



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.24.12.59-TDI

**UM MODELO DE PREVISÃO IMEDIATA DE  
TEMPESTADES BASEADO EM PARÂMETROS  
LAGRANGIANOS MEDIDOS POR RADAR DE DUPLA  
POLARIZAÇÃO**

Bruno Lisbôa Medina

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelo Dr.  
Luiz Augusto Toledo Machado,  
aprovada em 23 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J32KU5>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas  
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
(CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação  
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.24.12.59-TDI

**UM MODELO DE PREVISÃO IMEDIATA DE  
TEMPESTADES BASEADO EM PARÂMETROS  
LAGRANGIANOS MEDIDOS POR RADAR DE DUPLA  
POLARIZAÇÃO**

Bruno Lisbôa Medina

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelo Dr.  
Luiz Augusto Toledo Machado,  
aprovada em 23 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J32KU5>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Medina, Bruno Lisbôa.

M468m Um modelo de previsão imediata de tempestades baseado em parâmetros lagrangianos medidos por radar de dupla polarização / Bruno Lisbôa Medina . – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxiv + 88 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.24.12.59-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientador : Dr. Luiz Augusto Toledo Machado.

1. Previsão imediata. 2. Radar. 3. Dupla polarização. I.Título.

CDU 551.509

---

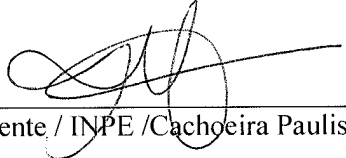


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

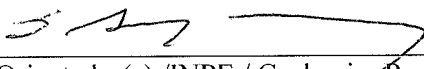
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Meteorologia**

Dra. Simone Marilene Sievert da  
Costa Coelho

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Luiz Augusto Toledo  
Machado

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Carlos Frederico de Angelis

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / CEMADEN / Cachoeira Paulista-SP

Dr. Lawrence David Carey


  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UAH / Huntsville- EUA

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples.

(x) unanimidade.

Título: “Um Modelo de Previsão Imediata de Tempestades Baseado em Parâmetros Lagrangianos Medidos por Radar de Dupla Polarização.”

  
Aluno (a): Bruno Lisbôa Medina

São José dos Campos, 23 de Março de 2015.



*“Ante o Supremo Arquiteto  
Hay que sacar o chapéu  
Porque - na escola do Céu  
Não existe analfabeto!”*

Jayme Caetano Braun





*A meus pais, João e Delires Medina*



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela força e fé fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A meus pais, João e Delires Medina, que me apoiaram incondicionalmente em todas as etapas da minha vida.

A minha irmã Aline pela inspiração acadêmica.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e à Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais pela estrutura fornecida para que esta dissertação se tornasse realidade.

Ao Dr. Luiz Augusto Toledo Machado pela orientação, apoio e discussões científicas.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Aos colegas e amigos da DSA e do CPTEC e a todos que de alguma forma auxiliaram na realização desta dissertação.



## RESUMO

Este trabalho apresenta ferramentas de previsão imediata de tempestades que constituem um modelo probabilístico para ocorrência de eventos intensos meteorológicos. A previsão imediata de tempo, ou *nowcasting*, consiste na previsão de tempo para período de 0 a 6 horas, escala espacial de poucos quilômetros e a utilização de dados com frequência menor que 1 hora. A previsão imediata utiliza, principalmente, dados de radar meteorológico para discriminar tridimensionalmente eventos precipitantes em alta resolução espacial e temporal. A obtenção de ferramentas de *nowcasting* consiste no principal objetivo desse trabalho, as quais foram obtidas a partir das informações coletadas pelo radar de dupla polarização banda X do Projeto CHUVA do experimento realizado no Vale do Paraíba, estado de São Paulo. Foram selecionados eventos de granizo e um conjunto de eventos convectivos intensos e não-intensos. Com esses dados, o ForTraCC-Radar foi utilizado para o rastreamento das células convectivas para avaliação de diversas ferramentas de *nowcasting*, que dependem das derivadas lagrangianas no tempo, incluindo variáveis polarimétricas e parâmetros integrados verticalmente. Essas ferramentas foram obtidas a partir dos eventos de granizo, cujas assinaturas de severidade ocorreram antes do horário do fenômeno. Posteriormente, esses parâmetros foram aplicados ao conjunto de eventos intensos e não-intensos e avaliados sua capacidade de previsibilidade. Através de filtro estatístico e correlação entre parâmetros, obteve-se um número reduzido de parâmetros que, conjuntamente, consistiram em um modelo probabilístico de previsão imediata de tempo. As características físicas dos parâmetros que constituem o modelo são: formação e colapso de diferentes hidrometeoros em coexistência acima da isoterma de  $-40^{\circ}\text{C}$ , presença de alvos verticalmente orientados acima da isoterma de  $-20^{\circ}\text{C}$ , ocorrência de alvos verticais e alta refletividade  $Z_h$  na camada de fase mista e elevada intensidade da refletividade  $Z_h$  em relação à totalidade da célula convectiva.



# **A NOWCASTING MODEL BASED ON LAGRANGIAN PARAMETERS MEASURED BY DUAL-POLARIZATION RADAR**

## **ABSTRACT**

This study presents nowcasting tools for thunderstorms, which consists in a probabilistic model for intense meteorological events. Nowcasting is defined as a short-term weather forecasting for a time period of 0-6 hours, spatial scale of no more than a few kilometers with an update frequency less than 1 hour. Weather radars are used primarily for nowcasting, whose information discriminate precipitating events in three dimensions in high spatial and temporal resolution. This work aims to develop nowcasting tools from information collected by the radar dual-polarization X-band CHUVA Project of experiments performed at the Vale do Paraiba region, São Paulo state. Hail events, and a control set of intense and non-intense events were selected for the study. ForTraCC-radar algorithm was used for tracking these convective cells for evaluation of diverse nowcasting tools that depends on lagrangian time derivation, such as polarimetric variables and vertical integrated parameters. These parameters were obtained for hail events before phenomena and later applied to control set of events for previsibility capacity analysis. With a statistic filter and correlation of parameters, a few number of parameters were obtained, which consists in a probabilistic model of nowcasting. Physical characteristics of these parameters are: formation and collapse of different types of hydrometeors coexisting above  $-40^{\circ}\text{C}$  isotherm, presence of vertically oriented hydrometeors above  $-20^{\circ}\text{C}$  isotherm, vertical targets associated with high reflectivity  $Z_h$  in mixed-phase layer, between  $0^{\circ}\text{C}$  and  $-20^{\circ}\text{C}$  isotherm, and high fraction of reflectivity  $Z_h$  compared to total convective cell.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág</u>
Figura 2.1 - Exemplos de linhas de convergência detectadas por radar indicadas por setas, sendo em preto valores acima de 30 dBZ (a). Exemplo de rolos convectivos (b). Esquema de interseção de brisa com rolos convectivos e sua associada vortacidade, engatilhando convecção (c). .....	7
Figura 2.2 - Exemplo de rastreamento de células de radar pelo TITAN. ....	9
Figura 2.3 - Previsão de refletividade de radar (escala de cinza) de modelo de escala de nuvem com três ciclos de assimilação 4DVAR de refletividade e velocidade vertical para 0h (a), 2h (b), 3h (c) e 5h (d). A refletividade observada encontra-se em contorno. ....	11
Figura 2.4 - Metodologia de previsão de sistemas convectivos do ForTraCC. ....	16
Figura 3.1 - Área de abrangência (círculo) e localização do radar (cruz) Banda X da campanha CHUVA - Vale do Paraíba. ....	19
Figura 3.2 - Sequência de imagens Cappi 3 km (a) e <i>clusters</i> de 35 (b), 30 (c) e 25 dBZ (d) definidos pelo ForTraCC. ....	23
Figura 3.3 - Sequência de imagens Cappi 3 km (a) e <i>clusters</i> de 35 dBZ seguindo o <i>cluster</i> mais intenso (b) e seguindo o <i>cluster</i> maior em área (c), definidos pelo ForTraCC. ....	25
Figura 3.4 - Representação esquemática do volume com 1 km de resolução horizontal e 0,5 km de resolução vertical, onde a camada 6 é definida entre 2,75 km e 3,25 km de altura, com altura média de 3 km. Os <i>bins</i> localizados dentro desse volume são representados pela numeração em preto de 1 a 7, sendo que cada um possui um valor de variável de radar e uma altura, exemplificado à direita. A figura não está em escala real. ....	27
Figura 3.5 - Relação entre evento previsto e observado, sendo <i>a</i> acertos, <i>b</i> falso alarme, <i>c</i> erros, <i>d</i> corretos negativos e <i>n</i> é a dimensão da amostra. ....	33
Figura 3.6 - Fluxograma da concepção do modelo probabilístico. ....	35
Figura 4.1 - Cappi 3 km dos horários associados aos eventos: 1a (a), 1b (b), 2 (c), 3a (d) e 3b (e). ....	38
Figura 4.2 - Evolução temporal de volume total da camada de fase mista e do volume ocupado por $Z_{DR} < 0$ dB nessa camada para um evento de granizo (a) e percentual ocupado por $Z_{dr} < 0$ dB em relação à essa camada e variação de percentual (b). ....	40
Figura 4.3 - Evolução temporal de parâmetros para os 5 eventos de granizo, sendo a linha vermelha vertical a indicação do horário do granizo e a linha pontilhada vermelha horizontal o limiar para o parâmetro. Exemplo de parâmetro que utiliza limiar de porcentagem (a), exemplo de parâmetro que utiliza limiar de variação de porcentagem (b), exemplo de parâmetro não utilizado no estudo devido à ocorrência de falso alarme ou não-deteção (c). ....	42

Figura 4.4 - Evolução temporal dos eventos para refletividade $Z_h$ . Os eventos de granizo utilizados como referência estão em preto, eventos intensos em azul e eventos não-intensos em amarelo. ....	45
Figura 4.5 - Correlação entre 14 parâmetros que utilizam limiar de porcentagem. Na base da figura se encontra a correlação entre os 2 parâmetros que utilizam limiar de variação de porcentagem. ....	48
Figura 4.6 - Previsão correta de eventos intensos (barras azuis) e não-intensos (legenda, base), falsos alarmes para cada conjunto de eventos (linhas pontilhadas vermelhas) e erros (legenda, topo) em função do tempo de antecedência para cada parâmetro. ....	52
Figura 4.7 - Curvas de probabilidade de ocorrência de evento intenso utilizando 8 parâmetros acumulados em 24, 18, 12, 6 e 0 minutos. ....	56
Figura 4.8 - Curvas de probabilidade de ocorrência de evento intenso utilizando 8 parâmetros (azul, quadrados) acumulados em 24 minutos e falso alarme para eventos não-intensos (amarelo, círculos). ....	57
Figura 4.9 – Curvas de probabilidade utilizando 8 parâmetros (amarelo), utilizando 16 parâmetros sem o filtro de correlação (azul) e com os 81 parâmetros originais (preto) para comparação. ....	58
Figura 4.10 – Curvas de probabilidade utilizando 8 parâmetros para os eventos independentes (preto) comparado com os eventos intensos (azul) e eventos não-intensos (amarelo). ....	59
Figura 4.11 - Curvas de probabilidade utilizando 8 parâmetros para os 26 eventos intensos acumulado 24 minutos (azul, quadrados) e falso alarme não-acumulado no tempo para esses eventos intensos (azul, círculos) comparados com modelo para eventos independentes e seu falso alarme (preto). ....	60
Figura 4.12 – Frequência de ocorrência de probabilidade para eventos intensos independentes (preenchido, verde) para 0, 6, 12, 18 e 24 minutos acumulado, em porcentagem, e curva de probabilidade para eventos intensos (linha azul ou preta) (a) e frequência de probabilidade para eventos não-intensos (preenchido, azul) e curva de probabilidade para eventos não intensos (linha amarela) (b). ....	61
Figura 4.13 – Modelo aplicado a 3 eventos independentes. A curva preta representa a probabilidade de detecção do evento independente, ponto e barras vermelhas representam previsão de evento intenso em menos de 25 minutos e ponto e barras amarelas representam previsão de evento intenso em mais de 25 minutos. ....	64
Figura 4.14 – Modelo aplicado a 2 eventos não-intensos. A curva preta representa a probabilidade de detecção do evento independente, ponto e barras amarelas representam previsão de evento intenso em mais de 25 minutos. ....	65

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Características do radar Banda X do Projeto Chuva. ....	17
Tabela 3.2 - Exemplo de <i>bins</i> detectados ao longo de uma coluna com área de 1 km <sup>2</sup> em suas respectivas camadas. Na coluna Perfis Verticais são apresentados os perfis obtidos com interpolação linear. ....	28
Tabela 3.3 – Altura, temperatura média e desvio padrão da radiossondagem média para a campanha CHUVA-Vale do Paraiba.....	29
Tabela 4.1 – Características dos parâmetros após filtro estatístico... ..	47
Tabela A.1 - Limiares das variáveis polarimétricas calculados associados às camadas, representados pela letra “X”. ....	79
Tabela A.2 – Descrição dos 90 parâmetros.....	80
Tabela A.3 - Índices estatísticos dos parâmetros em ordem do HSS. ....	84
Tabela B.1 – Eventos intensos.....	87
Tabela B.2 – Eventos não-intensos.....	88



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DVAR	- Three-Dimensional Variational Data Assimilation
4DVAR	- Four-Dimensional Variational Data Assimilation
CAPPI	- Constant Altitude Plan Position Indicator
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DECEA	- Departamento de Controle do Espaço Aéreo
FAVIL	- Fração de Área de VIL
ForTraCC	- Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters
GOES	- Geostationary Operational Environmental Satellite
GPM	- Global Precipitation Measurement
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
NWS	- National Weather Service
PPI	- Plan position indicator
REDEMET	- Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
RHI	- Range-height indicator
UTC	- Coordinated Universal Time
VET	- Variational Echo Tracking
VHF	- Very high frequency
VIL	- Vertically Integrated Liquid
VLf	- Very low frequency



## LISTA DE SÍMBOLOS

#Par.	- Número do Parâmetro
$\Delta V$	- Vetor de erro
$\alpha$	- Parâmetro do método ZPHI
$\beta$	- Parâmetro do método ZPHI
$\gamma$	- Parâmetro do método ZPHI
$\Delta\%$	- Variação de Porcentagem
$\Delta h$	- Diferença de altura
$\varepsilon$	- Elevação do radar
$\rho_{hv}$	- Correlação co-polar
$\Phi_{DP}$	- Diferencial de fase
a	- Acertos (tabela de contingência)
AB0	- Camada abaixo da isoterma de 0°C
AC0	- Camada acima da isoterma de 0°C
AC-20	- Camada acima da isoterma de -20°C
AC-40	- Camada acima da isoterma de -40°C
$A_{dp}$	- Atenuação diferencial
$A_h$	- Atenuação
ALT	- Altura
$b_1$	- Coeficiente linear da equação de expansão
b	- Falso alarme (tabela de contingência)
B	- Parâmetro do método ZPHI
c	- Erros (tabela de contingência)
CFM	- Camada de Fase Mista
$C_m$	- Camada
d	- Corretos negativos (tabela de contingência)
dB	- Decibéis
dBZ	- Decibéis de refletividade $Z_h$
DVP	- Desvio Padrão
FAR	- Razão de Falso Alarme
H	- Altura do <i>bin</i> em relação ao solo
$H_R$	- Altura do radar
HSS	- Heidke Skill Score
$H_{TOP}$	- Altura do topo
$K_{DP}$	- Diferencial de fase específica
$k_e$	- Índice de refração
Lim.Par.	- Limiar do Parâmetro
$L_{rad}$	- Atenuação do radome
$m_1$	- Coeficiente angular da equação de expansão
máx.	- Máximo
mdn.	- Mediana
méd.	- Média
mín.	- Mínimo

$n$	- Dimensão da amostra (tabela de contingência)
$p_{25}$	- 25° percentil
$p_{75}$	- 75° percentil
POD	- Probabilidade de Detecção
POFD	- Probabilidade de Falsa Detecção
$r$	- Distância do <i>bin</i> ao radar
$r_1$	- Distância do <i>bin</i> seguinte à $r$ , na radial
$R$	- Taxa de Precipitação
$R_t$	- Raio da Terra
$S_{hh}$	- Campo elétrico horizontal
$S_{vv}$	- Campo elétrico vertical
$t$	- Tempo
$T_m$	- Temperatura média
$V$	- Vetor deslocamento extrapolado
$V_r$	- Vento radial
$VE$	- Vetor de previsão de deslocamento
$VP$	- Vetor previsto
$w$	- Velocidade vertical
$Z_{DR}$	- Refletividade diferencial
$Z_h$	- Refletividade horizontal
$Z_i$	- Refletividade de radar em um nível
$Z_v$	- Refletividade vertical



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Técnicas de Previsão Imediata por Radar Meteorológico .....	5
2.1.1. Iniciação Convectiva .....	5
2.1.2. Rastreamento.....	7
2.1.3. Modelos .....	10
2.2. Uso de Dupla Polarização para Nowcasting.....	13
2.3. ForTraCC.....	14
<b>3 DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
3.1. Obtenção dos Dados.....	17
3.2. Tratamento dos Dados.....	20
3.3. Obtenção dos Eventos .....	21
3.4. ForTraCC.....	22
3.5. Conversão de Resolução dos Dados.....	26
3.6. Obtenção dos Parâmetros .....	30
3.6.1 Contabilização dos Volumes .....	30
3.6.2 Variação de Topo e VIL .....	31
3.7. Escolha dos Parâmetros Preditores .....	32
3.8. Desenvolvimento de um Modelo Probabilístico.....	34
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
4.1. Descrição dos Eventos de Granizo.....	37
4.2. Parâmetros Polarimétricos Preditores de Granizo.....	39
4.3. Aplicação dos Parâmetros nos Eventos Intensos e Não-Intensos .....	44
4.4. Modelo Probabilístico de Previsão de Eventos Intensos .....	54
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A – VARIÁVEIS E PARÂMETROS POLARIMÉTRICOS .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE B – EVENTOS INTENSOS E NÃO-INTENSOS .....</b>	<b>87</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A previsão de tempo possui grande importância no âmbito sócio-econômico, principalmente em situações de eventos severos de precipitação, que podem provocar impactos devastadores na superfície. O Serviço Meteorológico Americano (National Weather Service, NWS) utiliza como definição de eventos severos a ocorrência de um ou mais dos seguintes fenômenos: tornados, ventos destrutivos ou rajadas iguais ou maiores que 50 kt (92,6 km/h) e granizo com diâmetro igual ou maior que 1,9 cm (MOLLER, 2001). Para o acompanhamento e previsão de tempo desses fenômenos, são necessárias três etapas essenciais, como proposto por Nascimento (2005) para operação no Brasil. Primeiramente, a antecedência de dois a cinco dias de regiões propícias para eventos severos através de reconhecimento de padrões atmosféricos por prognósticos de modelos numéricos em escala sinótica e técnicas de mineração de dados. Segundo, o acompanhamento do cenário de um dia a poucas horas de antecedência do evento através de análise de sondagens, rede de observação de mesoescala, modelos numéricos de mesoescala e imagens de satélite, focando de modo mais preciso as regiões mais prováveis para extremos de precipitação. A última etapa consiste na previsão imediata ou *nowcasting*, que é a previsão de tempo para período de 0 a 6 horas e escala espacial de poucos quilômetros, utilizando dados que possuem frequência menor que 1 hora (WILSON et al., 2010).

A previsão imediata de tempo, nesta última etapa, utiliza informações de diversas fontes, mas principalmente de radares meteorológicos. Diversas técnicas foram desenvolvidas nas últimas décadas e muito esforço está sendo empregado pelos principais centros de meteorologia do mundo para aumentar a acurácia dessas técnicas. Entre elas, destacam-se a previsão de iniciação convectiva, o rastreamento de células e os modelos que utilizam dados de radar em sua inicialização. Para iniciação convectiva, são utilizados dados de radar para observação de convergência em baixos níveis através de linhas de convergência, cuja presença ou intersecção com rolos convectivos ou entre linhas são essenciais para a formação de convecção (WILSON et al., 1998). Entretanto, os primeiros métodos de *nowcasting* desenvolvidos foram de rastreamento de células e

previsão de deslocamento por extrapolação baseada no passado recente da célula (NOEL; FLEISHER, 1960 citado por WILSON et al., 1998). Posteriormente, métodos de rastreamento mais robustos foram desenvolvidos, entre eles a definição de vetores de deslocamento por correlação cruzada (LI et al., 1995) e previsão a partir de advecção lagrangiana das células (BELLON et al., 2010), além de previsão modificando a forma e o tamanho das células (VILA et al., 2008). Atualmente, experimentos estão sendo realizados com modelos numéricos, que são utilizados para assimilar dados de radar simulando a estrutura explícita das tempestades (SUN; ZHANG, 2008).

O radar de dupla polarização acrescenta consideravelmente informações úteis para o *nowcasting* devido às variáveis adicionais possíveis em relação à radares de polarização simples, como refletividade diferencial ( $Z_{DR}$ ), diferença de fase ( $\Phi_{DP}$ ), diferencial de fase específica ( $K_{DP}$ ) e correlação co-polar ( $\rho_{HV}$ ). Nesse contexto, o Projeto CHUVA (Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: A contribution to cloud resolving modeling and to the GPM (Global Precipitation Measurement)), que consiste em experimentos de campo para pesquisa de diferentes regimes de precipitação e processos físicos associados, apresenta significativo potencial para a obtenção de ferramentas de *nowcasting* devido à disponibilidade de um radar de dupla polarização Banda X nos experimentos. Além do radar, diversos instrumentos são também disponíveis durante o projeto como disdrômetros, pluviômetros, LIDAR, radiômetro de microondas, entre outros (MACHADO et al., 2014).

A tomada de decisões de meteorologistas e órgãos responsáveis torna-se crucial principalmente para regiões vulneráveis, onde a ocorrência de eventos extremos como precipitação intensa, elevado acumulado de precipitação, ventos intensos, tornados, granizo, furacões, etc., provocam impactos mais devastadores, como deslizamentos de terra, inundações bruscas, danos no patrimônio e, ainda, perda de vidas. Atualmente, setores variados da economia estão utilizando a informação da previsão de tempo e o *nowcasting* para o planejamento das atividades e possíveis tomadas de decisões, como a indústria, construção civil, setor elétrico, transporte, aviação, entre outros (WILSON et al., 1998).

## 1.1. Objetivos

O principal objetivo desse estudo é elaborar, avaliar e quantificar a previsibilidade de ferramentas de *nowcasting* utilizando dados de radar de dupla polarização para sistemas intensos no sudeste do Brasil. Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Caracterizar as células convectivas em seu estágio de desenvolvimento para determinar seu futuro grau de severidade através de parâmetros prognósticos.
- b) Obter a variabilidade temporal de variáveis polarimétricas para discernir características micro-físicas das células convectivas que precedem tempestades.
- c) Avaliar essas ferramentas utilizando uma base de dados de tempestades intensas e outra de controle (não-intensa).

Cabe ressaltar que esse estudo apresenta pioneirismo quanto à metodologia empregada e à utilização de informações de radares polarimétricos para a obtenção de ferramentas de *nowcasting*. A revisão bibliográfica será apresentada na seção 2, onde serão abordadas as principais técnicas de *nowcasting* por radar divididas em técnicas de previsão de iniciação convectiva, técnicas de rastreamento de células e uso de modelos numéricos, além do uso de dados de dupla polarização para *nowcasting* e uma explanação do sistema de rastreamento ForTraCC. Na seção 3, os dados e a metodologia desse estudo serão expostos. Os resultados serão apresentados na seção 4 e as considerações finais na seção 5, seguido das referências bibliográficas.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Técnicas de Previsão Imediata por Radar Meteorológico**

Nesta seção será apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas em previsão imediata de tempo utilizando radar meteorológico. Primeiramente, técnicas de previsão de iniciação convectiva serão expostas, seguido das técnicas de rastreamento de células convectivas e do uso de modelos numéricos que assimilam dados de radar para a geração de saídas para uso em *nowcasting*.

#### **2.1.1. Iniciação Convectiva**

A previsão da iniciação convectiva consiste em antecipar quando e onde a convecção irá se formar. Trata-se de um desafio objetivo devido ao fato da iniciação convectiva depender enormemente da temperatura e umidade na camada limite planetária em situações com baixa forçante de grande escala. Variações em  $1\text{g/kg}^{-1}$  na umidade e em  $1^\circ\text{C}$  na temperatura da camada limite são críticos para a determinação da formação de convecção (CROOK, 1996), cuja variação é comum em poucos quilômetros de distância devido aos rolos horizontais que transportam ar úmido para cima e ar seco para baixo (WECKWERTH et al., 1996). Dessa maneira, tornam-se necessárias observações detalhadas da camada limite e nuvens cumulus a fim de aprimorar o conhecimento da iniciação e evolução das tempestades.

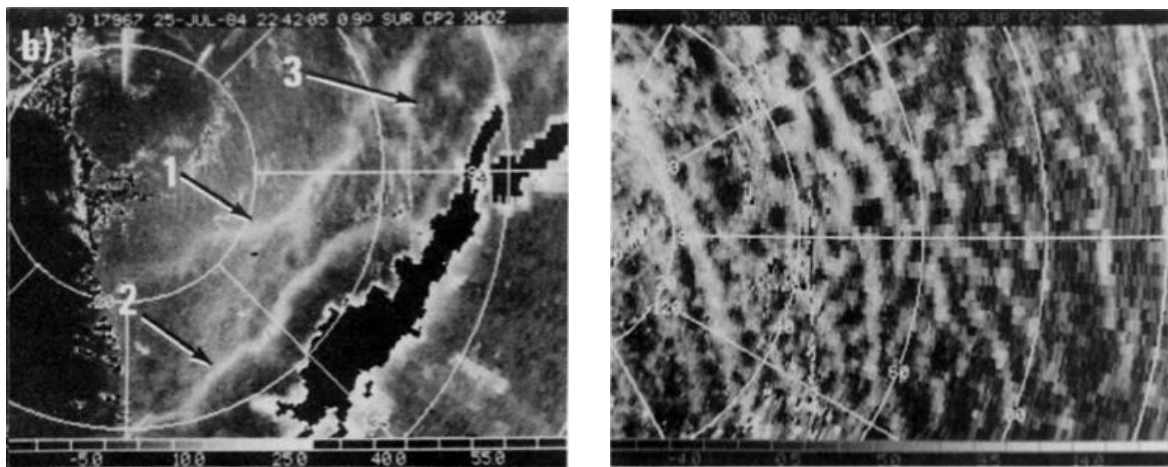
Entre os principais fatores que contribuem para a iniciação convectiva está a convergência em baixos níveis. A convergência de mesoescala em baixos níveis antecede a ocorrência de tempestades, sendo que a magnitude da convergência está associada com a intensidade da célula (GARSTANG; COOPER, 1981). A convergência antecede em dezenas de minutos a ocorrência de novo eco por radar ou precipitação no solo (GARSTANG; COOPER, 1981) e em 90 minutos para as tempestades mais intensas (ULANSKI; GARSTANG, 1978).

