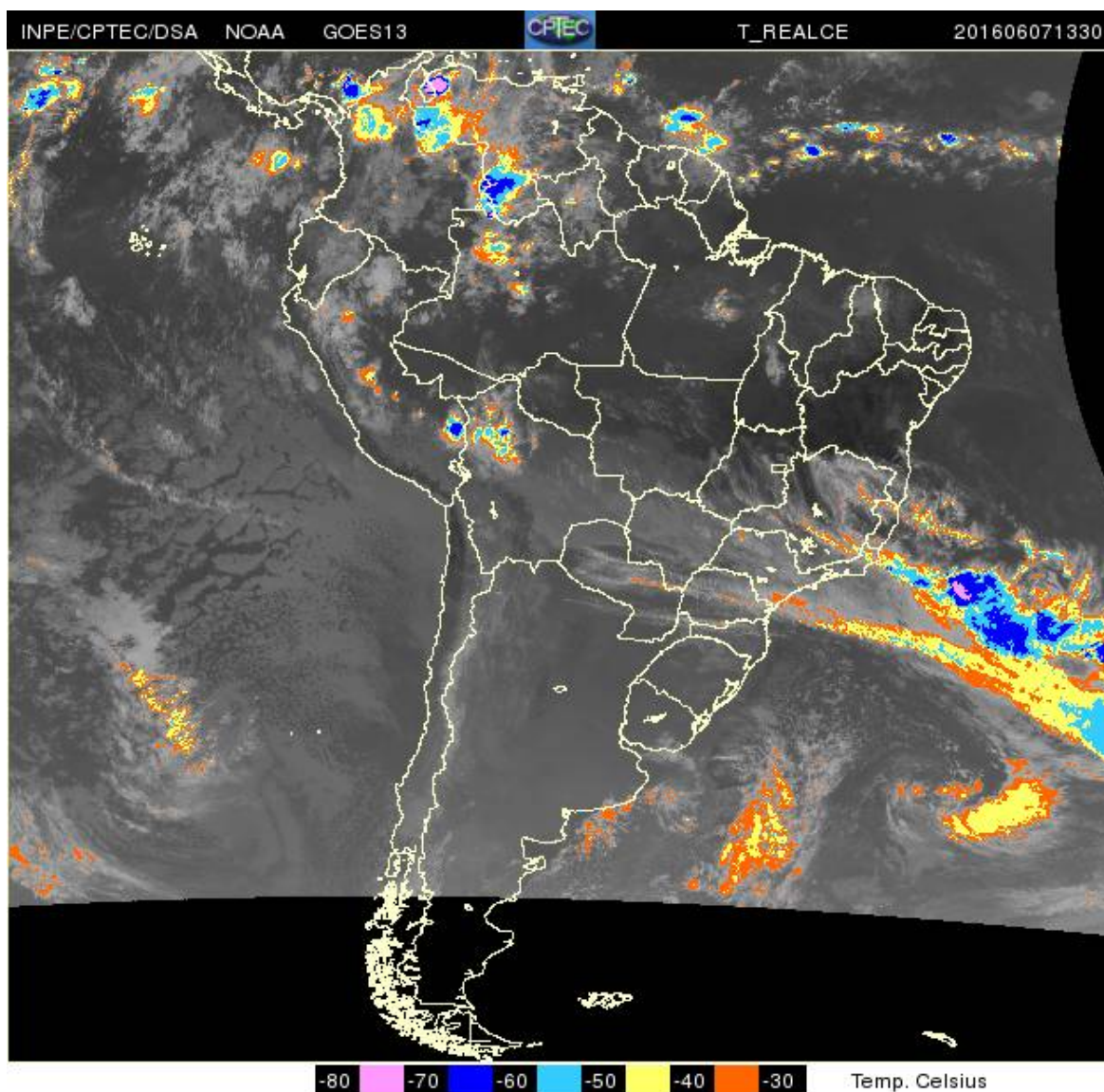


Figura 4.38: Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 07/07/2016 às 13h30min (UTC) [EXP03]. Fonte: NASA e INPE/BR.

O momentos estatísticos da distribuição apresentam-se quase uniformes ao longo da série, mas M_0 e M_1 aumentam ao final do período de forma sensível, provavelmente devido ao aumento do número de gotículas de diâmetros inferiores à 1 mm (Fig. 4.42).

As estimativas dos diâmetros médios estimados a partir da razão entre momentos estatísticos sucessivos segue a tendência de diminuição dos diâmetros, para D_0 , D_1 e D_2 , entre os tempos decorridos 0,08h e 0,10h (Fig. 4.43). Durante o período em que a chuva enfraquece lentamente sua intensidade, as estimativas de diâmetro médio variam lentamente e em consonância entre si. No período próximo ao final quando a intensidade da chuva cai de forma mais abrupta, o comportamento das estimativas D_0 , D_1 , D_2 são opostos (i.e., em relação à variação temporal) ao das estimativas D_4 , D_5 e D_6 . Uns aumentam e os outros diminuem e vice-versa. Isto pode ser entendido desde que os momentos M_0 e M_6 são sensíveis ao aumento do número de gotas pequenas e grandes, respectivamente.

A evolução temporal do conteúdo de água líquida ao longo da série amostral é mostrada na Figura 4.44. Nota-se variações maiores no início e final do período amostral. Durante a maior parte do período o LWC apresentou valores em torno de $0,4 \text{ g kg}^{-1}$, valores altos para um chuvisco. Isto é um indício que o EXP03 poderia ser associado à uma chuva variável, entre moderada e leve, e

não à chuva.

O fator de refletividade do radar estimado mostrou valores entre 5 e 19 dBZ (Fig. 4.45).

A Figura 4.46 permite uma comparação das taxas de precipitação observada em pluviômetro (OBS), estimada da integração da distribuição empírica (DSD) e estimada da relação Z-R da distribuição de Marshall-Palmer (M-P). As variações podem ser entendidas em função das variações encontradas nos diferentes momentos estatísticos ao longo do período amostral.

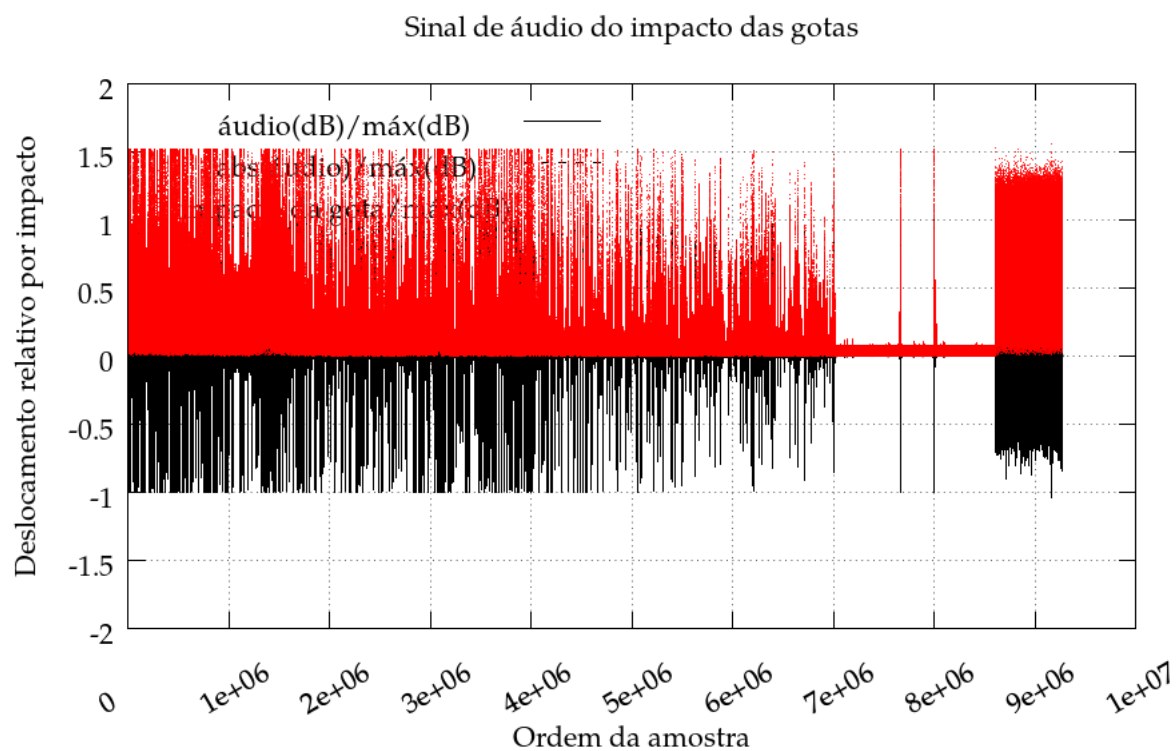


Figura 4.39: Sinal de áudio correspondente ao impacto de gotas de um chuvisco observado (EXP03).

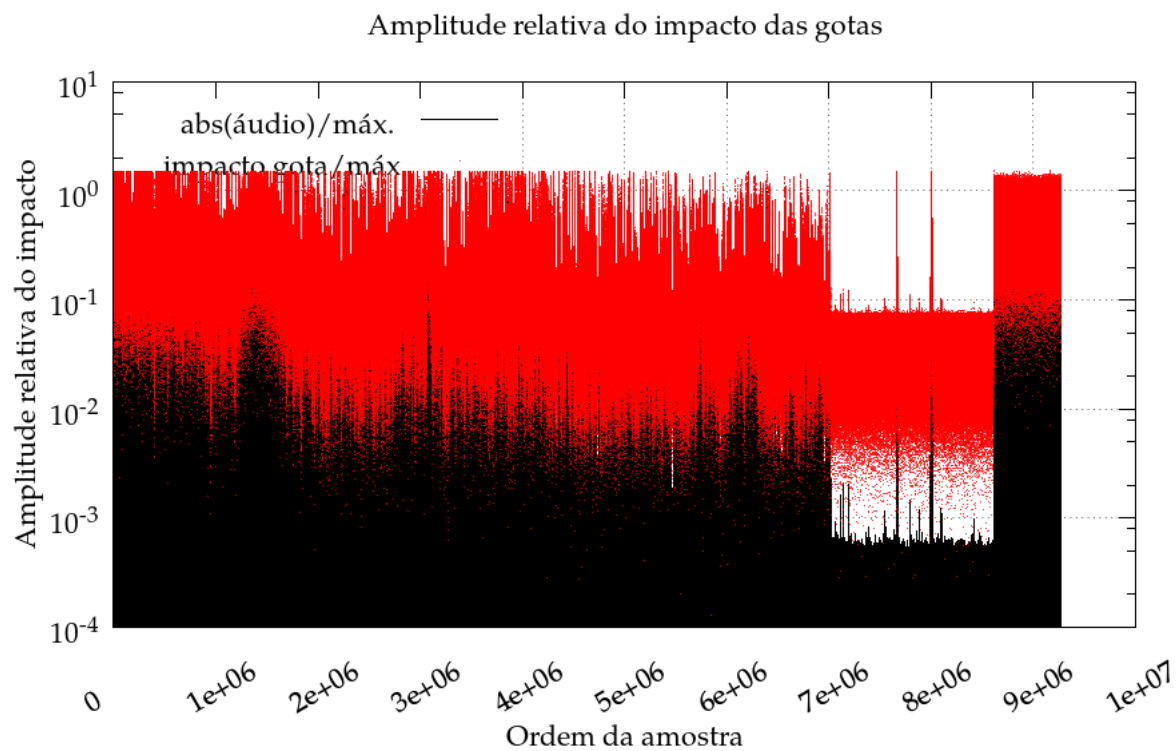


Figura 4.40: Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuvisco observado (EXP03).

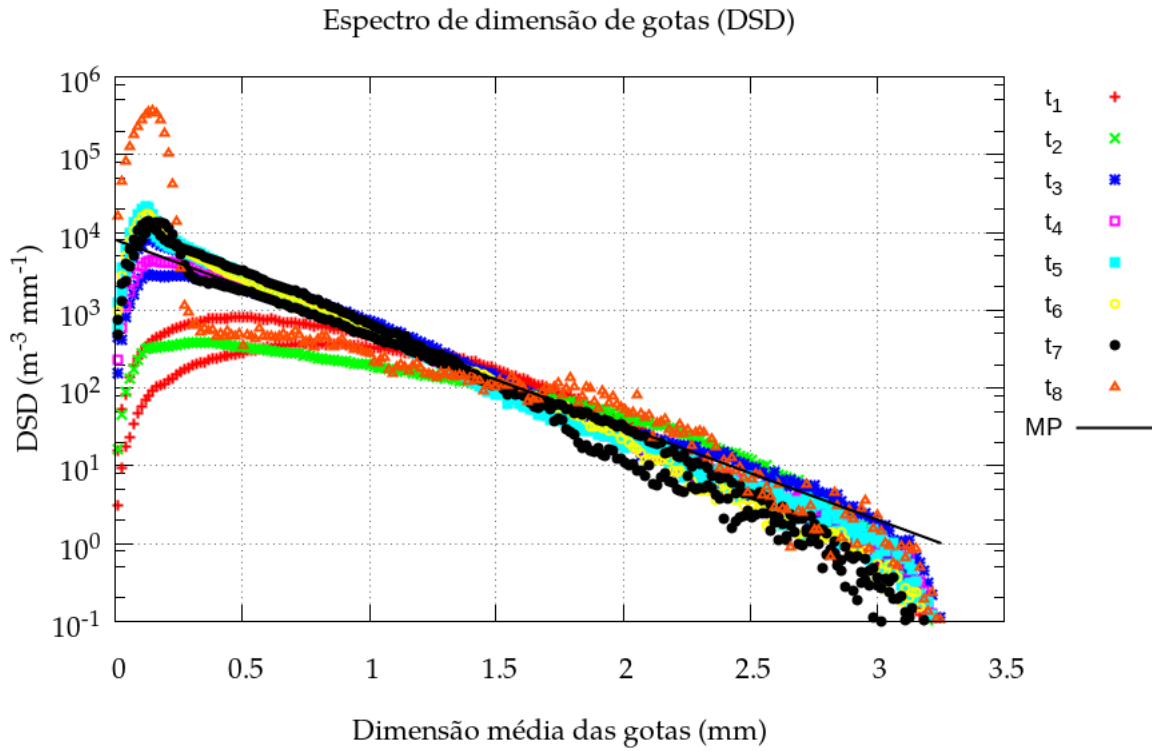


Figura 4.41: Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP03).

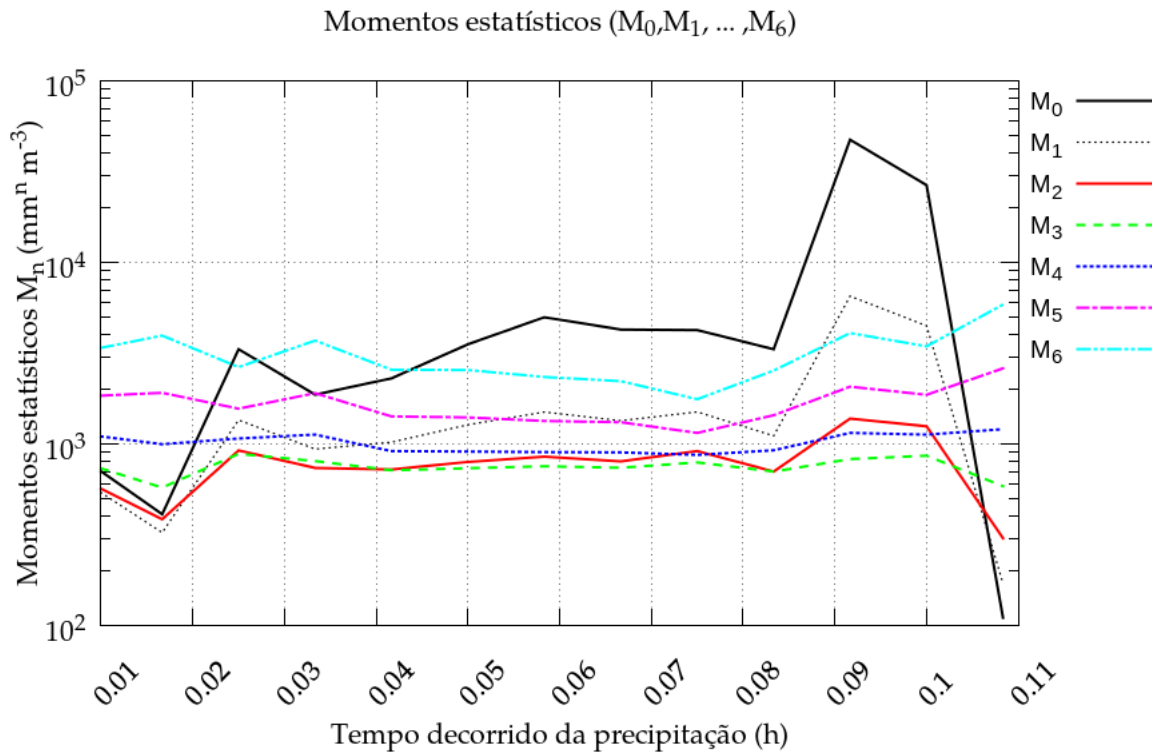


Figura 4.42: Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP03).

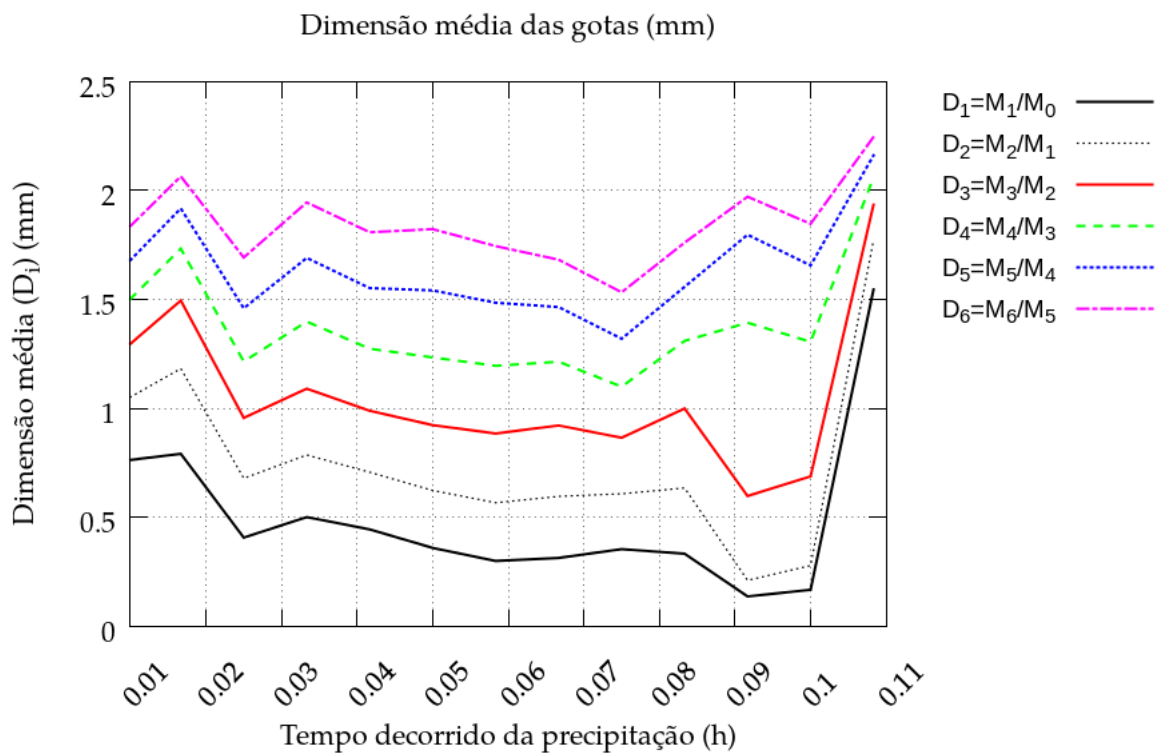


Figura 4.43: Idem à Fig. 4.42 para estimativas de diâmetro médio de gota.

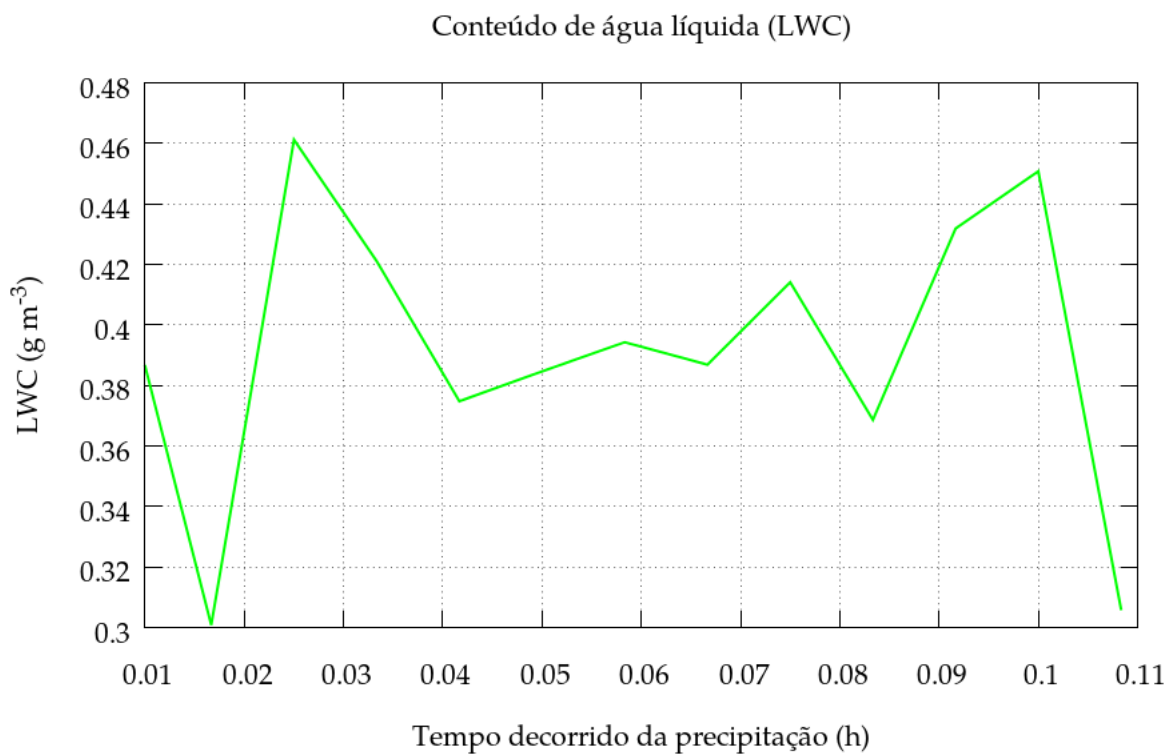


Figura 4.44: Idem à Fig. 4.42 para conteúdo de água líquida (LWC).