Wilson e Carbone (1984) citado por Wilson et al. (1998) observaram linhas de convergência por radar mesmo na ausência de nuvens, que ocorrem por correntes com diferenciada densidade, frentes, circulações induzidas pela topografia e por aquecimento diferencial (WILSON; MUELLER, 1993). Wilson e Schreiber (1986) definem as linhas de convergência por radar como “estreita linha com refletividade de 0 a 20 dBZ e/ou linha com aparente fluxo convergente pela velocidade Doppler com mais de 10 km de comprimento, de 1 a 3 km de largura e período de persistência mínimo de 15 minutos”, possuindo na maior parte dos casos gradiente de temperatura e/ou umidade associado (Figura 2.1a). As linhas de convergência possuem grande importância porque a convecção preferencialmente ocorre nas proximidades destas.

Os rolos convectivos horizontais são visíveis por radar em tardes quentes de verão, ocorrendo em maior número e permanecendo aproximadamente estacionários e paralelos ao vento médio da camada limite (WILSON; SCHREIBER, 1986; Figura 2.1b). Locais onde rolos convectivos horizontais intersectam com linhas de convergência, brisas ou cumulus pré-existentes favorecem o início de convecção (ATKINS et al., 1995; Figura 2.1c). Muitas vezes, a convecção ocorre em regiões onde já existem cumulus, a menos que intensa convergência ocorra (WILSON; MUELLER, 1993).

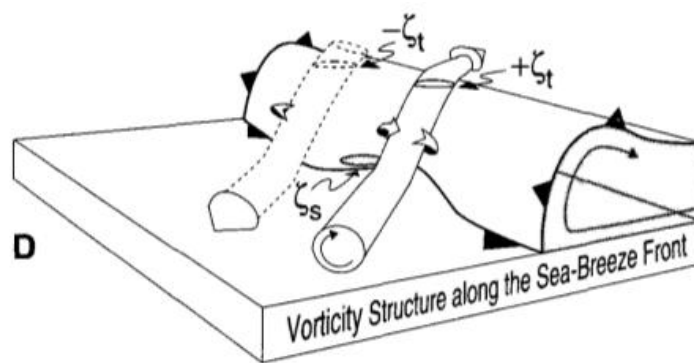
Entre os sistemas inteligentes que realizam previsão de iniciação convectiva, destacam-se o GANDOLF (Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land Surface Flood Forecasting; Pierce et al., 2000) e o Auto-Nowcaster (MUELLER et al., 2003; ROBERTS, 2006). O GANDOLF utiliza dados de radar, satélite e modelo numérico de mesoescala para análise do movimento e desenvolvimento subsequente da convecção baseado em ciclo de vida conceitual. O Auto-Nowcaster utiliza radar, satélite e observações e possui regras de iniciação através das linhas de convergência detectadas pelo sistema, além de regras de decaimento, como exemplo considerar dissipada células menores que um limiar e longe da linha de convergência (WILSON et al., 1998; WILSON; MEGENHARDT, 1997).





(a)

(b)



(c)

Figura 2.1 - Exemplos de linhas de convergência detectadas por radar indicadas por setas, sendo em preto valores acima de 30 dBZ (a). Exemplo de rolos convectivos (b). Esquema de interseção de brisa com rolos convectivos e sua associada vorticidade, engatilhando convecção (c).

Fonte: Adaptado de Wilson e Schreiber (1986); Atkins et al. (1995).

### 2.1.2. Rastreamento

As técnicas de rastreamento de células convectivas por radar meteorológico consistem na identificação, acompanhamento e previsão de deslocamento de ecos de radares. Para a identificação de células, utilizam-se limiares de valores de refletividade e/ou

área/volume. Utilizando duas ou mais imagens sucessivas, é possível o rastreamento de células através de técnicas de sobreposição (MOREL et al., 1997), projeção de centroide (JOHNSON et al., 1998), minimização de função de custo (DIXON; WIENER, 1993), otimização do erro da posição e longevidade (LAKSHMANAN; SMITH, 2010) e sobreposição seguido de função de custo global (HAN et al., 2009). A previsão de deslocamento da célula pode ser realizada através da extrapolação do vetor deslocamento (NOEL; FLEISHER, 1960 citado por WILSON, 1998). É possível assumir estado estacionário, ou seja, sem mudança no tamanho ou intensidade, ou considerar o aumento através de tendência linear. A fusão e a separação de células são problemas recorrentes nas técnicas de extrapolação devido aos erros que causam na previsão de deslocamento das células. A seguir serão citados sistemas automáticos de rastreamento de células de radar desenvolvidos por diferentes centros no mundo em operação.

O SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) é um algoritmo rastreador de células através de centroide que faz previsão de movimento de múltiplos máximos de refletividade no interior da célula (JOHNSON et al., 1998). O TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting) é um sistema semelhante ao SCIT que leva em consideração fusão e separação através de algoritmos geométricos (Figura 2.2), além do crescimento e decaimento linear baseado no passado da célula. Ao invés de basear-se em sobreposição para acompanhar células, o TITAN baseia-se na minimização da função de custo, ou seja, na distância e/ou diferença de área entre células (DIXON; WIENER, 1993).

O WDSS (Warning Decision Support System) possui diversos algoritmos de detecção de tempo severo. Ressaltam-se os algoritmos de detecção e rastreamento de células através de centroide, detecção de granizo, probabilidade de granizo e granizo severo (diâmetro maior que 1,9 cm), divergência de topo, detecção de mesociclones e cisalhamento associado, ventos intensos, downbursts, tornados e helicidade nas proximidades de tempestades por modelo (EILTS et al., 1996; LAKSHMANAN et al., 2007).

O CARDS (Canadian Radar Decision Support) utiliza lógica fuzzy para ranquear tempestades, cujos limiares para classificação em fraco, moderado, forte e severo são configuráveis (LAPCZAK et al., 1999). O THESPA (Thunderstorm Environment Strike Probability Algorithm; DANCE et al., 2010) fornece *nowcasting* por probabilidade de a tempestade alcançar um determinado local através de distribuição Gaussiana bivariada de velocidade e direção. Entre outros sistemas automáticos de rastreamento de células de radar destacam-se o STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System; BOWLER et al., 2006), SWIRLS (Short-range Warnings of Intense Rainstorms in Localized Systems; LI; LAI, 2004), AWIPS (Advanced Weather Interactive Processing System; MATHEWSON, 1996), NIMROD (GOLDING, 1998) e o SIGOONS (Significant Weather Object Oriented Nowcast System; BROVELLI et al., 2005).

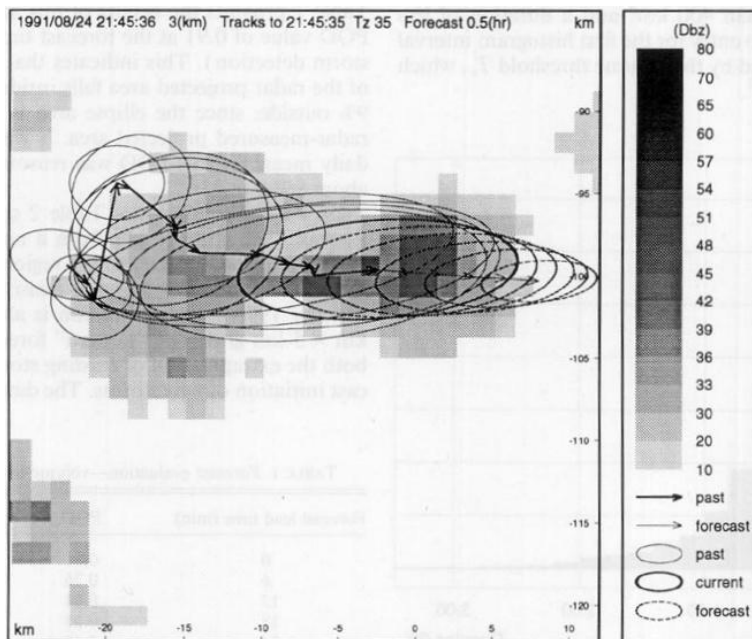


Figura 2.2 - Exemplo de rastreamento de células de radar pelo TITAN.

Fonte: Dixon e Wiener (1993).

A performance desses algoritmos decai rapidamente nos primeiros 30 minutos devido ao curto ciclo de vida médio das tempestades de cerca de 20 minutos para células simples (BRANT FOOTE; MOHR, 1979). Refinamentos foram desenvolvidos nas técnicas de extrapolação como o COTREC (LI et al., 1995) e o Variational Echo Tracking (VET; BELLON et al., 2010). O COTREC consiste na definição de vetores de deslocamento por correlação cruzada usando equação da continuidade bidimensional. Isto minimiza a divergência da velocidade derivada dos blocos adjacentes. O VET é utilizado pelo MAPLE (McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation) para a determinação do campo de vento. A previsão de deslocamento do MAPLE é feita a partir da advecção lagrangiana das células (BELLON et al., 2010).

No futuro, será necessária a combinação dos métodos de rastreamento com o campo de advecção em um único esquema, pois são complementares. Esses algoritmos continuarão em desenvolvimento devido ao fato de prover previsões de melhor qualidade em prazo mais curto que os modelos numéricos de tempo convencionais (MOLLER, 2001; PIERCE, 2012).

### **2.1.3. Modelos**

Modelos numéricos para previsão imediata podem ser divididos em duas categorias, sendo elas os modelos que não utilizam dados de radar nas condições iniciais e os que utilizam. A primeira trata-se, simplesmente, de modelos com alta resolução espacial e temporal, a fim de prever fenômenos na escala das tempestades. Dessa maneira, as tempestades são geradas durante o período de previsão. Entretanto, essa categoria de modelo produz erros significantes nos primeiros passos de tempo e na localização das tempestades devido ao *spin-up* da convergência de baixos níveis da circulação de grande escala, tornando baixa a acurácia para o *nowcasting* (WILSON et al., 1998). Os casos que apresentaram bons resultados estavam associados à forçantes de grande escala, como apresentado no estudo de Wang et al. (1996).

Estudos que assimilaram dados de radar em modelos utilizaram, inicialmente, observação de precipitação em superfície com convecção parametrizada, como no trabalho pioneiro de Fiorino e Warner (1981). Dessa maneira, a estrutura tri-dimensional de umidade, divergência, calor latente, entre outras variáveis são ajustadas a partir do campo em duas dimensões da precipitação (LIN et al., 1996 citado por WILSON et al., 1998). Simulações utilizando a estrutura explícita das tempestades foi inicialmente realizado por Lin et al. (1993). Além de radares meteorológicos, observações de superfície e sondagens são assimilados em modelos de escala de nuvens (SUN; ZHANG, 2008; Figura 2.3). Entretanto, há dificuldade na determinação da estrutura dinâmica, termodinâmica e micro-física das tempestades baseada apenas em dados de radar. Há também dificuldade na manutenção das tempestades pelos modelos após a precipitação inicial devido à falta de observação e assimilação da estrutura da camada limite, essencial para iniciação e manutenção da convecção (WILSON et al., 1998).

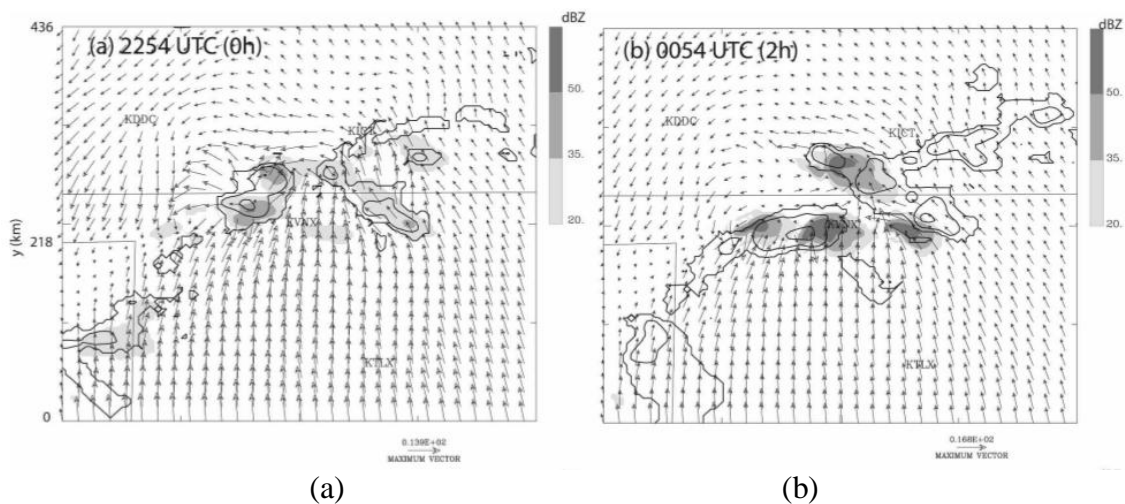


Figura 2.3 - Previsão de refletividade de radar (escala de cinza) de modelo de escala de nuvem com três ciclos de assimilação 4DVAR de refletividade e velocidade vertical para 0h (a), 2h (b), 3h (c) e 5h (d). A refletividade observada encontra-se em contorno (continua).

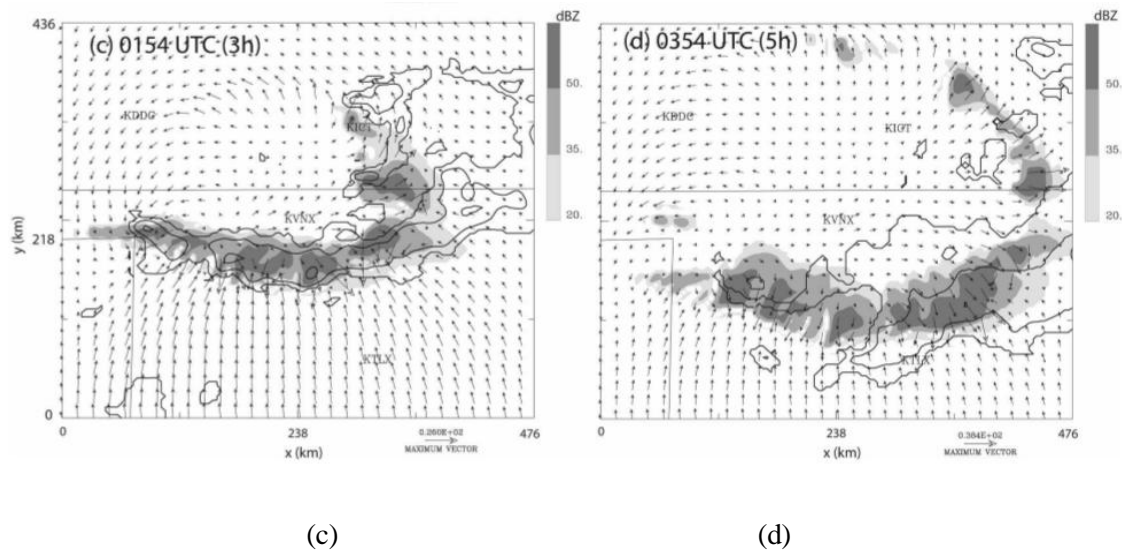


Figura 2.3 – Conclusão.

Fonte: Sun e Zhang (2008).

Diversos autores desenvolvem sistemas de assimilação de dados de radar em modelos numéricos. Grecu (2000) avaliou técnicas de previsão quantitativa por radar baseadas em redes neurais para previsões para até 3 horas e não encontrou diferença significativa comparado a esquemas simples de técnicas advectivas. Portanto, previsões quantitativas de precipitação devem considerar principalmente advecção, mas a modelagem estatística auxilia na performance. Snyder e Zhang (2003) aplicaram o Filtro de Kalman por Ensemble para assimilar velocidades Doppler e dados do radar de dupla polarização. A técnica consiste em estimar as covariâncias entre as variáveis observadas e o estado através de ensemble de previsões para, assim, assimilar dados de radar em modelo de escala de nuvem.

O VDRAS, Variational Doppler Radar Analysis System (SUN e CROOK, 1997, 2001), é um método de assimilação de dados de radar baseado na técnica de assimilação de dados variacional 4D (4DVAR) em um modelo de escala de nuvens com parametrizações de processos micro-físicos de nuvens quentes. É determinado o vento tridimensional e a estrutura termodinâmica e micro-física das tempestades convectivas

através da minimização da função de custo, definido pela diferença entre a observação do radar e a previsão do modelo.

Tai et al. (2011) propuseram utilizar o campo de análise do VDRAS juntamente com o modelo Weather Research and Forecasting (WRF), com a continuação da integração feita pelo WRF. Xiao et al. (2005) utilizou a técnica 3DVAR, The Three-Dimensional Variational Data Assimilation, para assimilar velocidades Doppler no modelo MM5 (The fifth-generation Pennsylvania State University–NCAR Mesoscale Model) para previsões de eventos severos.

O futuro da previsão numérica para previsão de tempestades requer rodadas em grandes domínios para obtenção da forçante de grande escala aliada à alta resolução espacial para inicialização da estrutura da tempestade por dados de radar, assim como acurada resolução temporal devido ao curto ciclo de vida das células de tempestade.

## **2.2. Uso de Dupla Polarização para Nowcasting**

O uso de dados de radar de dupla polarização para aplicação em previsão imediata de tempo é um tópico ainda pouco explorado. Dotzek e Friedrich (2009) observaram, utilizando classificação de hidrometeoros através de radar de dupla polarização, que o derretimento de hidrometeoros congelados é o principal fator contribuinte para a ocorrência de downbursts, seguido de evaporação de água líquida e arrasto de granizo grande. A relação das variáveis polarimétricas com descargas elétricas é um dos temas mais abordados em trabalhos recentes (CAREY et al., 2014; MATTOS et al., submetido em 2014) onde, segundo WOODARD et al., 2012, graupel em  $-15^{\circ}\text{C}$  e coluna de  $Z_{\text{DR}}$  ( $Z_{\text{DR}} > 1$  dB) em  $-10^{\circ}\text{C}$  apresentaram melhores resultados como preditores de descargas elétricas.

Outros estudos abordam a utilização de variáveis polarimétricas de forma diagnóstica. Além de assinaturas polarimétricas em tempestades intensas, como no trabalho de Kumjian e Ryzhkov (2008) onde supercélulas são estudadas, Chandrasekar et al. (2013)

abordaram características polarimétricas em eventos não-severos, no caso precipitações de inverno. Os autores encontraram, além do espectro de velocidade doppler na vertical como discriminador de tipos de hidrometeoros, a ocorrência de valores elevados de  $Z_{DR}$  próximo à região de crescimento de cristais de gelo por deposição de vapor para precipitação de hidrometeoros formados por agregação e *riming*. Em adição, Bechini et al. (2013) observaram que altos valores de  $Z_{DR}$  e  $K_{DP}$  próximos a isoterma de  $-15^{\circ}\text{C}$  são essenciais para a ocorrência e manutenção de eventos estratiformes.

### 2.3. ForTraCC

O ForTraCC (Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters; Vila et al., 2008) é um sistema automático de detecção e previsão de deslocamento de sistemas convectivos baseado no estudo de Machado et al. (1998) utilizado operacionalmente no DSA/CPTEC (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). O ForTraCC foi desenvolvido para uso de imagens de satélite geostacionário, sendo atualmente utilizado o satélite GOES-13. A seguir, o sistema ForTraCC para imagens de satélite será descrito, sendo que esse estudo utilizará o ForTraCC-Radar, adaptação do ForTraCC para dados de refletividade de radar realizada por Queiroz (2008), cujo princípio de rastreamento e previsão é o mesmo.

Para a detecção dos sistemas convectivos, os pixels das imagens de satélite são primeiramente classificados em presença e ausência de convecção, baseado no limiar de 235 K. Agrupamentos de pixels menores que  $1440\text{ km}^2$ , ou 90 pixels, são eliminados. A partir dessa identificação, são obtidos os seguintes parâmetros morfológicos para cada sistema convectivo: área, raio efetivo levando em consideração o centro geométrico, fração convectiva e número de células convectivas baseados em limiar menor (210 K), área dos cinco maiores *clusters* de menor limiar inseridos no sistema convectivo, eixo de inércia, inclinação e excentricidade. Os parâmetros radiativos calculados são: temperaturas média do sistema, temperatura média das cinco maiores células convectivas, temperatura mínima do sistema e temperatura média dos 9 pixels mais próximos do pixel com mínima temperatura.



Para o acompanhamento de um mesmo sistema convectivo (*cluster*), o ForTraCC utiliza o critério de mínima sobreposição de área de 15% dos pixels entre imagens sucessivas. Dessa maneira é possível o cálculo da velocidade do sistema convectivo no decorrer do seu ciclo de vida utilizando o centro de massa, constituindo assim uma família. O parâmetro de crescimento ou decrescimento em relação a sua área média em um intervalo de tempo  $\Delta t$  é calculado através da equação 2.1, sendo definida por Machado e Laurent (2004) como uma reta.

$$1/A * (\partial A / \partial t) = m_1 t + b_1 \quad (2.1)$$

Sendo  $m_1$  e  $b_1$  dependentes do tempo de vida total do sistema. Valor positivo dessa expressão implica em expansão do sistema e negativo implica em dissipação. A expansão inicial do sistema indica a área que o sistema atingirá em seu estágio de maturação (MACHADO; LAURENT, 2004).

A previsão de deslocamento do sistema  $VE(t+1)$  é feita através da soma do vetor deslocamento extrapolado  $V(t)$  e o vetor de erro  $\Delta V$  (Diferença entre os vetores deslocamento  $V(t)$  e o previsto  $VP(t)$ ). Dessa maneira, são necessárias três imagens sucessivas ( $t-2\Delta t$ ,  $t-\Delta t$ ,  $t$ ) para a geração da previsão ( $t+\Delta t$ ). A Figura 2.4 mostra de forma esquemática o método de previsão do ForTraCC.

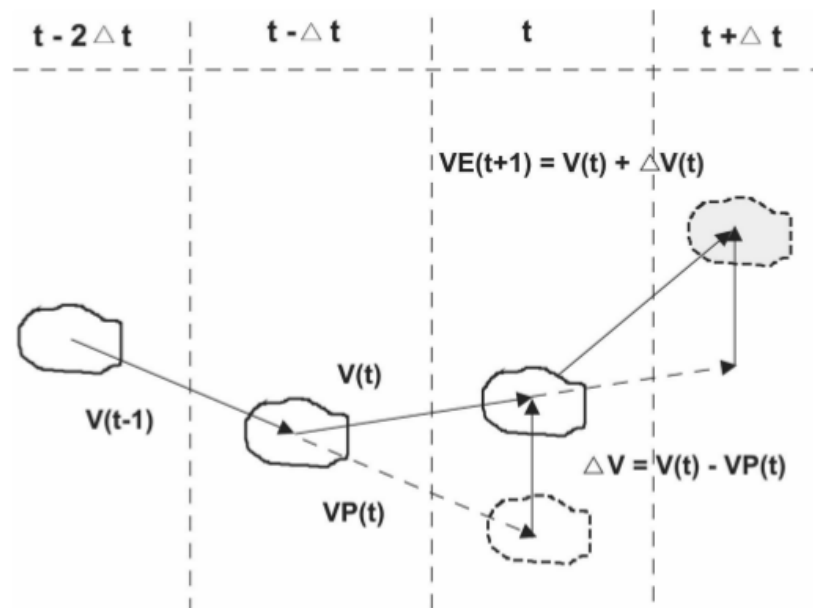


Figura 2.4 – Metodologia de previsão de sistemas convectivos do ForTraCC.

Fonte: Adaptado de VILA et al. (2008).

### 3 DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1. Obtenção dos dados

Esse estudo utilizará dados do radar de dupla polarização Banda X do Projeto CHUVA (Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: A contribution to cloud resolving modeling and to the GPM (Global Precipitation Measurement); SCHNEEBELI, 2012a; MACHADO et al., 2014). Esse projeto consiste em seis experimentos de campo para pesquisa de diferentes regimes de precipitação do Brasil e processos físicos associados a fim de contribuir para o GPM. O projeto visa obter dados para estudos das características micro-físicas das nuvens, ciclo de vida, estimativa de precipitação, descargas elétricas e modelagem micro-física em escala de nuvem. As principais características do radar são apresentadas na tabela 3.1 (BECHINI, 2010; SCHNEEBELI, 2012b). Além do radar, dados de instrumentos como disdrômetros, pluviômetros, LIDAR, radiômetro de micro-ondas, radar de apontamento vertical, rede de descargas elétricas em VHF e VLF, câmeras de alta velocidade e radiossondas são também disponíveis no período de atuação do projeto (MACHADO et al., 2014).

Tabela 3.1 – Características do radar Banda X do Projeto Chuva.

Frequência de operação	9,375 GHz
Transmissor	Magnetron transmitindo 35 kW por canal
Polarização	Transmissão horizontal e vertical simultâneas
Frequência de Repetição de Pulso	Alternado em 1200 e 1500 Hz (PPI)
Largura do pulso	0,5 $\mu$ s
Largura do feixe	1,3°
Diâmetro da antena	1,8 m

Fonte: Adaptado de BECHINI et al., 2010; SCHNEEBELI et al., 2012b.

A polarização dupla do radar, horizontal e vertical, permite a obtenção de informações específicas a respeito da estrutura das nuvens precipitantes, antes não permitido com

radares de polarização simples. Além da refletividade de radar ( $Z_h$ , dBZ) e do vento radial ( $V_r$ , m/s), as variáveis obtidas pela dupla polarização serão a seguir apresentadas. O logaritmo da diferença entre os sinais horizontal e vertical retornados ao radar consiste na refletividade diferencial ( $Z_{DR}$ , dB, Equação 3.1) e o coeficiente de correlação entre os sinais horizontal e vertical consiste na correlação co-polar ( $\rho_{hv}$ , Equação 3.2). Outra variável é a diferença entre as fases dos sinais polarizados (diferença de fase,  $\Phi_{DP}$ , °), sendo a sua derivada uma variável que permite melhor discriminação e interpretação (diferencial de fase específica,  $K_{DP}$ , °/km), apresentada na equação 3.3 (STRAKA et al., 2000). Serão utilizadas nesse estudo as variáveis  $K_{DP}$ ,  $Z_{DR}$ ,  $\rho_{hv}$  e  $Z_h$ .

$$Z_{DR} = 10 \log_{10} \left( \frac{Z_h}{Z_v} \right) \quad (3.1)$$

$$\rho_{hv} = \frac{|S_{vv} S_{hh}^*|}{(|S_{hh}^2|^{1/2} |S_{vv}^2|^{1/2})} \quad (3.2)$$

$$K_{DP} = \frac{\Phi_{dp}(r_1) - \Phi_{dp}(r)}{2(r_1 - r)} \quad (3.3)$$

Onde  $Z_h$  é a refletividade horizontal,  $Z_v$  é a refletividade vertical,  $r$  é a distância ao radar do alvo,  $r_1$  é a distância do *bin* seguinte à  $r$  na radial e  $S_{ij}$  são as componentes de S-matrix referente à polarização dos sinais enviados e retornados.

Serão utilizados nesse estudo dados do Projeto Chuva do experimento que ocorreu no Vale do Paraíba (Figura 3.1) no estado de São Paulo, a fim de estudar características do regime de precipitação convectiva da estação chuvosa dessa região. Nessa campanha, o radar encontrava-se instalado em São José dos Campos - SP, na latitude 23.208702 °S e longitude de 45.952187 °W a 650 metros de altitude entre os meses de novembro de 2011 e março de 2012.

A estratégia adotada durante o experimento CHUVA – Vale do Paraíba consiste em 13 elevações (1.0°, 1.7°, 2.6 °, 3.6°, 4.8°, 6.2°, 7.8°, 9.7°, 11.9°, 14.5°, 17.5°, 20.9°, 25.0°) para composição volumétrica, além de apontamento vertical (PPI de 89°) para calibração do  $Z_{DR}$  e dois RHI, sendo a duração total dessas varreduras de 6 minutos, dos quais os 4 minutos iniciais são destinados às 13 elevações. Ressalta-se que o horário da varredura corresponde ao seu início, o que acarretou na necessidade de acrescentar 2 minutos no horário em alguns casos, correspondendo ao horário intermediário das varreduras volumétricas. O alcance das observações é de 100 km e a resolução angular é de 1°. Outras características incluem resolução radial de 150 m, velocidade da antena de 25° por segundo e 68 amostras por pulso. Para os RHI na campanha CHUVA - Vale do Paraíba, os ângulos azimutais são de 122.4° e 116.4°, as resoluções angular e radial de 0.5° e 150 metros respectivamente, PRF de 1500 Hz, velocidade da antena de 9° por segundo e 150 amostras por pulso. No PPI de 89°, as resoluções angular e radial são de 2° e 150 metros, a PRF usada é de 1500 Hz e a velocidade da antena de 36° por segundo.

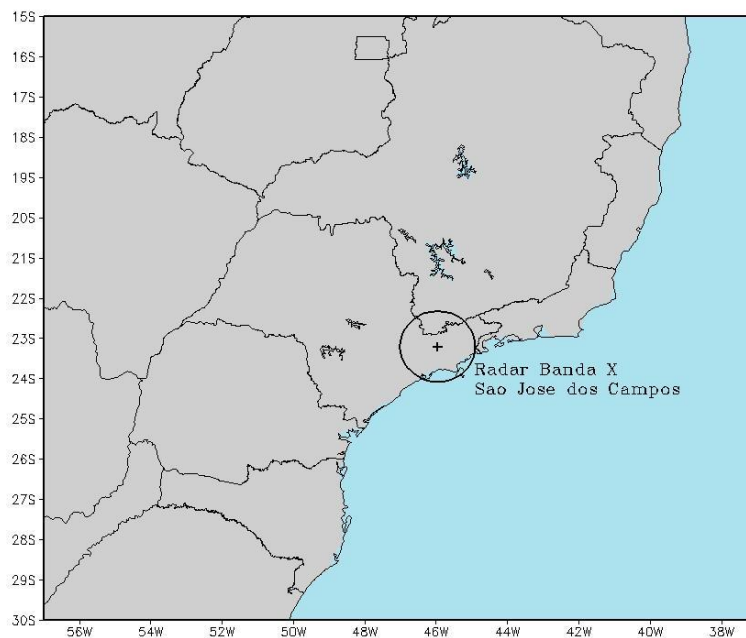


Figura 3.1 - Área de abrangência (círculo) e localização do radar (cruz) Banda X da campanha CHUVA - Vale do Paraíba.

### 3.2. Tratamento dos dados

Os dados de radar foram tratados a partir de correções de atenuação por precipitação na refletividade  $Z_h$  e na refletividade diferencial  $Z_{DR}$ . Na correção da atenuação do  $Z_h$ , foi utilizado o algoritmo ZPHI (TESTUD et al., 2000), onde a atenuação  $A_h(i)$  e a atenuação diferencial  $A_{dp}$  são dadas pelas equações 3.4 e 3.5.

$$A_h(i) = \frac{Z_h(i)^B}{I(0,i_1) + (10^{0.1B\gamma\Delta\phi_{dp}} - 1)I(i,i_1)} \times (10^{0.1B\gamma\Delta\phi_{dp}} - 1) \quad (3.4)$$

$$A_{dp} = \alpha A_h^\beta \quad (3.5)$$

Onde  $I(i,i_1)$  é definido pela equação 3.6 a seguir.

$$I(i, i_1) = 0.46B \sum Z_h(j)^B \Delta r \quad (3.6)$$

A definição dos parâmetros  $\gamma$ ,  $B$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são importantes para a boa performance do método ZPHI e são definidas como constantes por Schneebeli (2012b) com os seguintes valores:  $\gamma = 0,212$ ,  $B = 0,724$ ,  $\alpha = 0,117$  e  $\beta = 1,265$ .

Para a correção do  $Z_{DR}$ , será utilizado o método  $\Phi_{DP}$  linear que considera que a atenuação do  $Z_{DR}$  é linearmente proporcional ao  $\Phi_{DP}$  (BRINGI et al., 2007). Para a determinação do viés do  $Z_{DR}$ , serão utilizadas as correções apresentadas por Sakuragi e Biscaro (2012) de -0.27, -0.33 e -0.59 dB durante três períodos da campanha CHUVA – Vale do Paraíba (09/11/2011 a 11/12/2011, 12/12/2011 a 27/01/2012 e 28/01/2012 a 31/03/2012). Essas correções foram determinadas através do apontamento vertical presente na estratégia de varredura e proporcionaram uma melhora na classificação de hidrometeoros do software Rainbow (KEENAN, 2003) utilizado durante a campanha.

Em adição, há atenuação em casos de radome molhado por chuva sobre o radar. O estudo de Bechini et al. (2010) baseado em Anderson (1975) propôs uma correção linear

da refletividade  $Z_h$  com a taxa de precipitação dada pela equação 3.7, onde  $L_{rad}$  é a atenuação do radome e  $R$  é a taxa de precipitação em mm/h. Nesse estudo, a técnica de Bechini será aplicada utilizando uma média entre a taxa de precipitação durante e antes da varredura para evitar subestimação da atenuação por evaporação do radome molhado sem chuva.

$$L_{rad} = 2(-0.34 + 1.75R^{1/3}) \quad (3.7)$$

Ressalta-se que os dados disponibilizados para esse estudo são já corrigidos pelo algoritmo ZPHI para refletividade  $Z_h$  e pelo método  $\Phi_{DP}$  linear para  $Z_{DR}$ . Além da atenuação sofrida por radar de curto comprimento de onda, outras limitações ocorrem na qualidade dos dados desses tipos de radar, como efeito de ressonância causada pela interferência de ondas eletromagnéticas refletidas pelas bordas das gotas e acoplamento cruzado entre as ondas ortogonalmente polarizadas (RYZHKOV; ZRNIC, 2005). Esses efeitos são desprezados nesse estudo.

### 3.3. Obtenção dos eventos

Na maior parte dos dias em que a campanha Vale do Paraíba do Projeto Chuva esteve em atuação, foram verificadas ocorrências de eventos precipitantes. Nesse trabalho, serão estudados eventos convectivos intensos, separados pelas categorias apresentadas a seguir:

- Granizo em superfície;
- Células com refletividade  $Z_h$  máxima igual ou maior que 60 dBZ no Capi de 3 km.

Em adição, “Eventos não-intensos” são definidos como células precipitantes com máxima refletividade entre 46,5 e 53,5 dBZ. Em virtude da atenuação do sinal do radar a grandes distâncias, serão utilizados os eventos de precipitação que ocorrem em um raio de 60 km de distância ao radar. A partir dessa catalogação, cálculos de diversos

parâmetros foram efetuados, cuja evolução temporal indica seu potencial diagnóstico e prognóstico para a severidade do evento.

Eventos com ocorrência de granizo com o horário de sua ocorrência foram obtidos a partir de códigos METAR e SPECI de aeroportos da região (REDEMET, 2014), como Guarulhos (SBGR), Taubaté (SBTA) e São José dos Campos (SBSJ). Pesquisou-se eventos de granizo a partir de outras fontes (INPE.CPTEC, 2014; INMET, 2014; SIDEC, 2013; PORTAL R3, 2014), as quais não continham o horário do evento. Os eventos intensos e não-intensos foram obtidos a partir de análise dos dados de radar de toda a campanha.

### **3.4. ForTraCC**

O ForTraCC-Radar (QUEIROZ, 2008) será utilizado para acompanhamento de sistemas precipitantes utilizando o radar Banda X como fonte de dados. O CAPPI de 3 km, com resolução espacial de 200 metros em coordenadas cartesianas, será inicialmente utilizado para o acompanhamento dos sistemas por não possuir influência de ecos de terreno e da banda brilhante. Esses dados possuem formato cartesiano, com resolução espacial de 200 metros.

A definição do limiar de refletividade para identificação e rastreamento de *clusters* pelo ForTraCC-Radar é substancial, uma vez que limitações ocorrem na performance do rastreamento utilizando valores baixos ou elevados de refletividade. Testes foram realizados para limiares de 20, 25, 30, 35 e 40 dBZ e para diferentes metodologias de rastreamento em casos de separação de células, ou *split*. O método de rastreamento necessita escolher, em casos de separação de células, uma célula para considerar como mesma família. Dessa maneira, foram realizados testes seguindo a célula com maior área, seguindo a célula com maior refletividade  $Z_h$  máxima e com maior refletividade  $Z_h$  média. Foram utilizados para esse teste quatro eventos associados à queda de granizo, sendo um deles sem horário confirmado de queda no solo. Escolheu-se, para a detecção do evento, limiar de refletividade  $Z_h$  de 35 dBZ utilizando a máxima refletividade  $Z_h$  em



casos de *split*. Essa escolha deu-se porque limiares mais baixos de refletividade  $Z_h$  apresentaram problemas no rastreamento, principalmente com fusão com extensas áreas de precipitação, não condizendo com a análise proposta da célula convectiva (Figura 3.2). Por outro lado, limiar alto de refletividade  $Z_h$  impede a identificação de sistemas precipitantes na fase inicial do ciclo de vida, quando a célula ainda não atingiu o limiar. A escolha do *cluster* com máxima refletividade  $Z_h$  em casos de *split* deu-se pela melhor performance no rastreamento correto das células convectivas associadas aos eventos, como exemplificado na figura 3.3. As famílias apresentadas nas figuras 3.2 e 3.3 são aquelas referentes ao horário do granizo, o que justifica o rastreamento errôneo em horários anteriores ao evento na figura 3.2d. Para limiar de área, foram utilizados baixos valores para permitir a identificação de sistemas pequenos no início do ciclo de vida, suprindo a limitação da intensidade exposta anteriormente. O limiar utilizado é de 5 pixels, ou  $0,2 \text{ km}^2$ .

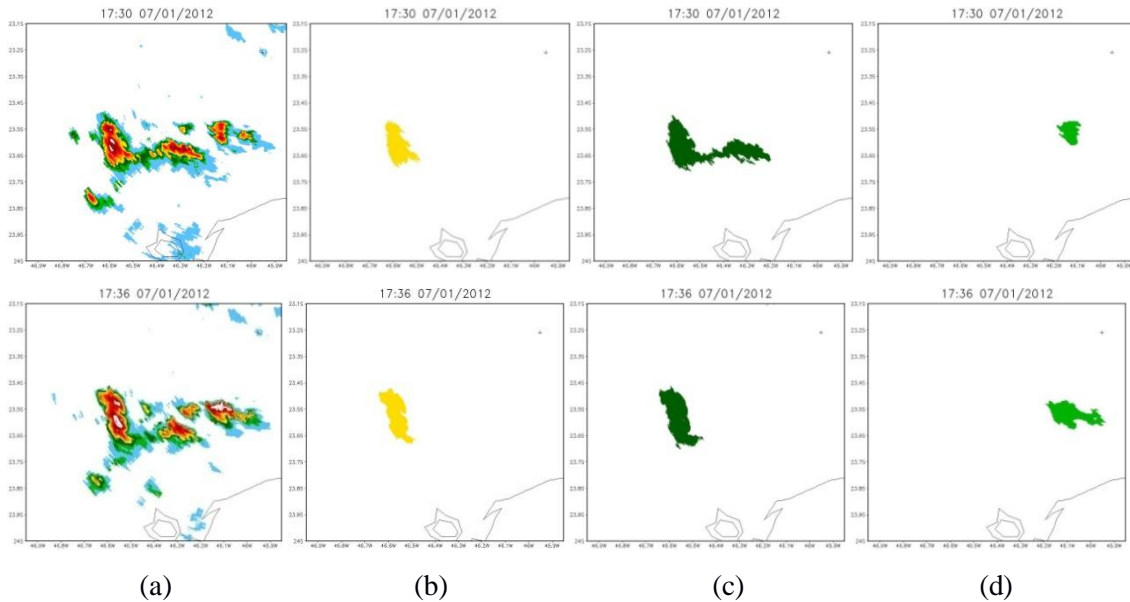


Figura 3.2 – Sequência de imagens Capii 3 km (a) e *clusters* de 35 (b), 30 (c) e 25 dBZ (d) definidos pelo ForTraCC (continua).

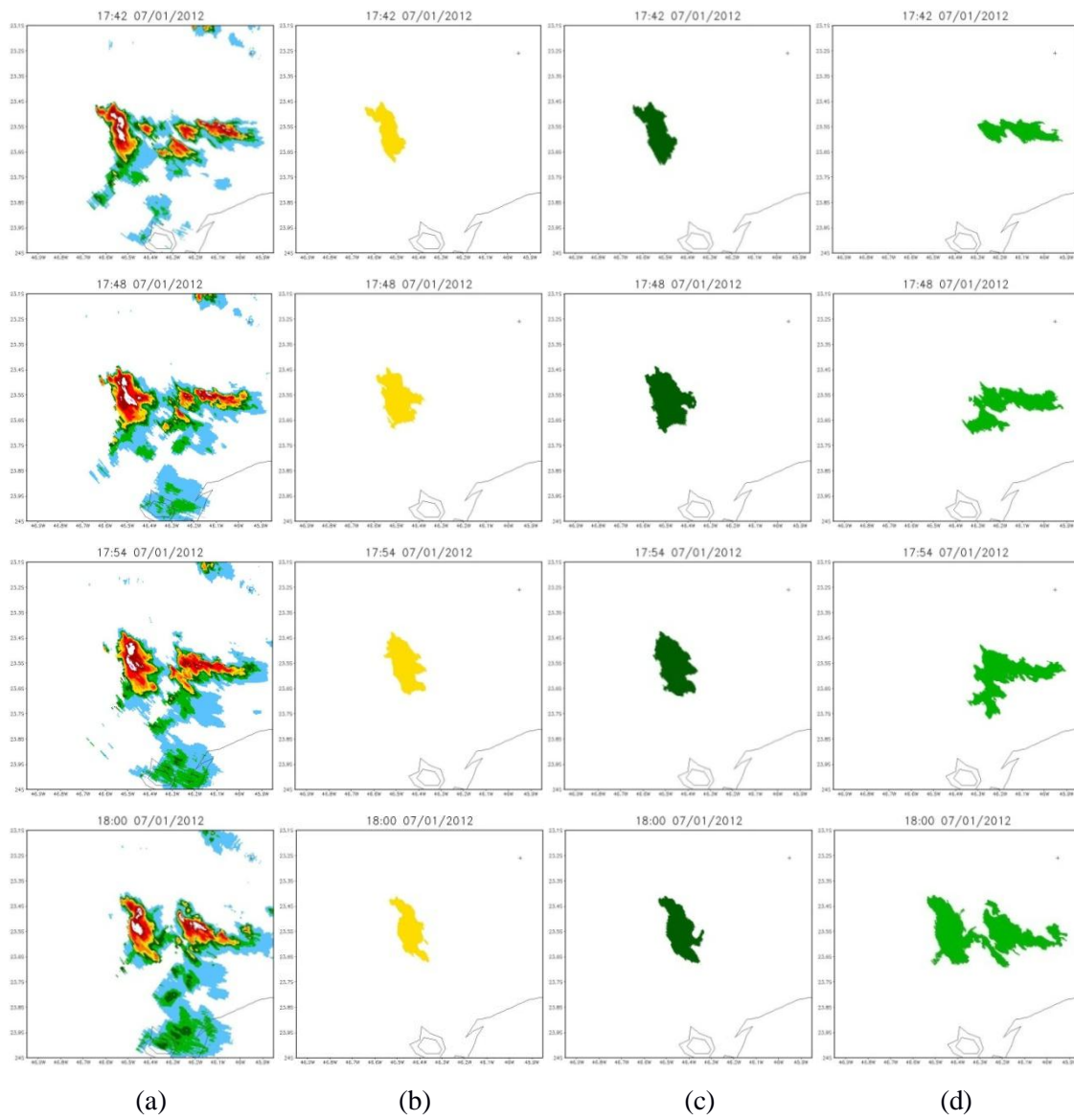


Figura 3.2 – Conclusão.

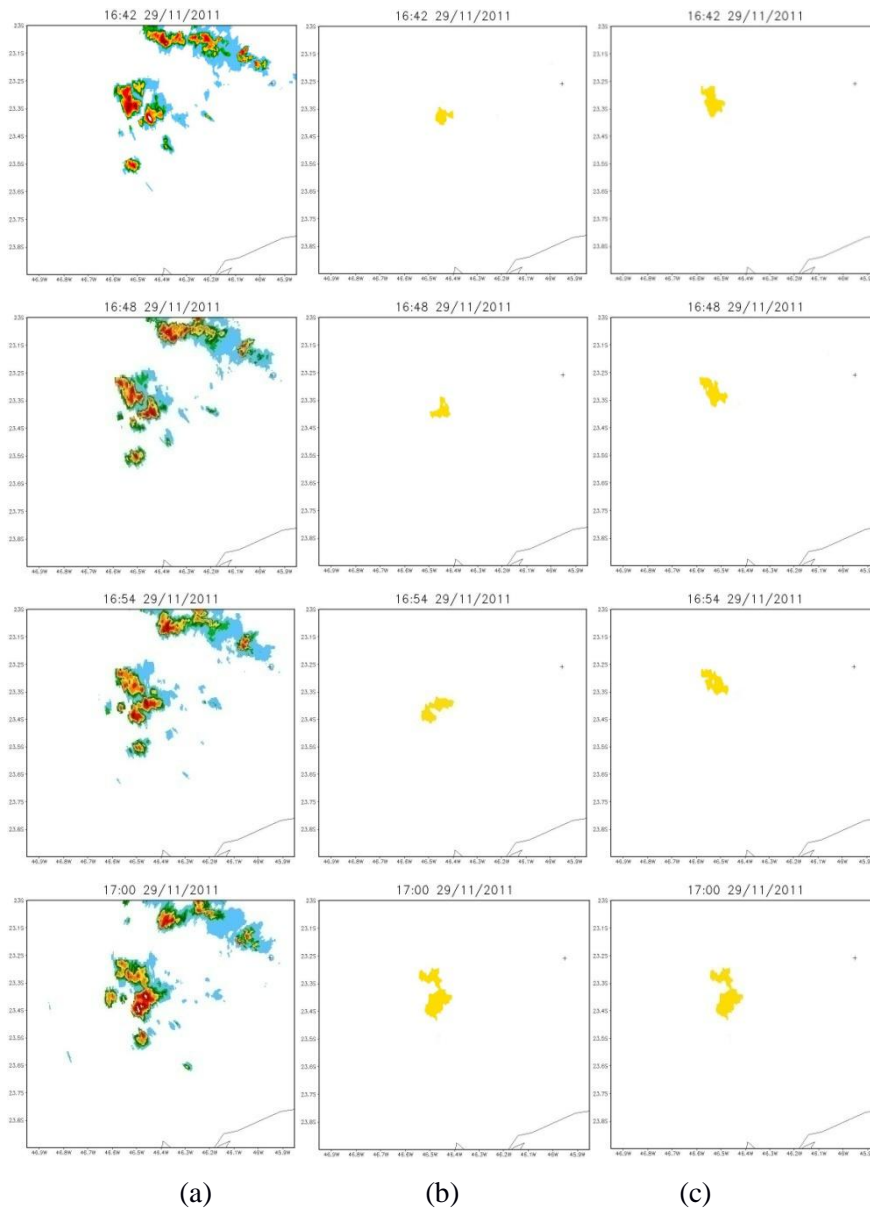


Figura 3.3 – Sequência de imagens Capi 3 km (a) e *clusters* de 35 dBZ seguindo o *cluster* mais intenso (b) e seguindo o *cluster* maior em área (c), definidos pelo ForTraCC (continua).

### 3.5. Conversão de Resolução dos Dados

O *cluster* definido pelo ForTraCC foi transformado para resolução de 1 km na horizontal para a comparação com os dados brutos de radar, de onde obteve-se dados dos *bins* na mesma resolução horizontal e com 0,5 km de resolução na vertical.

A partir do pixel com resolução de 1 km definido pelo *cluster* do ForTraCC, procurou-se, para a primeira elevação, todos os *bins* de radar contidos nessa área, processo repetido para as elevações seguintes. Cada *bin* possui uma altura, calculada a partir da equação de altura de radar segundo uma atmosfera com refração média (Equação 3.8), onde H é a altura do *bin* em relação ao solo em km, r é a distância do *bin* ao radar em km,  $k_e$  é o índice de refração igual a 4/3,  $R_t$  é o raio da Terra em km,  $\varepsilon$  é a elevação do radar em ° e  $H_R$  é a altura do radar em km.

$$H = \sqrt{r^2 + (k_e R_t)^2 + 2rk_e R_t \sin \varepsilon} - k_e R_t + H_R \quad (3.8)$$

As alturas de cada *bin* foram convertidas para camadas com resolução de 0,5 km, cujo ponto médio da camada é a altura divisível por 0,5 (Figura 3.4). Para exemplificar, *bins* em alturas entre 2,751 km e 3,250 km (altura média igual a 3,0 km) estão na mesma camada, a camada 6, enquanto a camada 7 envolve *bins* entre 3,251 km e 3,750 km cuja altura média é igual a 3,5 km, e assim sucessivamente. Após a busca por *bins* até a última elevação, o processo de busca continua para a área de 1 km<sup>2</sup> seguinte associado ao *cluster*. Metodologia semelhante para conversão de dados de radar foi utilizado por Costa (2007) e Mattos (submetido em 2014).

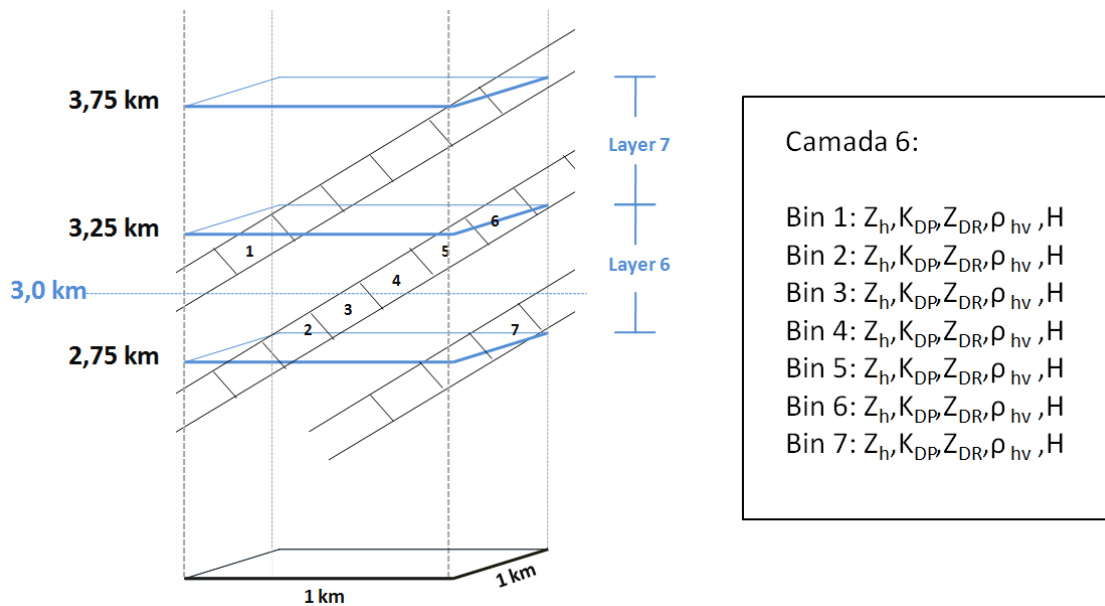


Figura 3.4 - Representação esquemática do volume com 1 km de resolução horizontal e 0,5 km de resolução vertical, onde a camada 6 é definida entre 2,75 km e 3,25 km de altura, com altura média de 3 km. Os *bins* localizados dentro desse volume são representados pela numeração em preto de 1 a 7, sendo que cada um possui um valor de variável de radar e uma altura, exemplificado à direita. A figura não está em escala real.

Obtidos todos os *bins* de cada camada para cada pixel de 1 km, foram determinados os perfis verticais utilizando valor máximo, mínimo, médio, mediana, 25° percentil e 75° percentil. Para camadas sem valor, foi realizado um preenchimento linear, como exemplificado na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Exemplo de *bins* detectados ao longo de uma coluna com área de 1 km<sup>2</sup> em suas respectivas camadas. Na coluna Perfis Verticais são apresentados os perfis obtidos com interpolação linear. A coluna Cm representa o número da camada.

Cm	Refletividade Z <sub>h</sub> dos bins detectados	Perfis Verticais					
		máx.	mín.	méd.	mdn	p25	p75
18	31.0, 29.5, 25.5, 20.5, 16.0	31.0	16.0	27.3	25.5	29.5	20.5
17		33.1	20.1	29.9	28.8	32.0	23.6
16		35.2	24.2	32.5	32.0	34.5	26.8
15		37.4	28.4	35.1	35.2	37.0	29.9
14	39.5, 39.5, 38.5, 39.0, 37.0, 33.0, 32.5	39.5	32.5	37.7	38.5	39.5	33.0
13		39.7	33.5	37.8	38.2	39.3	34.5
12		39.8	34.5	38.0	38.0	39.2	36.0
11	38.0, 35.5, 37.5, 37.0, 37.5, 40.0, 38.5, 39.0	40.0	35.5	38.1	37.8	39.0	37.5
10		44.2	36.5	40.9	38.6	42.5	37.8
9	39.5, 39.5, 38.0, 37.5, 44.0, 46.0, 48.5	48.5	37.5	43.7	39.5	46.0	38.0
8		49.5	36.5	44.3	40.0	46.7	37.8
7		50.5	35.5	45.0	40.5	47.3	37.7
6	34.5, 38.0, 37.5, 41.0, 43.0, 48.0, 51.5	51.5	34.5	45.6	41.0	48.0	37.5
5	27.0, 24.0, 23.5, 24.0, 27.5, 34.0, 36.0	36.0	23.5	30.7	27.0	34.0	24.0

Devido à inexistência de radiossondagens durante os três meses finais da campanha, utilizou-se uma média das radiossondagens lançadas nos dois primeiros meses da campanha para a determinação de camadas de interesse definidas entre isotermas (Tabela 3.3, MATTOS, submetido em 2014). As camadas de interesse são: Abaixo da isoterma de 0°C (AB0), entre as isotermas de 0°C e -20°C, chamada aqui de Camada de Fase Mista (CFM), acima da isoterma de 0°C (AC0), camada acima da isoterma de -20°C (AC-20) e acima de -40°C (AC-40). Utilizando a média das radiossondagens, definiu-se AB0 como as camadas menores e igual a 8, a CFM entre as camadas 9 e 15, AC0 são as camadas iguais e maiores que 9, AC-20 compreende a camada 16 e camadas mais elevadas e AC-40 são a camada 21 e mais elevadas.

A definição da CFM ocorreu após testes entre as isotermas de 0°C e -15°C, 0°C e -20°C e 0°C e -40°C, sendo o segundo representando melhor a presença de hidrometeoros líquidos e congelados, enquanto o primeiro consistia em uma camada estreita e pouco representativa e a última sofria muita influência da camada de gelo. A definição descrita deu-se através de análise do comportamento dos parâmetros descritos na seção seguinte. O comportamento de variáveis polarimétricas na CFM é importante pelo fato da presença e aumento do conteúdo de hidrometeoros congelados nessa camada ser um indicador de aumento do potencial de severidade da convecção, podendo ser inferida a partir das variáveis polarimétricas aqui estudadas.