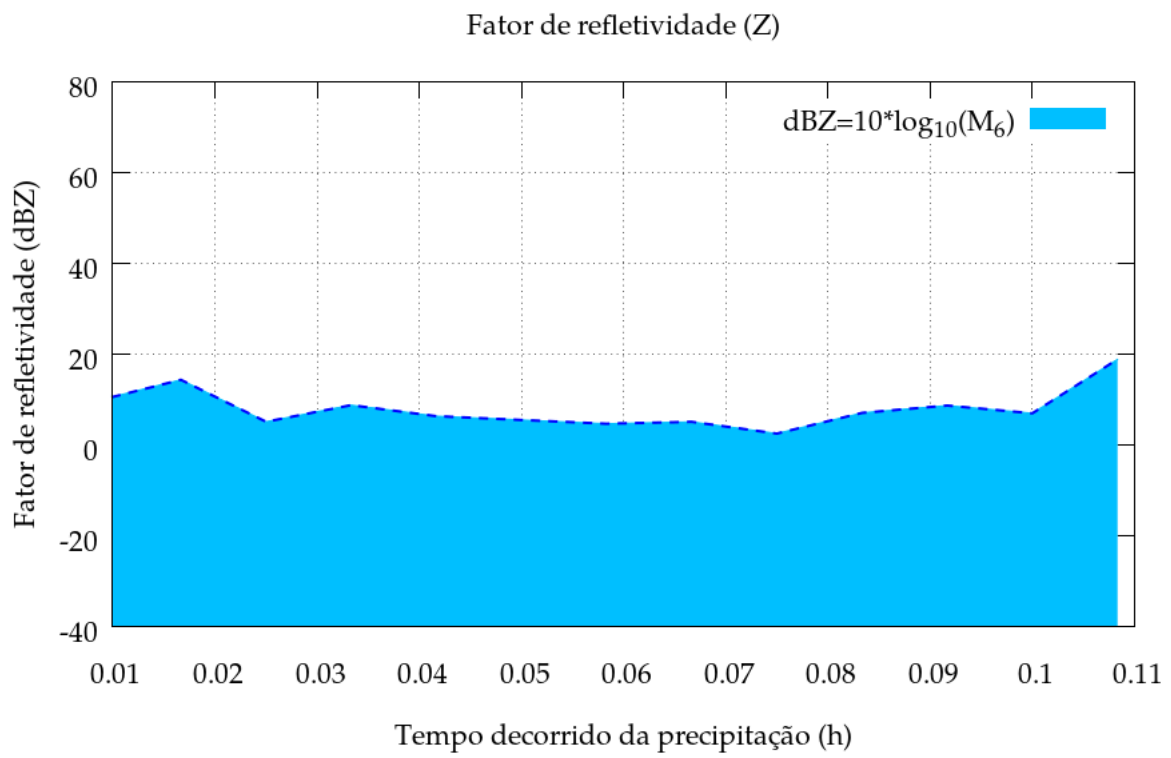


Figura 4.45: *Idem à Fig. 4.42 para o fator de refletividade do radar (dBZ).*

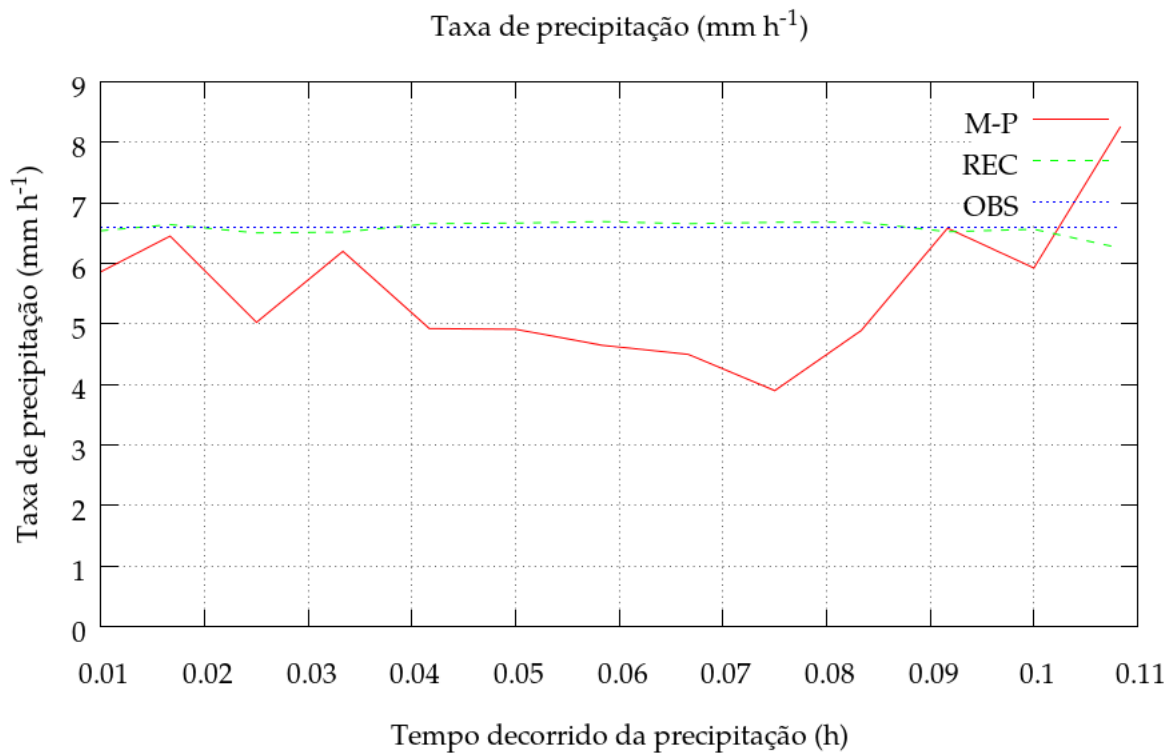


Figura 4.46: Idem Fig. 4.42 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).

EXP04

EXP04 denomina a análise da DSD obtida para a chuva de $20,0 \text{ mm h}^{-1}$ ocorrida na tarde do dia 31/08/2016. Para esta precipitação foi considerado um registro de áudio iniciado às 16h33min (TL), com duração de 10min.

Análise sinótica (EXP04)

O mapa sinóptico mostrado na Figura 4.47 indica a presença de uma frente fria em SP se aproximando rapidamente do RJ. Portanto, a precipitação registrada corresponde a uma chuva pré-frontal. A zona frontal tem uma orientação bastante meridional, o que indica a tendência de uma rápida passagem e desenvolvimento (occlusão), com queda de temperatura e muita nebulosidade junto a zona frontal. Simultaneamente, outra frente fria de grande dimensão pode ser observada avançando rapidamente sobre o Norte da Argentina. Na retaguarda desta extensa frente fria encontra-se uma massa de ar polar fria e seca, com centro de pressão de 1028 (hPa), sobre o litoral Pacífico do Chile, que tem sua massa de ar advectada sobre o Norte da Argentina, pelo escoamento superficial de SW associado a uma cavado pós-frontal na Argentina, de inclinação SE-NW.

A diferença de poucas horas entre o mapa sinóptico e a imagem de satélite permite avaliar a rapidez com que se deu o desenvolvimento baroclínico, com oclusão sobre o Atlântico, e a entrada da massa de ar polar fria e seca sobre o Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil e sobre a Argentina, Paraguai, Uruguai e Bolívia (Fig. 4.48).

A nebulosidade e chuvas pré-frontais no SE brasileiro podem ser associadas ao transporte de ar tropical, úmido e potencialmente instável, vindo de Norte por sobre a massa de ar polar, cuja borda está inclinada de SE a NW, indicando a penetração na retaguarda da Alta Pressão polar. Esta condição sinóptica é similar às condições nas quais ocorre ascensão de ar tropical sobre ar subtropical de uma esteira transportadora, quando um referencial lagrangiano é colocado seguindo a zona frontal. Uma evidência disto é a grande extensão da área de precipitação sobre a frente quente no oceano Atlântico, com formato de virgula invertida característico.

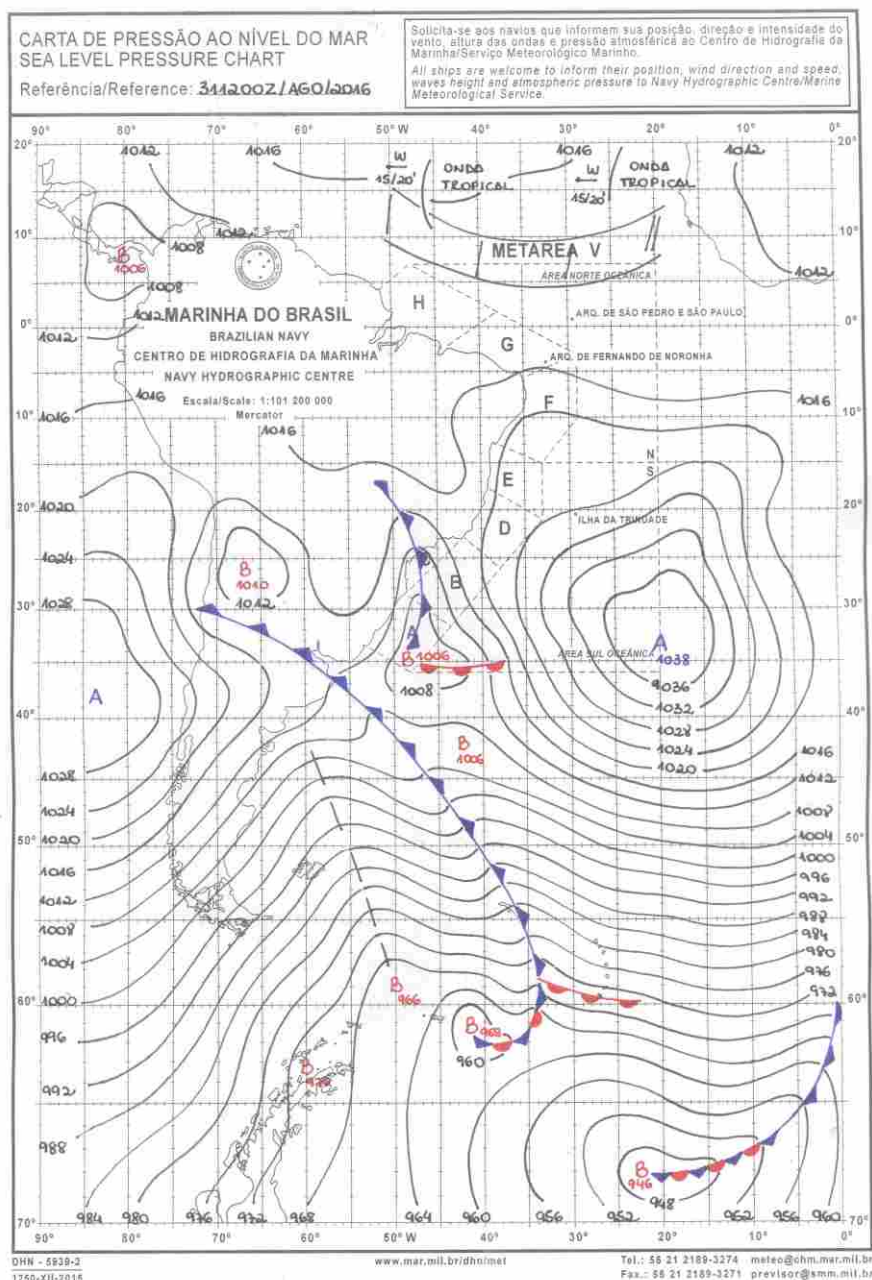


Figura 4.47: Carta das 12h UTC de 31/08/2016 do experimento EXP04. Fonte: REDEMET/BR.

Análise do arquivo de áudio (EXP04)

Sob condições pré-frontais registrou-se uma amostra do áudio da chuva (EXP04) caracterizado por uma variação lenta da taxa de precipitação a qual diminuiu com o tempo (Fig. 4.49). Consequentemente, a intensidade do sinal do impacto de gotas mostrou uma notável homogeneidade ao longo de todo o período amostral (Fig. 4.50).

Os espectros empíricos obtidos apresentaram uma tendência exponencial ao longo de todo período amostral. Neste caso, é possível uma maior aderência do modelo exponencial de Marshall-Palmer (Fig. 4.51).

Enquanto os momentos M_4 , M_5 e M_6 apresentam pequena variação ao longo da amostra, os momentos M_0 , M_1 e M_2 e M_3 (em menor proporção) aumentam a medida que a precipitação enfraquece do início ao final do período amostral (Fig. 4.52). Provavelmente isto se deve ao aumento

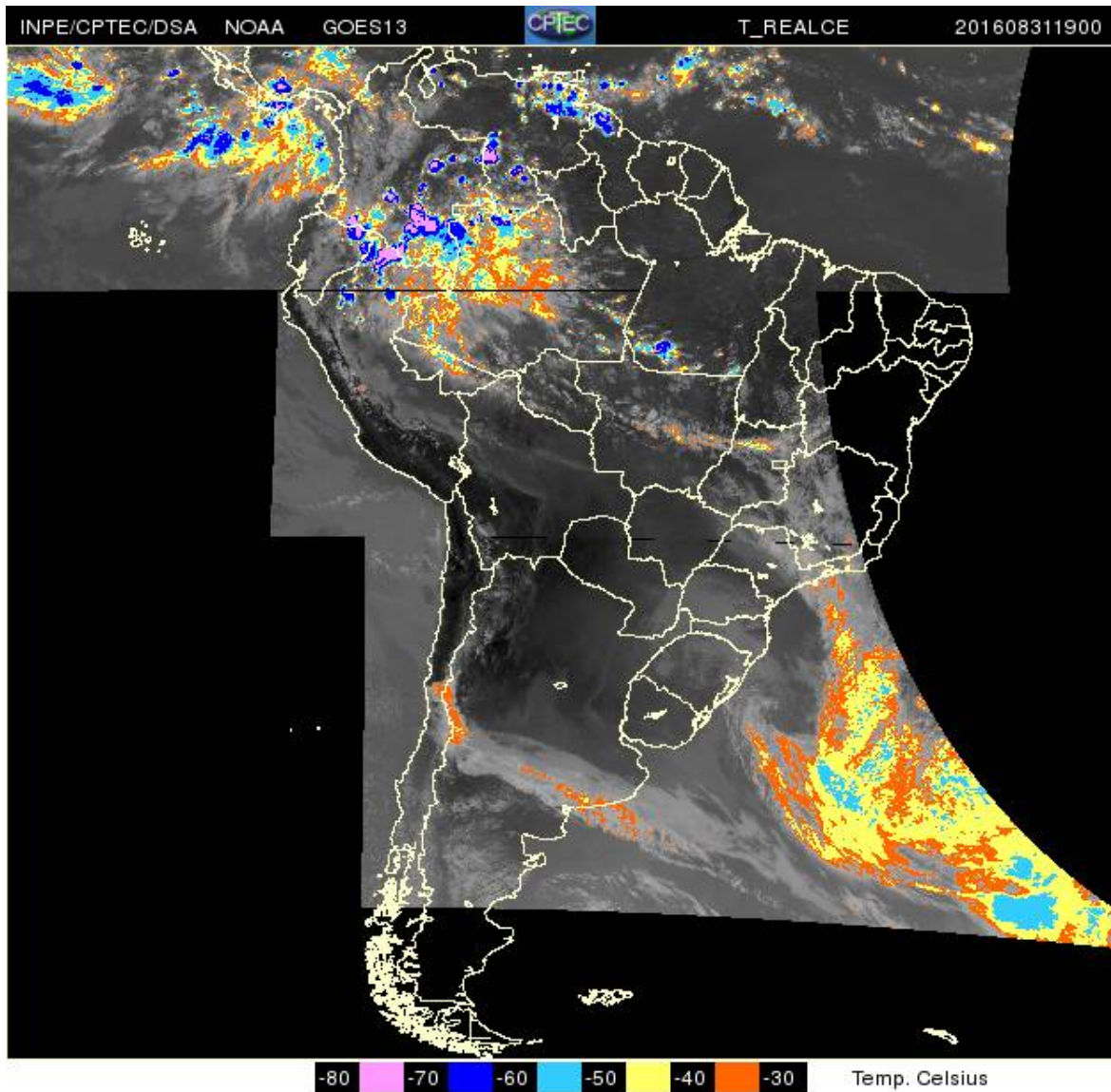


Figura 4.48: Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 31/08/2016 às 19h (UTC) [EXP04]. Fonte: NASA e INPE/BR.

do número de gotículas com diâmetro inferior a 1 mm.

Um aumento abrupto da precipitação no instante final da série temporal foi suficiente para diminuir os momentos estatístico de ordem M_0 , M_1 e M_2 , assim como alterar as estimativas obtidas a partir desses momentos.

A redução da taxa de precipitação ao longo da série amostral provocou a diminuição do diâmetro médio das gotas, como pode ser verificado na Figura 4.53, com excessão do final da série quando há um incremento da precipitação.

Mais uma vez, as variações do LWC mostram-se pouco óbvias, em função da estimativa do cubo do diâmetro médio das gotas (D_4) (Fig. 4.54). Os valores obtidos estão entre 0,95 e 1,85 $g\ kg^{-1}$, com valor médio próximo de 1,25 $g\ kg^{-1}$.

O fator de refletividade do radar apresentou uma variação entre 14 e -2 dBZ durante o período amostral (Fig. 4.55).

A Figura 4.56 permite a comparação das variações das taxas de precipitação observada pelo pluviômetro (e fornecida como parâmetro de entrada) (OBS), a estimativa por integração da distribuição empírica (DSD) e a estimativa pela relação Z-R da distribuição de Marshall-Palmer (M-P). As variações da taxa de precipitação mostram-se mais suaves no EXP04.

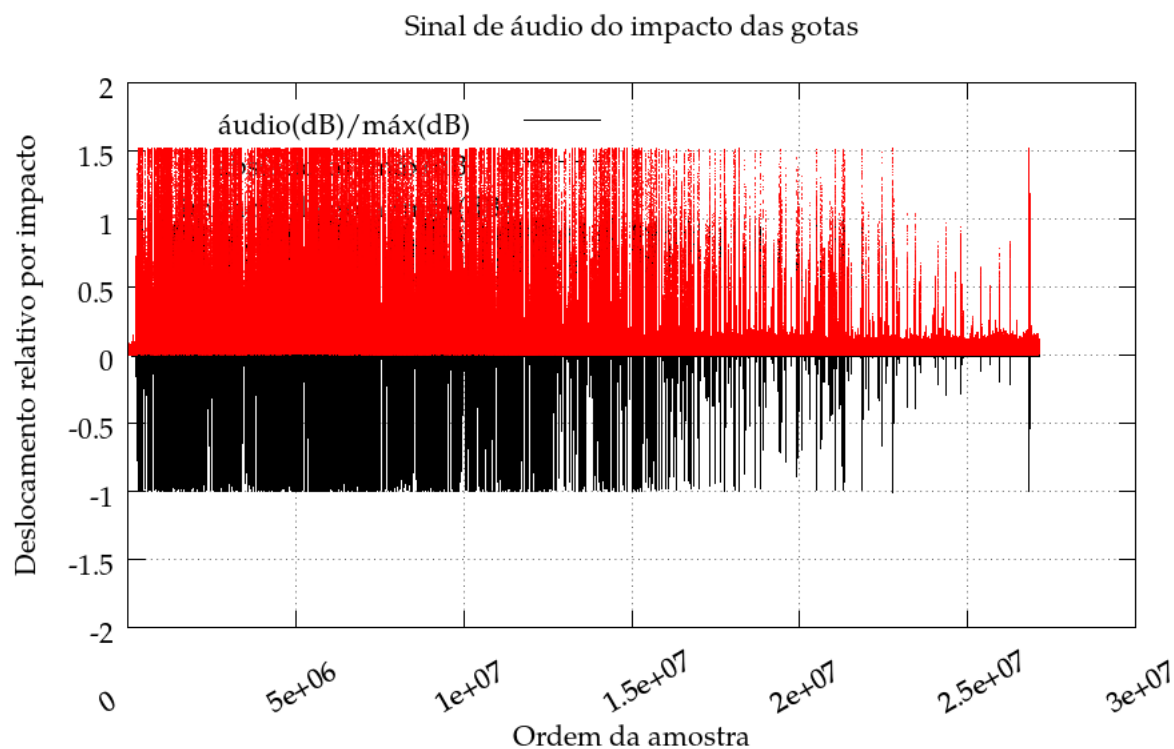


Figura 4.49: Sinal de áudio correspondente ao impacto de gotas de um chuveiro observado com duração de 10min (EXP04).

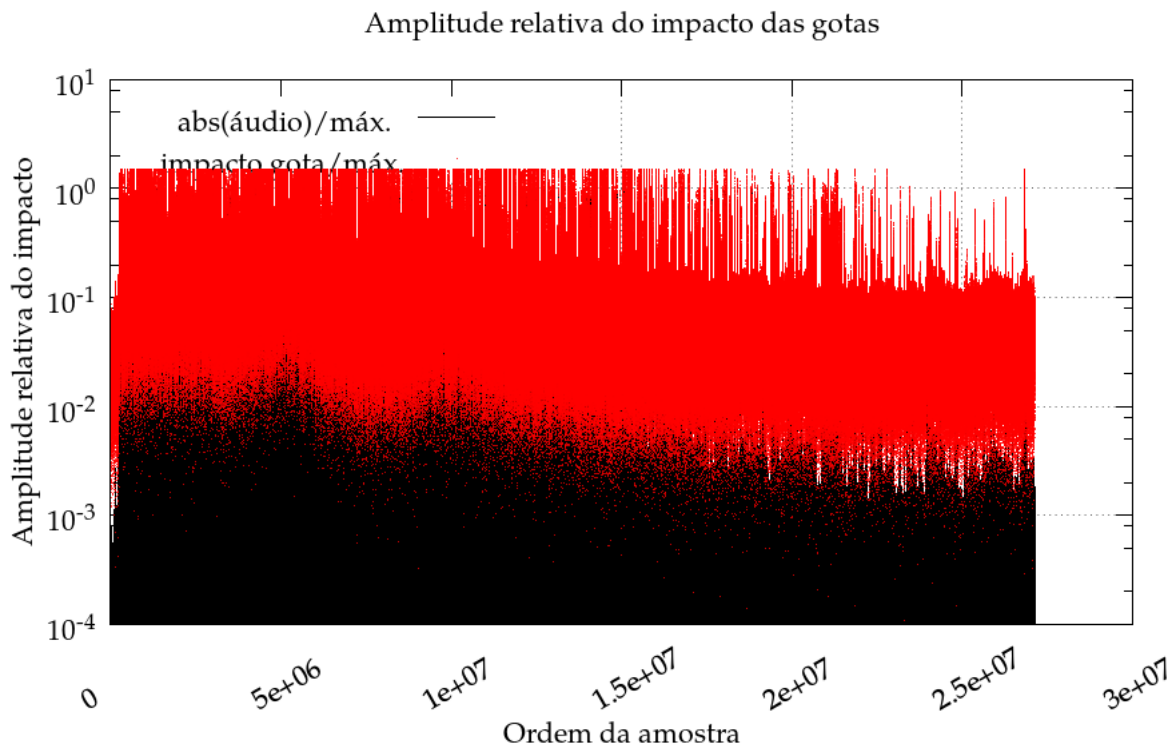


Figura 4.50: Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuveiro observado com duração de 10min (EXP04).

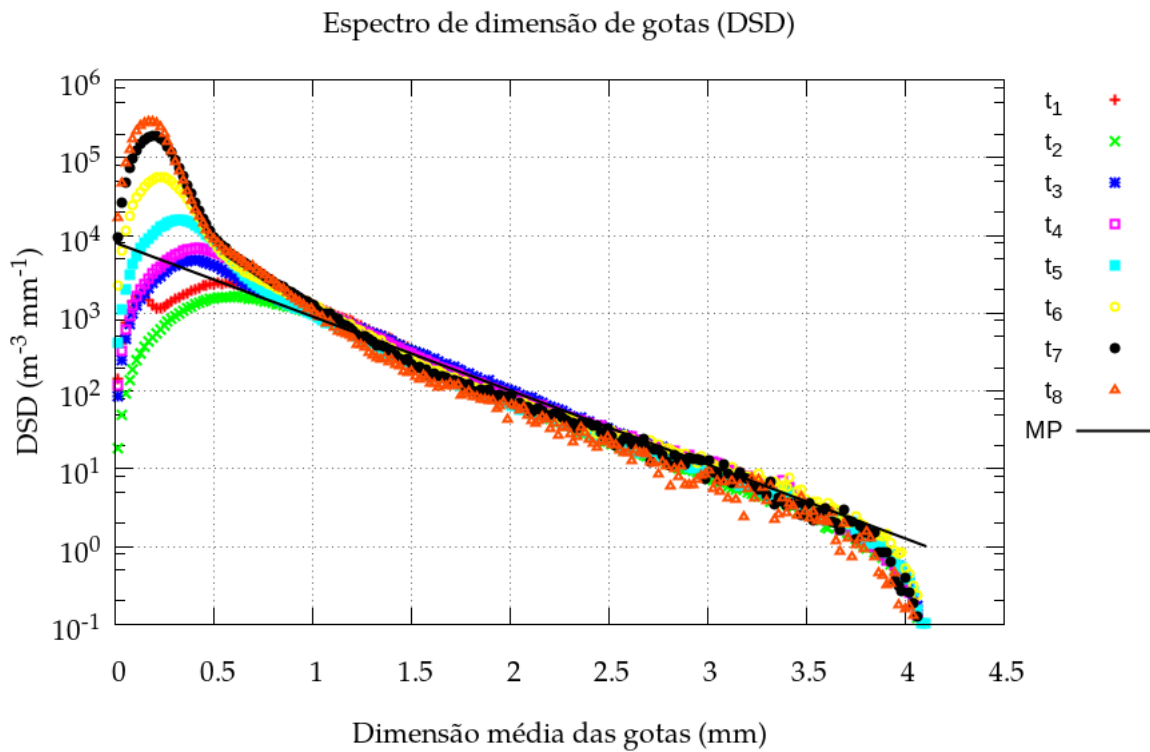


Figura 4.51: Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP04).

EXP05

EXP05 apresenta a análise da DSD de uma chuva pré-frontal de $26,0 \text{ mm h}^{-1}$ ocorrida na noite do dia 19/09/2016. O registro de áudio (filtrado) corresponden a 5min de duração, com início às

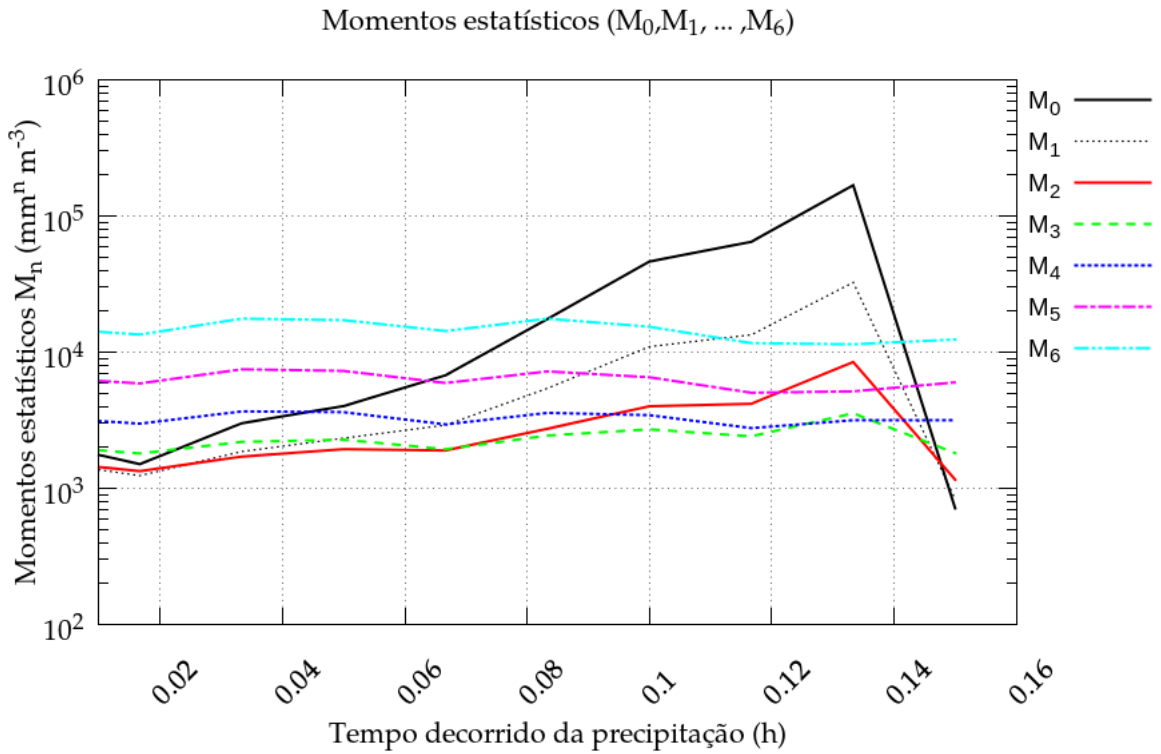


Figura 4.52: Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP04)

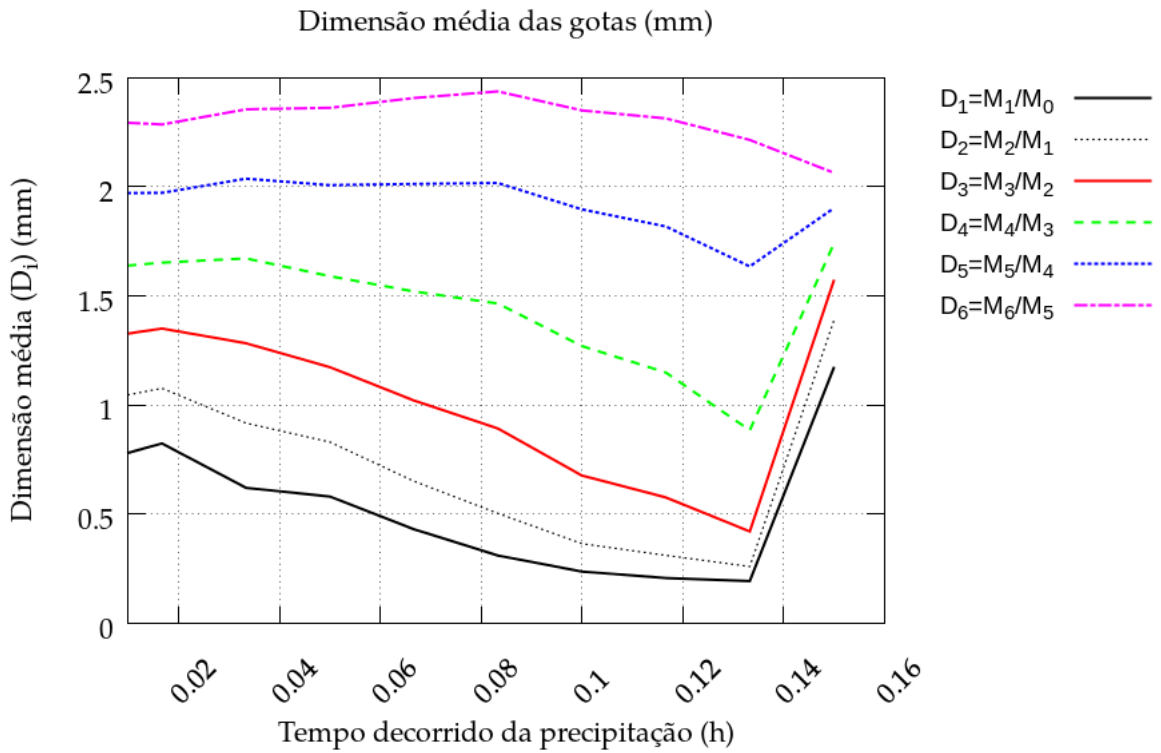


Figura 4.53: Idem à Fig. 4.52 para estimativas do diâmetro médio de gotas.

22h17 min (TL).

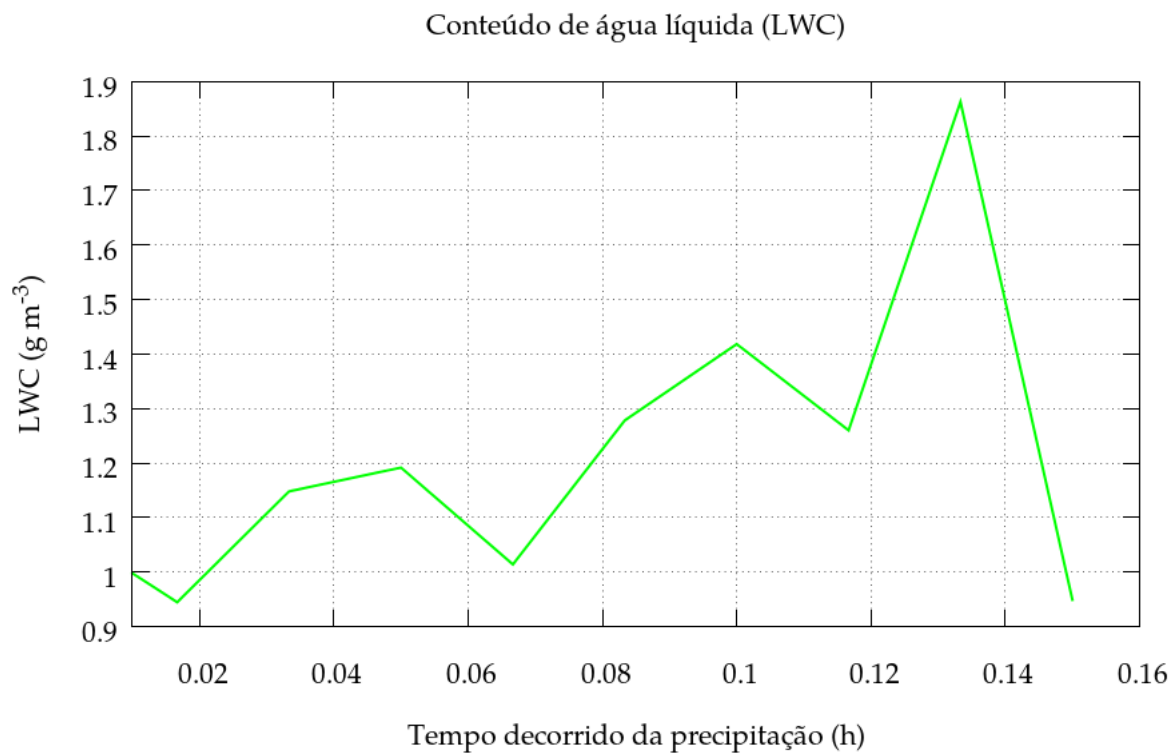


Figura 4.54: *Idem à Fig. 4.52 para o conteúdo de água líquida (LWC).*

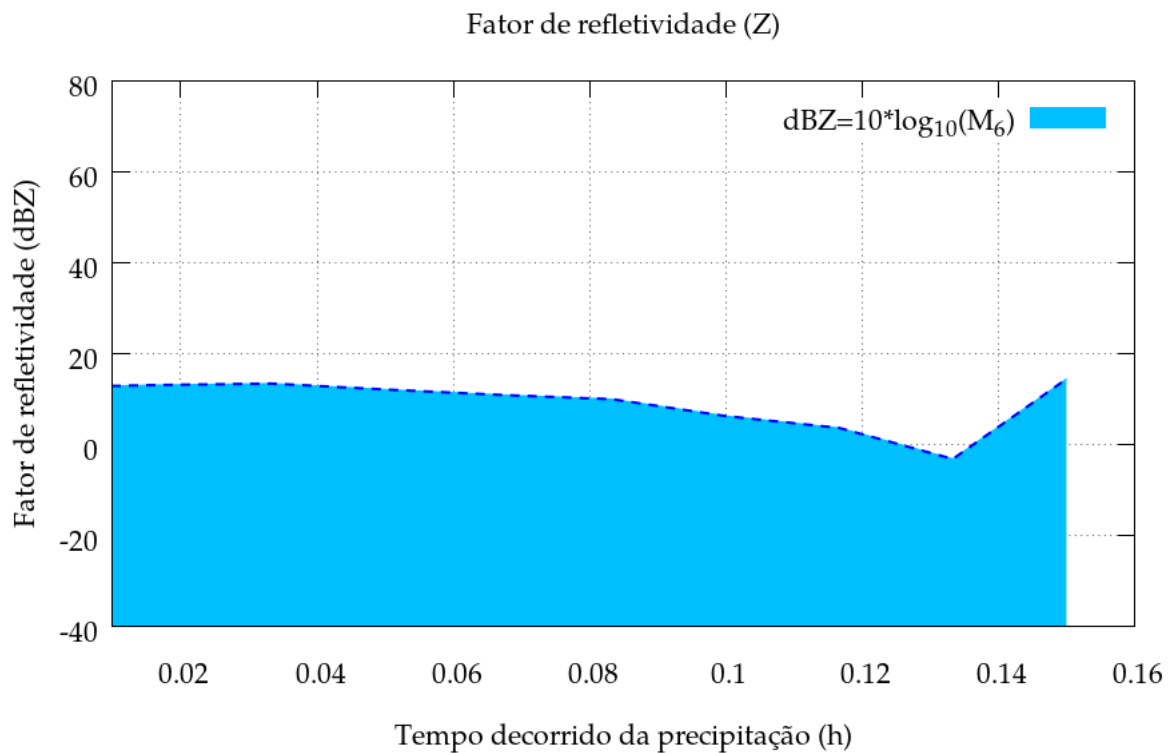


Figura 4.55: *Idem à Fig. 4.52 para o fator de refletividade (dBZ).*

Análise sinótica

A carta sinótica para o dia 19/09/2016 às 12h UTC (Fig. 4.57) mostra que o RJ encontra-se em uma condição sinótica pré-frontal. O escoamento superficial é de Nordeste, favorável à advecção

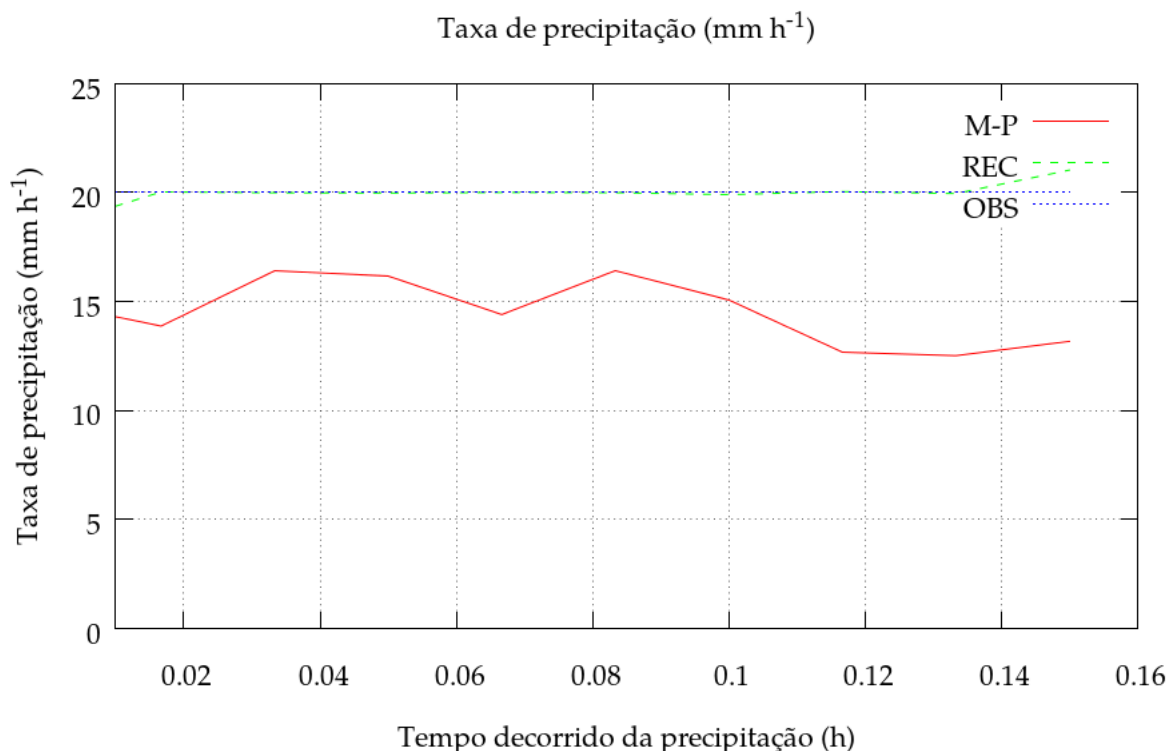


Figura 4.56: Idem à Fig. 4.52 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).

do ar úmido, quente e tropical da massa de ar marítima associada ao escoamento do Centro de Alta Pressão semi-permanente do Atlântico Sul. Nota-se a presença de uma baixa pressão continental sobre Minas Gerais e Goiás, que pode está associado à condições favoráveis à convergência do escoamento em superfície e ao desenvolvimento de tempestades esparsas sobre o Sudeste brasileiro, inclusive sobre o Estado do Rio de Janeiro (Fig. 4.58).

Análise do arquivo de áudio (EXP05)

O áudio correspondente ao período de chuva do EXP05 mostra-se muito variável em relação à intensidade de áudio (Fig. 4.59) e ao impacto de gotas associado (Fig. 4.60).

A evolução temporal da DSD empírica pode ser examinada na Figura 4.61. As variações da taxa de precipitação influenciam na forma da DSD empírica. Por exemplo, em 4/8 do período amostral a diminuição local da precipitação implica que diminuição do número de gotas maiores que 1 mm (vide distribuição dos quadradinhos correspondente a subamostra t4 na figura). A precipitação volta a incrementar-se na segunda metade do período. Isto implica em uma maior aproximação dos pontos empíricos em relação à curva teórica de Marshall-Palmer. Para subamostras de duração entre 0,5 e 1 minuto, o EXP05 oferece indício da ocorrência de valor mínimo da taxa de precipitação para que o modelo de Marshall-Palmer possa apresentar uma aderência à DSD empírica com significância estatística.

As Figuras 4.62 e 4.63 trazem evidência da ocorrência de duas distribuições (não simultâneas), que se mostram, ora uma ora outra, a medida que o evento de precipitação ocorre.

O conteúdo de água líquida se mostra uma variável inevidente, pois não somente uma função in-

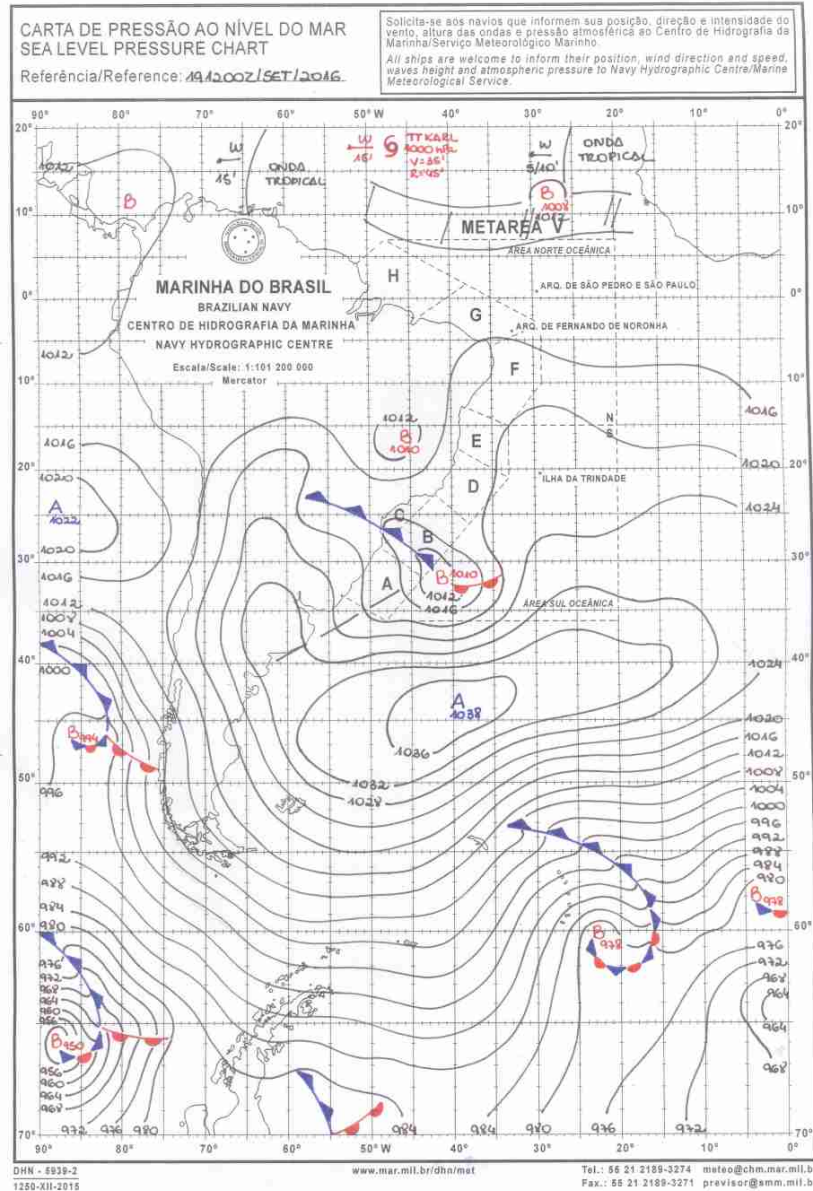


Figura 4.57: Carta das 12h UTC de 19/09/2016 do experimento EXP05. Fonte: REDEMETS/BR.

tegral do diâmetro médio e o momento de terceira-ordem como também depende da super-saturação presente na nuvem e da quantidade de água que se acumula pela diferença da velocidade de queda das gotas (Fig. 4.64). No caso do EXP05 mostra-se como uma função crescente com o tempo.

O fator de refletividade apresenta oscilações a medida que diminui de 0 para -2 dBZ durante o período amostral (Fig. 4.65), em correspondência à diminuição da taxa de precipitação do início para o final do período.

A Figura 4.66 permite a comparação das variações das taxas de precipitação observada pelo pluviômetro (e fornecida como parâmetro de entrada) (OBS), a estimativa por integração da distribuição empírica (DSD) e a estimativa pela relação Z-R da distribuição de Marshall-Palmer (M-P). As variações da taxa de precipitação obtidas da relação Z-R de Marshall-Palmer mostram-se sensíveis à evolução temporal do diâmetro médio D_4 usado na estimativa de $Z (\approx D_4^6)$.

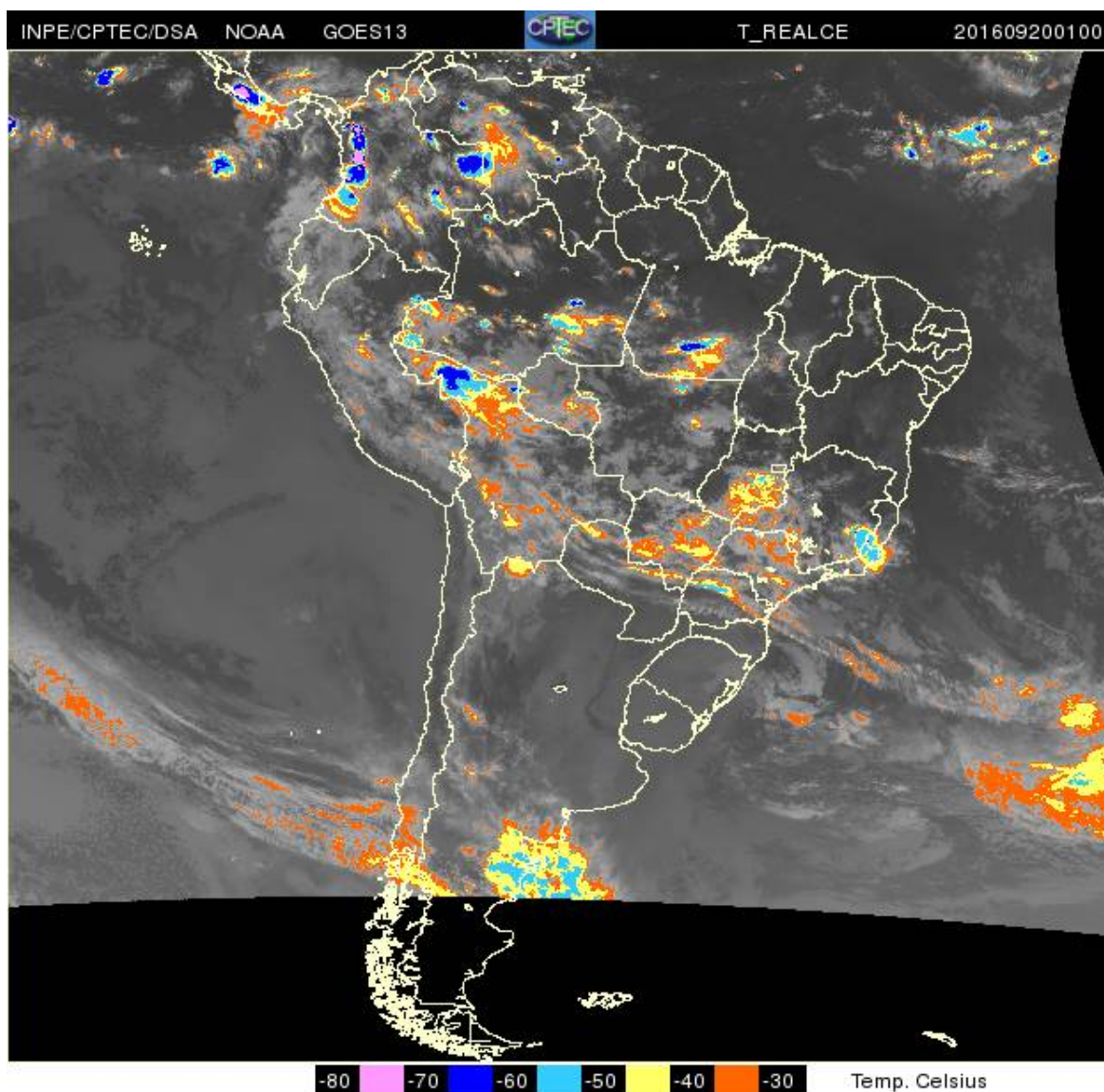


Figura 4.58: Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 20/09/2016 à 1h (UTC) [EXP05]. Fonte: NASA e INPE/BR.

EXP06

EXP06 designa a análise da DSD para a chuva com taxa de precipitação de $20,0 \text{ mm h}^{-1}$ ocorrida na noite no dia 26/09/2016. Um registro de áudio de duração de 5min foi iniciado às 21h50min (TL), produzindo um registro (filtrado) de duração de 5min.

Análise sinóptica (EXP06)

A carta sinóptica para o dia 26/09/2016 às 12h UTC mostra que o RJ encontra-se em uma condição sinóptica pós-frontal (Fig. 4.67). O escoamento superficial é de Sudoeste, favorável à advecção do ar úmido e frio da massa de subtropical marítima sobre os morros da cidade do Rio de Janeiro e escarpas voltadas para Sul da Serra do Mar mais ao Norte. Esta também é uma condição é favorável a formação de precipitação estratiforme sobre a cidade do Rio de Janeiro, em condição pós-frontal, principalmente por estrato-cúmulos e à nimbo-estratos.

A origem da precipitação pode ser nuvens quentes associadas à área em tom de cinza [intermediário] encontrada sobre a faixa litorânea do Estado do RJ na imagem de satélite do dia 27/09/2016 da 1h (UTC), i.e., 22h (TL) (Fig. 4.68).

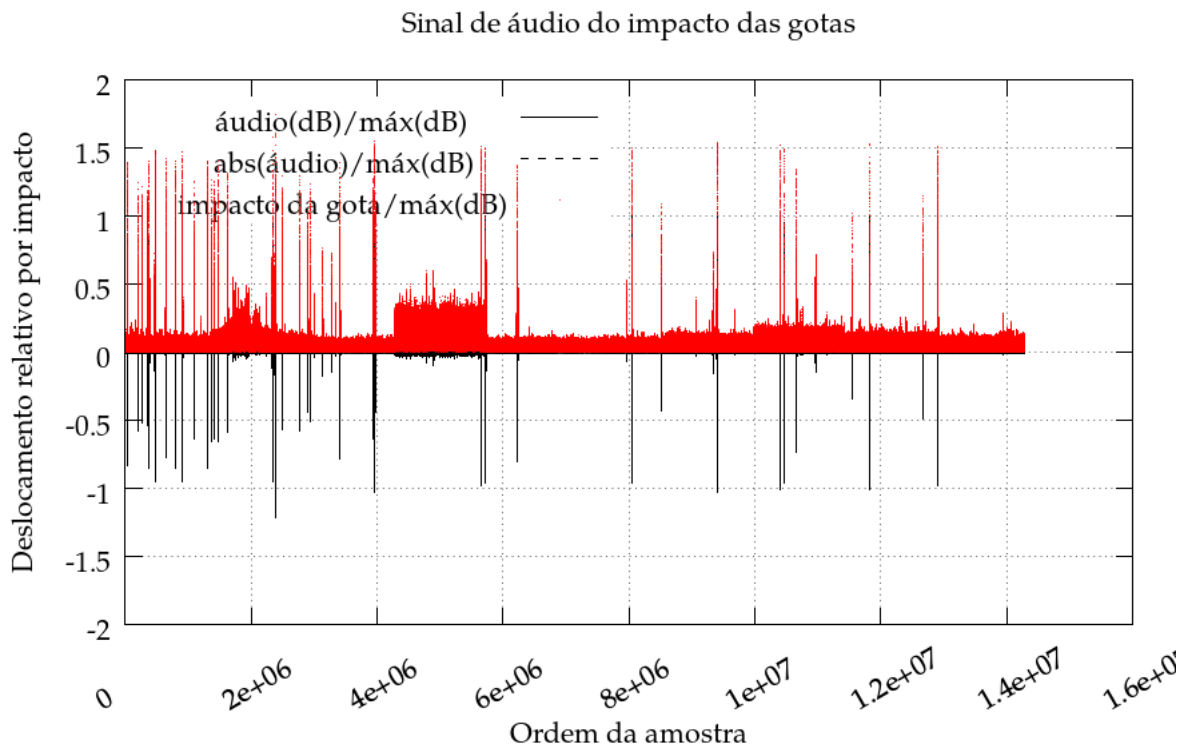


Figura 4.59: Sinal de áudio correspondente ao impacto de gotas de um chuveiro observado com duração de 10min (EXP05).