Tabela 3.3 – Altura, temperatura média e desvio padrão da radiossondagem média para a campanha CHUVA-Vale do Paraíba.

ALT (m)	Tm	DVP	ALT (m)	Tm	DVP	ALT (m)	Tm	DVP
750.0	20.0	2.3	5750.0	-7.7	1.5	10500.0	-41.7	2.3
1000.0	17.9	2.4	6000.0	-9.4	1.6	10750.0	-43.6	2.2
1250.0	16.7	2.9	6250.0	-11.0	1.7	11000.0	-45.4	2.2
1500.0	16.0	2.9	6500.0	-12.6	1.7	11250.0	-47.3	2.1
1750.0	15.0	2.5	6750.0	-14.3	1.7	11500.0	-49.2	2.0
2000.0	13.6	2.2	7000.0	-16.0	1.9	11750.0	-50.9	1.9
2250.0	12.0	1.8	7250.0	-17.8	2.0	12000.0	-52.6	1.8
2500.0	10.5	1.6	7500.0	-19.4	2.1	12250.0	-54.2	1.8
2750.0	9.1	1.4	7750.0	-21.2	2.3	12500.0	-55.9	1.9
3000.0	7.6	1.4	8000.0	-23.1	2.4	12750.0	-57.5	2.2
3250.0	6.4	1.4	8250.0	-24.9	2.4	13000.0	-58.9	2.5
3500.0	5.0	1.5	8500.0	-26.8	2.5	13250.0	-60.2	2.8
3750.0	3.6	1.8	8750.0	-28.6	2.6	13500.0	-61.6	2.9
4000.0	2.3	1.9	9000.0	-30.4	2.7	13750.0	-62.8	3.0
4250.0	0.9	1.8	9250.0	-32.2	2.6	14000.0	-63.9	3.0
4500.0	-0.4	1.7	9500.0	-34.0	2.6	14250.0	-65.0	3.0
4750.0	-1.8	1.7	9750.0	-36.0	2.6	14500.0	-65.7	2.6
5000.0	-3.2	1.5	10000.0	-37.9	2.5	14750.0	-66.7	2.6
5250.0	-4.7	1.5	10250.0	-39.8	2.4	15000.0	-67.6	2.8
5500.0	-6.2	1.5						

Fonte: MATTOS, submetido em 2014.

### 3.6. Obtenção dos Parâmetros

#### 3.6.1 Contabilização dos Volumes

Definidos os perfis verticais e as camadas de interesse, foram contabilizados volumes representados por conjuntos de valores de variáveis polarimétricas. Essas medidas foram feitas para as células definidas pela área de 35 dBZ em 3 km pelo ForTraCC seguidas a cada instante. Dessa forma, todas as medidas são lagrangianas. Os valores definidos condizem com o interesse físico da camada estudada, e são apresentadas na tabela A.1, no apêndice A. Através desses valores, procura-se definir tipos específicos de partículas de gelo e água importantes na análise de severidade, como a água líquida super-resfriada importante para o processo de crescimento de gelo por *riming* originando graupel e granizo, além da própria presença do granizo e do graupel, precursor deste. Limiares de refletividade  $Z_h$  entre 35 dBZ e 50 dBZ foram utilizados para o cálculo do volume em todas as camadas, para a determinação da intensidade e severidade do sistema precipitante. Limiares negativos de  $Z_{DR}$  em todas as camadas, exceto em AB0, foram calculados para determinar alvos orientados verticalmente, enquanto  $K_{DP}$  utilizando limiares abaixo de  $0^\circ/\text{km}$  foram calculados para obter alvos onde a atenuação do sinal de radar na vertical foi maior comparado com a atenuação na horizontal. Em AB0, foram utilizados limiares de  $Z_{DR}$  e  $K_{DP}$  maiores que 0 dB e  $0^\circ/\text{km}$ , respectivamente, pois nessa região o interesse é para alvos horizontais, ou precipitação intensa. Para correlação  $\rho_{hv}$ , foram utilizados diferentes limiares com intervalo de 0,05, com interesse na obtenção de volumes de correlação baixa, significando co-existência de diferentes tipos de hidrometeoros. Testes também foram utilizados para conjunto de duas, três e quatro variáveis simultaneamente, conforme apresentado na tabela A.1, no apêndice A.

Os volumes de uma dada variável polarimétrica foram calculados utilizando limiares baseados nos valores mínimos, máximos, médios, medianas, e 25° e 75° percentis,



explanado na seção anterior. Ressalta-se ainda que foram obtidos, além dos volumes, a derivada temporal do volume, a porcentagem do volume em relação à camada total e a derivada temporal dessa porcentagem.

### 3.6.2 Variação de Topo e VIL

A obtenção da Variação de Topo consiste na variação temporal da altura máxima ( $dH_{TOP}/dt$ ) que um limiar de refletividade  $Z_h$  é detectado no sistema precipitante. É possível, ainda, a determinação da altura de topo média, a partir da altura máxima alcançada em cada perfil vertical de resolução horizontal de 1 km. Os limiares de refletividade  $Z_h$  utilizados foram: 0 dBZ, 10 dBZ e 20 dBZ. Trata-se de um importante parâmetro de severidade por ser uma medida indireta do crescimento da convecção através de correntes ascendentes (MACHADO; LAURENT, 2004). A velocidade das correntes ascendentes pode, ainda, ser inferida a partir da variação de topo.

A água líquida integrada verticalmente (VIL, *Vertically Integrated Liquid*) é calculado usando dados de refletividade de radar e sua unidade é em  $kg/m^2$  (GREENE; CLARK, 1972). A equação 3.9 é utilizada para o seu cálculo, onde  $Z_i$  é refletividade de radar em um nível,  $Z_{i+1}$  é a refletividade em um nível acima e  $\Delta h$  é diferença de altura entre esses níveis, nesse caso 500 m. Trata-se de um avaliador de tempestades severas, além de ser possível realizar previsão quantitativa de precipitação (BOUDEVILLAIN; ANDRIEU, 2003).

$$VIL = \sum 3.44 \times 10^{-6} [(Z_i + Z_{i+1})/2]^{4/7} \Delta h \quad (3.9)$$

A partir do cálculo do VIL, é possível a obtenção de outro parâmetro, a densidade do VIL, ou DVIL, que consiste no quociente entre o VIL e o echo-top (Equação 3.10; AMBURN; WOLF, 1997). Nesse estudo, o echo-top é definido como a altura máxima de refletividade maior que 0 dBZ. Trata-se de uma “normalização” do VIL que discrimina melhor tempestades que produzem granizo, sendo independentes de estações do ano, localização e massas de ar. Outro parâmetro calculado é a Fração de Área de

VIL (FAVIL), onde é obtido a porcentagem de VIL maior que um limiar em relação ao sistema precipitante total (Equação 3.11). Os limiares testados foram de 5 kg/m<sup>2</sup> e 10 kg/m<sup>2</sup>.

$$DVIL = \frac{VIL}{Echo\ Top} \quad (3.10)$$

$$FAVIL = \frac{area\ (VIL > limiar\ )}{area\ (cluster\ )} \quad (3.11)$$

### 3.7 Escolha dos Parâmetros Preditores

Os parâmetros expostos na seção 3.6 foram calculados para os eventos associados à queda de granizo no solo, cujo horário é conhecido. A partir de então, é possível definir quais dos parâmetros melhor diagnostica e prognostica o fenômeno. A escolha desses parâmetros deve possuir significado físico, apresentando uma “assinatura” antes do horário do fenômeno. Como exemplo, ressalta-se o crescimento do conteúdo de gelo em camadas elevadas e o colapso desse conteúdo minutos antes do granizo como uma importante característica a ser obtida entre esses parâmetros.

Os parâmetros preditores escolhidos serão aplicados ao conjunto de eventos intensos, onde refletividade  $Z_h$  máxima maior que 60 dBZ ocorreu em algum momento do ciclo de vida do evento, e aos eventos não-intensos, que possuem  $Z_h$  máximo entre 46,5 e 53,5 dBZ. Dessa maneira, pretende-se reduzir o número de parâmetros a partir de análise da capacidade prognóstica para esses eventos. A partir do número reduzido de parâmetros, a capacidade de detecção de eventos intensos será testada utilizando um conjunto independente de eventos intensos, como forma de teste da previsibilidade desses parâmetros.

Essa análise será feita de forma estatística a partir de avaliadores baseados na tabela de contingência (Figura 3.5, WILKS, 2011), sendo eles a Probabilidade de Detecção (POD), Falso Alarme (FAR), Probabilidade de Falsa Detecção (POFD) e o *Heidke Skill*

*Score* (HSS). De acordo com a relação entre previsão e evento observado,  $a$  representa acertos,  $b$  falso alarme,  $c$  representa erros e  $d$  corretos negativos.

		Observado	
		Sim	Não
Previsto	Sim	a	b
	Não	c	d

$n=a+b+c+d$

Figura 3.5 – Relação entre evento previsto e observado, sendo  $a$  acertos,  $b$  falso alarme,  $c$  erros,  $d$  corretos negativos e  $n$  é a dimensão da amostra.

Fonte: Adaptado de Wilks (2011).

A Probabilidade de Detecção (POD, *Probability of Detection*) consiste na equação 3.12, representando a razão entre previsões corretas e o número de vezes que o evento ocorreu.

$$POD = \frac{a}{a+c} \tag{3.12}$$

A Razão de Falso Alarme (FAR, *False Alarm Ratio*) consiste na proporção de eventos previstos que falharam, ou seja, a razão entre o falso alarme e o total de previsões, sendo representada pela equação 3.13.

$$FAR = \frac{b}{a+b} \tag{3.13}$$

A Probabilidade de Falsa Detecção (POFD, *Probability of False Detection*) é a razão de falso alarme sobre o número total de não-ocorrências do evento (Equação 3.14). É a frequência relativa condicional da previsão errônea em relação aos eventos que não ocorreram. Complementa a POD abrangendo todas as quatro probabilidades condicionais.

$$POFD = \frac{b}{b+d} \quad (3.14)$$

O *Heidke Skill Score* (HSS) é um índice estatístico que computa a proporção correta de previsões randômicas estatisticamente independentes das observações (Equação 3.15). A previsão perfeita para o HSS possui valor igual a 1, previsão equivalente à previsão de referência possui HSS=0 e previsões piores que a referência possui HSS negativo.

$$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \quad (3.15)$$

O uso de correlação entre os parâmetros será empregado nesse estudo para o descarte de parâmetros que possuem características similares, utilizando seus valores observados nos eventos de granizo. Dois parâmetros serão considerados correlacionados quando a correlação entre eles for maior ou igual a 0,8 em módulo. Entre parâmetros correlacionados, apenas continuará na análise o parâmetro que possuir maior valor de HSS.

### **3.8 Desenvolvimento de um Modelo Probabilístico**

Obtidos os parâmetros preditores, um modelo probabilístico de previsão imediata de tempo foi desenvolvido. O modelo foi validado através de um conjunto independente de eventos intensos, definidos como os últimos em ordem cronológica do total de eventos intensos. O modelo será descrito a seguir.

Inicialmente, para um dado tempo  $t$  que antecede o evento  $E$  para um dos parâmetros preditores, é verificado se o parâmetro previu o evento intenso. O mesmo procedimento é realizado para todos os parâmetros e para o mesmo evento. A porcentagem do acerto em função do conjunto de parâmetros previsores que acertaram a previsão é obtida. O mesmo procedimento é realizado para o evento  $E$  seguinte e, após cálculo para todos os

eventos, o procedimento é realizado para o seguinte tempo  $t$ . As porcentagens são, então, acumuladas nos seus últimos horários de antecedência para o mesmo evento. A explicação para o acúmulo de tempos de antecedência é apresentado nos resultados, na seção 4.4. Para o mesmo tempo de antecedência acumulado, são obtidos a média e o desvio padrão para a obtenção da curva probabilística de identificação do evento intenso. O mesmo procedimento foi realizado para eventos não-intensos, ou seja, falso alarme, e para o conjunto de eventos independentes para verificação da performance do modelo. A figura 3.6 demonstra esquematicamente a concepção do modelo descrito.

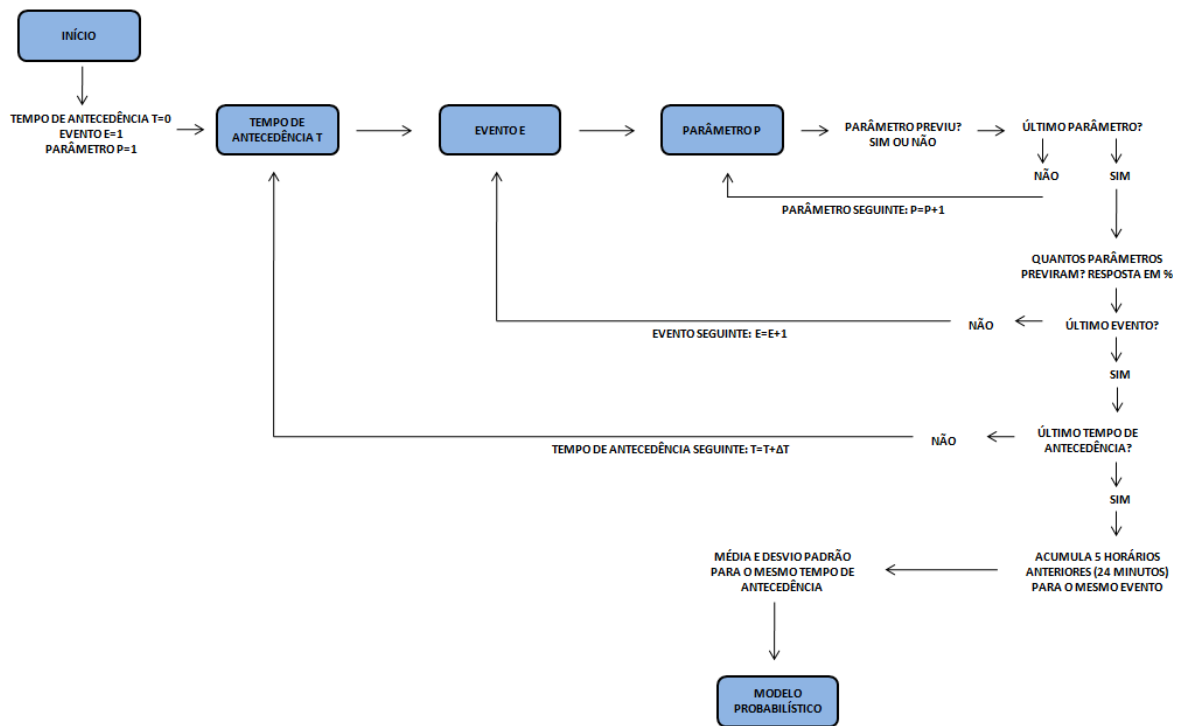


Figura 3.6 – Fluxograma da concepção do modelo probabilístico.



## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Descrição dos Eventos de Granizo**

Neste capítulo serão descritos os eventos de granizo selecionados para estudo. Para tanto, além da confirmação da queda no solo é também necessário o horário exato da ocorrência desse fenômeno. As fontes que apresentam essas informações são códigos METAR e SPECI de aeroportos da região (REDEMETS, 2014), como Guarulhos (SBGR), Taubaté (SBTA) e São José dos Campos (SBSJ), onde foram registrados 5 eventos no período de estudo e em Albrecht et al. (2012). Três eventos de granizo obtidos a partir de outras fontes (INPE.CPTEC, 2014; INMET, 2014; PORTAL R3, 2014), foram descartados devido à falta do horário de ocorrência do granizo. Para o estudo desses eventos, faz-se necessário o acréscimo de 2 minutos ao horário da varredura do radar, conforme explanado na seção 3.1

Dos 5 eventos com horários confirmados a partir de informações de aeroportos, dois apresentaram limitações para o estudo, sendo um por intensa atenuação provocada por precipitação sobre o radar e outro devido à rápida fusão com extensa área de precipitação intensa, impedindo estudo da célula específica causadora de granizo. Os 3 eventos restantes serão descritos a seguir.

O primeiro evento, chamado de Evento 1 (Figura 4.1a e 4.1b), provocou granizo na região metropolitana de São Paulo no dia 07 de janeiro de 2012 nos seguintes horários: 17h15min UTC, das 17h40min às 17h55min UTC (15 minutos de granizo) e às 18h06min UTC (ALBRECHT et al., 2012; REDEMETS, 2014). Desses 3 horários de granizo, serão utilizados para o estudo apenas os dois primeiros devido ao baixo intervalo de tempo entre os últimos horários (11 minutos), onde assume-se a não-ocorrência de realimentação do granizo no sistema precipitante, podendo o último ser resultado da formação de granizo responsável pelo granizo no horário anterior. Os dois primeiros horários de granizo, que serão aqui estudados, serão referidos nesse estudo como Evento 1a e Evento 1b. A célula já apresentava caráter intenso na primeira

detecção pelo radar, pois vinha de uma trajetória de fora do alcance do radar. Apesar da distância, quase no limite do alcance do radar na primeira detecção, o estudo foi possível devido à quase nenhuma área de precipitação entre o evento e o radar, sendo prejudicada apenas a obtenção de dados próximo à superfície. Nos minutos seguintes à primeira detecção, a célula apresentou deslocamento em direção ao radar, permitindo melhor análise. O Evento 2 (Figura 4.1c) provocou granizo em Taubaté no dia 21 de janeiro de 2012 às 17h20min UTC (REDEMET, 2014). Esse evento caracterizou-se por rápido desenvolvimento, provocando granizo apenas 26 minutos após o primeiro eco. O Evento 3 (Figura 4.1d e 4.1e) provocou granizo em Guarulhos no dia 19/02/2012 às 20h10min UTC, às 20h45min UTC e às 21h00min UTC (REDEMET, 2014), sendo que o último horário não será estudado pelo motivo de exclusão do último horário de granizo do Evento 1.

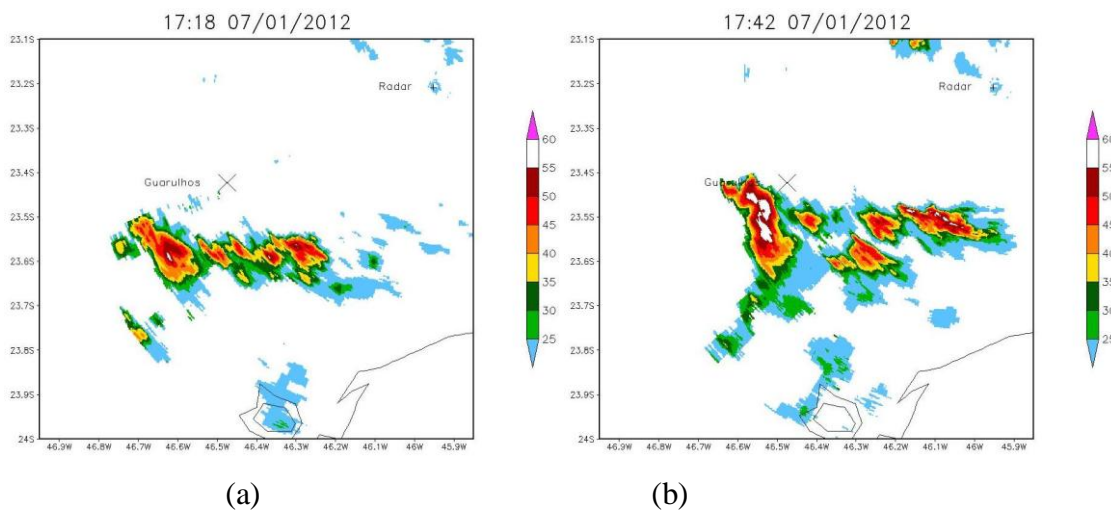


Figura 4.1 – Cappi 3 km dos horários associados aos eventos: 1a (a), 1b (b), 2 (c), 3a (d) e 3b (e). (Continua).



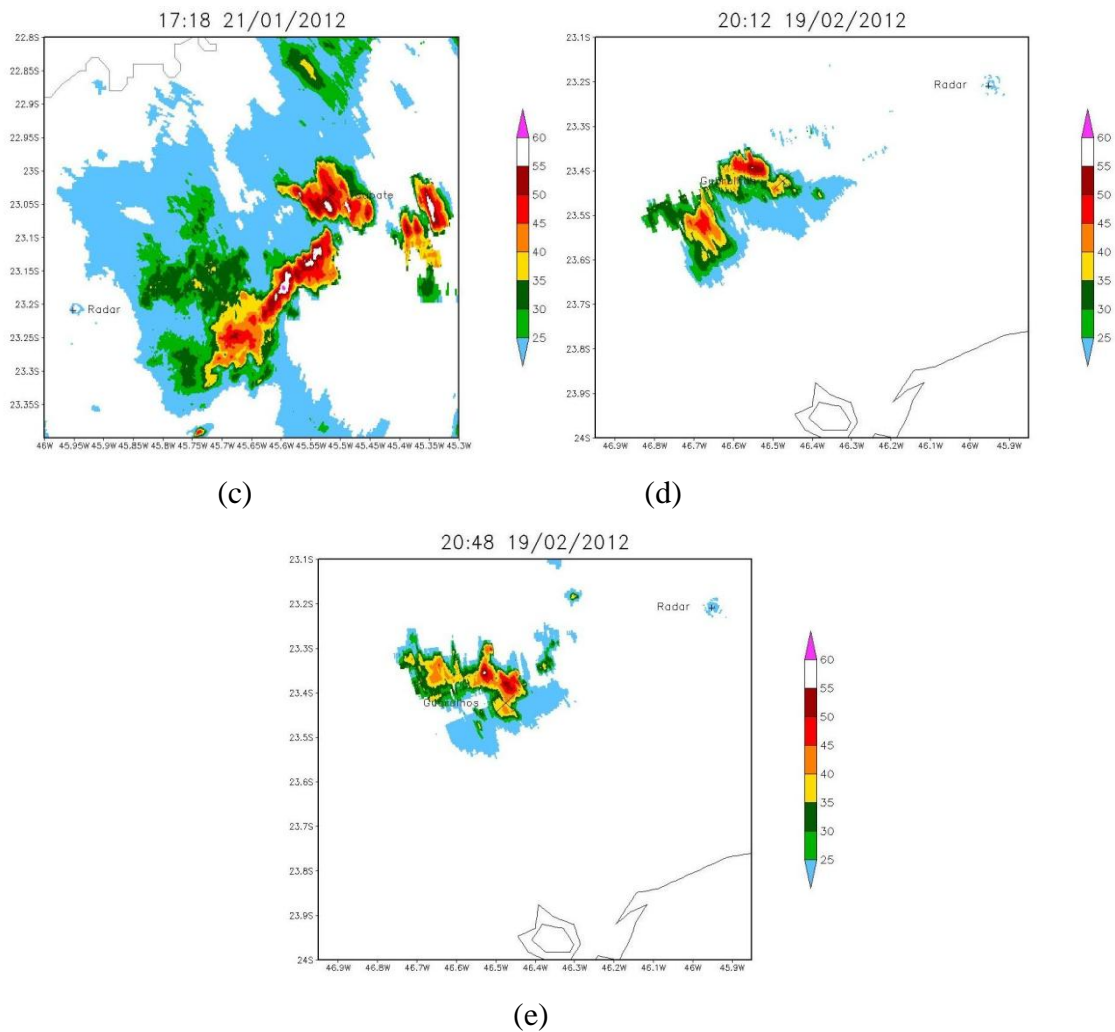


Figura 4.1 – Conclusão.

## 4.2 Parâmetros Polarimétricos Preditores de Granizo

Os parâmetros preditores de granizo foram obtidos a partir de análise de variação de topo, VIL, volume das variáveis polarimétricas e de combinações entre elas para diferentes camadas utilizando diferentes limiares das variáveis (Tabela A.1, Apêndice A), além da variação do volume, porcentagem e variação da porcentagem para os Eventos 1, 2 e 3. Os parâmetros escolhidos como preditores para o fenômeno foram os que apresentaram comportamentos similares antes do granizo para todos os eventos.

Parâmetros diagnósticos, ou seja, que indicassem o horário exato do evento, também foram pesquisados.

Entre as características obtidas a partir dessa análise, foi verificado que o comportamento do volume de conjunto de valores de variáveis polarimétricas acompanha a tendência do volume total da camada na maior parte dos casos. Mesmo uma pequena diferença entre esses volumes implica em uma mudança no valor da porcentagem da variável em relação à camada total, mostrando-se mais útil para análise. Em acréscimo, a variação da porcentagem também mostra-se importante para análise, pois apresenta quando houve um aumento ou diminuição mais pronunciado do volume da variável em relação à camada total. A Figura 4.2 apresenta as características supracitadas.

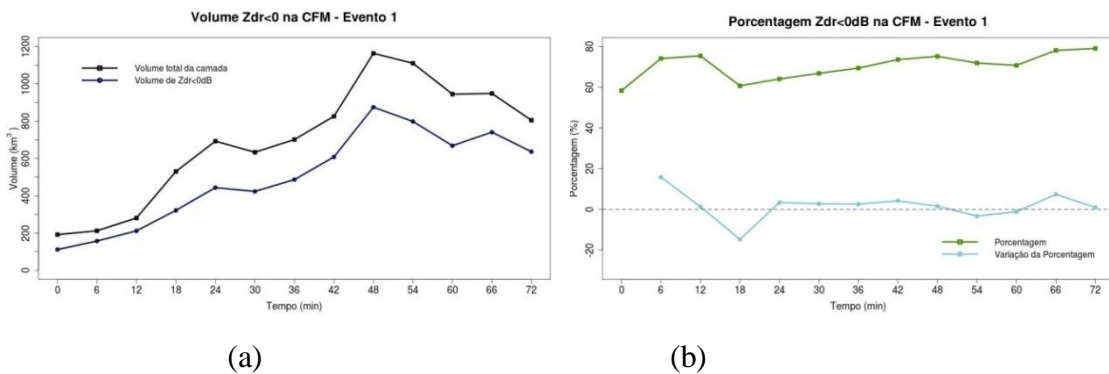


Figura 4.2 – Evolução temporal de volume total da camada de fase mista e do volume ocupado por  $Z_{DR} < 0$  dB nessa camada para um evento de granizo (a) e percentual ocupado por  $Z_{DR} < 0$  dB em relação à essa camada e variação de percentual (b).

A partir das informações de porcentagem e variação de porcentagem das variáveis polarimétricas, procurou-se obter as seguintes características: porcentagem ou variação de porcentagem maior que um limiar ocorrendo com tempo de antecedência ao granizo mínimo de um minuto. Essas características devem ocorrer antes de todos os eventos de granizo (1a, 1b, 2, 3a e 3b) uma única vez, uma vez que maior número de ocorrências antes de um evento implicaria em um falso alarme. Por outro lado, parâmetros

diagnósticos devem ocorrer no horário do granizo ou próximo, com tempo médio de diferença menor que 6 minutos, sendo essa a resolução temporal do radar. A Figura 4.3 mostra exemplos de parâmetros que utilizam porcentagem e variação de porcentagem, além de caso de parâmetro não utilizado por falso alarme ou não-deteção.