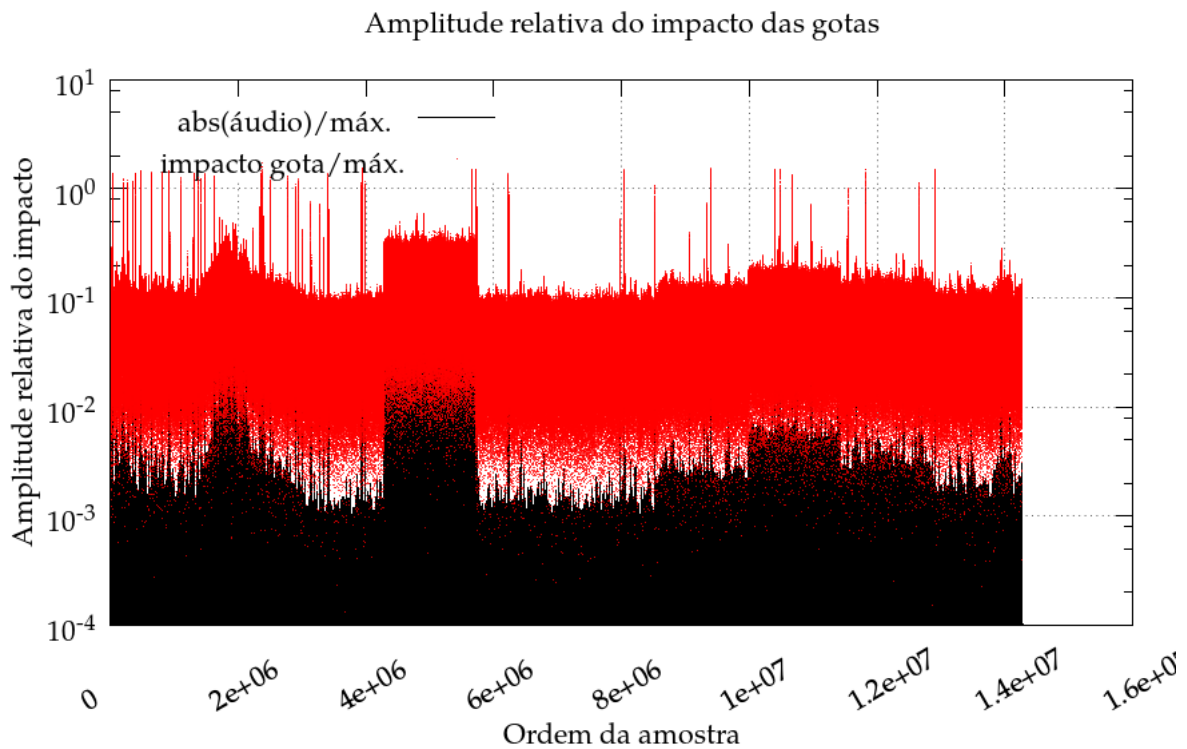


Figura 4.60: Amplitude do sinal de áudio do impacto de gotas de um chuveiro observado com duração de 10min (EXP05).

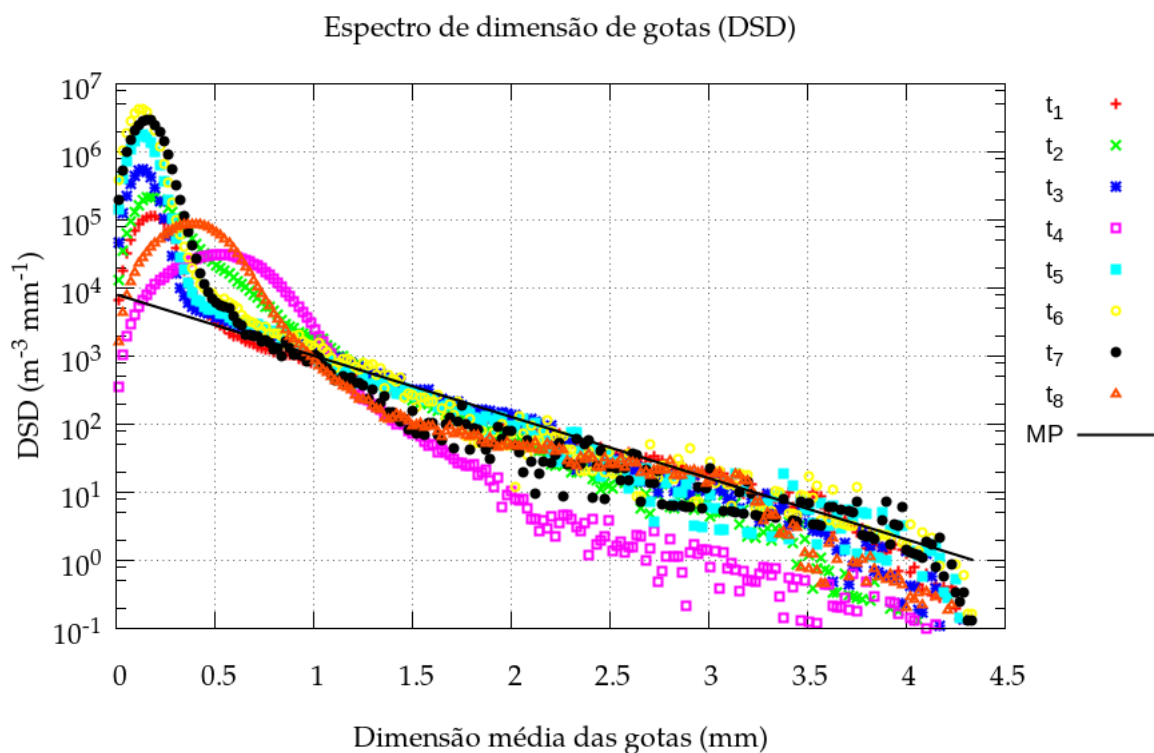


Figura 4.61: Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP05).

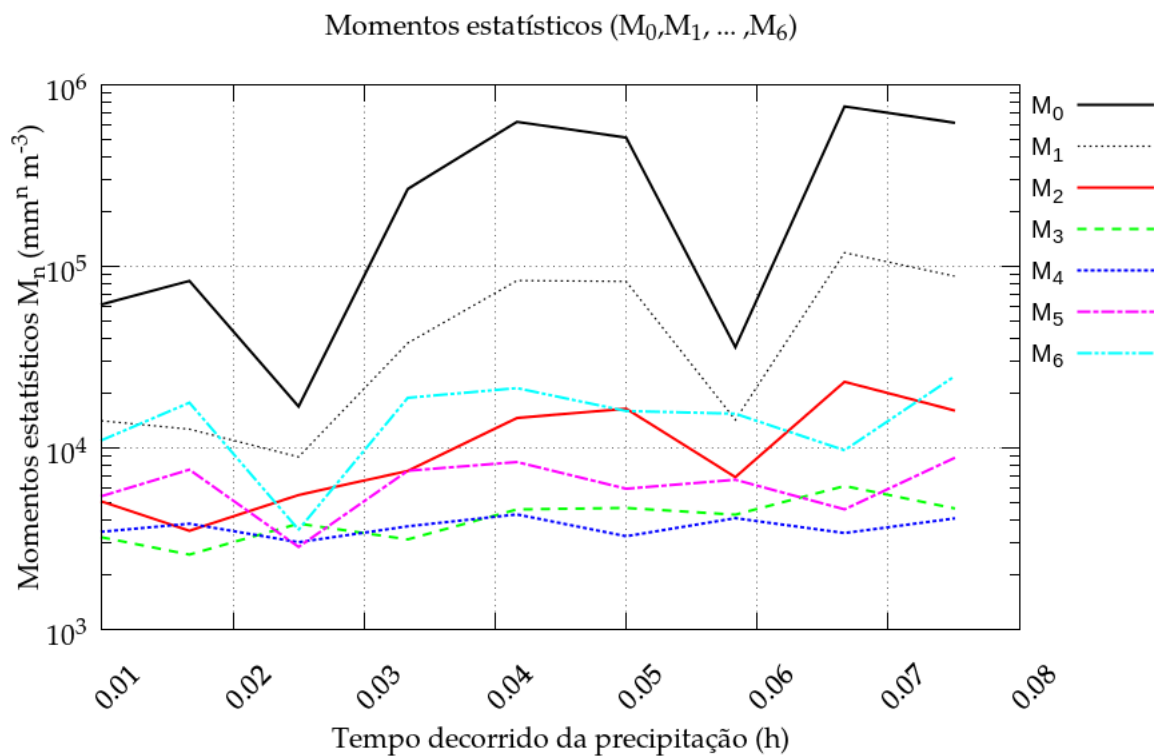


Figura 4.62: Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP05)

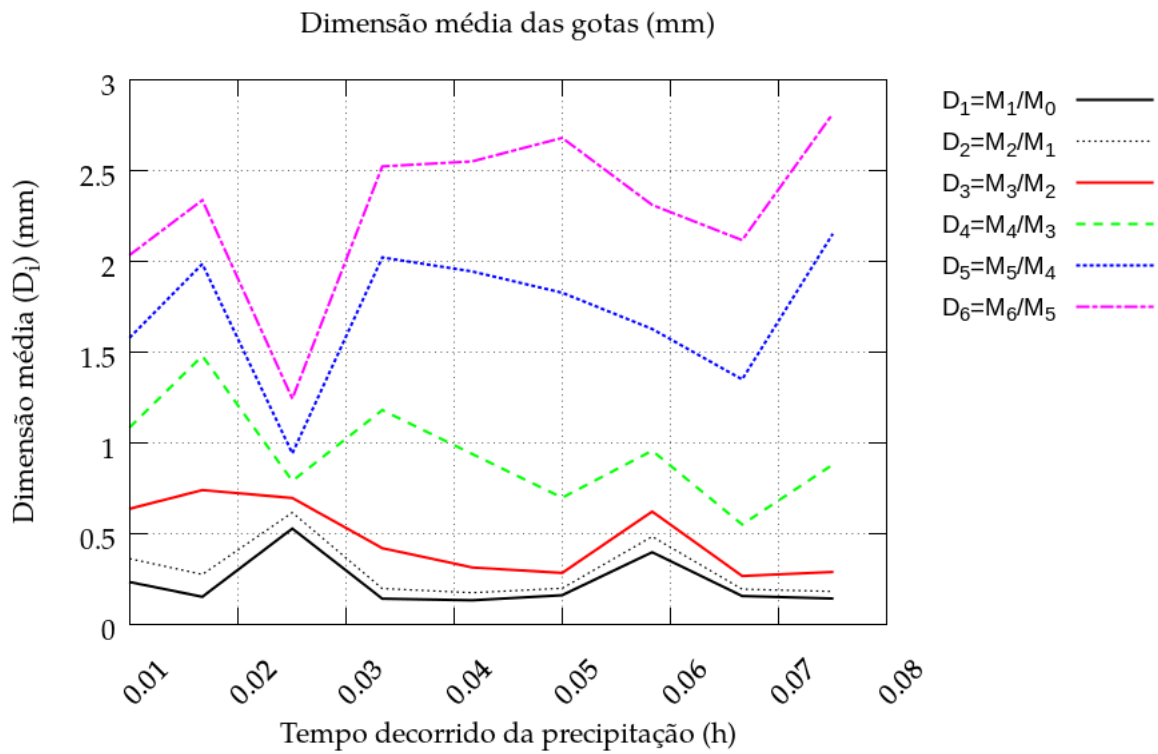


Figura 4.63: Idem à Fig. 4.62 para estimativas de diâmetro médio de gota.

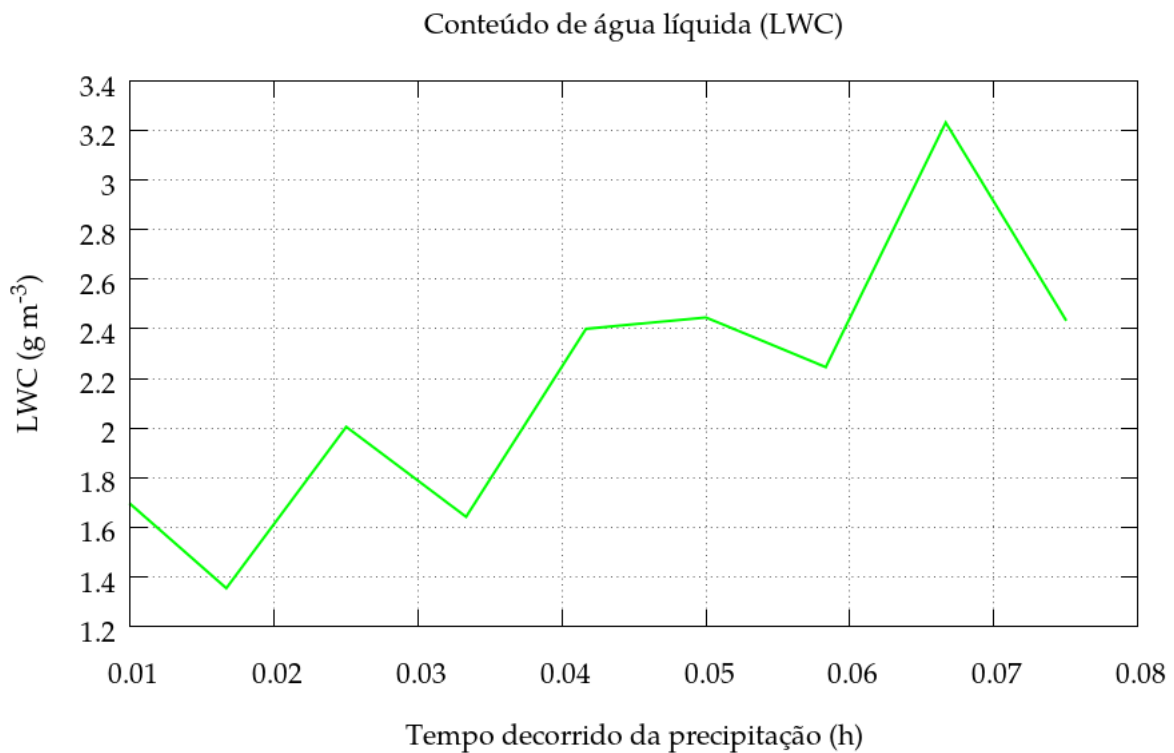


Figura 4.64: Idem à Fig. 4.62 para o conteúdo de água líquida (LWC).

Análise do arquivo de áudio (EXP06)

A análise do arquivo de áudio (EXP06) considera um período filtrado de 5min, contendo um número de 10 subamostras de 30s sequenciais.

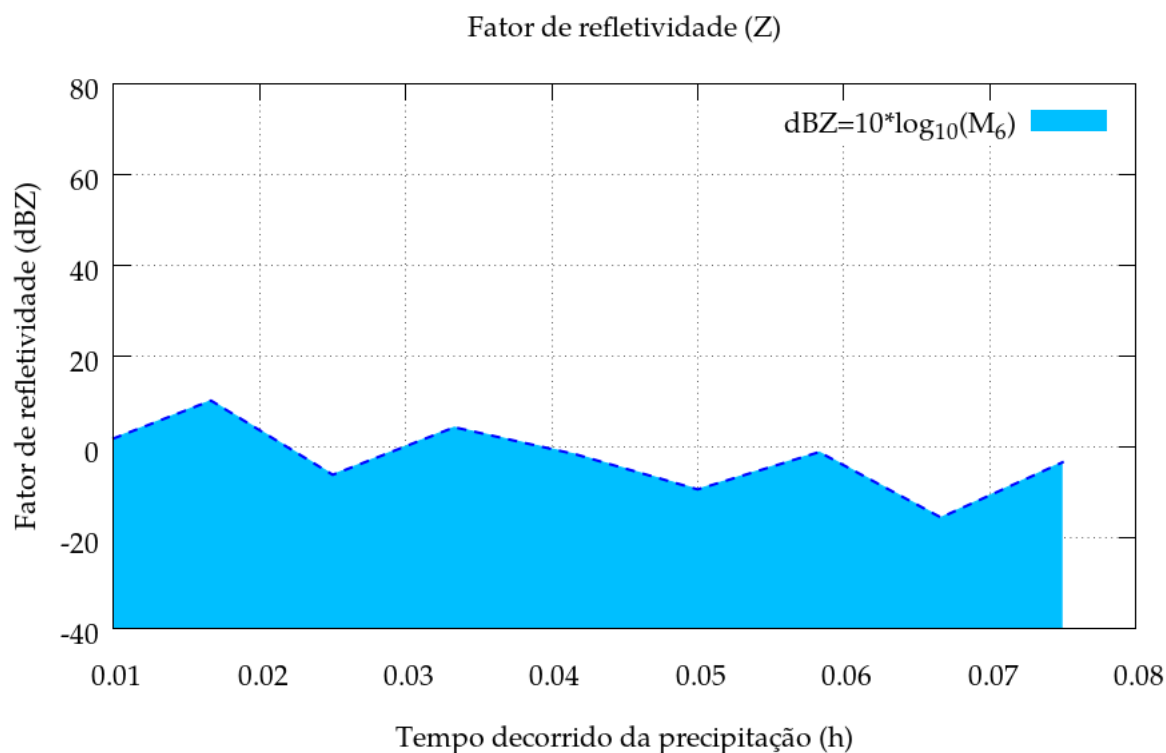


Figura 4.65: Idem à Fig. 4.62 para o fator de refletividade (dBZ).

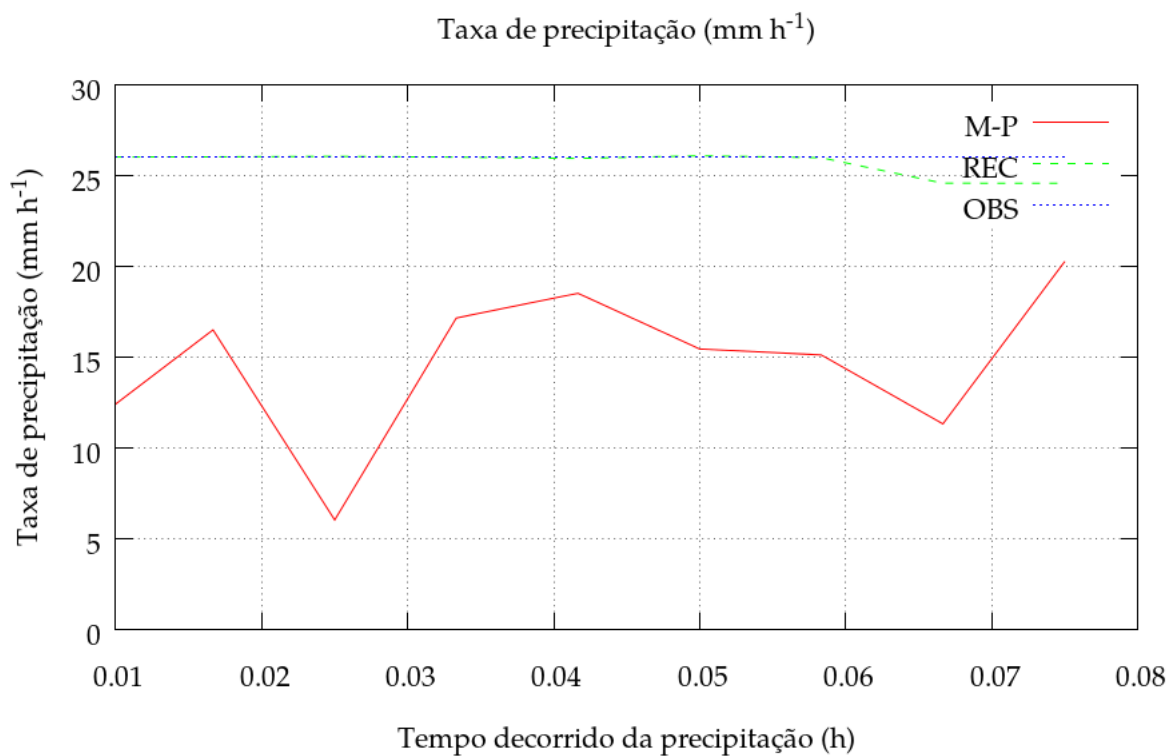


Figura 4.66: Idem à Fig. 4.62 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).

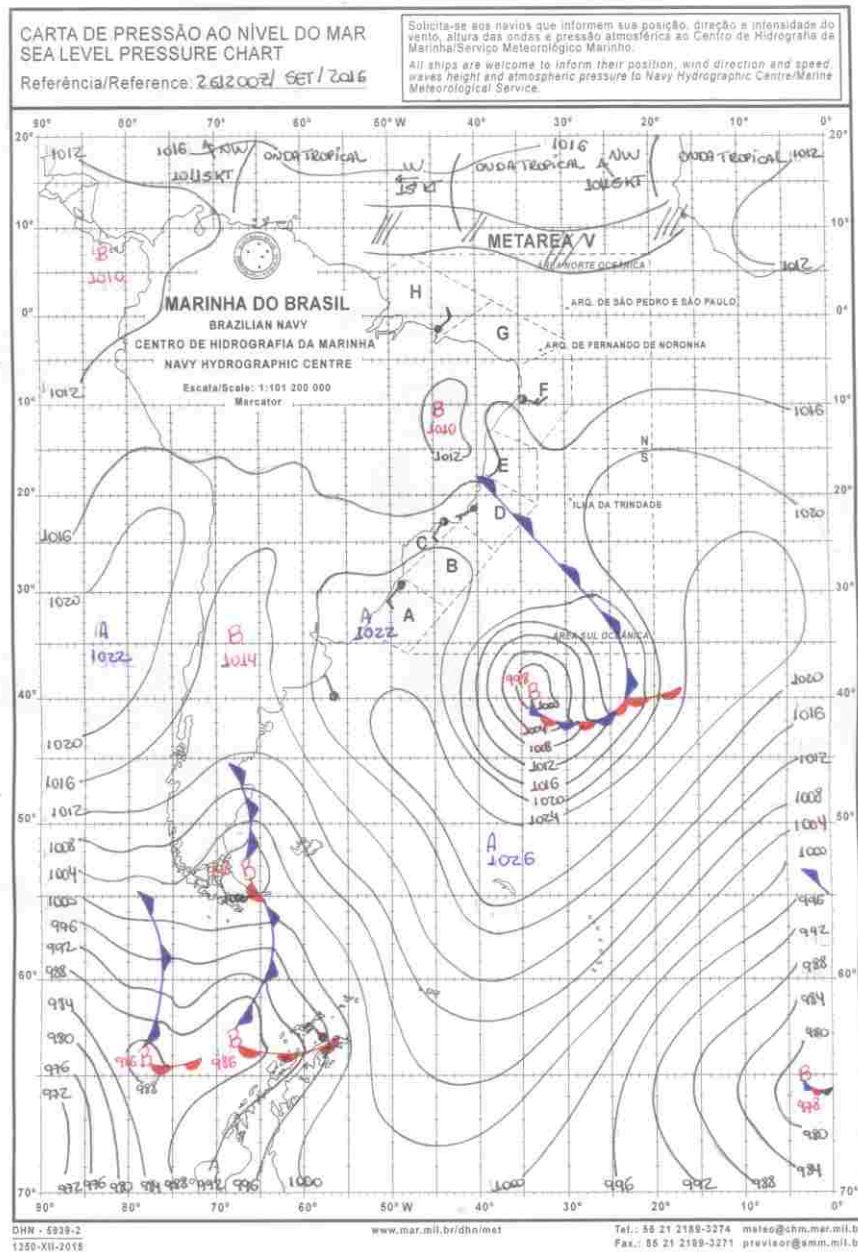


Figura 4.67: Carta das 12h UTC de 26/09/2016 do experimento EXP06. Fonte: REDEMET/BR.

A figura 4.69 mostra o sinal de áudio (filtrado) do EXP06 na forma de impulsos positivos e negativos da onda sonora, produzidos pelos impactos das gotas de precipitação.

Neste gráfico foram sobrepostas as amplitudes positivas associadas à identificação de gotas (pontos). Como pode ser observado, o número de gotas identificadas é muito grande. Considerou-se que uma gota possa ser identificada quando ocorre uma variação positiva da intensidade do sinal (acima de um limiar especificado bem acima do nível de ruído residual) entre registros sucessivos.