Exemplo de limiar de variação de porcentagem é mostrado na figura 4.3a onde a porcentagem do parâmetro em questão ultrapassa 3,76 % uma única vez antes do horário do granizo para todos os eventos. Ressalta-se que o evento 1b é a continuação do evento 1a, assim como o evento 3b em relação ao 3a. A figura 4.3b mostra o exemplo de um parâmetro que utiliza variação de porcentagem onde, para todos os eventos, há variação da porcentagem menor que -4,02. Exemplo de parâmetro não utilizado por falso alarme é mostrado na figura 4.3c, onde o limiar desejado igual a -3,18 ocorre duas vezes para o evento 3b. O valor do parâmetro do evento 3b no primeiro horário é de -3,5 e no quarto horário é de -17,53. Limiar mais elevado que -3,18 não é possível, uma vez que manteria a ocorrência de falso alarme, podendo até aumentar o número de falsos alarmes dependendo do limiar utilizado e do parâmetro. A utilização de limiar menor que -3,18 caracterizaria a não-deteção para um evento, pois esse é o menor valor ocorrido para o evento 1b, em seu segundo horário.

Dessa maneira, foram obtidos 90 parâmetros, sendo 81 prognósticos e 9 diagnósticos. Apenas um dos parâmetros é dependente da variação de topo, enquanto dois são dependentes de VIL, 8 parâmetros utilizam apenas refletividade  $Z_h$ , 13 utilizam  $K_{DP}$ , 14 utilizam correlação  $\rho_{hv}$ , 10 utilizam  $Z_{DR}$ , 25 parâmetros dependem de  $K_{DP}$  e  $Z_{DR}$  em conjunto, 7 utilizam  $K_{DP}$ ,  $Z_{DR}$  e  $Z_h$  e 10 utilizam as 4 variáveis simultaneamente,  $K_{DP}$ ,  $Z_{dr}$ ,  $Z_h$  e  $\rho_{hv}$ .

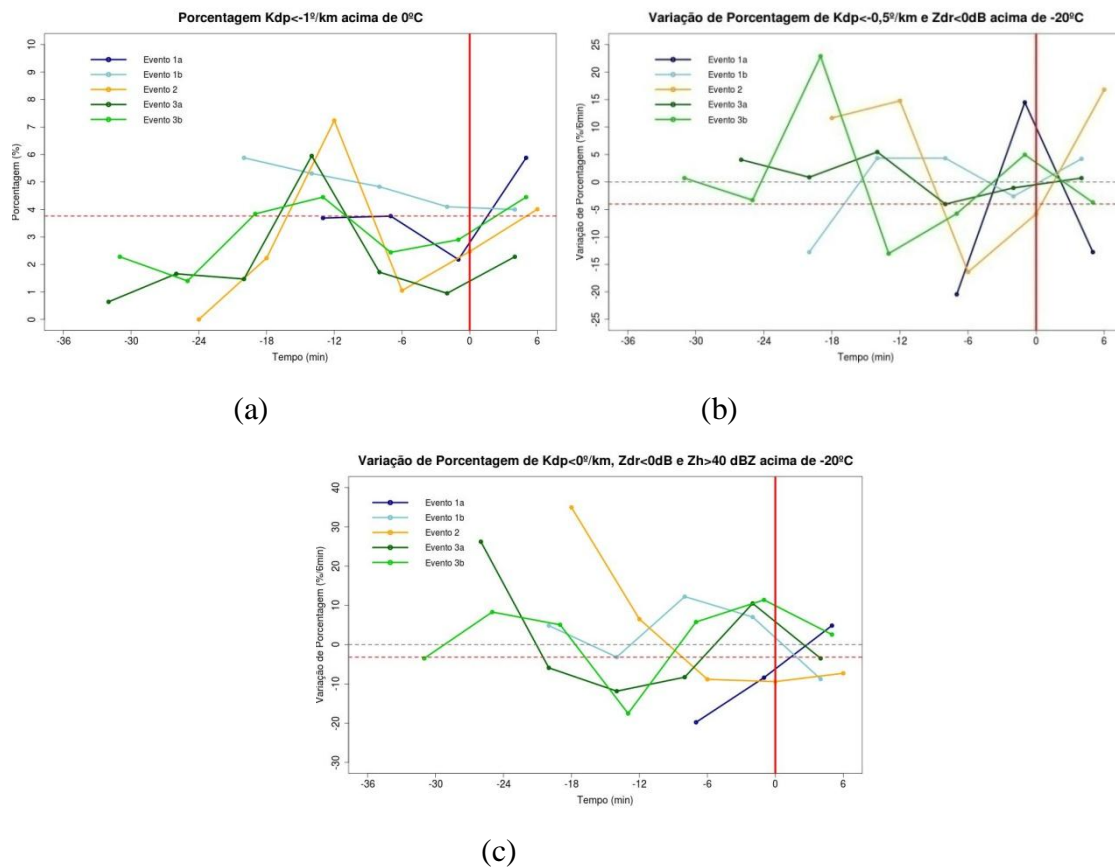


Figura 4.3 – Evolução temporal de parâmetros para os 5 eventos de granizo, sendo a linha vermelha vertical a indicação do horário do granizo e a linha pontilhada vermelha horizontal o limiar para o parâmetro. Exemplo de parâmetro que utiliza limiar de porcentagem (a), exemplo de parâmetro que utiliza limiar de variação de porcentagem (b), exemplo de parâmetro não utilizado no estudo devido à ocorrência de falso alarme ou não-deteção (c).

A Tabela A.2, no apêndice A, apresenta os parâmetros prognósticos e diagnósticos encontrados. O primeiro parâmetro é o único dependente da variação de topo e consiste na velocidade vertical média usando limiar de 20 dBZ. Dois parâmetros consistem em Fração de Área de VIL, onde são utilizados limiares acima de 5 kg/m<sup>2</sup> e 10 kg/m<sup>2</sup>. As variáveis VIL e DVIL não apresentaram comportamento prognóstico ou diagnóstico nesse estudo.

A refletividade  $Z_h$  está relacionada com a distribuição do tamanho de gotas e, quando muito elevada, pode estar relacionada à presença de granizo. Todos os parâmetros dependentes da refletividade  $Z_h$  referem-se às camadas acima da isoterma de  $0^\circ\text{C}$ , exceto um que utiliza o sistema precipitante inteiro. Os parâmetros dependentes de  $K_{DP}$  são todos prognósticos e utilizam limiares negativos ou zero acima da isoterma de  $0^\circ\text{C}$ . Seis dos 13 parâmetros dependentes de  $K_{DP}$  utilizam porcentagem, significando que quando um limiar de porcentagem é atingido, volume significativo da camada é ocupado por alvos cuja polarização vertical do radar sofre maior atenuação que a polarização horizontal. Isso implica em aumento de hidrometeoros orientados verticalmente como graupel, que podem posteriormente se tornar granizo. Os sete parâmetros de  $K_{DP}$  restantes usam limiar negativo de variação de porcentagem, ou seja, quando há uma queda acentuada da porcentagem de baixo  $K_{DP}$ , implicando em redução do conteúdo de alvos com alta atenuação na vertical. Essa redução é uma importante característica, pois indica a perda de massa desse tipo de hidrometeoro, podendo significar posterior queda desses hidrometeoros em solo.

Os parâmetros que utilizam correlação  $\rho_{hv}$  buscam identificar presença ou redução do volume de baixa correlação  $\rho_{hv}$ . Essas características visam obter regiões com presença de hidrometeoros em diferentes estados, o que indica presença de água líquida e gelo em coexistência, apresentando potencial para posterior formação de granizo. A presença de granizo e o processo de congelamento de hidrometeoros implica em baixos valores de correlação  $\rho_{hv}$ . Todos os 14 parâmetros de  $\rho_{hv}$  compreendem camadas acima da isoterma de  $0^\circ\text{C}$  e são prognósticos.

Os parâmetros dependentes de  $Z_{DR}$  utilizam limiares negativos acima da isoterma de  $0^\circ\text{C}$  e visam obter presença de alvos orientados verticalmente. Três dos dez parâmetros utilizam limiar negativo de variação de porcentagem para a obtenção da redução desses hidrometeoros, enquanto os demais parâmetros utilizam limiares de porcentagem para definir a presença desses alvos verticais.

Dos 25 parâmetros que utilizam  $Z_{DR}$  e  $K_{DP}$  simultaneamente, 7 são diagnósticos e 18 são prognósticos. Os parâmetros diagnósticos usam variação negativa de porcentagem de limiares positivos abaixo da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ , o que significa uma diminuição do volume de alvos horizontais próximo à superfície. Isso leva à interpretação de maior presença de hidrometeoros verticais e ocorrência de precipitação menos intensa, o que nos eventos em questão pode significar em presença de granizo em solo. Os 11 parâmetros restantes utilizam porcentagem ou variação de porcentagem negativa em camadas acima de  $0^{\circ}\text{C}$ , visando presença ou colapso do volume de hidrometeoros verticais.

A utilização de 3 variáveis,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$  e  $Z_h$  consiste em obter alvos verticais com elevada refletividade  $Z_h$  associada, enquanto a utilização de 4 variáveis, acrescentando a correlação  $\rho_{hv}$ , visa obter as características acima aliadas à baixa correlação, associada a presença de diferentes hidrometeoros. Os parâmetros com 3 e 4 variáveis, que totalizam 17, são todos prognósticos e utilizam porcentagem ou variação negativa de porcentagem acima da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ .

### **4.3 Aplicação dos Parâmetros nos Eventos Intensos e Não-Intensos**

Os parâmetros apresentados na seção 4.2 foram aplicados ao conjunto de eventos intensos e não-intensos. São 26 eventos intensos definidos como células com refletividade  $Z_h$  máxima em 3 km maior ou igual a 60 dBZ em algum momento de seu ciclo de vida (Tabela B.1, no apêndice B) e 19 eventos não-intensos, com máxima refletividade  $Z_h$  entre 46,5 e 53,5 dBZ (Tabela B.2, no apêndice B). Essa análise tem o objetivo de verificar a capacidade de previsibilidade dos parâmetros encontrados. As características morfológicas dos eventos são apresentadas na figura 4.4.

A seguir serão explanados como foram obtidos os acertos (*a*), falsos alarmes (*b*), erros (*c*) e corretos negativos (*d*), de acordo com a tabela de contingência mostrada na seção 3.7. Para parâmetros prognósticos, em caso de limiar do parâmetro alcançado para o evento antes do horário de refletividade  $Z_h$  maior que 60 dBZ, identificava-se a previsão

correta, ou  $a$  de acordo com a tabela de contingência. Em caso de duas ou mais detecções antes desse horário, identificavam-se falsos alarmes ( $b$ ), excetuando a última detecção. Por fim, computavam-se erros ( $c$ ), quando o limiar do parâmetro era alcançado para o evento intenso. Para análise dos parâmetros diagnósticos, considerou-se acerto ( $a$ ) quando havia detecção no intervalo entre 6 minutos antes e 6 minutos depois do horário de refletividade  $Z_h$  maior que 60 dBZ, falsos alarmes ( $b$ ) para casos de detecção antes desse intervalo e erros ( $c$ ) em casos de não-deteção. Para eventos não-intensos, considerava-se correto negativo ( $d$ ) quando o parâmetro não atingia o seu limiar e falso alarme ( $b$ ) em caso de limiar alcançado.

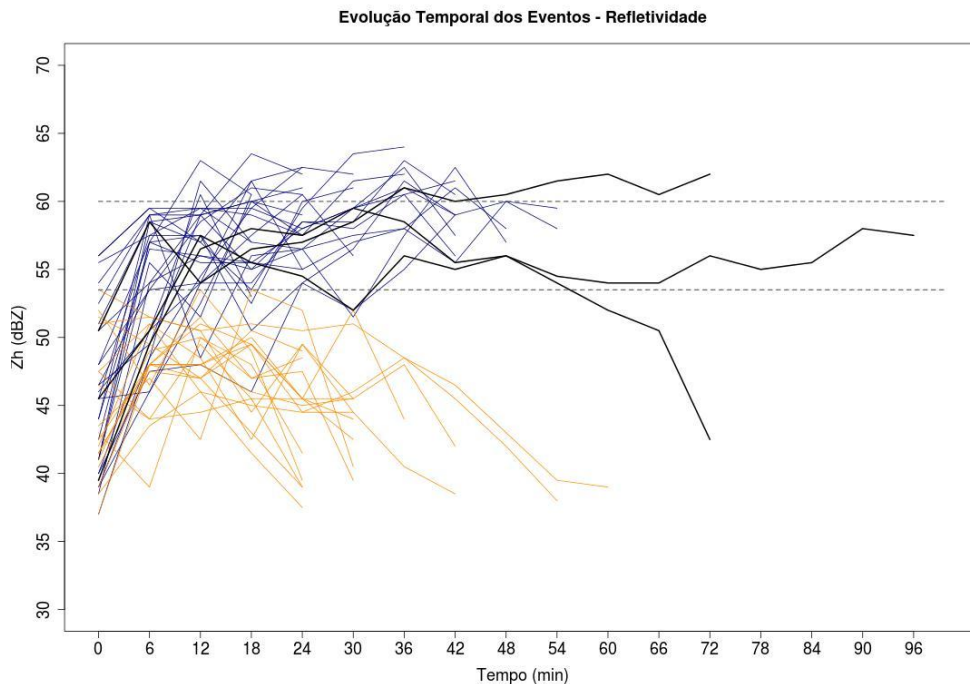


Figura 4.4 – Evolução temporal dos eventos para refletividade  $Z_h$ . Os eventos de granizo utilizados como referência estão em preto, eventos intensos em azul e eventos não-intensos em amarelo.

Dessa maneira, foram obtidos os índices estatísticos POD, FAR, POFD e HSS para cada parâmetro, apresentado na tabela A.3 na ordem do índice HSS. O POD leva em consideração a capacidade de detecção de eventos intensos, entretanto mascara

parâmetros com baixa detecção de corretos negativos (*d*). Esse comportamento é comum para parâmetros pouco “severos”, uma vez que detectam eventos intensos e, erroneamente, eventos não-intensos. Nesse contexto, o POFD complementa o POD, pois penaliza os parâmetros com baixa detecção dos corretos negativos. O FAR, assim como o POFD, computa o falso alarme, porém o faz apenas em relação aos eventos intensos. Por fim, o HSS leva em consideração toda a dimensão da amostra.

A fim de diminuir o elevado número de parâmetros, buscou-se a eliminação daqueles com performance estatística baixa, levando em consideração os índices mencionados. Os parâmetros reduziram àqueles com número de detecção de eventos intensos maior que os erros ( $POD > 0,5$ ), com número de falsos alarmes menor que o número de corretos negativos ( $POFD < 0,5$ ) e menor que o número de eventos intensos detectados ( $FAR < 0,5$ ), além de  $HSS > 0,1$ , indicando previsão melhor que a previsão de referência e servindo como filtro para parâmetros com performance ainda consideradas indesejáveis. A aplicação desse filtro diminuiu o número de parâmetros para 16, apresentados na tabela 4.1. Infelizmente, a performance estatística dos parâmetros diagnósticos não foi satisfatória, pois os mesmos encontram-se entre os que apresentaram pior desempenho segundo a tabela A.3, no apêndice A. Para referência, os parâmetros diagnósticos são aqueles que ocorrem na camada AB0 (ver na tabela A.2, no apêndice A). A análise que seguirá irá compreender apenas parâmetros prognósticos.

A aplicação de correlação entre os valores dos parâmetros nos 3 eventos de granizo permite encontrar, entre os 16 parâmetros, quais possuem comportamento similar. São considerados parâmetros correlacionados aqueles cujo valor de correlação entre eles for maior que 0,8. Desse conjunto de parâmetros, 14 utilizam limiar de porcentagem e 2 utilizam limiar de variação de porcentagem para defini-los, sendo que esses dois conjuntos não foram intercomparados devido ao diferente número de passos de tempo, o que pode ser visto na figura 4.2b. A correlação entre os 14 parâmetros é apresentada na figura 4.5, além do valor de correlação entre os dois parâmetros que utilizam variação de porcentagem. Esse segundo filtro reduziu o número de parâmetros para 8, pois permaneceu apenas o melhor parâmetro, segundo a tabela A.3, entre os considerados



correlacionados, sendo eles os parâmetros 3, 31, 33, 34, 45, 63, 72 e 74 e serão descritos a seguir.

Tabela 4.1 – Características dos parâmetros após filtro estatístico.

#Par.	Variáveis	Valor utilizado	Limiar da variável	Lim.Par.	Cm
2	FAVIL	máx.	$\geq 5$	59,09	
3	FAVIL	máx.	$\geq 10$	25,59	
29	% $\rho_{hv}$	mín.	$\leq 0,8$	15,23	CFM
31	$\Delta\% \rho_{hv}$	méd.	$< 0,95$	-6	AC-40
33	$\Delta\% \rho_{hv}$	mín.	$\leq 0,85$	-2,01	AC-40
34	% $\rho_{hv}$	p25	$\leq 0,8$	1,44	AC-40
45	% $Z_{DR}$	p25	$\leq -0,5$	30,48	AC-40
63	% $Z_{DR}$ e $K_{DP}$	mín. e mín.	$\leq -1$ e $\leq -0,5$	2,11	AC-20
72	% $Z_{DR}$ e $K_{DP}$	mín. e mín.	$< 0$ e $\leq -0,5$	18,18	AC-40
74	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ e $Z_h$	mín., mín. e máx.	$< 0$ , $\leq -1$ e $\geq 45$	0,21	CFM
75	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ e $Z_h$	mín., mín. e máx.	$< 0$ , $\leq -1$ e $\geq 40$	1,03	CFM
82	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$< 0$ , $\leq -1$ , $\geq 40$ e $< 0,9$	0,76	CFM
83	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$< 0$ , $\leq -1$ , $\geq 45$ e $< 0,85$	0,09	CFM
84	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$< 0$ , $\leq -1$ , $\geq 45$ e $< 0,9$	0,18	CFM
87	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$< 0$ , $\leq -0,5$ , $\geq 40$ e $< 0,9$	1,65	CFM
90	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	p25, p25, p75 e p25	$< 0$ , $\leq -0,5$ , $\geq 45$ e $< 0,9$	0,55	CFM

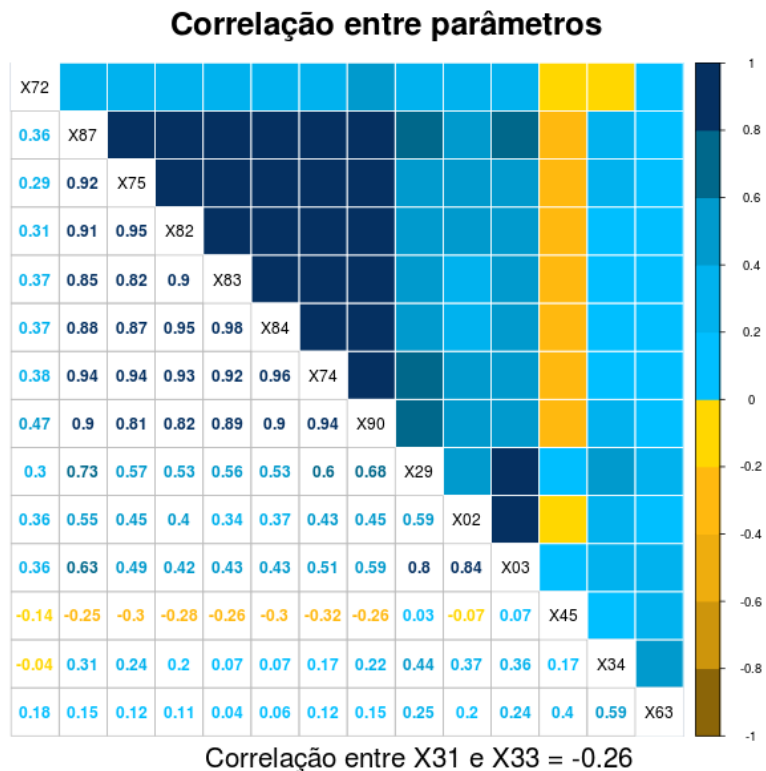


Figura 4.5 – Correlação entre 14 parâmetros que utilizam limiar de porcentagem. Na base da figura se encontra a correlação entre os 2 parâmetros que utilizam limiar de variação de porcentagem.

A Fração de Área de VIL maior que  $10 \text{ kg/m}^2$  em relação ao *cluster* total de 35 dBZ definido pelo ForTraCC (parâmetro 3, FAVIL<sub>10</sub>) é um parâmetro que, em sua essência, depende da refletividade  $Z_h$  em todos os níveis de altura. O parâmetro em si leva em consideração o sistema precipitante inteiro, uma vez que é uma medida de elevada intensidade comparada à totalidade do *cluster*. Uma analogia pode ser feita com a fração convectiva fornecida pelo ForTraCC, como exposto na seção 2.3, onde, para dados de satélites, divide-se a área de um valor de temperatura de brilho pela área ocupada por uma temperatura de brilho mais elevada. A Fração de Área de VIL aqui apresentada possui conceito semelhante, o qual se mede quanto do evento possui elevada intensidade medida através do VIL.

Três parâmetros dependem apenas da correlação  $\rho_{hv}$ , ressaltando a importância dessa variável polarimétrica para antecipação de eventos intensos. Todos esses parâmetros consideram a camada acima da isoterma de  $-40^{\circ}\text{C}$ . Dois desses parâmetros são dependentes de variação de porcentagem (parâmetros 31 e 33) enquanto o outro (parâmetro 34) é dependente de um limiar de porcentagem. Apesar dos parâmetros que usam variação de porcentagem possuírem significado físico semelhante, eles apresentaram baixa correlação entre eles, conforme exposto na figura 4.5. Os dois parâmetros representam a queda de baixos valores de correlação, sendo que um utiliza limiar de 0,95 através do seu valor médio e o outro utiliza 0,85 utilizando seu valor mínimo. Nessa camada, os valores de correlação  $\rho_{hv}$  são predominantemente elevados e próximos a 1. Logo, a utilização de valor médio para contabilizar valores de correlação menores que 0,95 são suficientes para indicar eventos intensos. Utilizando limiar mais baixo, como 0,85, torna-se necessário a utilização do valor mínimo para detectá-lo, uma vez que esse valor é considerado muito baixo para essa camada e, quando detectado, indica a intensidade do evento. A redução de correlação baixa representa a diminuição do volume ocupado por hidrometeoros diferentes ou com orientações ligeiramente diferentes, uma vez que nessa camada há apenas hidrometeoros congelados. A perda de volume dessas características nessa camada implica em posterior resposta em níveis mais baixos, como alteração dos hidrometeoros e aumento da refletividade  $Z_h$ , tendo como consequência a caracterização do evento intenso. O outro parâmetro é dependente de limiar de porcentagem de 25º percentil de correlação  $\rho_{hv}$  menor que 0,8 acima de  $-40^{\circ}\text{C}$  o qual, novamente, fez-se necessário o uso de um valor baixo para que houvesse detecção. O uso do valor mínimo de correlação  $\rho_{hv}$  não foi possível devido à não-detecção de um dos eventos na obtenção dos parâmetros (seção 4.2). Esse parâmetro determina a ocorrência de valores de correlação  $\rho_{hv}$  muito baixos para uma camada caracterizada por valores elevados onde, por esse motivo, eventos intensos e não-intensos foram corretamente determinados.

Outro parâmetro preditor é o uso do 25º percentil de  $Z_{DR}$  menor igual a  $-0,5$  dB acima da isoterma de  $-40^{\circ}\text{C}$  (Parâmetro 45). Trata-se de um parâmetro que identifica alvos verticais nessa camada. Outros dois parâmetros usam, além de  $Z_{DR}$ , a variável  $K_{DP}$

conjuntamente, sendo que um usa a camada acima da isoterma de  $-20^{\circ}\text{C}$  e limiares de mínimo  $Z_{\text{DR}}$  e mínimo  $K_{\text{DP}}$  de  $-1$  dB e  $-0,5^{\circ}/\text{km}$  (Parâmetro 63), enquanto outro usa a camada acima de  $-40^{\circ}\text{C}$  e limiares de mínimo  $Z_{\text{DR}}$  e mínimo  $K_{\text{DP}}$  de  $0$  dB e  $-0,5^{\circ}/\text{km}$ , respectivamente (Parâmetro 72). A utilização de duas variáveis de forma simultânea, os limiares intensos e a camada elevada estudada fazem com que esses dois parâmetros sejam considerados severos. Por esse motivo, esses parâmetros identificaram acertadamente tanto os eventos intensos quanto os não-intensos. Essas variáveis consideram a forma do hidrometeoro e a atenuação do sinal de radar, uma vez que  $Z_{\text{DR}}$  negativo identifica alvos verticais e  $K_{\text{DP}}$  menor igual a  $-0,5^{\circ}/\text{km}$  determina alvos que sofreram atenuação do sinal na vertical consideravelmente maior que a atenuação do sinal na horizontal. Dessa maneira, esses parâmetros determinam quando há ocorrência de volume de alvos altamente orientados verticalmente em camadas elevadas. O conteúdo elevado de gelo é uma importante característica de severidade, uma vez que antecipa a ocorrência de um ou mais dos seguintes fenômenos: precipitação intensa, *downbursts* por derretimento do gelo e a formação de granizo no interior da nuvem, eventualmente atingindo a superfície.

O último parâmetro é o único que usa três variáveis simultaneamente na camada de fase mista, sendo elas o mínimo  $K_{\text{DP}}$  menor igual a  $-1^{\circ}/\text{km}$ , mínimo  $Z_{\text{DR}}$  menor que  $0$  dB e máxima refletividade  $Z_{\text{h}}$  maior igual a  $45$  dBZ (Parâmetro 74). O uso de três variáveis considera a forma do alvo, a atenuação do radar e a elevada refletividade  $Z_{\text{h}}$  retornada, consistindo em um importante parâmetro descritor da severidade do evento.

Entre os oito parâmetros, apenas o parâmetro dependente de VIL considera o uso de todas as camadas na vertical, uma vez que a própria definição de VIL integra verticalmente valores de refletividade  $Z_{\text{h}}$ . Outros parâmetros utilizados isoladamente, sendo eles os três que usam correlação  $\rho_{\text{HV}}$  e o que usa  $Z_{\text{DR}}$ , calculam limiares em camadas muito elevadas, acima da isoterma de  $-40^{\circ}\text{C}$ . O uso de camadas não tão elevadas está associado à utilização simultânea de mais de uma variável, à exceção do parâmetro que utiliza  $K_{\text{DP}}$  e  $Z_{\text{DR}}$  acima de  $-40^{\circ}\text{C}$ . O único parâmetro que calcula volume de variáveis apenas na camada de fase mista é também o único que utiliza 3 variáveis. A

utilização de mais de uma variável auxilia no rigor empregado pelo parâmetro, implicando em parâmetros severos. A utilização de todas as 4 variáveis polarimétricas nos 8 parâmetros indica a importância do uso de todas as variáveis polarimétricas aqui estudadas, já que todas apresentaram previsibilidade para eventos intensos, o que ressalta o potencial do radar de dupla polarização para previsão imediata.

A figura 4.6 apresenta a performance detalhada de cada parâmetro em relação aos eventos intensos e não-intensos. A frequência de detecção de um evento intenso em função do tempo de antecedência é representado por barras azuis e o somatório dessas frequências resulta no número total de detecções ( $a$  da tabela de contingência), apresentado na legenda como “Acertos”. O número máximo possível de acertos é o número total de eventos intensos, ou seja, 26. Entretanto, o maior número de corretas detecções de eventos intensos por um parâmetro foi 22, sendo eles os parâmetros 3 e 74 (Figura 4.6). O complemento são os erros, mostrados na legenda, onde a soma dos acertos e erros é sempre igual ao número total de eventos intensos (26). Todos os parâmetros possuem número de acertos mínimo de 14 devido ao filtro estatístico que impõe  $POD > 0,5$ . Dessa maneira, todos os parâmetros possuem número de acertos maior que número de erros.

O falso alarme ( $b$ ) pode ocorrer tanto para eventos intensos quanto para não-intensos, sendo apresentado na figura de maneira separada para cada conjunto de eventos. Ao contrário dos números de acertos e erros, o número de falsos alarmes não possui limite máximo, podendo ocorrer mais de uma vez para um único evento. Obviamente, a ocorrência dos falsos alarmes ocorre antes das detecções dos eventos intensos, sendo essa ocorrendo predominantemente próximo ao horário do evento.

Os corretos negativos ( $d$  na tabela de contingência) possuem número máximo possível de 19 por ser esse o número de eventos não-intensos. Quando o parâmetro prevê evento intenso nesses casos, caracteriza-se o falso alarme. Entretanto, o somatório de falso alarme com correto negativo não necessariamente é 19 devido, como exposto anteriormente, à não-existência de limite máximo de falsos alarmes.

Apesar de alguns parâmetros apresentarem detecção relativamente baixa comparado a outros, como exemplo o parâmetro 72 que possui POD igual a 0,538 devido à 14 detecções e 12 erros, ressalta-se que parâmetros com essas características possuem boa detecção de eventos não-intensos, ou elevado número de corretos negativos ( $d$ ) sendo, para o caso do parâmetro 72, correto negativo igual a 18 e apenas 1 falso alarme para os 19 eventos. Considera-se satisfatório o desempenho estatístico desses parâmetros, como exposto na tabela A.3.

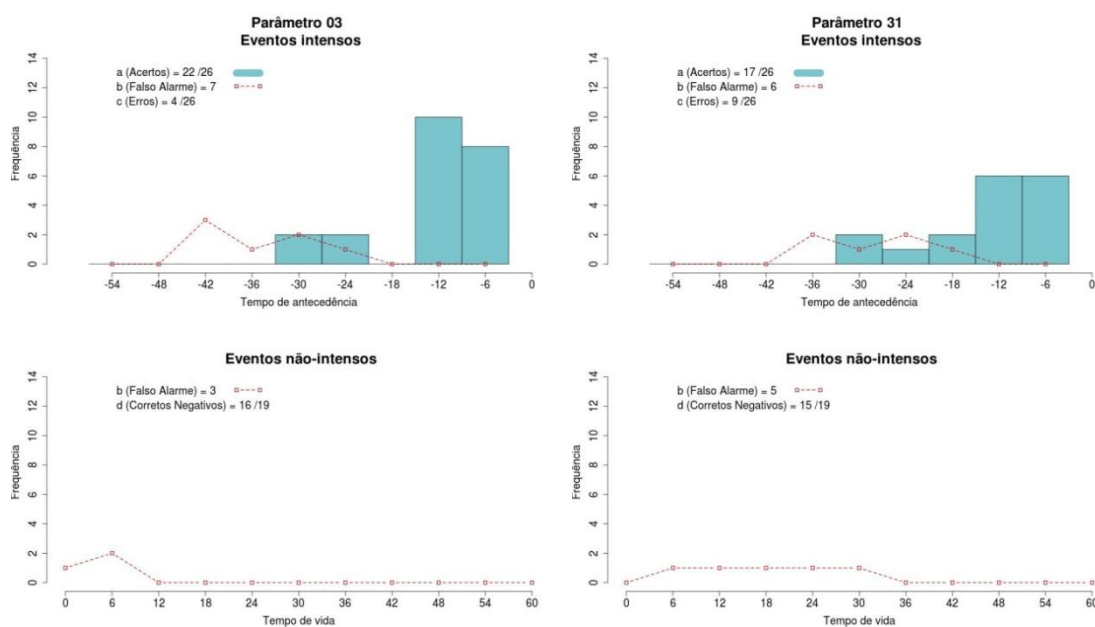


Figura 4.6 – Previsão correta de eventos intensos (barras azuis) e não-intensos (legenda, base), falsos alarmes para cada conjunto de eventos (linhas pontilhadas vermelhas) e erros (legenda, topo) em função do tempo de antecedência para cada parâmetro (continua).

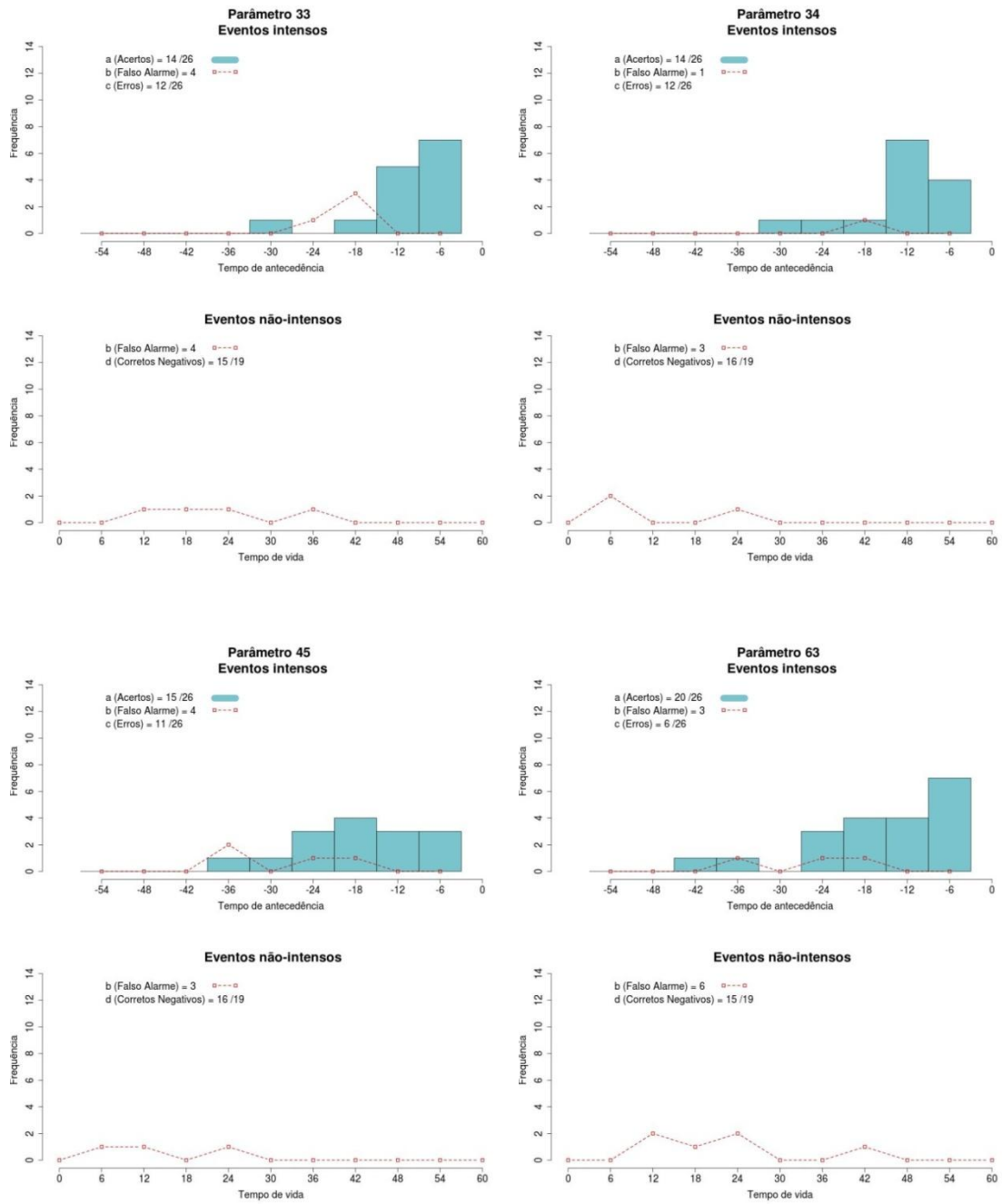


Figura 4.6 – Continuação.

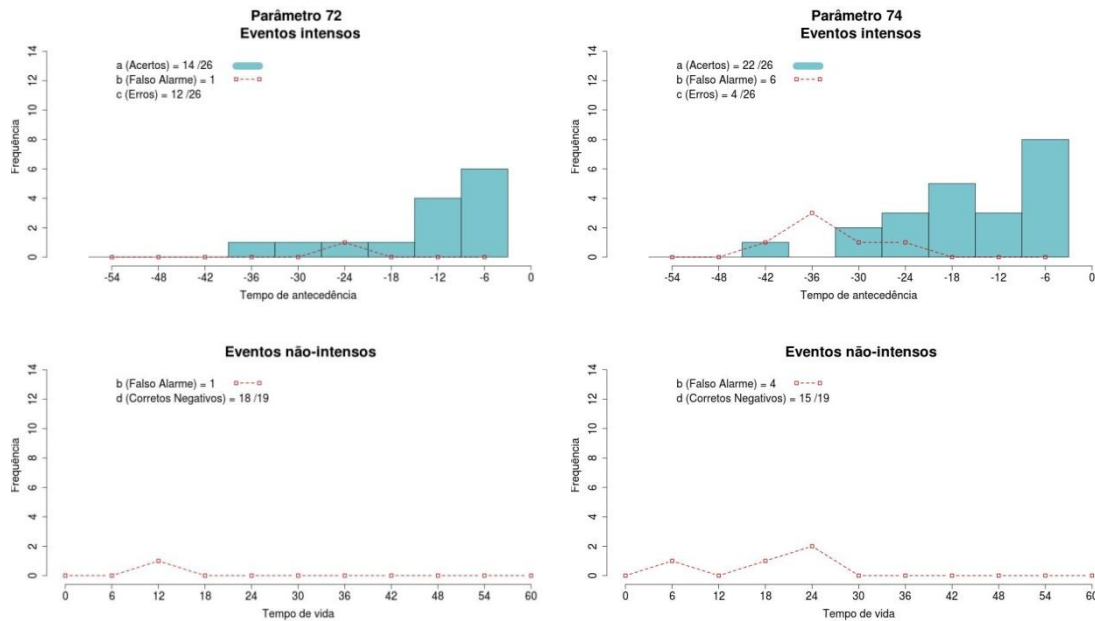


Figura 4.6 – Conclusão.

#### 4.4 Modelo Probabilístico de Previsão de Eventos Intensos

Como apresentado na figura 4.6, os parâmetros previsores apresentam uma detecção variável em função de cada evento, ocorrendo preferencialmente com 24 minutos de antecedência ou menos, com aumento da probabilidade de detecção com a redução do tempo de antecedência. A partir disso, três importantes características podem ser observadas:

- O uso de um único parâmetro não apresenta um nível de detecção que possa ser utilizado individualmente. O uso de todos os parâmetros aumenta a detecção em função das tempestades apresentarem um grande conjunto de características e evoluções próprias, que variam de célula para célula;
- Devido à variabilidade do tempo de antecedência da detecção para cada tempestade, não é possível utilizar o parâmetro em um único instante;



- c) Todas as variáveis apresentam uma probabilidade crescente à medida que se aproxima o evento.

Com base nessas características, um modelo que integra todas as variáveis foi concebido, o qual usa intervalos de tempo que permite verificar se ao longo da evolução do ciclo de vida da célula ela evoluiu para evento intenso ou não. O modelo é baseado no padrão de evolução dessas probabilidades que apresentaram um padrão para os eventos intensos diferente do padrão para eventos não-intensos. A concepção do modelo foi apresentada na seção 3.8.

Nessa análise, foram utilizados 26 eventos intensos e 11 eventos não-intensos. A diminuição do número de eventos não-intensos de 19 para 11 dá-se porque alguns apresentavam máxima refletividade antes do terceiro horário do ciclo de vida, o que impedia o cálculo de alguns parâmetros, principalmente os dependentes de variação de porcentagem que necessitam dois *scans* de radar para a obtenção de um valor do parâmetro. Posteriormente, será analisado um conjunto independente de 10 eventos intensos, os quais foram definidos a partir do total de 36 eventos intensos, onde os independentes foram escolhidos como os últimos em ordem cronológica.

A figura 4.7 demonstra as curvas de probabilidade média e desvio padrão da porcentagem de parâmetros que previram todos os eventos intensos, acumulando 24, 18, 12, 6 e 0 minutos no tempo. Observa-se o aumento da probabilidade de detecção para maiores acumulados de tempo. Nessa análise, será utilizado o acumulado de 24 minutos porque acumulados menores apresentaram sobreposição dos desvios padrões dos eventos intensos e não-intensos.

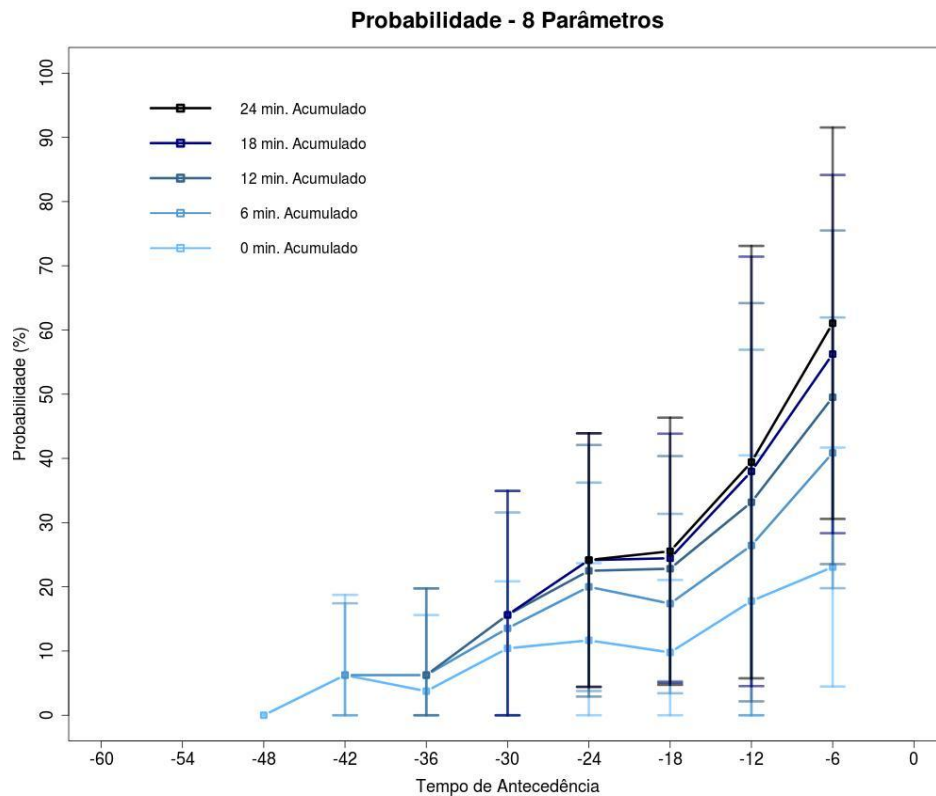


Figura 4.7 – Curvas de probabilidade de ocorrência de evento intenso utilizando 8 parâmetros acumulados em 24, 18, 12, 6 e 0 minutos.

A figura 4.8 apresenta a probabilidade de detecção acumulando 24 minutos para os 26 eventos intensos, representado pela curva azul, além da detecção dos parâmetros para os 11 eventos não-intensos, ou seja, o falso alarme para esses eventos, representado pela curva amarela. Nesse caso, os desvios padrões não se sobrepõem, o que ocorre para acumulados menores de tempo.

Deve-se observar que os eventos não-intensos não são eventos ordinários, mas eventos convectivos com valor máximo de refletividade  $Z_h$  entre 46,5 e 53,5 dBZ. Logo, o falso alarme é extremamente rigoroso e o modelo consegue diferenciar esses dois padrões de tempestades, mesmo que os eventos não-intensos são também eventos com fortes chuvas, correspondendo a valores entre 29,38 e 80,46 mm/h pela relação Z-R de Marshall e Palmer (1948).

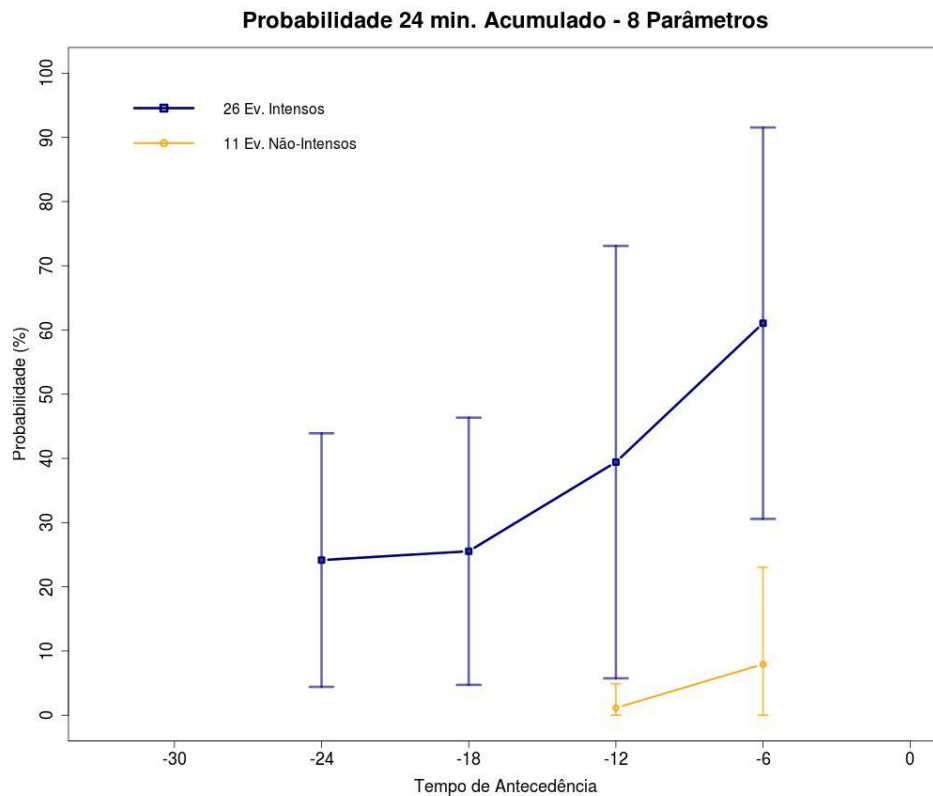


Figura 4.8 – Curvas de probabilidade de ocorrência de evento intenso utilizando 8 parâmetros (azul, quadrados) acumulados em 24 minutos e falso alarme para eventos não-intensos (amarelo, círculos).

Para fins de comparação, a figura 4.9 mostra as curvas de probabilidade utilizando todos os 81 parâmetros prognósticos e utilizando os 16 parâmetros apresentados na tabela 4.1 os quais foram obtidos após o filtro estatístico mas sem a aplicação da correlação para descarte dos parâmetros semelhantes. Percebe-se que, além da menor detecção de eventos intensos, o falso alarme para eventos não-intensos é maior, ocorrendo sobreposição de desvios padrões impossibilitando a completa separação desses dois conjuntos de eventos.

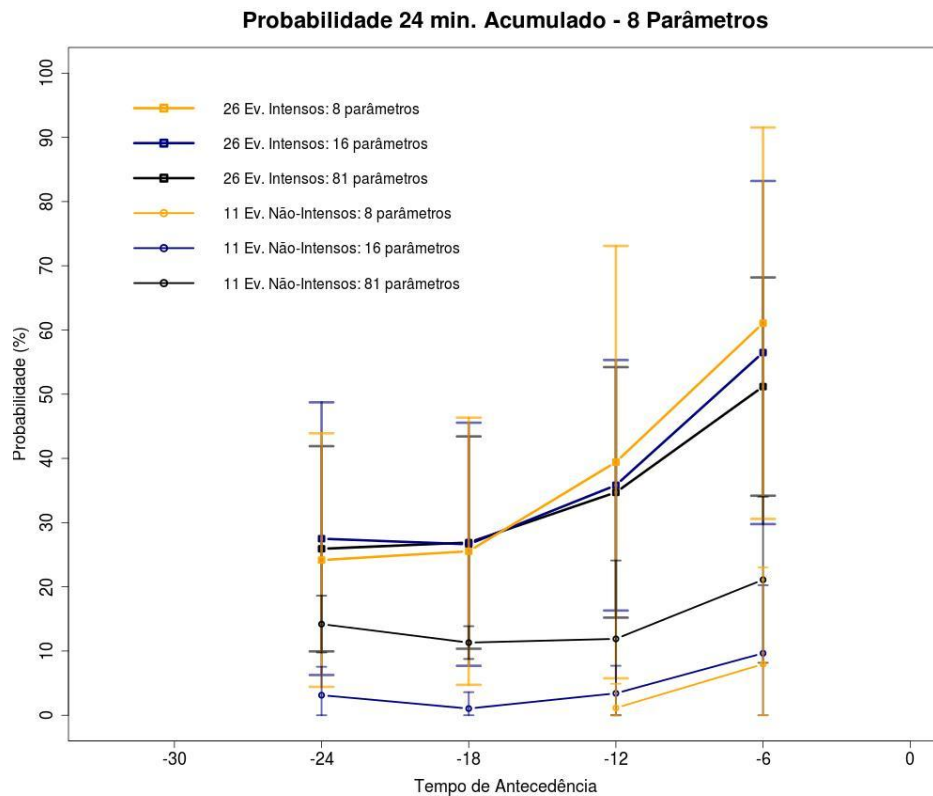


Figura 4.9 – Curvas de probabilidade utilizando 8 parâmetros (amarelo), utilizando 16 parâmetros sem o filtro de correlação (azul) e com os 81 parâmetros originais (preto) para comparação.

A figura 4.10 mostra a aplicação dos 8 parâmetros nos eventos independentes (curva preta) e desvio padrão associado. Percebe-se que a curva obtida identifica acertadamente esses eventos com sua média contida no intervalo do desvio padrão dos eventos intensos originais, exceto no tempo igual a -18. Ressalta-se, ainda, que esses eventos foram identificados por um maior número de parâmetros. Em acréscimo, os desvios padrões da probabilidade dos eventos independentes não se sobrepõem aos desvios padrões dos eventos não-intensos, corroborando a separação dos dois conjuntos de eventos.

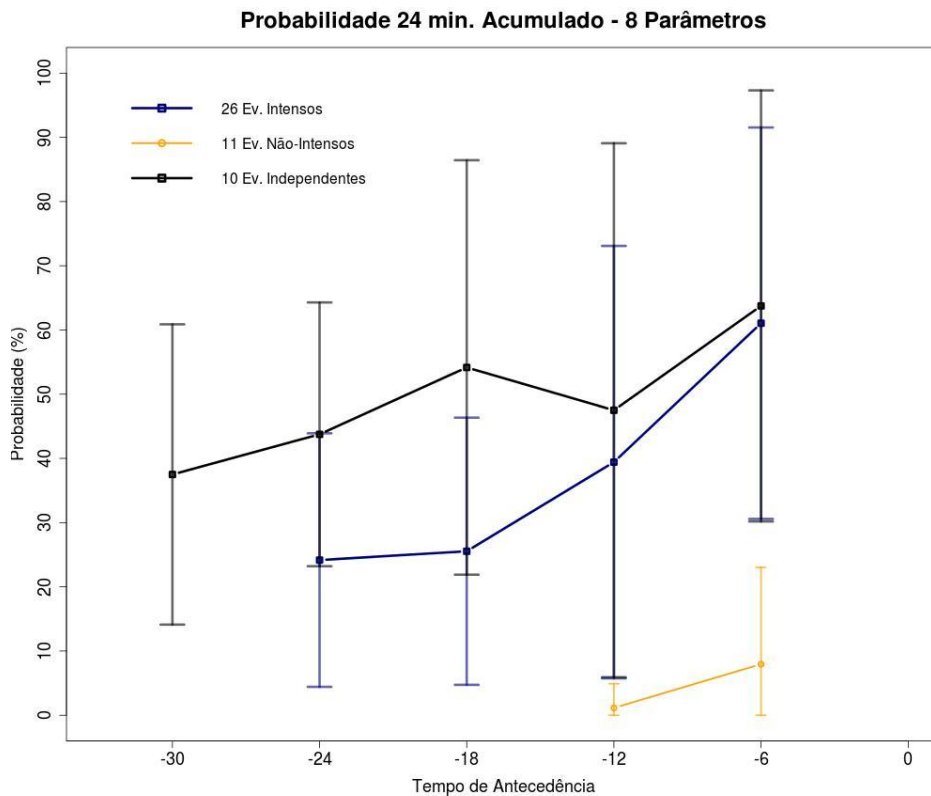


Figura 4.10 – Curvas de probabilidade utilizando 8 parâmetros para os eventos independentes (preto) comparado com os eventos intensos (azul) e eventos não-intensos (amarelo).

O falso alarme dos eventos intensos é apresentado na figura 4.11 por linha e círculos azuis. Não está acumulado para melhor discriminação do momento de ocorrência do falso alarme. Verifica-se a maior ocorrência de falsos alarmes no início do ciclo de vida, sendo no tempo igual a -42 o máximo, seguido de um pico secundário em -24. Falsos alarmes persistem até o tempo igual a -18. O falso alarme associado aos eventos independentes é apresentado na figura 4.11 como linha e círculos pretos, onde é verificado comportamento semelhante mas com falsos alarmes mais acentuados no início do ciclo de vida.