Note-se que o sinal da oscilação original do áudio (i.e., a vibração sonora) foi normalizada pela divisão do valor em decibéis pelo valor máximo encontrado na série amostral. As amplitudes de áudio são apresentadas em escala logarítmica relativas de intensidade, i.e., adimensionais $\log_{10}[dB/\max(dB)]$.

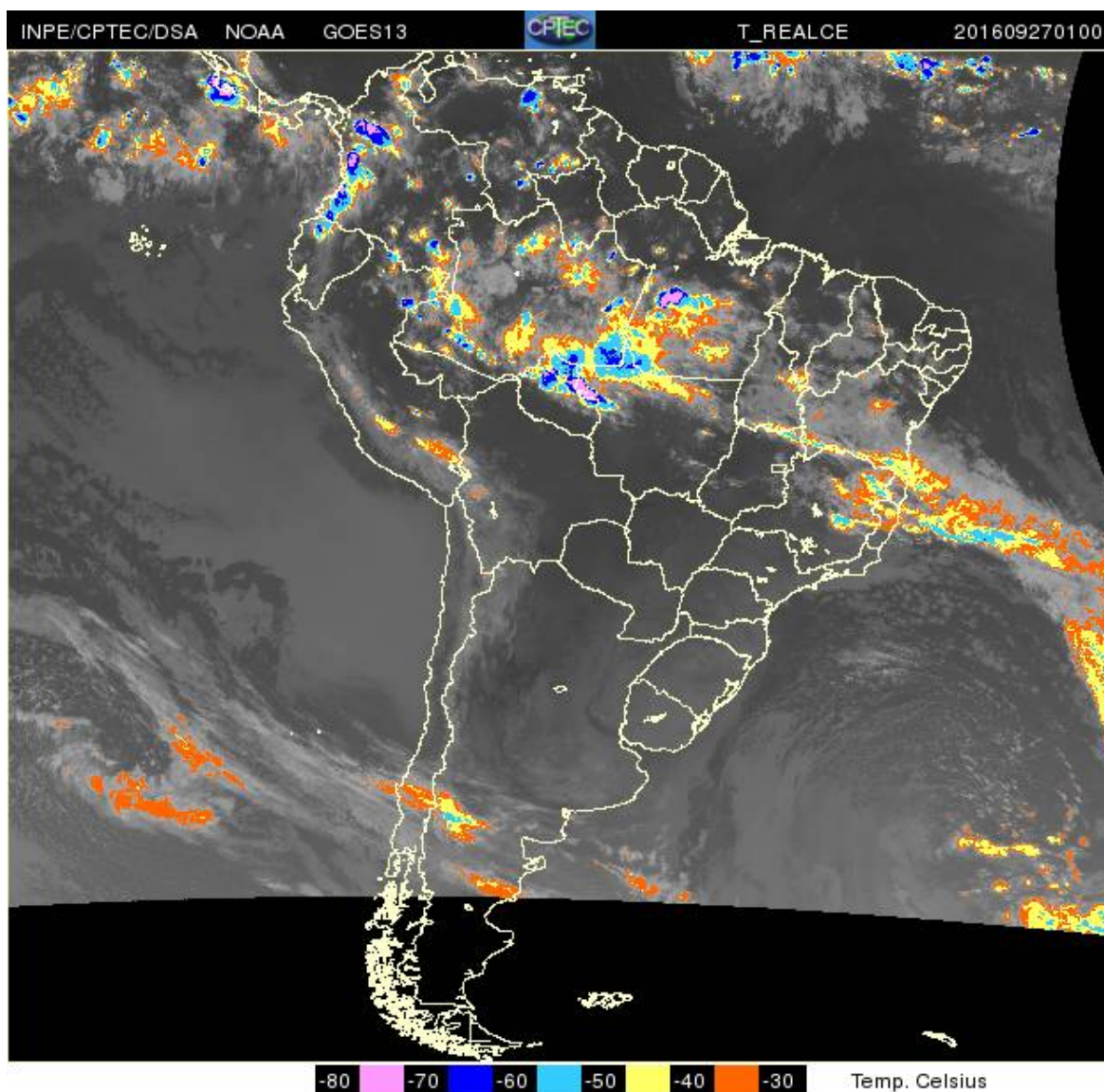


Figura 4.68: Imagem de satélite no canal infravermelho termal (realçada) para o dia 27/09/2016 à 1h (UTC) [EXP06]. Fonte: NASA e INPE/BR.

A figura 4.70 apresenta o módulo do valor normalizado do áudio, sobreposto à amplitude relativa dos diâmetros de gotas, i.e., $\log_{10}[D/\max(D)]$. Note-se a diminuição da amplitude do impacto de gotas com o tempo de registro. O EXP06 apresenta semelhanças em relação ao EXP04, no qual também ocorre uma diminuição da intensidade de áudio do impacto no período amostral. A persistência da chuva durante todo o período amostral é favorável à obtenção de uma distribuição DSD única para todo o período, i.e., é razoável obter-se uma DSD média. Em outras palavras, a condição é mais favorável à obtenção de DSD similares em cada subamostra. Neste caso, obtém-se um menor desvio padrão considerada à semelhança entre os DSD das subamostras no EXP06 e EXP04.

Nota-se a semelhança geral das DSD obtidas em diferentes subamostras ao longo da série temporal (Fig. 4.71). Isto indica a origem similar da distribuição de gotas associadas à chuva do EXP06, i.e., indica o caráter uniforme dos mecanismos de produção das gotas, dos pontos de vista físico e estatístico.

A distribuição de momentos estatístico pode ser observada na Figura 4.72. Torna-se patente neste caso que o valor de alguns momentos derivam e curvam-se para que o ajuste produza a taxa

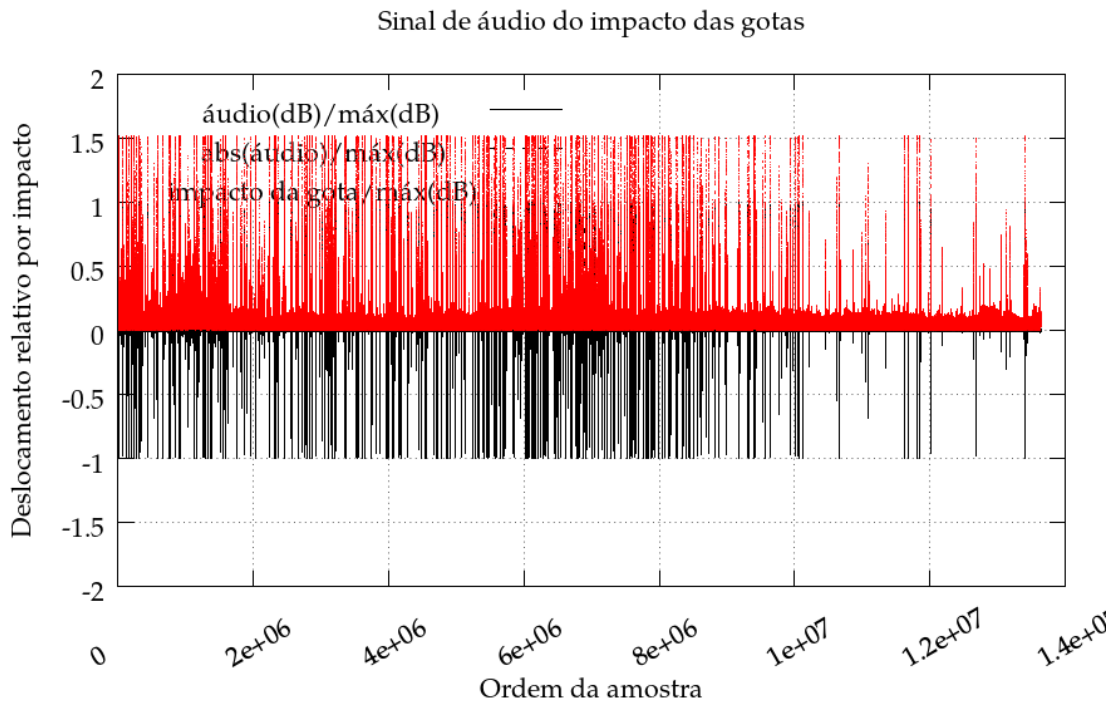


Figura 4.69: Sinal de áudio normalizado referente ao impacto das gotas de chuva observada no dia 26/09/2016 às 21h50min (EXP06). As amplitudes associadas à identificação de gotas está indicado pelos pontos que sobrepõe as oscilações do áudio.

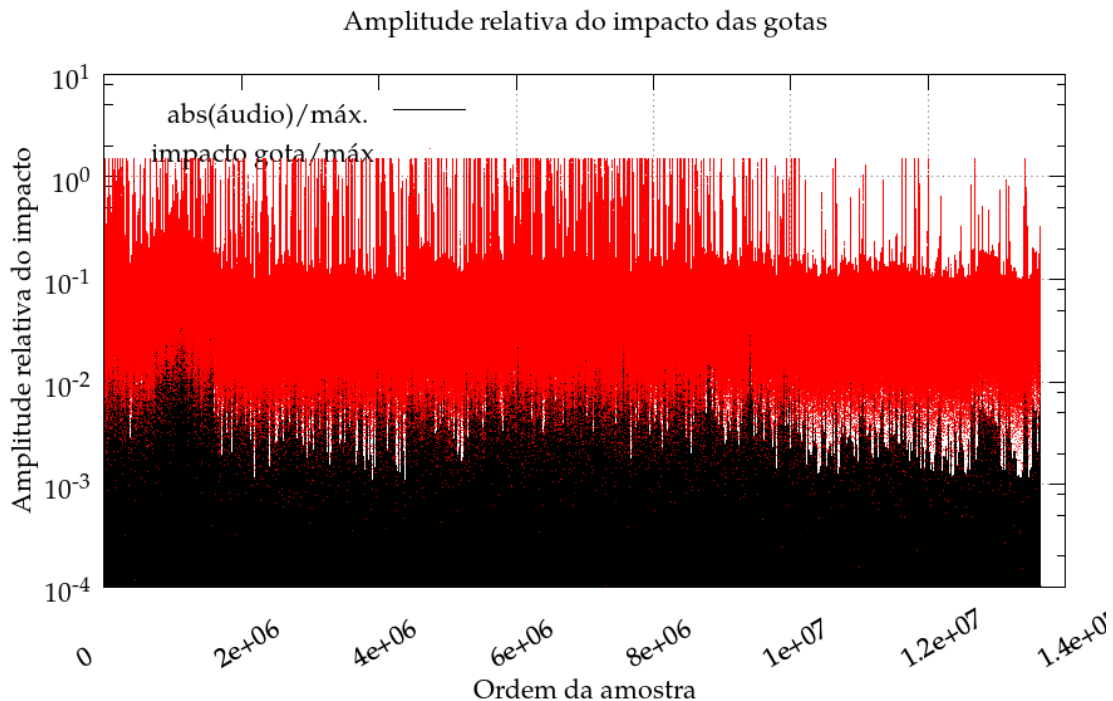


Figura 4.70: Amplitude absoluta do sinal de áudio normalizado referente ao impacto de gotas de chuva observada no dia 26/09/2016 às 21h50min (EXP06). As amplitudes associadas à identificação de gotas está indicado pelos pontos que sobrepõe as oscilações do áudio.

de precipitação invariante fornecida pelo usuário do aplicativo (namelist). O efeito da aplicação de uma taxa de precipitação única para todas as subamostras é gerar a curvatura dos momentos

estatísticos. Isto é razoável considerando-se um valor médio de DSD para todo o período. Mas pode ser impreciso para as estimativas de DSD das subamostras. Uma possível alternativa seria reestimar a taxa de precipitação à cada subamostra. Isto pode ser considerado em uma futura versão do aplicativo.

O EXP06 apresenta uma variação temporal das estimativas de diâmetros médios bem mais uniforme, consideradas às variações das amostras anteriores (Fig. 4.73).

O conteúdo de água líquida apresentou valores relativamente elevados entre $0,94$ e $1,54 \text{ g kg}^{-1}$ durante o período amostral, associados à taxa de precipitação média de 20 mm h^{-1} (Fig. 4.74).

Ao longo do período amostral o fator de refletividade do radar variou entre 15 e -2 dBZ (Fig. 4.75). Isto é um indício favorável à utilização da estimativa de D_4^6 para estimativa de Z aplicado à relação Z-R de Marshall-Palmer.

O ajuste da DSD foi mais uma vez eficaz em permitir a recuperação da taxa de precipitação fornecida pelo usuário a partir da integração dos momentos estatísticos (Fig. 4.76). A estimativa da taxa de precipitação obtida da relação Z-R subestimou o valor observado, como nas amostras anteriores. Isto pode ser entendido considerando a necessidade de ajuste local dos parâmetros da própria relação Z-R, como também por imprecisões metodológicas presentes no algoritmo de análise proposto. O fato de que os resultados mostram uma tendência sistemática do resultado da relação Z-R, provavelmente a questão de ajustar os parâmetros da relação Z-R pode ser indicada em aplicações futuras para a Cidade do Rio de Janeiro.

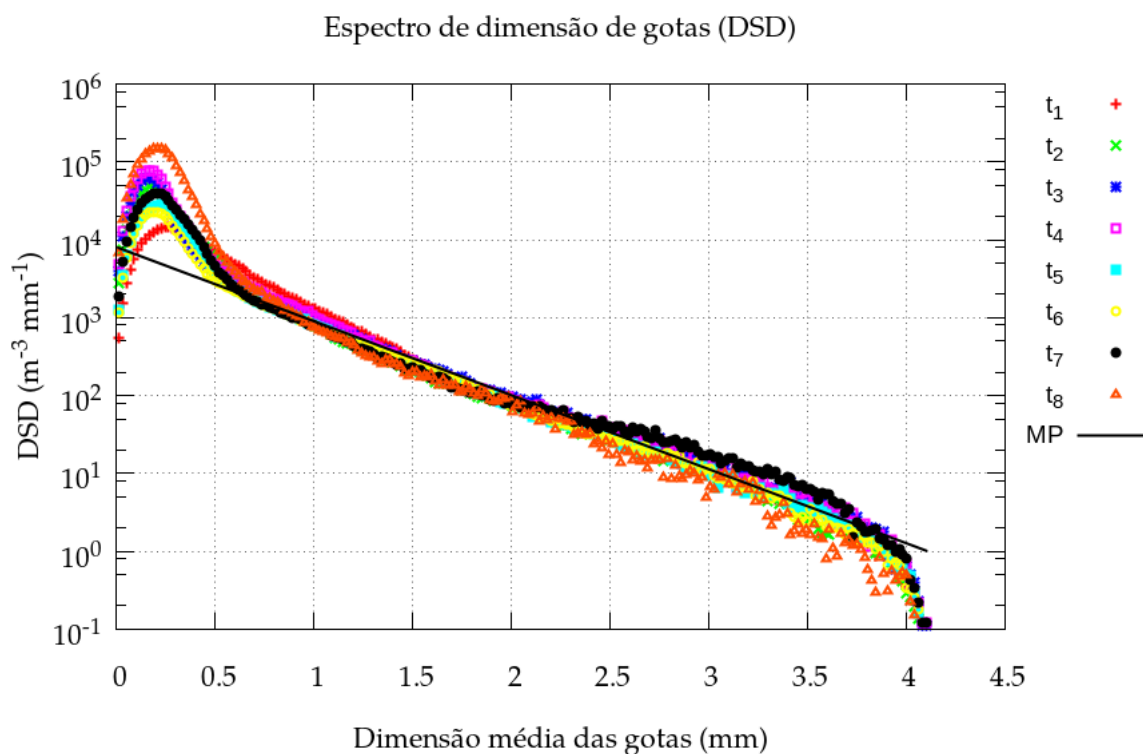


Figura 4.71: Evolução temporal da DSD para 8 amostras sequenciais ao longo da série temporal (EXP06).

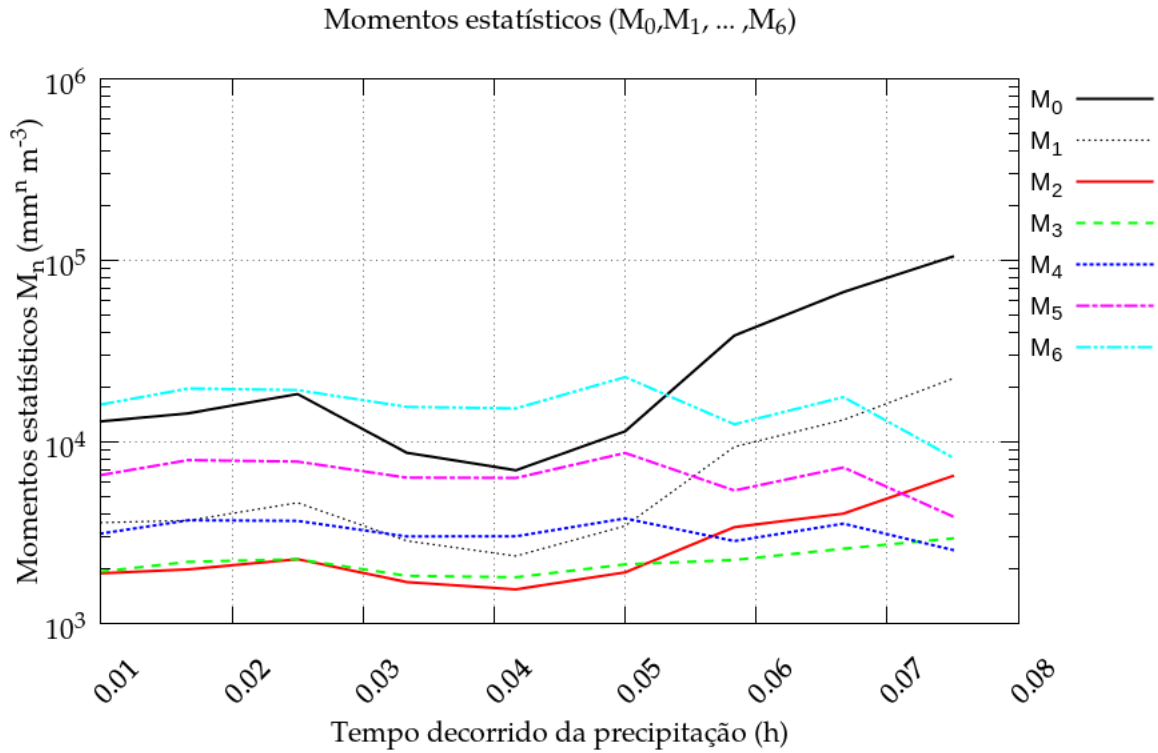


Figura 4.72: Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (EXP06)

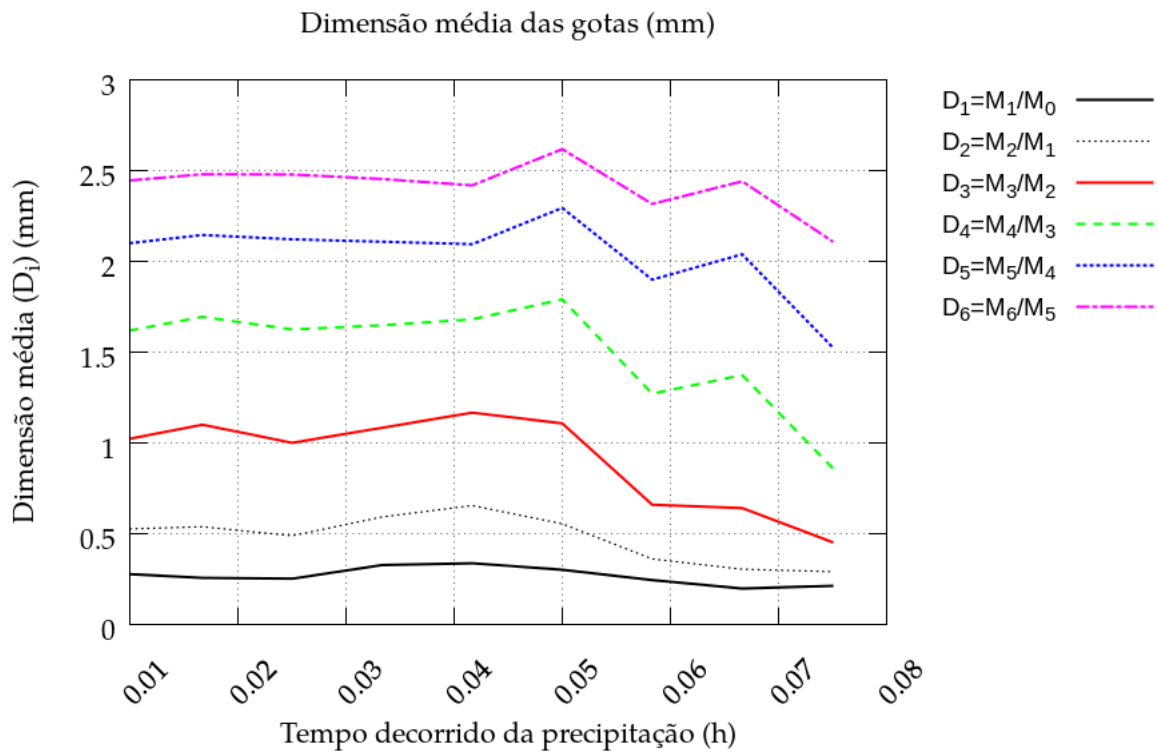


Figura 4.73: Idem à Fig. 4.72 para estimativas do diâmetro médio de gotas.

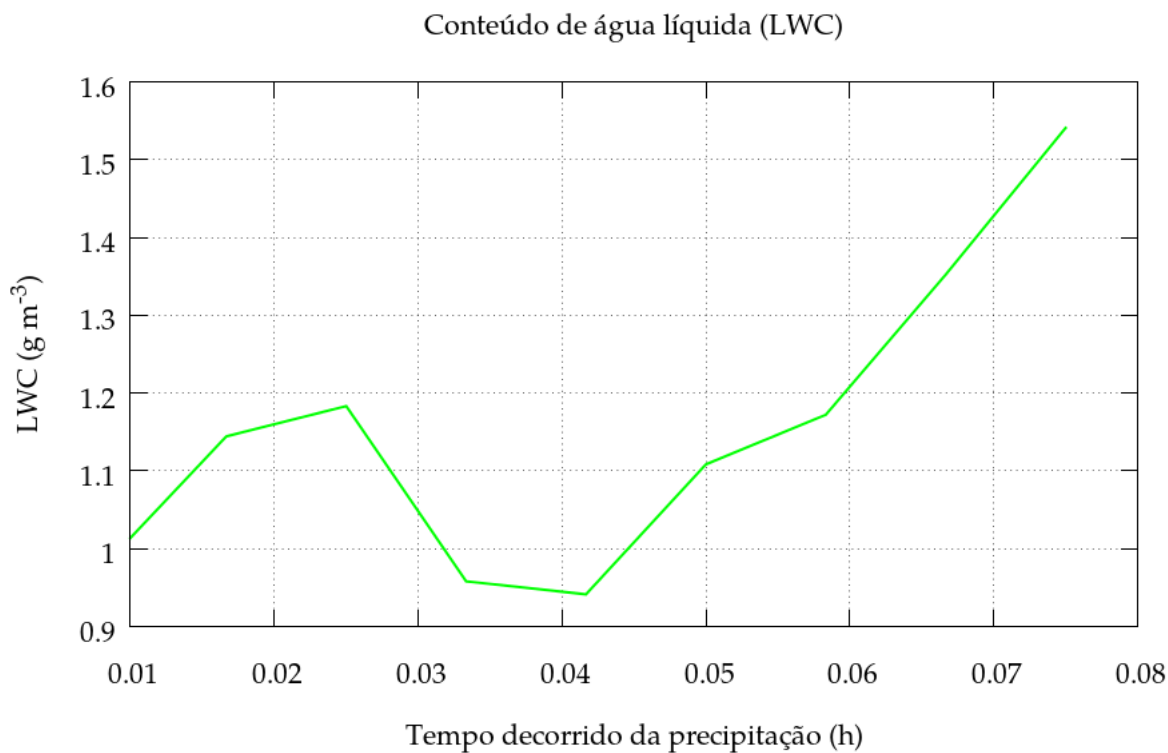


Figura 4.74: *Idem à Fig. 4.72 para o conteúdo de água líquida (LWC).*

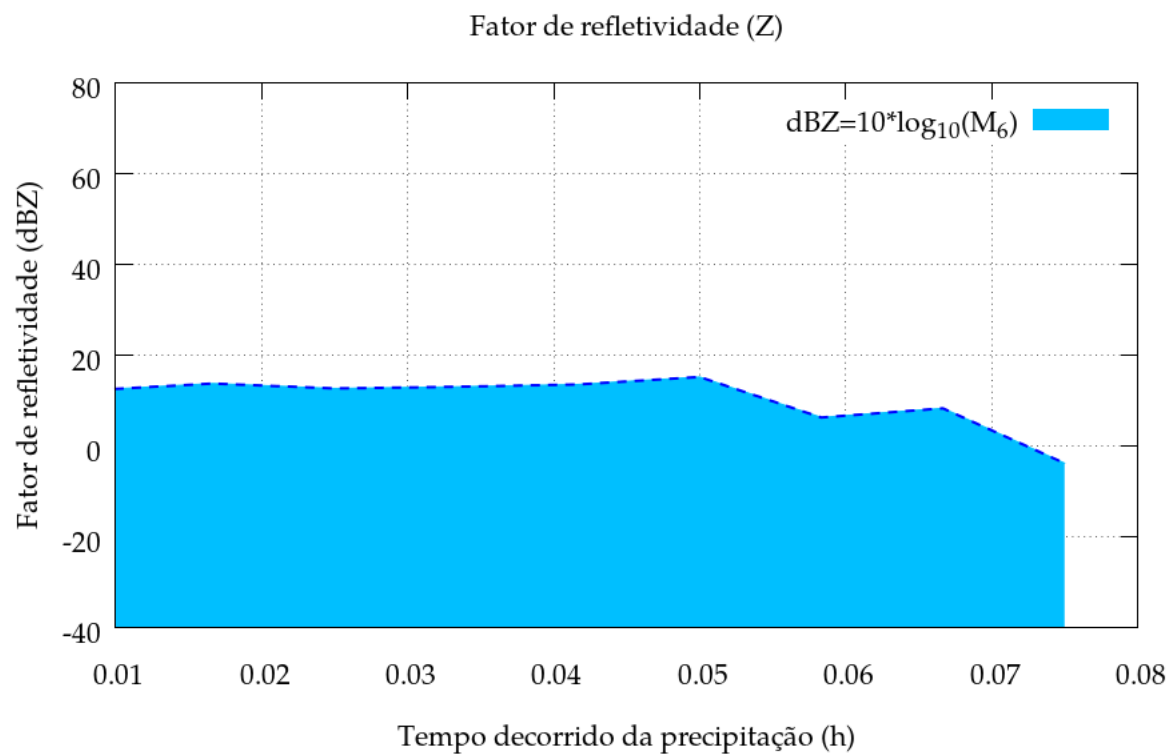


Figura 4.75: *Idem à Fig. 4.72 para o fator de refletividade (dBZ).*

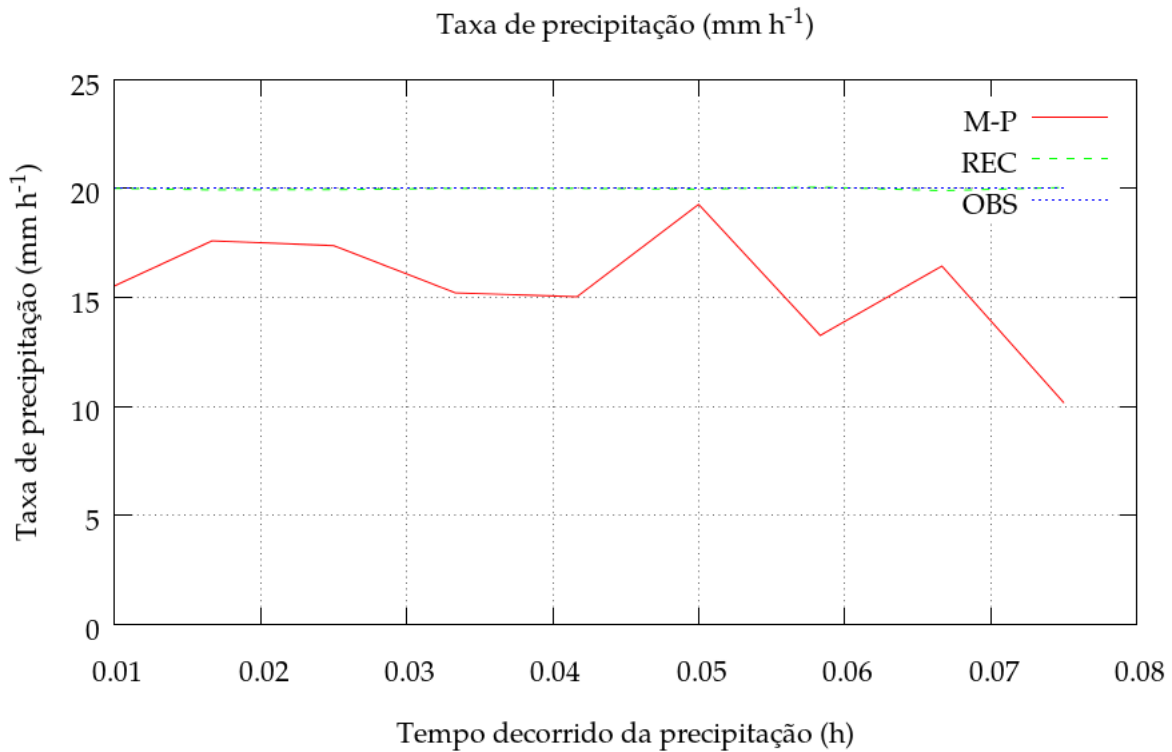


Figura 4.76: Idem à Fig. 4.72 para as taxas de precipitação: estimada a partir da relação Z-R de Marshall-Palmer (1948) (linha contínua), recuperada da DSD medida (REC) (linha tracejada) e estimada da rede de pluviômetros na área (OBS) (linha pontilhada).

4.5 Análise de sensibilidade à duração das subamostras

4.5.1 Simulação de chuva: duração total 600 s, 600 subamostras de 1 s

Nesta seção foram apresentados gráficos de análise disdrométrica de um chuva simulado.

O período total da simulação é de 600 s, i.e., 10min, que por sua vez foi subdividido em 600 subamostras de 1 s cada. A análise da DSD é feita para cada subamostra em separado. Supõe-se que a área do sensor do disdrometro sônico é suficientemente grande para garantir a coleta de uma amostra significativa de gotas a cada segundo, desde que o BAUD é da ordem de milhares de amostras de áudio por segundo, tipicamente 8000.

O gráfico da figura 4.77 mostra a amplitude relativa do sinal de áudio de impacto das gotas em relação ao índice de posição ao longo da amostra. O número total de registros (binários) é de 40597 valores simulados, seguindo a distribuição de tipo exponencial de Marshall-Palmer.

Considerou-se o modelo teórico de f.d.p. exponencial proposto por Marshall-Palmer normalizado unicamente pelo momento de ordem zero (M_0) como modelo da DSD simulada.

A simulação da DSD considerou a aplicação do método de Monte Carlo e do método gerador de números pseudo-aleatórios da linguagem fortran (comando *rand()*). Um algoritmo de uma f.d.p. exponencial foi adaptada para corresponder à distribuição inversa do modelo de Marshall-Palmer, escolhendo-se por chance a densidade de probabilidade associada ao valor (também escolhido por chance) da dimensão de gota (D) pertencente à distribuição.

A intensidade do impacto sobre a placa elástica horizontal foi considerada proporcional a potência de $5/2$ da dimensão da gota D simulada. Isto é consistente com a equação obtida pela equivalência entre a energia cinética da gota de diâmetro D e a energia elástica associada ao deslocamento da placa (x) devido ao impacto da gota. Isto é,

$$0.5 m v_t^2 = c_s x^2 \quad (4.2)$$

sendo $m = (\pi/6)\rho_w D^3$ a massa de uma gota de diâmetro D e $v_t \approx \kappa_v D$ uma aproximação linear da velocidade terminal. De forma consistente obtém-se a seguinte relação entre x e D ,

$$x = \sqrt{\frac{\rho_w c_s^2}{12\kappa_v}} D^{5/2} \quad \text{ou} \quad D = \left(\frac{12\kappa_v}{\rho_w c_s^2}\right)^{1/5} x^{2/5} \quad (4.3)$$

O gráfico 4.78 mostra a amplitude (i.e., o valor absoluto) do áudio do impacto das gotas simuladas, ao longo do período de amostragem, correspondente à figura 4.77.

O gráfico 4.79 mostra a DSD obtida, em unidades de $(m^{-3} mm^{-1})$, em função do diâmetro das gotas, D em (mm) , para este chuvisco simulado. Nota-se primeiro a semelhança geral entre a DSD empírica e a DSD teórico de M-P. Oito subconjuntos de pontos distintos (diferenciados por símbolos), correspondentes a oito subamostras sequenciais, também são mostrados ao longo do tempo de simulação. Não se nota, neste caso específico, diferenças significativas nas DSD obtidas em cada subamostra.

De forma mais geral, um modelo de distribuição Gama pode ser mais adequado para a representação da gama de precipitações (i.e, estratiformes e convectivas).

A evolução temporal dos momentos estatísticos de ordem zero a seis, em função do tempo decorrido (h) desde o início para o chuvisco simulado, pode ser examinada na figura 4.80. Como esperado para uma simulação teórica, os momentos estatísticos apresentam valores crescentes com sua própria ordem. Ao mesmo tempo, a razão entre os diferentes momentos mostra-se invariante em primeira aproximação, ao longo do período de simulação.

O gráfico da figura 4.81 mostra a dimensão média das gotas, em (mm) , em função do tempo decorrido desde o início da simulação. As estimativas do diâmetro médio provêm da razão inversa entre momentos sequenciais, e.g., a razão $D_6 = M_6/M_5$ fornece uma estimativa da dimensão média das gotas, conhecida por *gota média do radar*, desde que pode ser associada ao parâmetro de refletividade do radar (Z). As estimativas de diâmetros de D_0 a D_5 são relativamente menores que D_6 .

O conteúdo de água líquida (LWC), em $(g m^{-3})$, é plotado em função do tempo decorrido desde o início do chuvisco simulado (Fig. 4.82). Variações locais de LWC estão presentes e podem ser associadas às variações de muito curto período do impacto das gotas simuladas, que podem ser consideradas flutuações turbulentas. O chuvisco foi simulado para uma taxa de precipitação média de $2,2 mm h^{-1}$.

A figura 4.83 apresenta o fator de refletividade do radar (Z) associado, em função do tempo decorrido desde o início da simulação. Notam-se variações de pequena escala (flutuações) em torno do valor médio de 10 dBZ, ao longo de todo período simulado.

A taxa de precipitação recuperada em função do tempo é mostrada na Figura 4.84. Flutuações turbulentas são observadas ao longo do tempo de simulação, tanto para o valor recuperado pela integração dos momentos estatísticos (REC) quanto para o valor recuperado com a relação Z-R (M-P). Considera-se que as subestimativas do valor REC em relação à taxa de precipitação inicial

(OBS) ocorre devido à curta duração da subamostras utilizadas, igual a 1 s, neste exemplo.

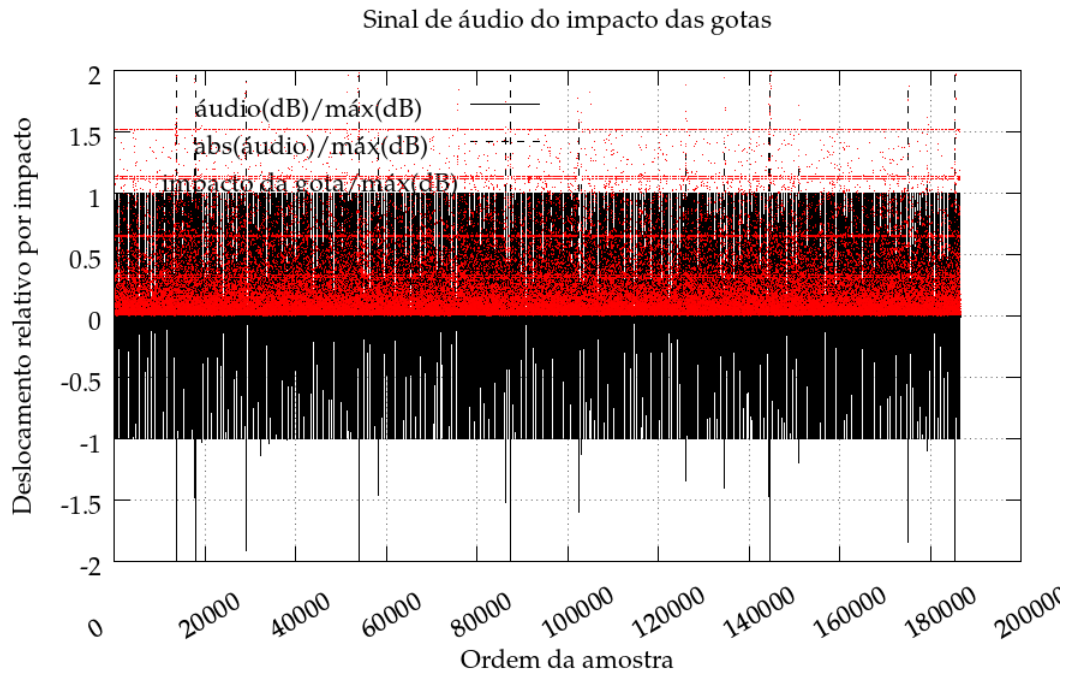


Figura 4.77: Sinal de áudio gerado pelo impacto de gotas simuladas para um chuveiro (SIM01).

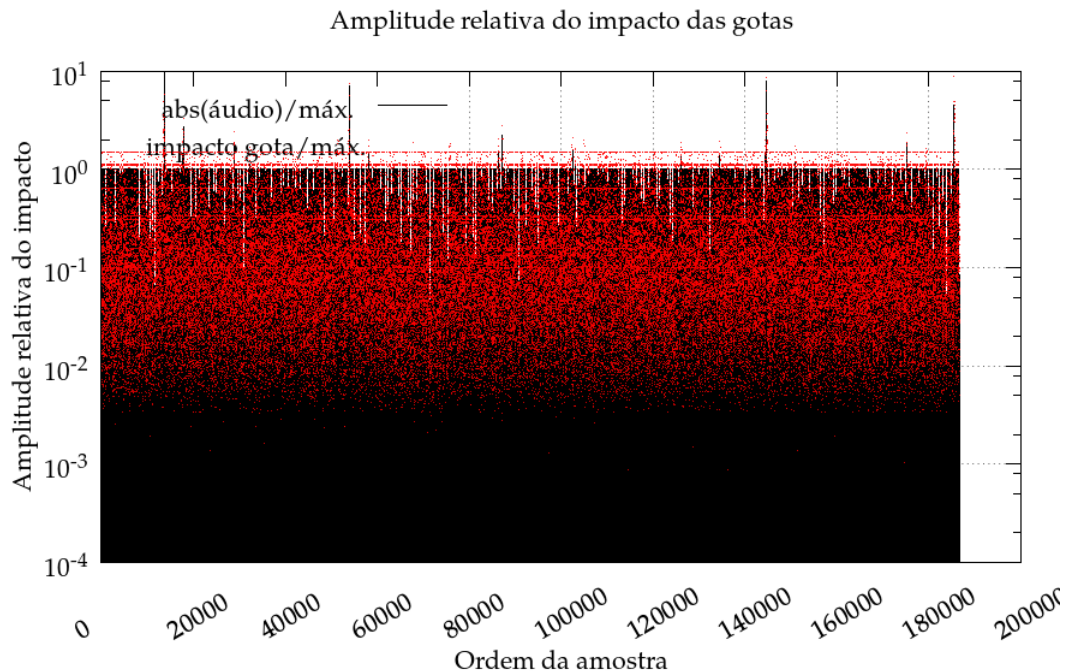


Figura 4.78: Amplitude absoluta do sinal de áudio do impacto das gotas de um chuveiro simulado (SIM01).

4.5.2 Simulação de chuveiro: duração total 600 s, 10 subamostras de 60s (SIM02)

Nesta seção serão apresentados os resultados de análise para o mesmo chuveiro simulado em SIM01. Portanto, o período simulado é de 10min, supostamente entre 10h5min às 11h05min, cor-

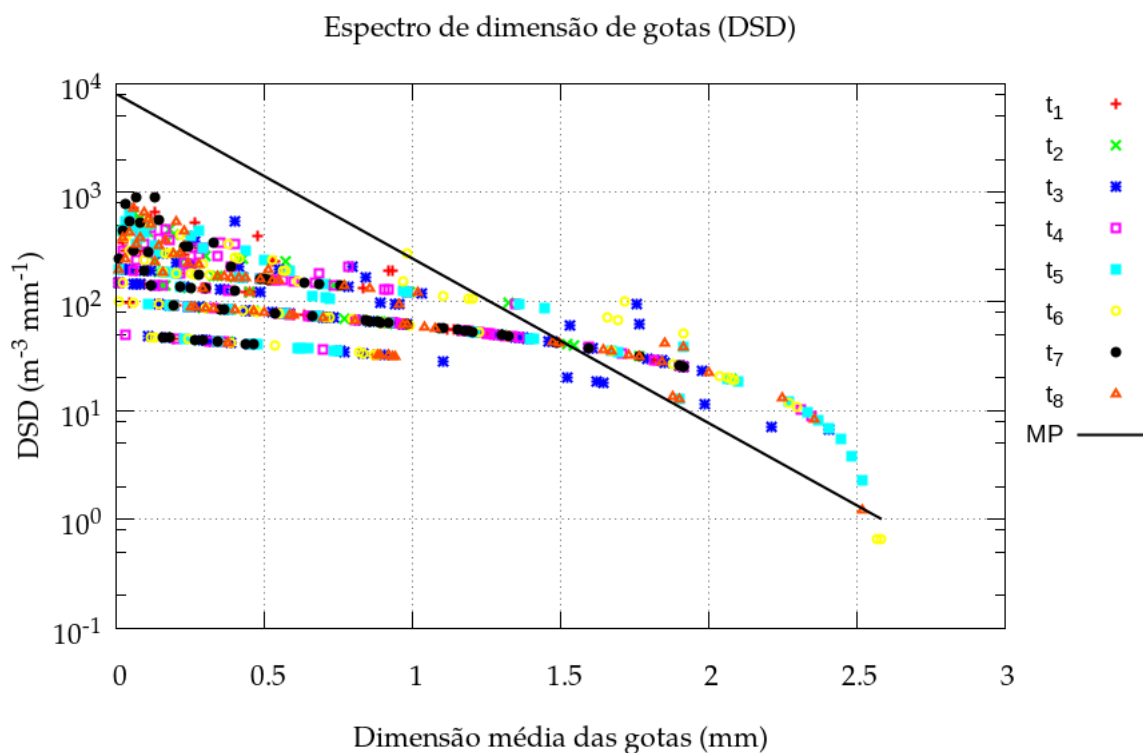


Figura 4.79: Distribuição de diâmetros de gotas DSD para o chuveiro simulado em função do tempo decorrido da simulação, para 8 subamostras de 60s (SIM01).

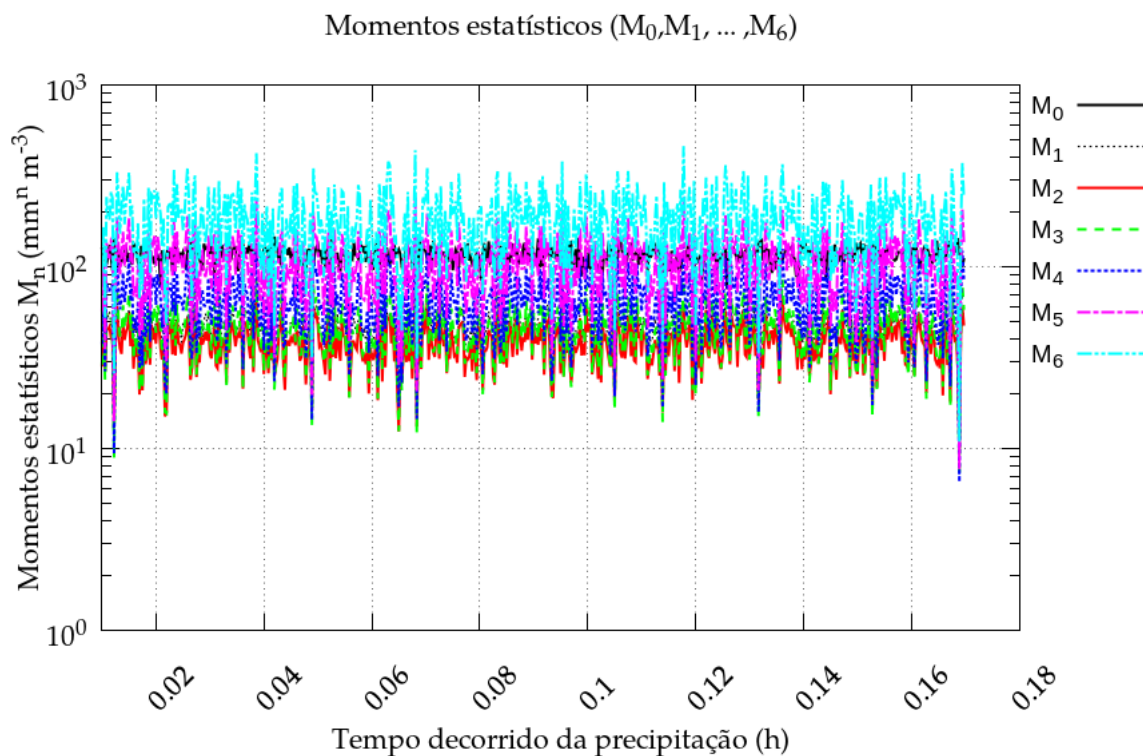


Figura 4.80: Evolução temporal dos momentos estatísticos em função do tempo decorrido em décimos de hora (SIM01)

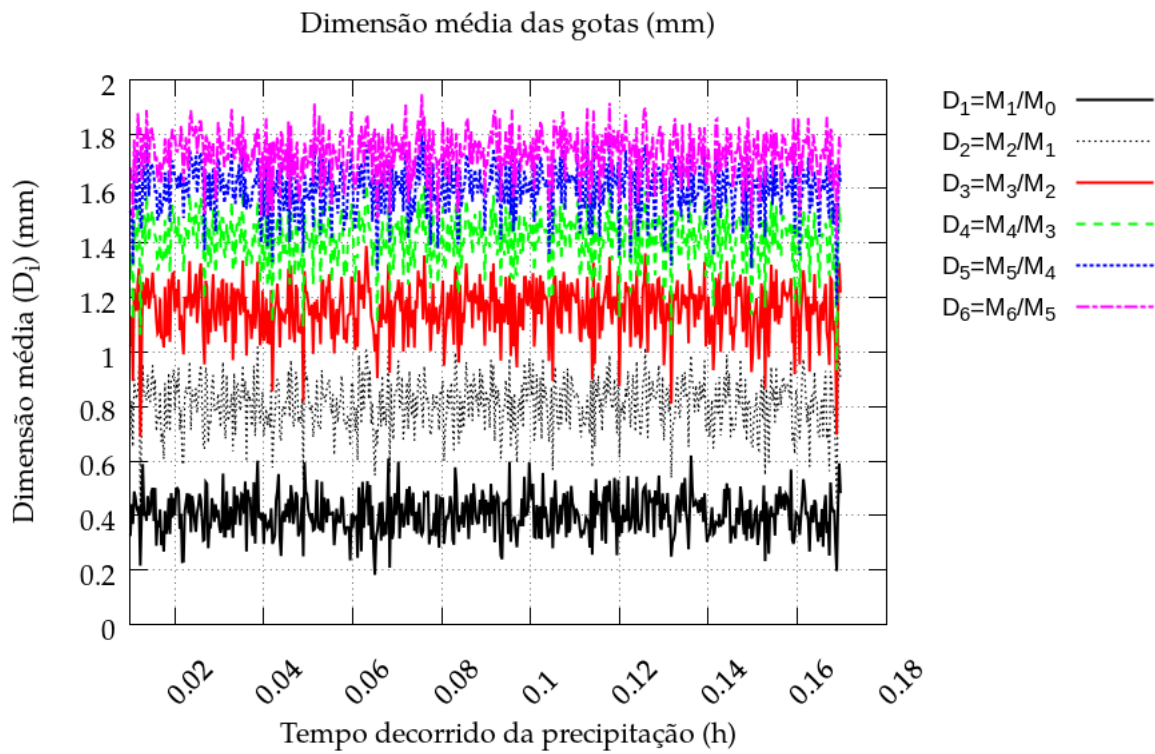


Figura 4.81: *Idem Fig. 4.80 para estimativas da dimensão média das gotas.*

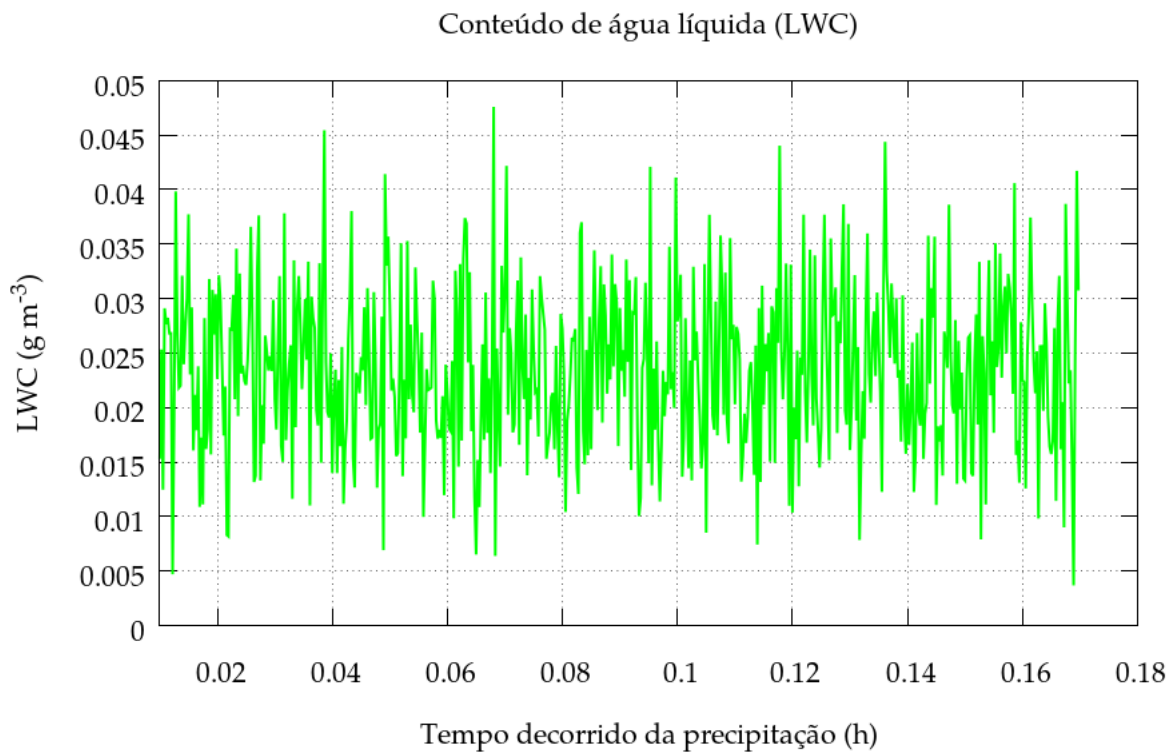


Figura 4.82: *Idem Fig. 4.80 para o conteúdo de água líquida (LWC).*

respondente ao chuveiro observado no dia 18/05/2016.