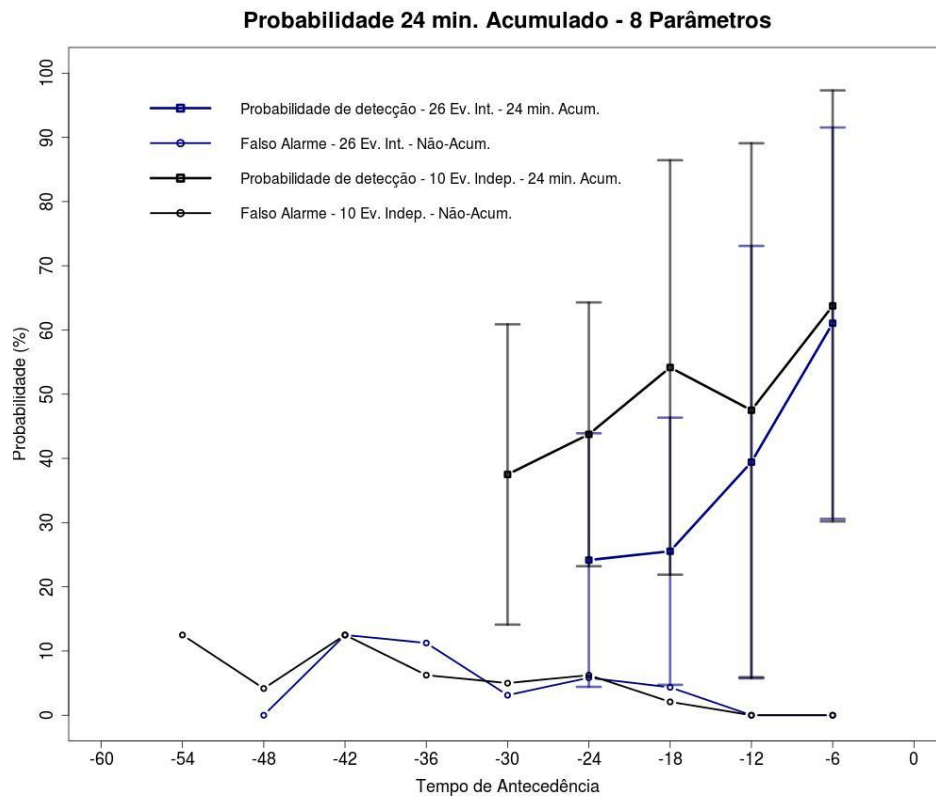
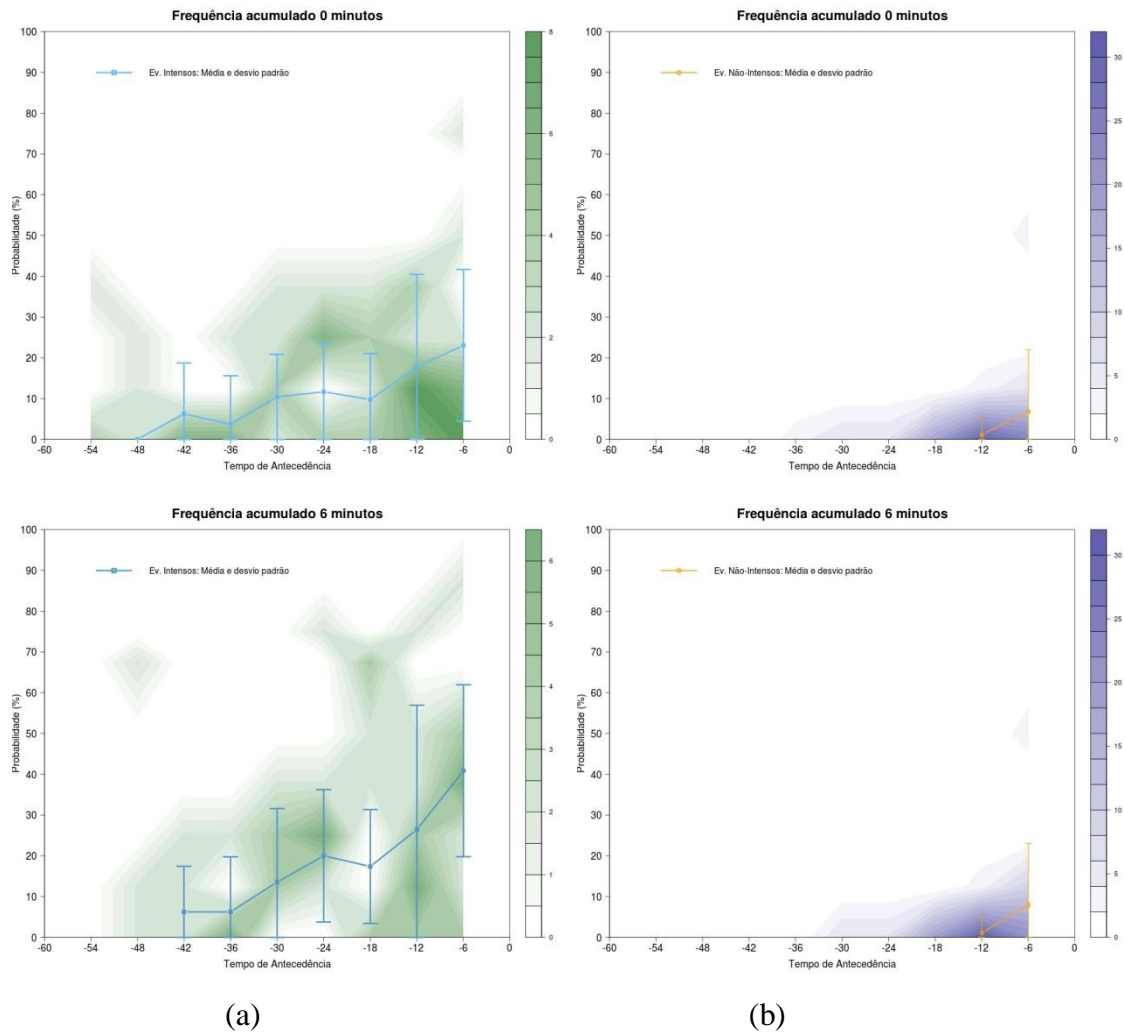


Figura 4.11 – Curvas de probabilidade utilizando 8 parâmetros para os 26 eventos intensos acumulado 24 minutos (azul, quadrados) e falso alarme não-acumulado no tempo para esses eventos intensos (azul, círculos) comparados com modelo para eventos independentes e seu falso alarme (preto).

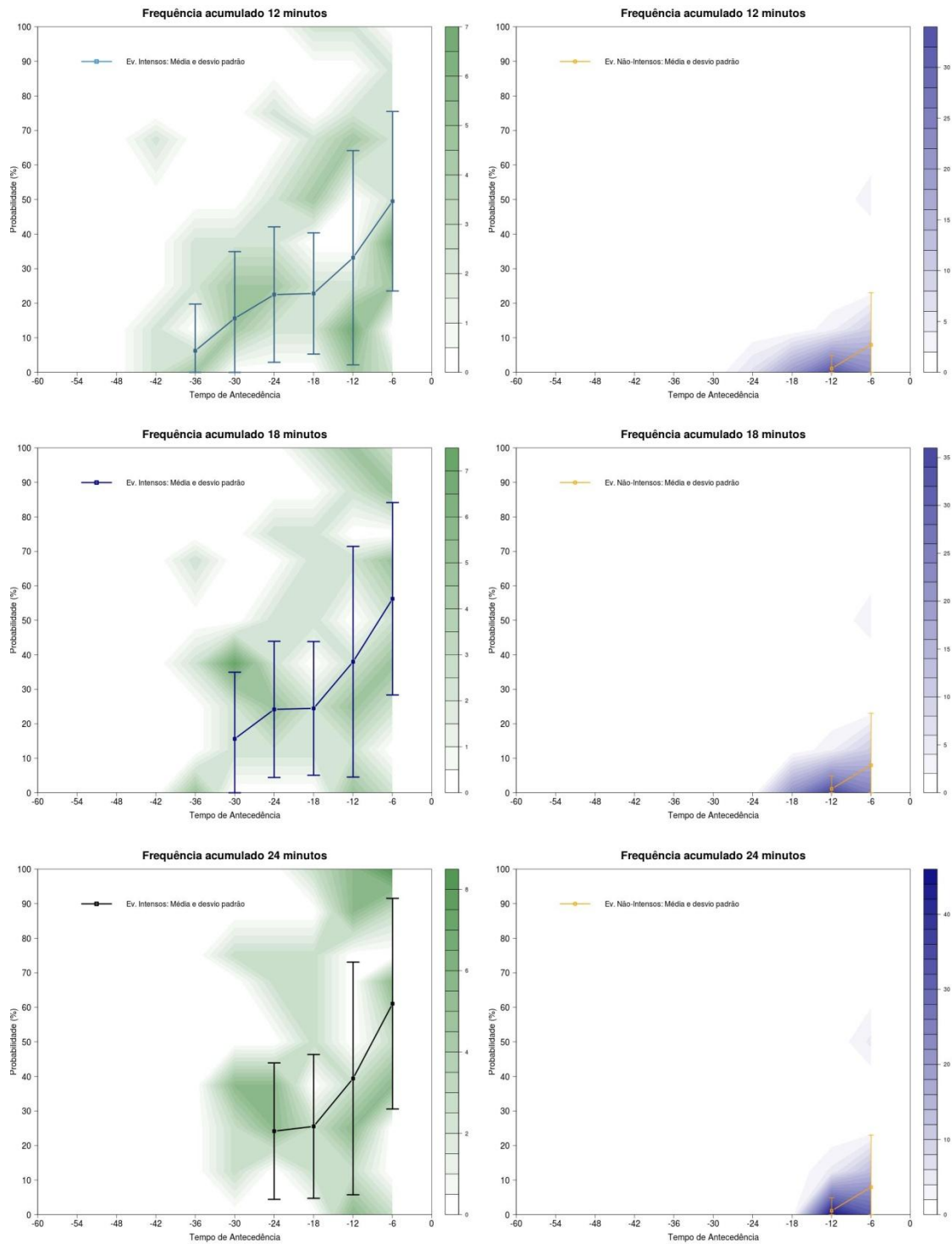
A frequência da probabilidade verificada para cada passo de tempo para os eventos independentes e não-intensos é apresentada na figura 4.12, juntamente com sua curva de probabilidade para eventos intensos associada. Para os eventos independentes, percebe-se o aumento da probabilidade conforme o aumento do tempo acumulado, enquanto para os eventos não-intensos, a probabilidade se concentra próximo à 0%. Isso corrobora o uso de 24 minutos acumulado no tempo, que apresenta maior detecção que o uso de tempos menores.



(a)

(b)

Figura 4.12 – Frequência de ocorrência de probabilidade para eventos intensos independentes (preenchido, verde) para 0, 6, 12, 18 e 24 minutos acumulado, em porcentagem, e curva de probabilidade para eventos intensos (linha azul ou preta) (a) e frequência de probabilidade para eventos não-intensos (preenchido, azul) e curva de probabilidade para eventos não-intensos (linha amarela) (b) (continua).



(a)

(b)

Figura 4.12 – Conclusão.



O modelo consiste na verificação do comportamento da probabilidade de detecção para os eventos isoladamente. Se o evento apresenta probabilidade compatível com evento intenso, espera-se que o evento intenso ocorra. A mesma analogia é aplicável para eventos não-intensos.

Ao longo do ciclo de vida da célula convectiva, a sua probabilidade é obtida. Se o tempo de vida da célula é de 6 minutos, ou seja, é o segundo *scan* de radar que ela ocorre, é verificado qual ponto médio da curva acumulada de 6 minutos mais se aproxima da probabilidade verificada para o evento. Se, por exemplo, o ponto mais próximo está associado ao tempo de antecedência de 36 minutos, plota-se esse ponto médio e desvio padrão. Para o horário seguinte, realiza-se o mesmo procedimento procurando na curva de 12 minutos acumulado, e assim sucessivamente. Ao chegar no tempo acumulado de 24 minutos, usa-se esse mesmo tempo acumulado para todos os horários seguintes.

Os tempos de antecedência fornecidos foram divididos em duas categorias: alerta para menos que 25 minutos e alerta para mais que 25 minutos. A figura 4.12 apresenta exemplos da aplicação do modelo para 3 eventos independentes onde, para cada evento, são apresentadas a curva de probabilidade do evento e o ponto médio e desvio padrão dos eventos intensos correspondente ao tempo acumulado. Se foram utilizados pontos médios que correspondessem ao tempo de antecedência igual a 6, 12, 18 ou 24 minutos, caracteriza-se alerta para menos que 25 minutos, representado em vermelho na figura. Se foram utilizados tempos de antecedência de 30 minutos ou mais, o alerta é para mais que 25 minutos, em amarelo na figura. Para o evento apresentado na figura 4.13a, o modelo identificou acertadamente alerta para os tempos de antecedência igual a -42, -48 e menores que -24 e errou para os tempos de antecedência igual a -30 e -36, pois nesses horários identificou alerta para menos que 25 minutos. Para o evento apresentado na figura 4.13b, somente foi verificado erro no tempo igual a -30, pois foi realizada previsão de alerta para menos de 25 minutos. O mesmo ocorreu para o evento da figura 4.13c.

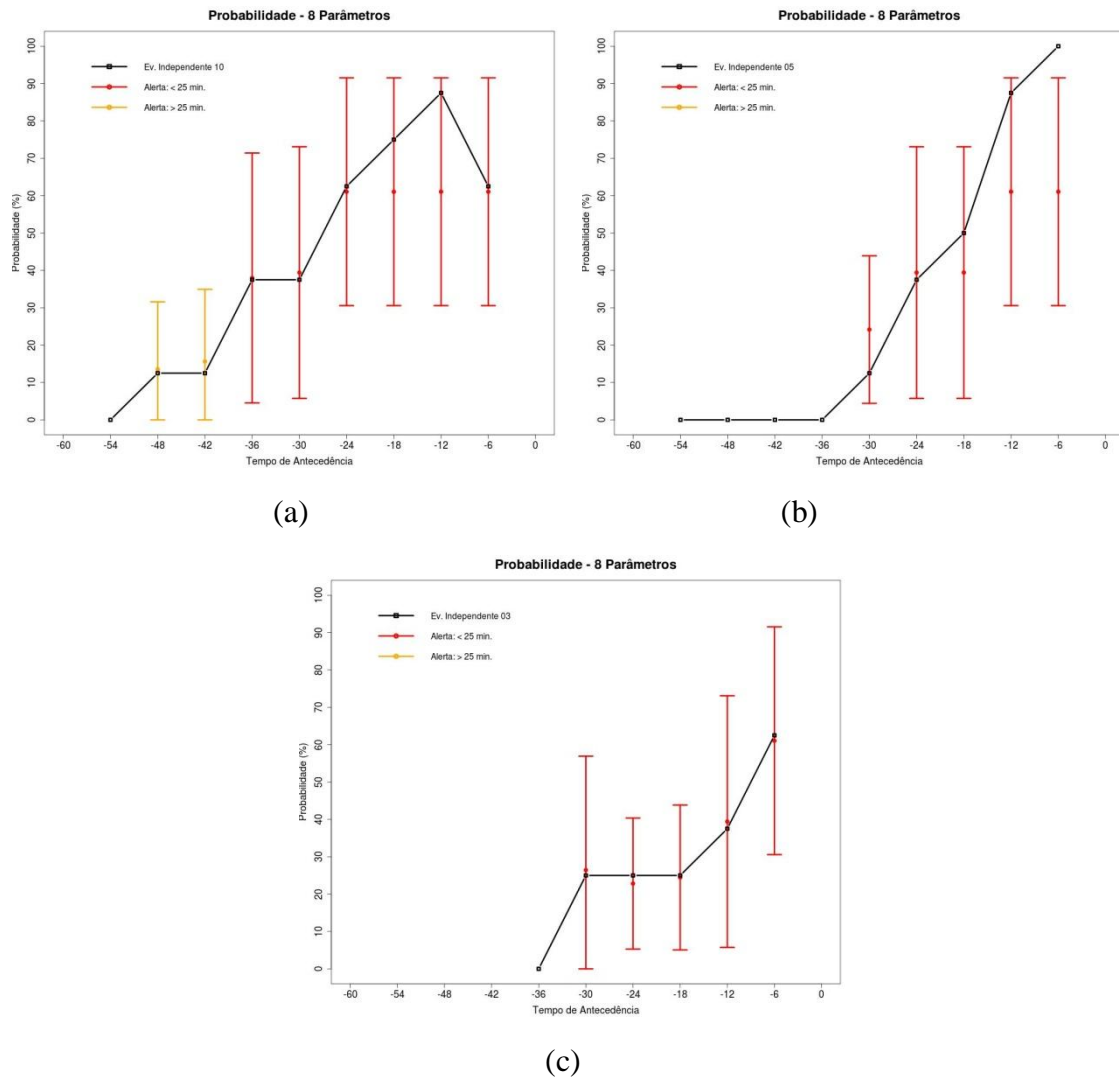


Figura 4.13 – Modelo aplicado a 3 eventos independentes. A curva preta representa a probabilidade de detecção do evento independente, ponto e barras vermelhas representam previsão de evento intenso em menos de 25 minutos e ponto e barras amarelas representam previsão de evento intenso em mais de 25 minutos.

A figura 4.14 mostra a aplicação do modelo para 2 eventos não-intensos. Para esses eventos, o modelo acerta se não emite nenhum alerta, o que ocorre no evento representado na figura 4.14a. No evento 4.14b ocorre um falso alarme, pois o modelo emite, com 6 minutos de antecedência à sua máxima intensidade, alerta de evento intenso em mais de 25 minutos.

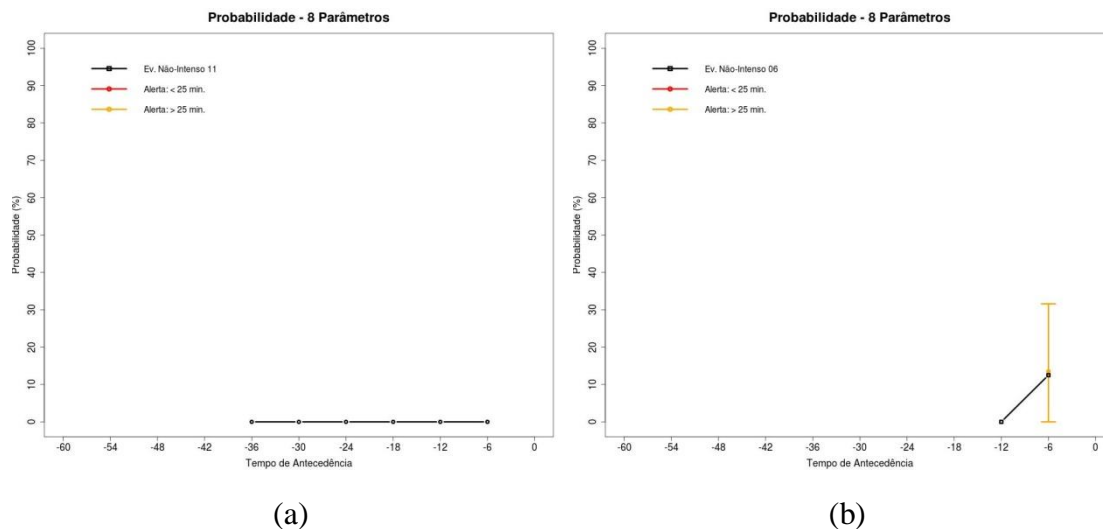


Figura 4.14 – Modelo aplicado a 2 eventos não-intensos. A curva preta representa a probabilidade de detecção do evento independente, ponto e barras amarelas representam previsão de evento intenso entre 25 e 40 minutos.

A obtenção da performance estatística do modelo consiste apenas em POD para os eventos intensos independentes, devido às duas únicas possibilidades para cada horário: acerto (*a* na tabela de contingência) ou erro (*c* na tabela de contingência). Para os eventos não-intensos, apenas é possível a obtenção do POFD, pois apenas pode ocorrer acerto (correto negativo, *d* na tabela de contingência) ou falso alarme (*b* na tabela de contingência). Nessa análise, foram desconsiderados tempos de antecedência maiores que 40 minutos, pois nesses casos o evento encontra-se no início do seu ciclo de vida e não há detecção para a maior parte dos casos. Em acréscimo, também não foram considerados erros para casos de nenhuma detecção de parâmetro no primeiro horário do ciclo de vida. Dessa maneira, o POD para os 10 eventos independentes é igual a 0,76 e o POFD para os 11 eventos não-intensos é igual a 0,29, demonstrando a eficácia do modelo para a separação desses conjuntos de eventos.



## 5 CONCLUSÕES

O objetivo principal dessa pesquisa foi a obtenção de características polarimétricas preditoras de eventos convectivos intensos da região do Vale do Paraíba em São Paulo usando dados de radar de dupla polarização banda X. O objetivo proposto levou à elaboração de um algoritmo de previsão imediata de tempo na forma de um modelo lagrangiano probabilístico. As principais conclusões desse trabalho serão, a seguir, apresentadas.

A fim de realizar o acompanhamento do ciclo de vida de eventos convectivos intensos e/ou severos utilizando radar meteorológico, é necessário utilizar limiar de refletividade  $Z_h$  elevado. O uso de limiares baixos de refletividade  $Z_h$  pode ser útil para outros objetivos como previsão de precipitação estratiforme e/ou extensas áreas de precipitação. Entretanto, para o estudo de eventos convectivos intensos, faz-se imprescindível o uso de limiares elevados para evitar o agrupamento de áreas de precipitação não-relacionadas com o evento em questão. No instante que uma célula convectiva se separa em duas ou mais células, é necessário que a continuação do ciclo de vida da célula seja aquela com a maior máxima refletividade  $Z_h$ , pois apresentou melhor resultado quanto ao correto rastreamento da continuação da célula convectiva.

A determinação de uma característica polarimétrica obtida a partir de derivada lagrangiana que ocorre no interior de uma nuvem convectiva definida a partir de limiar de 35 dBZ em 3 km deve ser realizada comparativamente com o volume total do evento ou da camada de interesse. Apenas a avaliação do aumento ou diminuição do volume de valores de variáveis polarimétricas não é suficiente, pois essa variação acompanha a taxa de crescimento do evento precipitante como um todo.

Todas as quatro variáveis polarimétricas estudadas,  $Z_h$ ,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$  e  $\rho_{hv}$ , apresentaram potencial para antecipar a ocorrência de eventos intensos. A interpretação física de cada variável é distinta, sendo importante para a definição dos valores e camadas a serem calculados. Além do uso isolado de uma variável, é possível o uso de duas ou mais

variáveis conjuntamente, o que leva ao acréscimo de informação e significados físicos ao parâmetro calculado. Os valores das variáveis polarimétricas utilizados que apresentaram melhor performance preditora foram aqueles valores mais severos. Limiares pouco severos apresentam falsos alarmes em demasia, enquanto limiares mais severos ocorrem somente em casos de eventos intensos, não provocando detecção em eventos não-intensos.

Na camada de fase mista, entre as isothermas de 0°C e -20°C, fez-se necessário a utilização de mais de uma variável polarimétrica para o discernimento de características que ocorressem nessa camada, sendo a interpretação física mais ampla e complexa. Para camadas mais elevadas, foram utilizados menos variáveis. Isso se deve ao próprio fato da altura da camada ser limitante para a obtenção de parâmetros e previsão imediata porque dificilmente limiares muito severos de mais de uma variável polarimétrica seriam detectados em elevadas altitudes. Em níveis mais baixos, o uso de um número maior de variáveis foi o fator determinante para determinar a severidade do parâmetro.

Em análise do comportamento de cada parâmetro, verificou-se que a probabilidade de detecção pelos parâmetros cresce à medida da aproximação do evento, a utilização de mais de um parâmetro é recomendável pelo aumento da detecção em relação aos parâmetros isolados e um único passo de tempo instantâneo não deve ser utilizado devido à variabilidade do tempo de antecedência para parâmetros isolados, sendo necessário o acúmulo da detecção dos parâmetros no tempo. Os parâmetros obtidos consistiram a base para a elaboração de um modelo probabilístico de previsão imediata de tempo. O modelo discerne eventos intensos e não-intensos satisfatoriamente, não havendo sobreposição de desvios padrões nas curvas de probabilidade. Esse modelo leva em consideração a probabilidade conforme o tempo de antecedência ao evento.

As características físicas, representadas pelos parâmetros, possuem tempos de antecedências ligeiramente diferentes, o que leva à seguinte sequência cronológica na física da nuvem. Primeiramente, ocorre o aumento do conteúdo de alvos verticalmente orientados na camada de fase mista, aliado à alta refletividade  $Z_h$ . Após, essa formação

de gelo na vertical se estende para camadas mais elevadas, implicando na presença de forte campo elétrico na nuvem. Por fim, quando a célula convectiva atinge altura com temperatura abaixo de  $-40^{\circ}\text{C}$ , forma-se o gelo heterogeneamente disposto, apresentando distintas orientações, e em seguida o gelo perde essa característica. Essas características físicas antecipam a ocorrência de refletividade  $Z_h$  muito elevada em 3 km ou granizo na superfície.

As características físicas descritas estão contidas no modelo probabilístico obtido o qual, comprovadamente, previu de maneira satisfatória eventos intensos de convecção observadas por radar. Dessa maneira, o modelo é uma possível ferramenta de previsão imediata aplicável em tempo real, podendo se tornar uma ferramenta útil para sistemas operacionais e, conseqüentemente, para tomadores de decisão de grandes aglomerações humanas.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, R ; MORALES, C. ; ANSELMO, E. ; NEVES, J. R. ; MATTOS, E. V. ; BISCARO, T. ; MACHADO, L. A. T. . Thunderstorm characteristics of summer precipitating systems during CHUVA-GLM Vale do Paraiba field campaign. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLOUDS AND PRECIPITATION, 16., 2012, Leipzig. **Proceedings of 16th International Conference on Clouds and Precipitation**. Leipzig: ICCP, 2012.

AMBURN, S. A.; WOLF, P. L. VIL density as a hail indicator. **Weather and Forecasting**, v. 12, n. 3, p. 473-478, 1997.

ANDERSON, I. Measurements of 20-GHz transmission through a radome in rain. **Antennas and Propagation, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 5, p. 619-622, 1975.

ATKINS, N. T.; WAKIMOTO, R. M.; WECKWERTH, T. M. Observations of the sea-breeze front during CaPE. Part II: Dual-Doppler and aircraft analysis. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 4, p. 944-969, 1995.

BECHINI, R.; CHANDRASEKAR, V.; CREMONINI, R.; LIM, S. Radome attenuation at X-band radar operations. In: EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY, 6., 2010, Sibiu. **Proceedings of Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology**. Sibiu: ERAD, 2010.

BECHINI, R.; BALDINI, L.; CHANDRASEKAR, V. Polarimetric Radar Observations in the Ice Region of Precipitating Clouds at C-Band and X-Band Radar Frequencies. **Journal of Applied Meteorology & Climatology**, v. 52, n. 5, p. 1147-1169, 2013.

BELLON, A. et al. McGill Algorithm for precipitation nowcasting by Lagrangian extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. Part I: Sensitivity studies of the variational echo tracking (VET) technique. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 46, n. 3, p. 369-381, 2010.

BOUDEVILLAIN, B.; ANDRIEU, H. Assessment of vertically integrated liquid (VIL) water content radar measurement. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 6, p. 807-819, 2003.

BOWLER, N. E.; PIERCE, C. E.; SEED, A. W. STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, n. 620, p. 2127-2155, 2006.

BRANT FOOTE, G.; MOHR, C. G. Results of a Randomized Hail Suppression Experiment in Northeast Colorado. Part VI: Post Hoc Stratification by Storm Intensity and Type. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, n. 12, p. 1589-1600, 1979.

BRINGI, V. N.; THURAI, M.; HANNESSEN, R. Correcting the measured ZDR for differential attenuation due to rain. **Dual-polarization weather radar handbook, 2nd Edition, Selex-Gematronik**. p. 51-56, 2007.

BROVELLI, P. et al. Nowcasting thunderstorms with Sigoons a significant weather object oriented nowcasting system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NOWCASTING AND VERY SHORT RANGE FORECASTING, 1., 2005, Toulouse. **Proceedings of the international symposium on nowcasting and very short range forecasting**. Toulouse: WSN, 2005.

CAREY, L. D.; BAIN, A. L.; MATTHEE, R. Kinematic and Microphysical Control of Lightning in Multicell Convection over Alabama during DC3. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 23., 2014, Tucson. **Proceedings of the international lightning detection conference**. Tucson: ILDC, 2014.

CHANDRASEKAR, V.; KERÄNEN, R.; LIM, S.; MOISSEEV, D. Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. **Atmospheric Research**, v. 119, p. 97-111, 2013.

COSTA, I. C. da. **Avaliação dos dados produzidos pela rede de radares meteorológicos de banda "S" localizados no centro sul do Brasil**. 2007. 139 p. (INPE-14986- TDI/1273). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.11.09>>. Acesso em: 6 jul. 2014.