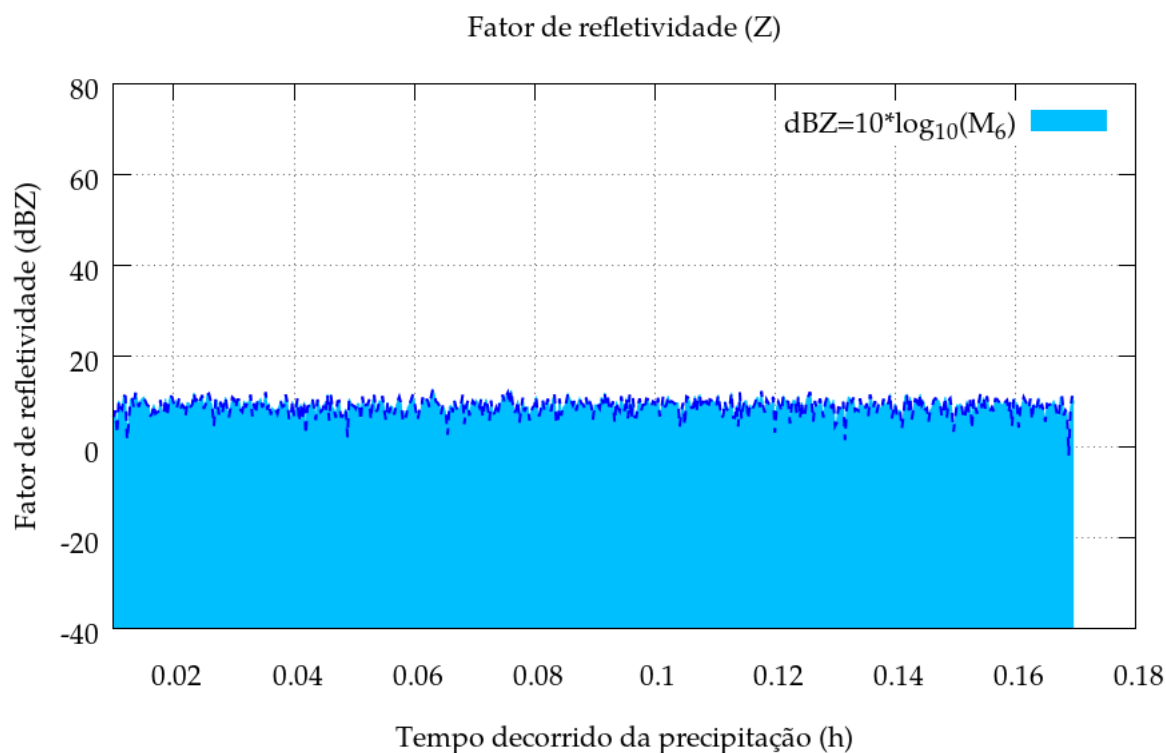


Figura 4.83: *Idem Fig. 4.80 para o fator de refletividade (Z).*

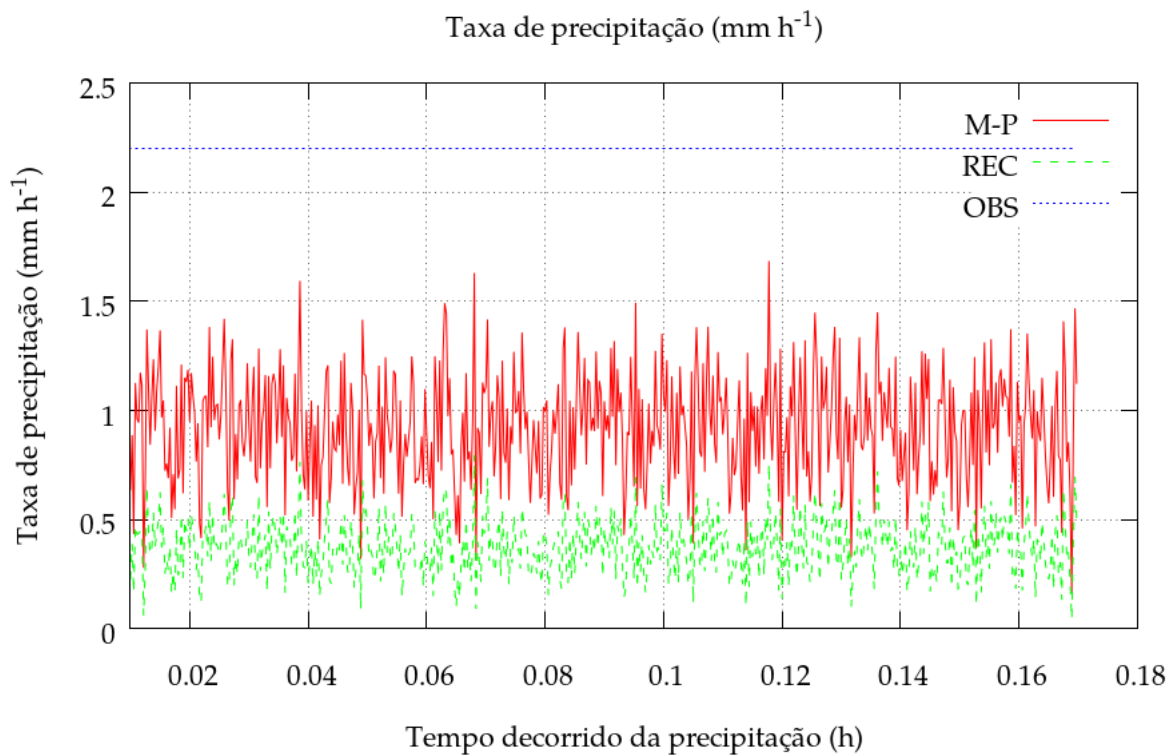


Figura 4.84: *Evolução temporal da taxa de precipitação recuperada (REC) por integração da DSD, em unidades (mm h^{-1}), plotada desde o início da simulação. Na legenda, OBS representa a taxa de precipitação de referência, igual a $2,2 \text{ mm h}^{-1}$ (linha pontilhada), e M-P obtida pela aplicação da relação Z-R de Marshall-Palmer (linha contínua) (SIM01).*

A diferença em relação à análise de SIM01 é a utilização de subamostras de 60s para subdividir a duração completa da amostra de 10min.

O gráfico da figura 4.85 mostra a amplitude relativa do sinal de áudio de impacto das gotas em relação ao índice de posição ao longo da amostra. O número total de registros (binários) é de 40597 valores simulados, seguindo a distribuição de tipo exponencial de Mashall-Palmer.

O gráfico 4.86 mostra a amplitude (i.e., o valor absoluto) do áudio do impacto simulado ao longo do período de amostragem, correspondente à figura 4.85.

A Fig. 4.87 mostra as DSD obtida para oito sucessivas amostras, em unidades de ($m^{-3} mm^{-1}$), como função da dimensão das gotas D , em (mm), obtidas para a análise do chuvisco simulado (SIM02), ao longo da série amostral. Mostra-se por comparação, a linha (reta) correspondente ao modelo exponencial de Marshall-Palmer (MP). É evidente o impacto da duração das subamostras sobre a DSD empírica obtida. Há uma semelhança geral da DSD empírica com o modelo teórico da DSD de M-P.

Cada DSD apresentada na Fig. 4.87 correspondem à análise de subamostras sucessivas de 60s. Neste caso, o modelo de DSD de M-P adere bem às DSDs empíricas, em primeira aproximação.

Para aplicações caracterizada por diferentes períodos de amostragem pode ser mais adequado um modelo de distribuição de densidade de probabilidade Gama (ainda da *família exponencial*).

O gráfico apresentado na figura 4.88 mostra os momentos estatísticos de ordem zero a seis, em função do tempo decorrido (h) desde o início da simulação do chuvisco. Os momentos estatísticos apresentam valores que aumentam com a ordem dos momentos. Já a razão inversa entre os diferentes momentos sucessivos mostra-se aproximadamente constante ao longo do período da simulação.

O gráfico da figura 4.89 apresenta as estimativas do diâmetro médio das gotas em função do tempo decorrido desde o início da simulação (SIM02). Uma maior uniformidade é obtida na SIM02 em relação àquela da SIM01, devido ao efeito do aumento da duração da subamostra.

Na figura 4.90, o conteúdo de água líquida (LWC), em ($g m^{-3}$), é apresentado em função do tempo decorrido do chuvisco simulado (SIM02). Observam-se apenas variações menores da LWC embora no gráfico as variações estejam bastante exageradas para permitir visualização. Note-se que o chuvisco simulado considerou uma taxa de precipitação média de $2,2 mm h^{-1}$. A LWC média simulada é aproximadamente $1,45 g kg^{-1}$.

Na figura 4.91 apresenta-se o fator de reletividade do radar (Z), em função do tempo decorrido do chuvisco simulado (SIM02). Observam-se variações menores ao longo da simulação em torno do valor 4 dBZ. A duração da subamostra de 60s pode ser importante para a reprodutibilidade da DSD proposta por M-P, particularmente, considerando o arranjo experimental de disdrômetros sônicos de impacto.

Na figura 4.92 mostra que a taxa de precipitação (R) pode ser recuperada corretamente, considerada um tolerância da ordem de $\pm 0,5 mm h^{-1}$, para subintervalos de observação sônica de 60s.

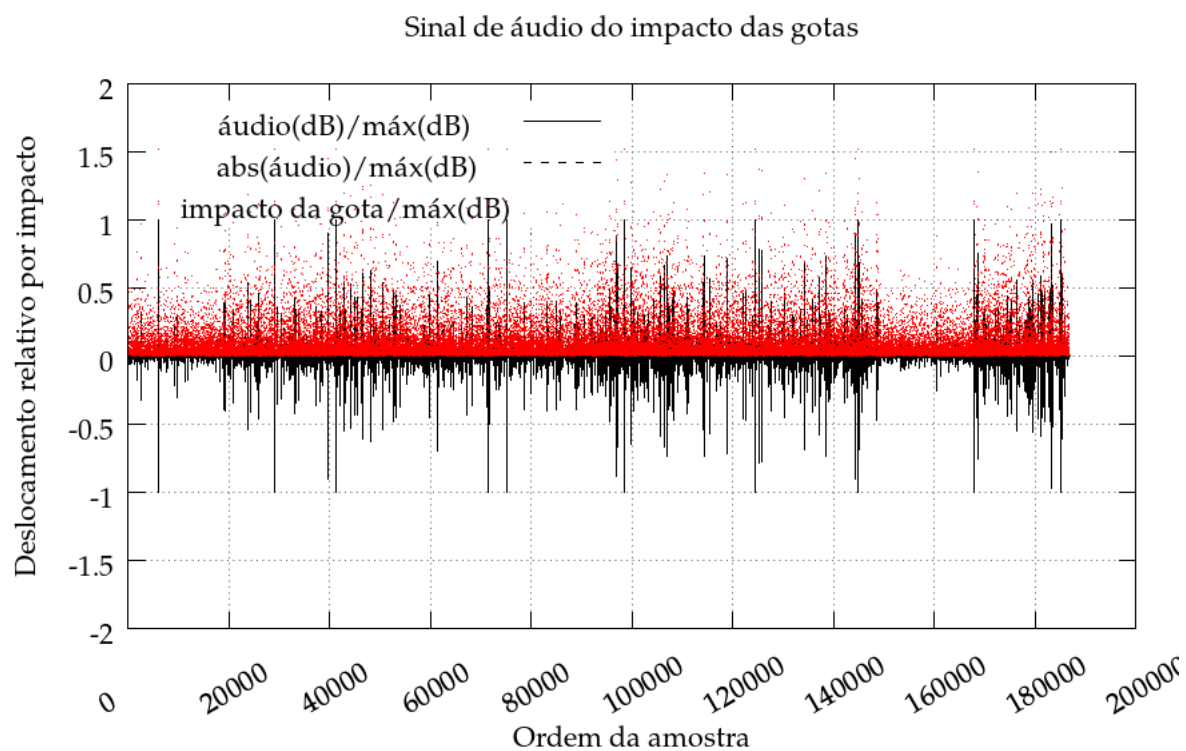


Figura 4.85: Sinal de áudio gerado pelo impacto de gotas simuladas para um chuvisco, para subamostras de 60 (s) (SIM02).

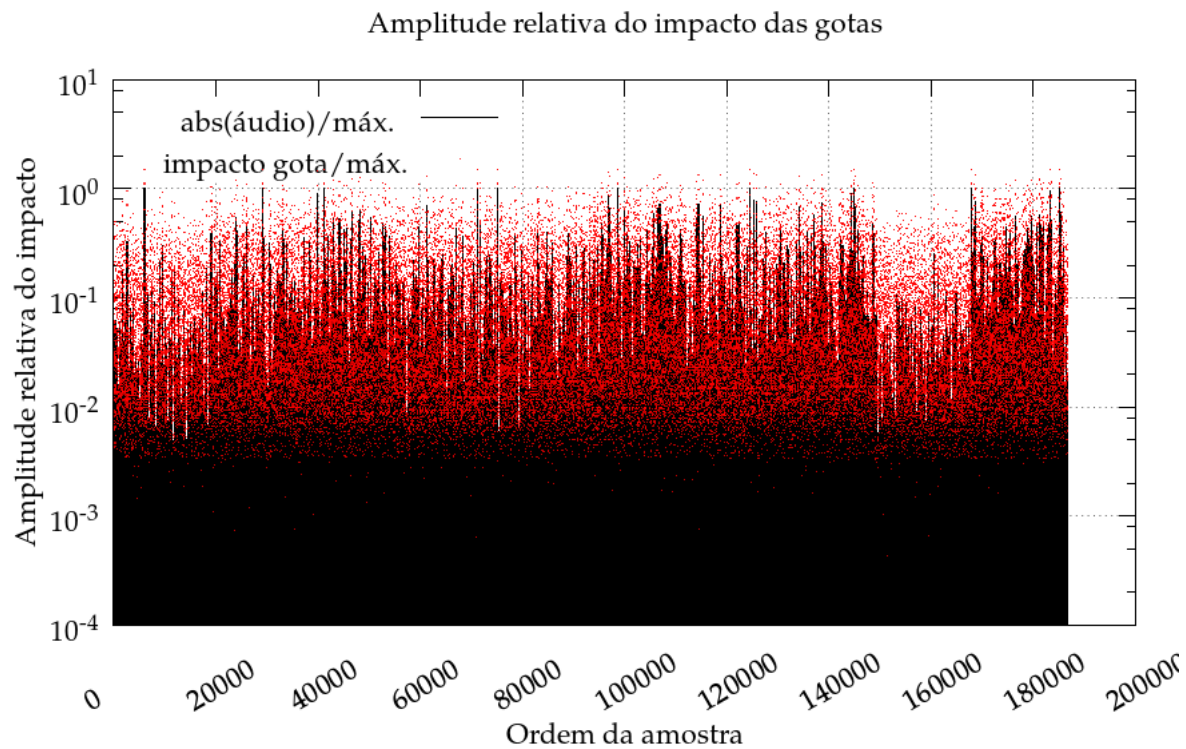


Figura 4.86: Amplitude absoluta do sinal de áudio do impacto das gotas de um chuvisco simulado, para subamostras de 60 (s) (SIM02).

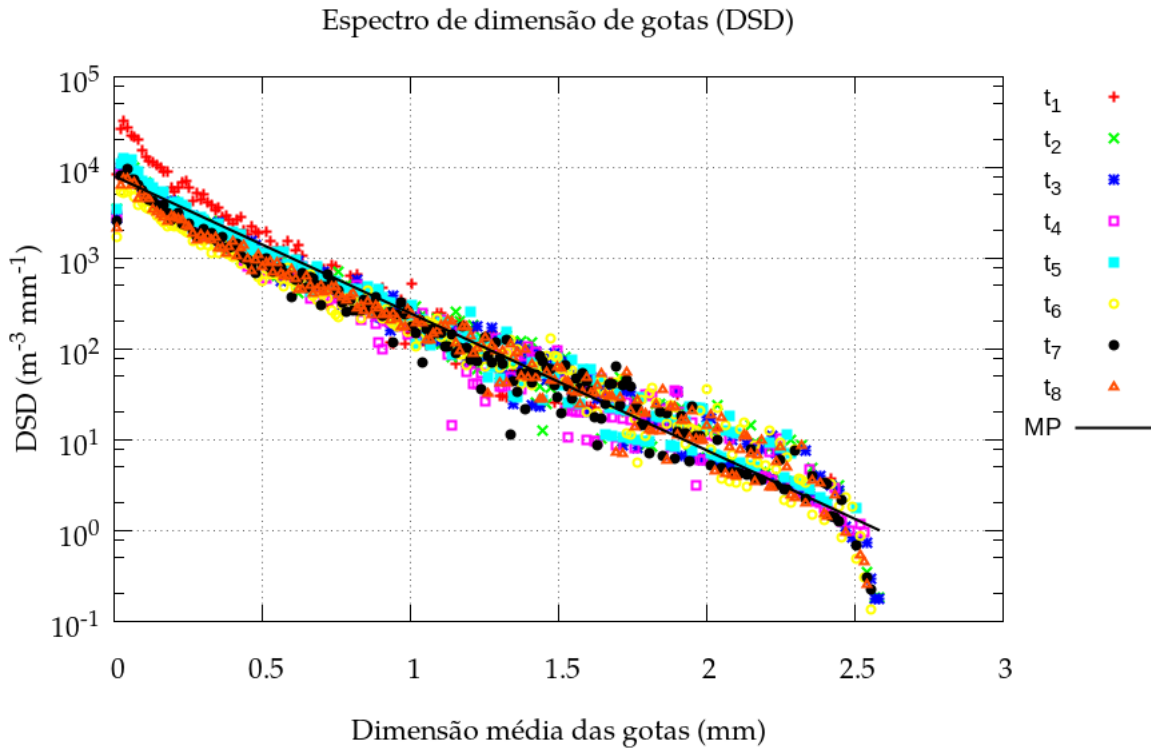


Figura 4.87: Distribuição de diâmetros de gotas DSD para o chuveiro simulado em função do tempo decorrido da simulação, para 8 subamostras de 60s (SIM02).

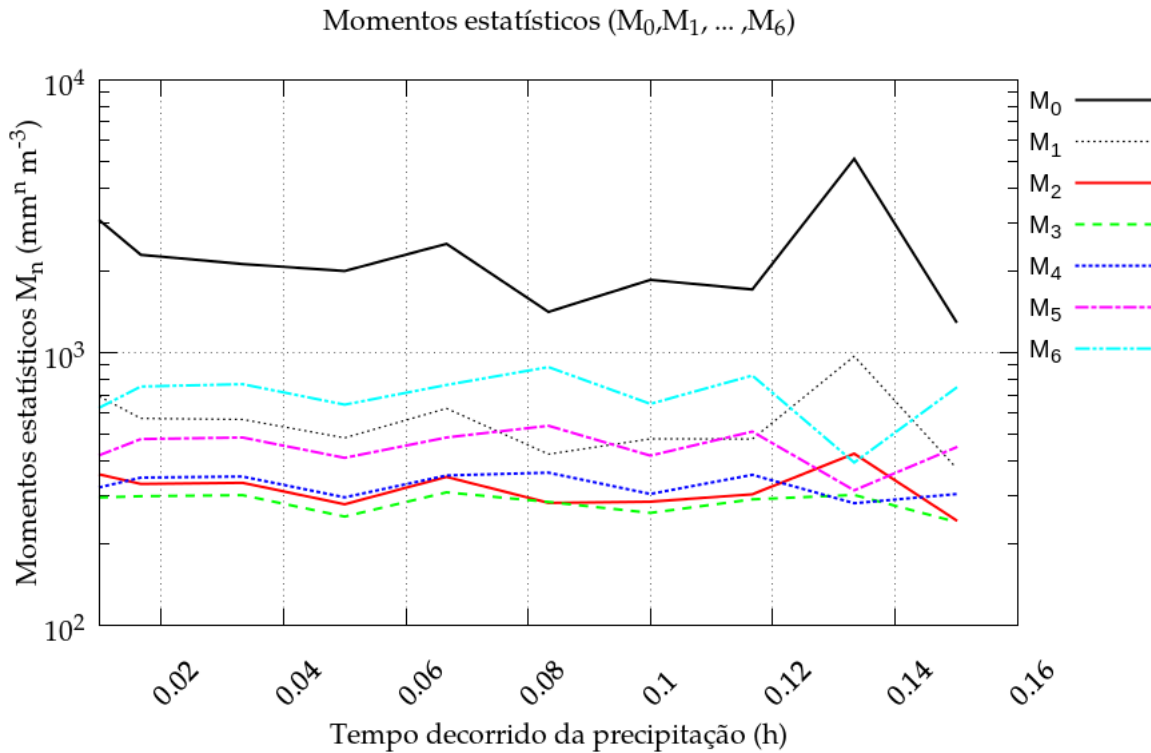


Figura 4.88: Evolução temporal dos momentos estatísticos associados à DSD do chuveiro simulado, em função do tempo decorrido (h), para subamostras de 60s (SIM02).

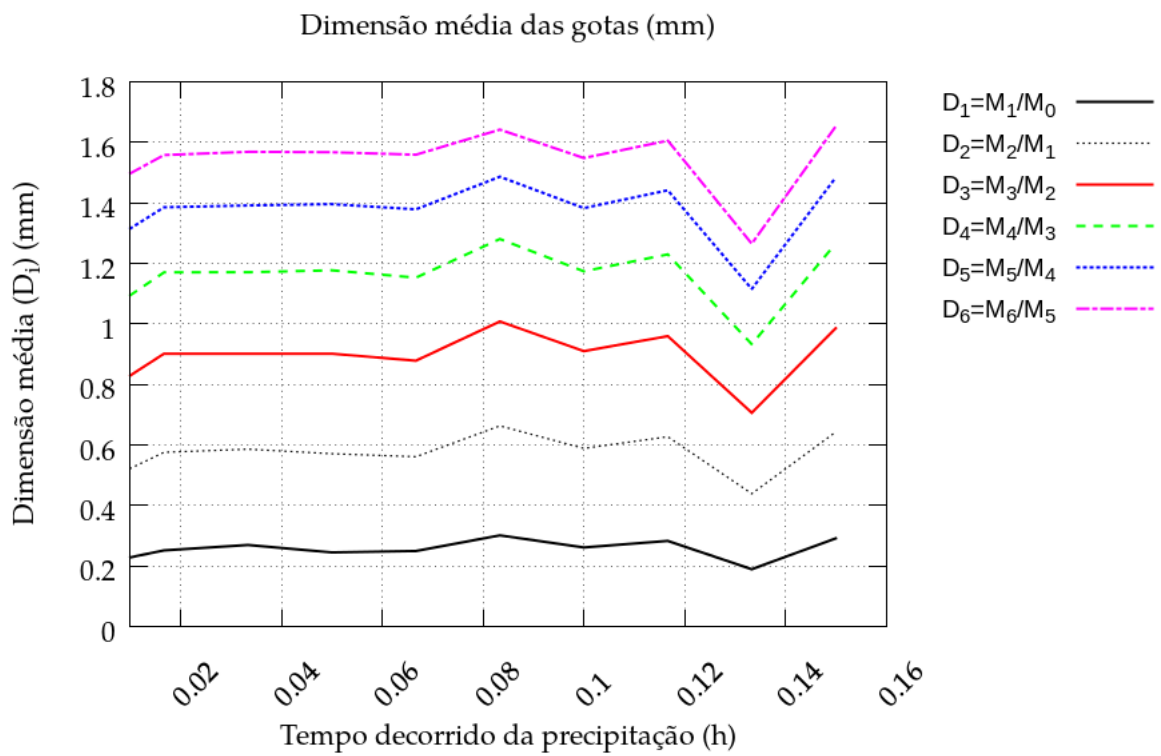


Figura 4.89: Idem à Fig. 4.88 para as estimativas de diâmetro média de gotas.

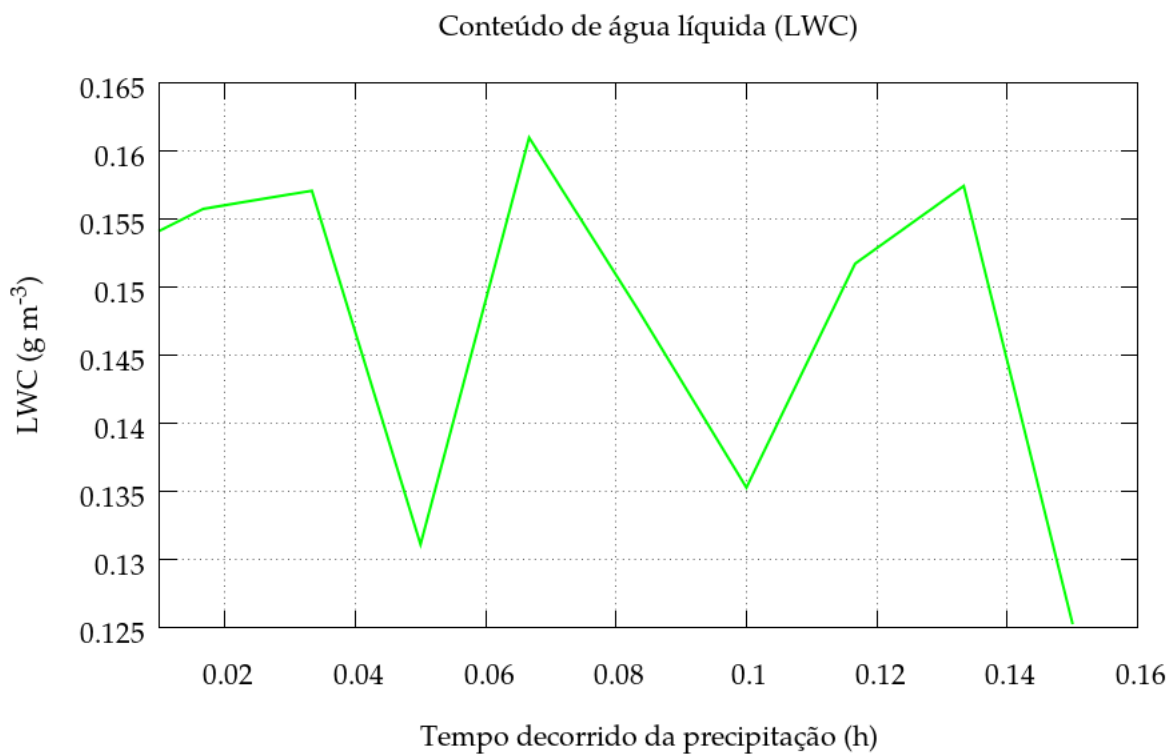


Figura 4.90: Idem Fig. 4.88 para o conteúdo de água líquida (LWC).

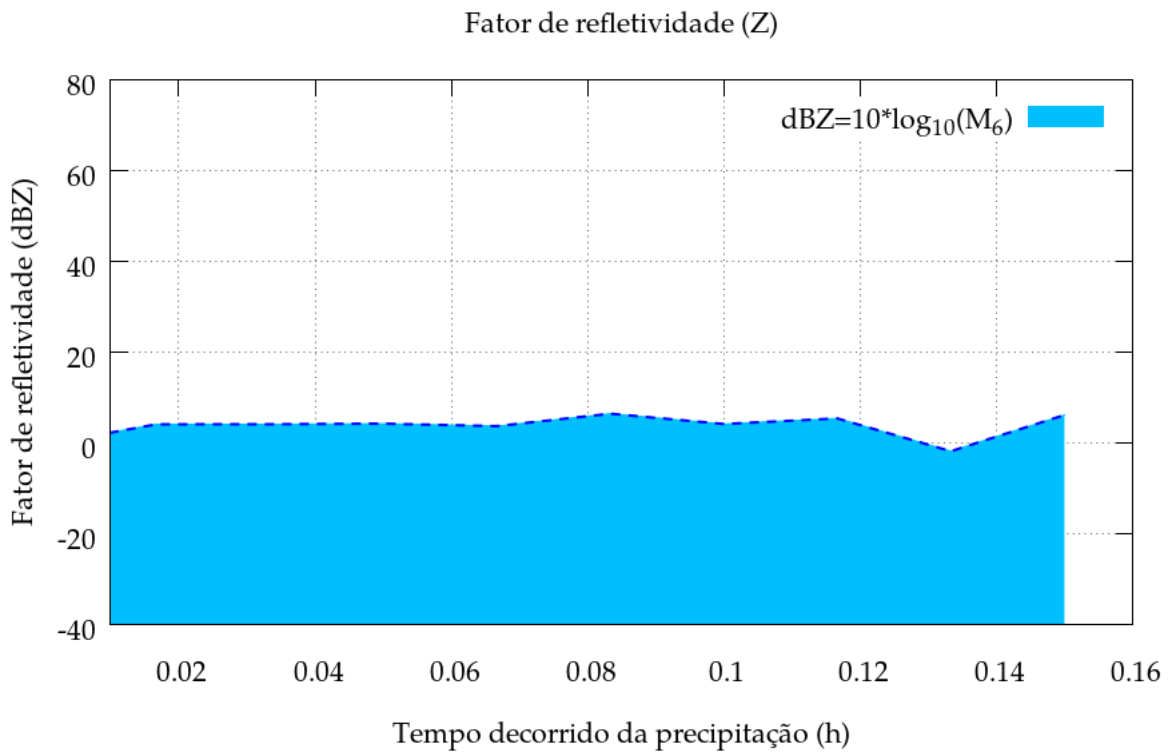


Figura 4.91: *Idem Fig. 4.88 para o fator de refletividade (Z).*

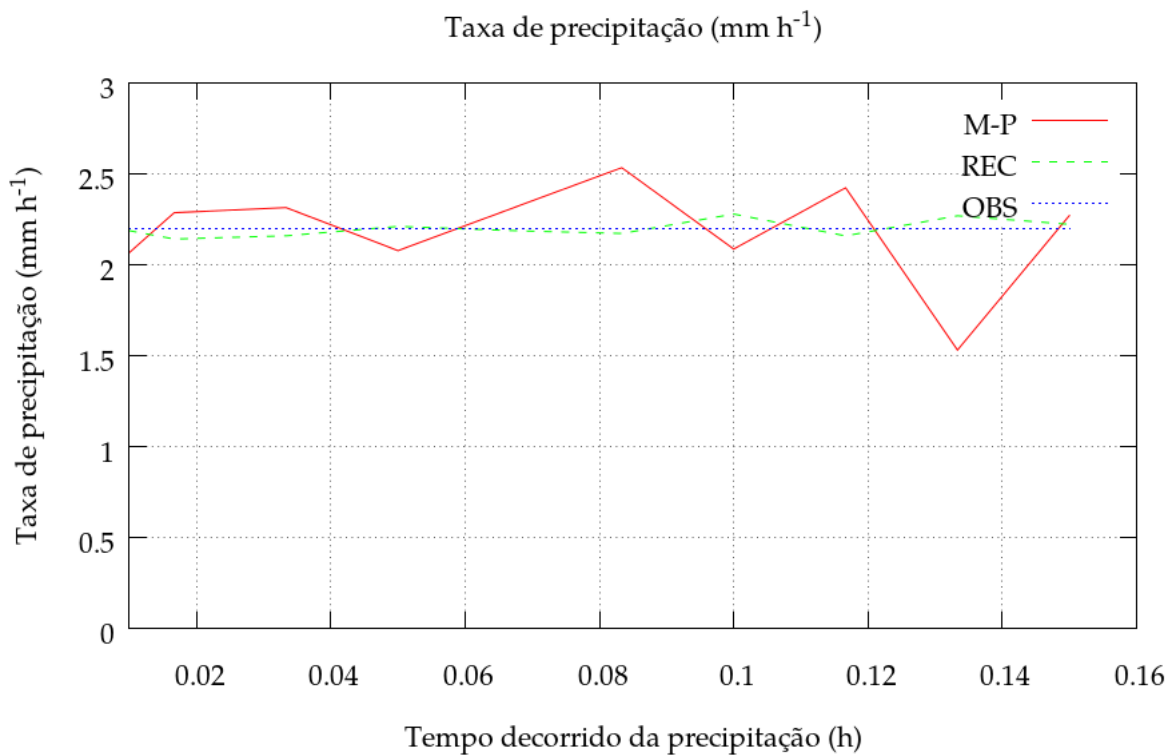


Figura 4.92: *Evolução temporal da taxa de precipitação recuperada (REC) por integração da DSD, em unidades de (mm h⁻¹), plotada desde o início da simulação. Na legenda, OBS representa a taxa de precipitação de referência, igual a 2,2 mm h⁻¹ (linha pontilhada), e M-P obtida pela aplicação da relação Z-R de Marshall-Palmer (linha contínua) (SIM02).*

4.6 Considerações finais

O aplicativo criado *drop_sound* apresenta potencial de utilização para análise do áudio de impacto de gotas sobre uma placa fina horizontal, na qual, a energia cinética do impacto pode ser convertida em energia elástica associada a uma oscilação de baixa frequência (KHz) captada por um microfone.

Da análise de resultados destaca-se aqui a relação entre a duração das subamostras e a forma da função de distribuição empírica. Um teste de sensibilidade foi realizado para uma série temporal de duração de 10min, dividida em subamostras de duração 1s e 60s. O teste mostrou a sensibilidade da função de distribuição de diâmetros de gotas em relação à duração da subamostra utilizada. Para subamostras de 1 s a função de distribuição tende a ser unimodal e portanto, pode ser modelada por uma f.d.p. uniforme. Já para subamostras de 60 (s) a distribuição empírica mostra-se aproximadamente exponencial, e neste caso, pode ser modelada por uma f.d.p. da família exponencial, como por exemplo, a DSD proposta por Marshall-Palmer ou ainda por uma distribuição Gama.

Subamostras correspondentes a registros de áudio com duração maior de 10min tendem a produzir uma distribuição com grande assimetria, para a qual obtém-se a priori uma melhor aderência de um modelo de f.d.p Gama (não mostrado por concisão).

No caso da distribuição de volume de gotas, dado que o volume de uma única gota grande pode ser equivalente ao de muitas gotículas, a forma das distribuições de volume e diâmetro podem ser diferentes.

Capítulo 5

Conclusões

O objetivo do trabalho foi obter a função densidade de probabilidade da dimensão das gotas de chuvas na Cidade do Rio de Janeiro da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), por meio de medição com um disdrômetro sônico, construído para esta finalidade.

As principais conclusões são:

1. O disdrômetro sônico pode ser usado em pesquisas científicas, para tal requer o desenvolvimento, tanto material (hardware) quando computacional (software).
2. As DSD empíricas obtidas são fisicamente consistentes com aquelas da literatura.
3. Distribuições de espectro de gotas de chuva de Marshall-Palmer (1948)[3] e Gama (UBRICHT, 1983)[2] são boas aproximações das DSD empíricas obtidas com DSD sônico.
4. Os resultados indicam que a escala de tempo de integração (dt) determina a forma da distribuição espectral observada, sendo monodistribuída para $dt = 1s$, da família exponencial para $1s < dt < 600s$, a distribuição de Marshall-Palmer para $dt = 600s$ e Gama para $dt > 600s$. Recomenda-se o modelo de distribuição Gamma para maior aderência à DSD empírica.

A utilização de disdrômetro requer do pesquisador conhecimento da física de nuvens, particularmente quando dados do disdrômetro são utilizados na calibração dos campos de precipitação de radares meteorológicos. Isto justifica a realização e disponibilização de material didático para cursos voltado à formação de hidrometeorologistas. Esta dissertação contém uma descrição dos tipos de disdrômetros que pode ser útil para estudantes de sistemas de medição em meteorologia e áreas afins (e.g., hidrologia, engenharia civil, etc).

5.1 Sugestões

Entre as sugestões para desenvolvimento futuro considera-se

1. Estender o período de observação disdrométrica sônica.
2. Utilizar o disdrômetro sônico para observar a DSD em outras localidades.
3. Comparar os resultados obtidos pelo disdrômetro desenvolvido neste trabalho com os resultados obtidos por disdrômetros comerciais.
4. Classificar conjuntamente a distribuição de gotas, sistemas sinópticos, de mesoescala e precipitações.
5. Continuar a desenvolver o disdrômetro sônico.
6. Patentiar o sistema constituído pelo programa numérico e o disdrômetro sônico.

7. Transferir *know-how* para comercialização do disdrômetro sônico.

Apêndice A

Instalação de dependências do aplicativo `drop_sound`

Para execução do aplicativo numérico (`drop_sound`) é necessária a instalação das seguintes dependências em um computador de ambiente linux (distribuição Ubuntu 14):

- `nautilus-terminal` - aplicativo que permite chamada do terminal de comandos a partir de qualquer janela de ícones, usando o botão direito do mouse.
- `firefox` - navegador para visualização dos filmes em formato gif.
- `eog` - aplicativo de visualização (png, eps, etc).
- `gnuplot` - compilador gráfico para plotagem de gráficos 1D, campos 2D, superfícies 3D e 4D (animações).
- `gfortran` - compilador Fortran 90.

Os comandos de instalação apropriados para a distribuição Ubuntu 14 são:

- `$USER> sudo ls`
- `$USER> nano /etc/apt/sources.list`
- `$USER> apt-get update`
- `$USER> apt-get install nautilus-terminal`
- `$USER> apt-get install firefox`
- `$USER> apt-get install eog`
- `$USER> apt-get install gnuplot`
- `$USER> apt-get install gfortran`

Implementação numérica em Fortran-90

A implementação numérica das equações no aplicativo foi realizada em linguagem de programação Fortran-90 pelo Prof. Hugo Abi Karam, acompanhada por mim. O aplicativo faz parte das facilidades de análise da precipitação atmosférica disponíveis para pesquisa e aplicações no laboratório de hidrometeorologia experimental do IGEO/CCMN/UFRJ.¹ O código apresenta uma característica modular, para ser portátil entre máquinas linux. Uma vantagem associada à portabilidade é permitir um acoplamento modular (i.e., organizado das variáveis compartilhadas) em um modelo de análise de riscos naturais abrangente. O aplicativo de análise dos dados do disdrômetro sônico também pode ser indicado para complementação das informações obtidas em sistemas de gestão baseados em radar meteorológico e rede de pluviômetros.

¹Site do laboratório (labhidro): <https://sites.google.com/a/igeo.ufrj.br/lhydrex/home>

Bibliografia

- [1] WINDER, P. N. *An acoustic water tank disdrometer*. 2010. Tese (Doutorado em Física) - University of Hull, 2010. [xix](#), [5](#), [7](#), [8](#), [9](#), [20](#)
- [2] ULBRICH, C. W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 22, n. 10, p. 1764–1775, 1983. [xix](#), [13](#), [14](#), [15](#), [30](#), [93](#)
- [3] MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, v. 5, n. 4, p. 165–166, 1948. [xxi](#), [3](#), [5](#), [14](#), [24](#), [27](#), [30](#), [40](#), [43](#), [49](#), [93](#)
- [4] IMD. Frequently asked questions (faq). Technical report, India Meteorological Department (IMD), 2017. <http://imd.gov.in/section/nhac/wxfaq.pdf>. [xxv](#), [18](#)
- [5] WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation - seventh edition. Technical report: Wmo-no. 8, World Meteorological Organization (WMO), 2008. [xxv](#), [17](#), [18](#)
- [6] AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. Difel, 1986. [1](#)
- [7] REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. [1](#)
- [8] DEREZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S. D.; MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia - RBMET*, v. 24, n. 1, p. 24–38, 2009. [1](#)
- [9] CEMADEN-RJ. Projeto pluviômetros automáticos - levantamento de pontos para instalação - RJ. Technical report, Governo do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho 2017. 66 p. [1](#)
- [10] JOSS, J.; WALDVOGEL, A. Ein spektrograph für niederschlagstropfen mit automatischer auswertung. *Pure and Applied Geophysics*, v. 68, n. 1, p. 240–246, 1967. [1](#), [5](#), [6](#)
- [11] MANI, T. K.; PILLAI, P. R. S. *Development of a technique for estimating rain parameters from rain noise measurements*. 2006. Dissertação (Mestrado em Física) - Cochin University of Science & Technology, ., 2006. [1](#), [5](#), [7](#), [20](#)
- [12] RUTLEDGE, S. A.; HOBBS, P. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. viii: A model for the “seeder-feeder” process in warm-frontal rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 40, n. 5, p. 1185–1206, 1983. [2](#)
- [13] SOUSA, F. B. B.; KARAM, H. A. Análise da estrutura termodinâmica associada ao desenvolvimento de tempestade ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - IGEO - UFRJ*, v. 37, n. 1, p. 17–26, 2014. [2](#)
- [14] WAGNER, C.; MASSAMBANI, O. Natureza de espectros de gotas observados em São Paulo: Um estudo de sua exponencialidade. *IV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, v. 2, p. 17–22, 1986. [3](#)

- [15] JOSS, J.; GORI, E. G. Shapes and raindrop size distribution. *Journal of Applied Meteorology*, v. 17, n. 7, p. 1054–1061, 1978. 3, 13, 14
- [16] MASSAMBANI, O.; RODRIGUEZ, C. A. M. Uma distribuição gama de tamanhos de gotas de chuva. *V Congresso Brasileiro de Meteorologia*, v. 2, p. VII–48, 1988. 3
- [17] RODRIGUES, C. A. M. *Distribuição de tamanho de gotas de chuva nos trópicos: Ajuste de uma função gamma e aplicações*. 1990. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade do Estado de São Paulo - USP, 1990. 3
- [18] JUSTO, L. A. J.; FRANCA, J. R. A. Comparação das propriedades microfísicas de diferentes tipos de nuvens em duas regiões tropicais com ecossistemas distintos usando dados do satélite CloudSat. *Anuário do Instituto de Geociências-IGEO-UFRJ*, v. 39, n. 1, p. 111–126, 2016. 3
- [19] ROGERS, R. R.; YAU, M. K. *A short course in cloud physics*. 3. ed. Elsevier, 1989. 3, 10, 11, 13, 16, 17
- [20] PEREIRA FILHO, A. J.; O. MASSAMBANI, O.; KARAM, H. A.; HALLAK, R.; HAAS, R.; VEMADO, F. Sistema de previsão hidrometeorológica para a bacia do alto Tietê. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 42–60, 2008. 3
- [21] SILVA JR., I. W. *Estudos microfísicos de tempestades em ambientes urbanos e rural a partir de sensoriamento remoto de alta resolução espaço-temporal*. 2016. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, IAG-USP, 2016. 3
- [22] RINEHART, R. E. *Radar for meteorologists*. Fourth edition. ed. Rinehart Publications, 2004. 5
- [23] LÖFFLER-MANG, M.; JOSS, J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 17, n. 2, p. 130–139, 2000. 5
- [24] TESTIK, F. Y.; GEBREMICHAEL, M. *Rainfall: state of the science*. John Wiley & Sons, 2013. v. 191. 5
- [25] BARTHAZY, E.; GÖKE, S.; SCHEFOLD, R.; HÖGL, D. An optical array instrument for shape and fall velocity measurements of hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 21, n. 9, p. 1400–1416, 2004. 5, 6
- [26] KRUGER, A.; KRAJEWSKI, W. F. Two-dimensional video disdrometer: A description. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, n. 5, p. 602–617, 2002. 5, 6
- [27] SALINAS-TAPIA et al. Caracterización geométrica y cinemática de un chorro pulverizado empleando la técnica óptica PTV. *Tecnol. Cienc. Agua - Jiutepec*, v. 5, n. 3, p. 125–140, 2014. 5
- [28] SILVERMAN, B. A.; THOMPSON, B. J.; WARD, J. H. A laser fog disdrometer. *Journal of Applied Meteorology*, v. 3, n. 6, p. 792–801, 1964. 5
- [29] GARCIA, Y. M. T. *Localización 3D y determinación del tamaño de partículas micrométricas opacas por medio de holografía digital em línea*. 2010. Dissertação (Mestrado em Física) - Masters thesis, Universidad Nacional de Colombia - Bogotá, Bogota - Colombia, 2010. 5
- [30] KAIKKONEN, V. A.; MÄKYNEN, A. J. A high sampling rate digital holographic imager instrument for the in situ measurements of hydrometeors. *Optical Review*, v. ., n. ., p. 1–9, 2016. 5

- [31] BORRMANN, S.; JAENICKE, R. Application of microholography for ground-based in situ measurements in stratus cloud layers: a case study. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 10, n. 3, p. 277–293, 1993. 6
- [32] VAN DE GIESEN, I. N.; HUT, I. R.; TEN VELDHUIS, I. M. C. *Low cost disdrometer*. 2010. Dissertação (Mestrado em Física) - Delft University of Technology, 2010. 6
- [33] LANE, J. Acoustic rain gauge array experiment PHASET. *Presented at the Fourth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments.*, v. 17, p. 19, 1997. 6
- [34] WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric science: an introductory survey*. Academic press, 2006. 9, 11
- [35] PRUPPACHER, H. R.; KLETT, J. D. *Microphysics of clouds and precipitation*. Kluwer Academic Publishers, 2004. 9, 10, 12, 13, 16
- [36] SZAKÁLL, M.; MITRA, S. K.; DIEHL, K.; BORRMANN, S. Shapes and oscillations of falling raindrops - a review. *Atmospheric research*, v. 97, n. 4, p. 416–425, 2010. 9
- [37] MCDONALD, J. E. The shape and aerodynamics of large raindrops. *Journal of Meteorology*, v. 11, n. 6, p. 478–494, 1954. 9
- [38] HOUZE JR, R. A. *Cloud dynamics*. Academic Press, Inc, 1993. v. 53. 10
- [39] LIOU, K. N. *An introduction to atmospheric radiation*. Academic press, 2002. 12
- [40] WILKS, D. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 3rd edition. ed. Academic Press, 2011. v. 100. 13
- [41] LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relation of raindrop-size to intensity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 24, n. 2, p. 452–460, 1943. 14
- [42] WALDVOGEL, A. The n_0 jump of raindrop spectra. *Journal of the Atmospheric Sciences (JAS)*, v. 31, n. 4, p. 1067–1078, 1974. 14
- [43] MAIBAUM, G. *Teoría de probabilidades y estadística matemática*. Editorial Pueblo y Educación, 1985. 15
- [44] CHECA-GARCIA, R. *First measurement of the small-scale spatial variability of the rain drop size distribution: results from a crucial experiment and maximum entropy modeling*. 2013. Tese (Doutorado em Física) - Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), 2013. 15, 16
- [45] BRINGI, C. N.; CHANDRASEKAR, V. *Polarimetric doppler weather radar: principles and applications*. Cambridge University Press, 2001. 16, 17
- [46] ARAÃZJO, R. S. *Classificação climatológica das nuvens precipitantes no Nordeste brasileiro utilizando dados do radar a bordo de um satélite TRMM*. 2015. Dissertação (Mestrado em Física) - Master's thesis. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São Josã dos Campos - SP, Brasil. 129 p., 2015. 17
- [47] ORVILLE, R. E. Development of the national lightning detection network. *BAMS*, v. 2, p. 181–190, Feb. 2008. DOI:10.1175/BAMS-89-2-180. 20
- [48] METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.; ROSENBLUTH, M.; TELLER, A.; TELLER, E. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, New York, v. 21, p. 1087, 1953. 24

- [49] HASTINGS, W. K. Monte carlo sampling methods using markov chains and their applications. *Biometrika*, v. 57, n. 1, p. 97, 1970. [24](#)
- [50] LEE, G.; ZAWADKI, I.; SZYRMER, W. A general approach to double-moment normalization of drop size distributions. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, n. 2, p. 264–281, 2004. [28](#)
- [51] ROSENFELD, D.; ULBRICH, C. W. Cloud microphysical properties, process, and rainfall estimation opportunities. *Meteorological Monographs*, v. 30, p. 237–237, 2003. [40](#)

Índice

- Aplicativo numérico drop_sound, 95
- Chuvisco simulado
 - Variação temporal, 81
- Classificação da chuva, 17
- Conclusões, 93
- Conteúdo de água líquida, 16
- Distribuição da superfície de gotas, 12
- Espectro de gotas (DSD), 11
- Fator de refletividade, 16
- Frequência absoluta, 11
 - Disdrômetro óptico, 12
 - Disdrômetro sônico, 11
- Implementação numérica, 25
- Instalação do aplicativo em linux, 95
- Microfísica de precipitação, 9
- Modelo de Bowen, 11
- Modelo de Marshall-Palmer, 14
- Modelo exponencial, 14
- Modelo Gama, 14
- Modelos de DSD, 14
- Momentos estatísticos, 15
- Número total de gotas na amostra, 16
- Nuvens quentes, 11
- Objetivos, 4
- Processo de Bergeron, 11
- Refletividade de gotas de precipitação, 12
- Resultados, 27
 - Calibração, 27
 - Considerações finais, 92
 - Curva de calibração, 28
 - DSD estimada da precipitação, 30
 - DSD modelada para 15/11/2015, 32
 - EXP02
 - Análise da DSD, 47
 - EXP06
 - Análise sinóptica, 70
- Experimentos, 34
 - EXP01, 34
 - EXP02, 44
 - EXP03, 50
 - EXP04, 61
 - EXP05, 65
 - EXP06, 70
- Sensor para acústica da precipitação, 21
- Sugestões, 93
- Tabela de precipitações observadas, 25
- Taxa de precipitação, 16
- Variações temporal da DSD, 24
- Velocidade terminal, 18