CROOK, N. A. Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields. **Monthly Weather Review**, v. 124, n. 8, p. 1767-1785, 1996.

DANCE, S.; EBERT, E.; SCURRAH, D. Thunderstorm strike probability nowcasting. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, n. 1, p. 79-93, 2010.

DOTZEK, N.; FRIEDRICH, K. Downburst-producing thunderstorms in southern Germany: Radar analysis and predictability. **Atmospheric Research**, v. 93, n.1, p. 457-473, 2009.

DIXON, M.; WIENER, G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting-A radar-based methodology. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 10, n. 6, p. 785-797, 1993.

EILTS, M. D. et al. Severe weather warning decision support system. In: CONFERENCE ON SEVERE LOCAL STORMS, 18., 1996, San Francisco. **Proceedings of the 18th Conference on Severe Local Storms**. San Francisco: CSLS, 1996.

FIORINO, M.; WARNER, T. T. Incorporating surface-winds and rainfall rates into the initialization of a mesoscale hurricane model. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 9, p. 1914-1929, 1981.

GARSTANG, M.; COOPER, H. J. The role of near surface outflow in maintaining convective activity. In: **Nowcasting: Mesoscale Observations and Short-Range Prediction**, v. 165, p. 161, 1981.

GOLDING, B. W. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. **Meteorological Applications**, v. 5, n. 1, p. 1-16, 1998.

GRECU, M.; KRAJEWSKI, W. F. A large-sample investigation of statistical procedures for radar-based short-term quantitative precipitation forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 239, n. 1, p. 69-84, 2000.

GREENE, D. R.; CLARK, R. A. Vertically integrated liquid water-A new analysis tool. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 7, p. 548-552, 1972.

HAN, L. et al. 3D convective storm identification, tracking, and forecasting-An enhanced TITAN algorithm. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 26, n. 4, p. 719-732, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Boletim Agrometeorológico, Nov 2011. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO\\_MENSAL\\_201111.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201111.pdf)>. Acesso em: 25 de mar. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS.CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (INPE.CPTEC). Boletim Técnico, nov 2011. Disponível em: [http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/relatorio/boletim\\_20111129.pdf](http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/relatorio/boletim_20111129.pdf). Acesso em: 25 mar. 2014.

JOHNSON, J. T. et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. **Weather and Forecasting**, v. 13, n. 2, p. 263-276, 1998.

KEENAN, T. D. Hydrometeor classification with a C-band polarimetric radar. **Aust. Meteor. Mag.**, v. 52, n. 1, p. 23-31, 2003.

- KUMJIAN, M. R.; RYZHKOV, A. V. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms. **Journal of Applied Meteorology & Climatology**, v. 47, n. 7, p. 1940-1961, 2008.
- LAKSHMANAN, V. et al. The warning decision support system-integrated information. **Weather and Forecasting**, v. 22, n. 3, p. 596-612, 2007.
- LAKSHMANAN, V.; SMITH, T. An objective method of evaluating and devising storm-tracking algorithms. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 2, p. 701-709, 2010.
- LAPCZAK, S. et al. The Canadian National Radar Project. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY, 29., 1999, Montreal. **Proceedings of the 29th International Conference on Radar Meteorology**. Montreal: ICRM, 1999.
- LI, L.; SCHMID, W.; JOSS, J. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, n. 6, p. 1286-1300, 1995.
- LI, P. W.; LAI, E. S. T. Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong. **Journal of Hydrology**, v. 288, n. 1, p. 189-209, 2004.
- LIN, Y.; RAY, P. S.; JOHNSON, K. W. Initialization of a modeled convective storm using Doppler radar-derived fields. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 10, p. 2757-2775, 1993.
- LIN, Y. et al. Impact of hourly precipitation input on the NCEP ETA model. In: CONFERENCE ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 11., 1996, Norfolk. **Proceedings of the 11th Conference on Numerical Weather Prediction**. Norfolk: CNWP, 1996.
- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998.
- MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H. The convective system area expansion over Amazonia and its relationships with convective system life duration and high-level wind divergence. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 3, p. 714-725, 2004.
- MACHADO, L. A., et al. The CHUVA Project-how does convection vary across Brazil?. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 9, p. 1365-1380, 2014.
- MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**, v. 5, n. 4, p. 165-166, 1948.

MATHEWSON, M. A. Using the AWIPS Forecast Preparation System (AFPS). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE INFORMATION AND PROCESSING SYSTEMS FOR METEOROLOGY, OCEANOGRAPHY AND HYDROLOGY, 12., 1996, Atlanta. **Proceedings of the 12th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology**. Atlanta: IIPS, 1996.

MATTOS, E.; MACHADO, L. A. T.; WILLIAMS, E. Polarimetric signatures of thunderstorms associated to frequency of electrical activity. Submetido em **Journal of Geophysical Research**. 2014.

MOLLER, A. R. Severe local storms forecasting. **Meteorological Monographs**, v. 28, n. 50, p. 433-480, 2001.

MOREL, C.; ORAIN, F.; SENESI, S. Automated detection and characterization of MCS using the meteosat infrared channel. In: METEOROLOGICAL SATELLITE DATA USERS CONFERENCE, 1997, Brussels. **Proc. Meteo. Satellite Data Users Conference**. Brussels: MSDUC, 1997.

MUELLER, C. et al. NCAR auto-nowcast system. **Weather and Forecasting**, v. 18, n. 4, p. 545-561, 2003.

NASCIMENTO, E. D. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.

NOEL, T. M.; FLEISHER, A. The linear predictability of weather radar signals. **Cambridge: Massachusetts Inst of Tech**, 1960.

PIERCE, C. et al. Nowcasting . In: BECH, J. (Ed.). **Doppler radar observations - weather radar, wind profiler, ionospheric radar, and other advanced applications**. Rijeka, Croatia: In Tech, 2012. ISBN: 978-953-51-0496-4. DOI: 10.5772/39054. Available from: <http://www.intechopen.com/books/doppler-radar-observations-weather-radar-wind-profiler-ionospheric-radar-and-other-advanced-applications/nowcasting>.

PIERCE, C. E. et al. GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation. **Meteorological Applications**, v. 7, n. 4, p. 341-360, 2000.

PORTAL R3. Disponível em: < [www.portalr3.com.br/2012/03/temporal-atinge-pinda-e-deixa-alguns-estragos-pela-cidade/](http://www.portalr3.com.br/2012/03/temporal-atinge-pinda-e-deixa-alguns-estragos-pela-cidade/)>. Acesso em: 20 de abr. 2014.

QUEIROZ, A. P. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar**. 2009. 114 p. (INPE-14181- TDI/1093). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.17.19.50>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

REDE DE METEOROLOGIA DO COMANDO DA AERONÁUTICA (REDEMET). Rio de Janeiro: DECEA, 2012. Disponível em: <<http://www.redemet.aer.mil.br>>. Acesso em: 14 jan.2014.

ROBERTS, R. D.; BURGESS, D.; MEISTER, M. Developing tools for nowcasting storm severity. **Weather and Forecasting**, v. 21, n. 4, p. 540-558, 2006.

RYZHKOV, A. V.; ZRNIC, D. S. Radar polarimetry at S, C, and X bands: Comparative analysis and operational implications. In: CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY, 32., 2005, Albuquerque. **Proceedings of the 32nd Conference on Radar Meteorology**. Albuquerque: CRM, 2005.

SAKURAGI, J.; BISCARO, T. Determinação do viés do ZDR e seu impacto na classificação de hidrometeoros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17., 2012, Gramado. **Anais do XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Gramado: CBMET, 2012.

SCHNEEBELI, M. et al. Observations of tropical rain with a polarimetric X-band radar: first results from the CHUVA campaign. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, v. 5, n. 1, p. 1717-1761, 2012a.

SCHNEEBELI, M. et al. Polarimetric X-band weather radar measurements in the tropics: radome and rain attenuation correction. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 5, n. 9, p. 2183-2199, 2012b.

SISTEMA INTEGRADO DE DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SIDECA). São Paulo: SIDECA, 2011. Disponível em: <<http://www.sideca.sp.gov.br/dcs/todasNoticias.php>>. Acesso em: 11 set. 2013.

SNYDER, C.; ZHANG, F.. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 8, p. 1663-1677, 2003.

STRAKA, J. M.; ZRNIC, D. S.; RYZHKOV, A. V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 8, p. 1341-1372, 2000.

SUN, J.; CROOK, N. A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 54, n. 12, p. 1642-1661, 1997.

SUN, J.; CROOK, N. A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. **Weather and forecasting**, v. 16, n. 1, p. 117-132, 2001.

SUN, J.; ZHANG, Y. Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 7, p. 2364-2388, 2008.

TAI, S. L. et al. Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and the Weather Research and Forecasting model: Real case studies during SoWMEX in Taiwan. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 6, p. 975-992, 2011.

TESTUD, J. et al. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 3, p. 332-356, 2000.

ULANSKI, S. L.; GARSTANG, M. The role of surface divergence and vorticity in the life cycle of convective rainfall. Part I: Observation and analysis. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 35, p. 1047-1062, 1978.

VILA, D. A. et al. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: Methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 2, p. 233-245, 2008.

WANG, D. H. et al. Prediction and simulation of convective storms during VORTEX 95. In: CONFERENCE ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 11., 1996, Norfolk. **Proceedings of the 11th Conference on Numerical Weather Prediction**. Norfolk: CNWP, 1996.

WECKWERTH, T. M.; WILSON, J. W.; WAKIMOTO, R. M. Thermodynamic variability within the convective boundary layer due to horizontal convective rolls. **Monthly weather review**, v. 124, n. 5, p. 769-784, 1996.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic press. v. 10, 2011.

WILSON, J. W. et al. Nowcasting thunderstorms: A status report. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, p. 2079-2099, 1998.

WILSON, J. W.; CARBONE, R. Nowcasting with Doppler radar: The forecaster-computer relationship. In: **Nowcasting II, Mesoscale Observations and Very-Short-Range Weather Forecasting**. p. 177, 1984.

WILSON, J. W.; MEGENHARDT, D. L. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 7, p. 1507-1525, 1997.

WILSON, J. W.; MUELLER, C. K. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. **Weather and Forecasting**, v. 8, n. 1, p. 113-131, 1993.



WILSON, J. W.; SCHREIBER, W. E. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 12, p. 2516-2536, 1986.

WILSON, J. W.; FENG, Y.; CHEN, M.; ROBERTS, R. D. Nowcasting Challenges during the Beijing Olympics: Successes, Failures, and Implications for Future Nowcasting Systems. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 6, p. 1691-1714, 2010.

WOODARD, C. J.; CAREY, L. D.; PETERSEN, W. A.; ROEDER, W. P. Operational utility of dual-Polarization Variables in Lightning Initiation Forecasting. **Electronic J. Operational Meteor.**, v. 13, n. 6, p. 79-102, 2012.

XIAO, Q. et al. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 6, p. 768-788, 2005.



## APÊNDICE A – VARIÁVEIS E PARÂMETROS POLARIMÉTRICOS

Tabela A.1 – Limiares das variáveis polarimétricas calculados associados às camadas, representados pela letra “X”. A coluna “Cluster” significa todas as camadas.

Variável	Limiar da variável	AB0	CFM	AC0	AC-20	AC-40	Cluster
$Z_h$	$\geq 35$	X	X	X	X	X	X
	$\geq 40$	X	X	X	X	X	X
	$\geq 45$	X	X	X	X	X	X
	$\geq 50$	X	X	X	X	X	X
$\rho_{hv}$	$< 0,95$	X	X	X	X	X	
	$< 0,9$	X	X	X	X	X	
	$\leq 0,85$	X	X	X	X	X	
	$\leq 0,8$	X	X	X	X	X	
$Z_{DR}$	$> 0$	X					
	$\geq 0,5$	X					
	$\geq 1,0$	X					
	$\geq 2,0$	X					
	$< 0$		X	X	X	X	
	$\leq -0,5$		X	X	X	X	
	$\leq -1,0$		X	X	X	X	
	$\leq -2,0$		X	X	X	X	
$K_{DP}$	$> 0$	X					
	$\geq 0,5$	X					
	$\geq 1,0$	X					
	$\geq 2,0$	X					
	$< 0$		X	X	X	X	
	$\leq -0,5$		X	X	X	X	
	$\leq -1,0$		X	X	X	X	
	$\leq -2,0$		X	X	X	X	
$Z_{DR}$ e $K_{DP}$	$> 0$ e $> 0$	X					
	$> 0$ e $\geq 0,5$	X					
	$> 0$ e $\geq 1,0$	X					
	$\geq 0,5$ e $> 0$	X					
	$\geq 0,5$ e $\geq 0,5$	X					
	$\geq 0,5$ e $\geq 1,0$	X					
	$\geq 1,0$ e $> 0$	X					
	$\geq 1,0$ e $\geq 0,5$	X					
	$\geq 1,0$ e $\geq 1,0$	X					
	$< 0$ e $< 0$		X	X	X	X	
	$< 0$ e $\leq -0,5$		X	X	X	X	
	$< 0$ e $\leq -1,0$		X	X	X	X	
	$\leq -0,5$ e $< 0$		X	X	X	X	
	$\leq -0,5$ e $\leq -0,5$		X	X	X	X	
	$\leq -0,5$ e $\leq -1,0$		X	X	X	X	
	$\leq -1,0$ e $< 0$		X	X	X	X	

(Continua)

Tabela A.1 – Conclusão.

Variável	Limiar da variável	AB0	CFM	AC0	AC-20	AC-40	Cluster
Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	$\leq -1,0$ e $\leq -0,5$		X	X	X	X	
	$\leq -1,0$ e $\leq -1,0$		X	X	X	X	
Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> e Z <sub>h</sub>	$<0, \leq -0,5$ e $\geq 40$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -0,5$ e $\geq 45$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -1$ e $\geq 40$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -1$ e $\geq 45$	X	X	X	X	X	
Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> , Z <sub>h</sub> e $\rho_{hv}$	$<0, \leq -0,5, \geq 40$ e $<0,9$	X	X	X	X	X	
	$<0, < -0,5 \geq 40$ e $<0,85$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -0,5, \geq 45$ e $<0,9$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -0,5, \geq 45$ e $<0,85$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -1, \geq 40$ e $<0,9$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -1, \geq 40$ e $<0,85$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -1, \geq 45$ e $<0,9$	X	X	X	X	X	
	$<0, \leq -1, \geq 45$ e $<0,85$	X	X	X	X	X	

Tabela A.2 – Descrição dos 90 parâmetros.

#Par.	Variáveis	Valor utilizado	Limiar da variável	Lim.Par.	Camada
1	w	méd.	20 dBZ	6	
2	FAVIL	máx.	$\geq 5$	59,09	
3	FAVIL	máx.	$\geq 10$	25,59	
4	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 50$	5,15	CFM
5	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 35$	40,57	AC-20
6	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 40$	21,1	AC-20
7	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 45$	5,1	AC-20
8	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 35$	25,72	AC-40
9	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 40$	11,13	AC-40
10	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 50$	2,56	AC0
11	% Z <sub>h</sub>	máx.	$\geq 50$	4,86	Total
12	$\Delta\%$ K <sub>DP</sub>	mín.	$>0$	-5,62	AB0
13	$\Delta\%$ K <sub>DP</sub>	mín.	$\geq 0,5$	-7,06	AB0
14	% K <sub>DP</sub>	mín.	$\leq -0,5$	8,37	CFM
15	$\Delta\%$ K <sub>DP</sub>	mín.	$\leq -1$	-2,76	CFM
16	$\Delta\%$ K <sub>DP</sub>	mín.	$<0$	-5,86	AC-20

(Continua)

Tabela A.2 – Continuação.

#Par.	Variáveis	Valor utilizado	Limiar da variável	Lim.Par.	Camada
17	$\Delta\% K_{DP}$	p25	<0	-5,34	AC-20
18	$\Delta\% K_{DP}$	mín.	$\leq -0,5$	-4,56	AC-20
19	$\% K_{DP}$	méd.	$\leq -2$	0,13	AC-20
20	$\Delta\% K_{DP}$	mín.	$\leq -0,5$	-18,18	AC-40
21	$\% K_{DP}$	mín.	$\leq -1$	2,72	AC-40
22	$\% K_{DP}$	p25	<0	46,06	AC0
23	$\% K_{DP}$	mín.	$\leq -1$	3,76	AC0
24	$\% K_{DP}$	mín.	$\leq -2$	0,12	AC0
25	$\Delta\% \rho_{hv}$	p75	<0,95	-5,69	CFM
26	$\Delta\% \rho_{hv}$	mdn.	<0,9	-4,65	CFM
27	$\% \rho_{hv}$	mín.	$\leq 0,85$	27,8	CFM
28	$\% \rho_{hv}$	méd.	$\leq 0,85$	10,18	CFM
29	$\% \rho_{hv}$	mín.	$\leq 0,8$	15,23	CFM
30	$\Delta\% \rho_{hv}$	mdn.	$\leq 0,8$	-4,73	AC-20
31	$\Delta\% \rho_{hv}$	méd.	<0,95	-6	AC-40
32	$\Delta\% \rho_{hv}$	p75	$\leq 0,85$	-1,15	AC-40
33	$\Delta\% \rho_{hv}$	mín.	$\leq 0,85$	-2,01	AC-40
34	$\% \rho_{hv}$	p25	$\leq 0,8$	1,44	AC-40
35	$\Delta\% \rho_{hv}$	p75	<0,95	-3,79	AC0
36	$\Delta\% \rho_{hv}$	méd.	<0,9	-3,23	AC0
37	$\% \rho_{hv}$	p25	$\leq 0,85$	8,89	AC0
38	$\% \rho_{hv}$	mín.	$\leq 0,8$	8,12	AC0
39	$\% Z_{DR}$	méd.	$\leq -0,5$	11,53	CFM
40	$\% Z_{DR}$	mín.	$\leq -1$	12,67	CFM
41	$\% Z_{DR}$	mín.	$\leq -0,5$	44,64	AC-20
42	$\% Z_{DR}$	mín.	$\leq -1$	12,5	AC-20
43	$\Delta\% Z_{DR}$	p25	$\leq -1$	-1,8	AC-20
44	$\Delta\% Z_{DR}$	méd.	$\leq -2$	-0,22	AC-20
45	$\% Z_{DR}$	p25	$\leq -0,5$	30,48	AC-40
46	$\Delta\% Z_{DR}$	méd.	$\leq -1$	-2,21	AC-40
47	$\% Z_{DR}$	p25	$\leq -2$	0,71	AC-40

(Continua)

Tabela A.2 – Continuação.

#Par.	Variáveis	Valor utilizado	Limiar da variável	Lim.Par.	Camada
48	% Z <sub>DR</sub>	mín.	≤-1	12,45	AC0
49	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	>0 e >0	-6,23	AB0
50	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e <0	28,54	CFM
51	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e <0	-7,38	AC-20
52	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e <0	39,5	AC-40
53	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	≤-1 e ≤-1	1,04	CFM
54	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	≤-1 e ≤-1	0,76	AC-20
55	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	≤-1 e ≤-1	0,81	AC-40
56	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	méd. e méd.	≥0,5 e ≥0,5	-8,55	AB0
57	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	p25 e p25	≤-1 e <0	1,83	CFM
58	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	>0 e ≥1	-4,91	AB0
59	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e ≤-1	1,83	CFM
60	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	p25 e p25	<0 e ≤-1	-1,1	AC-40
61	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	méd. e méd.	≥1 e ≥0,5	-9,04	AB0
62	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	≤-1 e ≤-0,5	2,11	CFM
63	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	≤-1 e ≤-0,5	2,11	AC-20
64	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	méd. e méd.	≤-1 e ≤-0,5	0,58	AC0
65	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	méd. e méd.	≥0,5 e ≥1	-5	AB0
66	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	p25 e p25	≤-0,5 e ≤-1	1,04	CFM
67	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	p25 e p25	≤-0,5 e ≤-1	1,16	AC0
68	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	≤-0,5 e ≤-1	-0,89	AC0
69	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	p25 e p25	≥0,5 e >0	-5,16	AB0
70	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	>0 e ≥0,5	-8,34	AB0
71	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e ≤-0,5	-4,02	AC-20
72	% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e ≤-0,5	18,18	AC-40
73	Δ% Z <sub>DR</sub> e K <sub>DP</sub>	mín. e mín.	<0 e ≤-0,5	-13,86	AC-40
74	% Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> e Z <sub>h</sub>	mín., mín. e máx.	<0, ≤-1 e ≥45	0,21	CFM
75	% Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> e Z <sub>h</sub>	mín., mín. e máx.	<0, ≤-1 e ≥40	1,03	CFM
76	Δ% Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> e Z <sub>h</sub>	méd., méd. e méd.	<0, ≤-0,5 e ≥40	-0,45	CFM
77	% Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> e Z <sub>h</sub>	mín., mín. e máx.	<0, ≤-0,5 e ≥40	3,37	AC-20
78	% Z <sub>DR</sub> , K <sub>DP</sub> e Z <sub>h</sub>	mín., mín. e máx.	<0, ≤-0,5 e ≥40	1,12	AC-40

(Continua)

Tabela A.2 – Conclusão.

#Par.	Variáveis	Valor utilizado	Limiar da variável	Lim.Par.	Camada
79	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ e $Z_h$	p25, p25, p75	$<0, \leq -0,5$ e $\geq 45$	1,48	CFM
80	$\Delta\%$ $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ e $Z_h$	p25, p25, p75	$<0, \leq -0,5$ e $\geq 45$	-0,58	AC-20
81	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -1, \geq 40$ e $<0,85$	0,55	CFM
82	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -1, \geq 40$ e $<0,9$	0,76	CFM
83	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -1, \geq 45$ e $<0,85$	0,09	CFM
84	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -1, \geq 45$ e $<0,9$	0,18	CFM
85	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -0,5, \geq 40$ e $<0,85$	-0,58	CFM
86	$\Delta\%$ $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -0,5, \geq 40$ e $<0,85$	0,24	AC-20
87	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -0,5, \geq 40$ e $<0,9$	1,65	CFM
88	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	mín., mín., máx. e p25	$<0, \leq -0,5, \geq 40$ e $<0,9$	0,49	AC-20
89	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	p25, p25, p75 e p25	$<0, \leq -0,5, \geq 40$ e $<0,9$	0,48	CFM
90	% $Z_{DR}$ , $K_{DP}$ , $Z_h$ e $\rho_{hv}$	p25, p25, p75 e p25	$<0, \leq -0,5, \geq 45$ e $<0,9$	0,55	CFM

Tabela A.3 – Índices estatísticos dos parâmetros em ordem do HSS.

#Par.	a	b	c	d	HSS	POD	FAR	POFD	#Par.	a	b	c	d	HSS	POD	FAR	POFD
3	22	10	4	16	0.462	0.846	0.312	0.385	20	7	0	19	19	0.237	0.269	0.000	0.000
74	22	10	4	15	0.448	0.846	0.312	0.400	31	17	11	9	15	0.231	0.654	0.393	0.423
72	14	2	12	18	0.415	0.538	0.125	0.100	21	8	1	18	18	0.228	0.308	0.111	0.053
63	20	9	6	15	0.396	0.769	0.310	0.375	79	12	5	14	17	0.227	0.462	0.294	0.227
81	13	2	13	18	0.376	0.500	0.133	0.100	87	16	9	10	14	0.224	0.615	0.360	0.391
89	12	1	14	18	0.374	0.462	0.077	0.053	4	22	18	4	11	0.219	0.846	0.450	0.621
90	14	3	12	17	0.369	0.538	0.176	0.150	54	11	5	15	18	0.201	0.423	0.312	0.217
83	15	5	11	18	0.354	0.577	0.250	0.217	41	25	20	1	6	0.192	0.962	0.444	0.769
77	12	2	14	18	0.338	0.462	0.143	0.100	73	7	1	19	18	0.192	0.269	0.125	0.053
34	14	4	12	16	0.324	0.538	0.222	0.200	7	8	2	18	18	0.190	0.308	0.200	0.100
75	19	10	7	14	0.316	0.731	0.345	0.417	33	14	8	12	15	0.189	0.538	0.364	0.348
84	15	6	11	17	0.312	0.577	0.286	0.261	71	18	15	8	13	0.155	0.692	0.455	0.536
76	11	2	15	19	0.309	0.423	0.154	0.095	2	15	11	11	15	0.154	0.577	0.423	0.423
85	11	2	15	18	0.301	0.423	0.154	0.100	46	10	5	16	17	0.152	0.385	0.333	0.227
82	14	5	12	15	0.277	0.538	0.263	0.250	55	21	19	5	10	0.148	0.808	0.475	0.655
45	15	7	11	16	0.270	0.577	0.318	0.304	29	15	11	11	13	0.119	0.577	0.423	0.458
11	25	18	1	8	0.269	0.962	0.419	0.692	53	20	19	6	10	0.111	0.769	0.487	0.655
10	24	19	2	9	0.239	0.923	0.442	0.679	44	11	7	15	15	0.102	0.423	0.389	0.318

(Continua)

Tabela A.3 – Continuação.

#Par.	a	b	c	d	HSS	POD	FAR	POFD	#Par.	a	b	c	d	HSS	POD	FAR	POFD
78	3	0	23	19	0.099	0.115	0.000	0.000	27	14	13	12	12	0.018	0.538	0.481	0.520
6	3	0	23	19	0.099	0.115	0.000	0.000	86	3	2	23	18	0.014	0.115	0.400	0.100
5	3	0	23	19	0.099	0.115	0.000	0.000	19	3	2	23	17	0.009	0.115	0.400	0.105
24	15	12	11	13	0.097	0.577	0.444	0.480	64	12	10	14	12	0.007	0.462	0.455	0.455
48	25	20	1	3	0.097	0.962	0.444	0.870	67	16	14	10	9	0.007	0.615	0.467	0.609
47	8	5	18	18	0.087	0.308	0.385	0.217	66	17	15	9	8	0.002	0.654	0.469	0.652
50	24	25	2	4	0.058	0.923	0.510	0.862	62	24	33	2	2	-0.017	0.923	0.579	0.943
80	3	1	23	19	0.058	0.115	0.250	0.050	22	23	34	3	3	-0.029	0.885	0.596	0.919
88	4	2	22	18	0.048	0.154	0.333	0.100	23	19	21	7	6	-0.047	0.731	0.525	0.778
42	22	20	4	5	0.047	0.846	0.476	0.800	57	22	26	4	3	-0.048	0.846	0.542	0.897
28	12	10	14	14	0.045	0.462	0.455	0.417	32	6	6	20	15	-0.052	0.231	0.500	0.286
52	23	27	3	5	0.038	0.885	0.540	0.844	59	17	17	9	7	-0.055	0.654	0.500	0.708
40	25	25	1	2	0.035	0.962	0.500	0.926	30	21	27	5	4	-0.059	0.808	0.562	0.871
9	1	0	25	19	0.033	0.038	0.000	0.000	16	17	26	9	10	-0.063	0.654	0.605	0.722
8	1	0	25	19	0.033	0.038	0.000	0.000	37	19	24	7	6	-0.066	0.731	0.558	0.800
39	23	24	3	4	0.027	0.885	0.511	0.857	17	17	27	9	10	-0.069	0.654	0.614	0.730
14	26	38	0	1	0.021	1.000	0.594	0.974	51	16	22	10	10	-0.069	0.615	0.579	0.688

(Continua)

Tabela A.3 – Conclusão.

#Par.	a	b	c	d	HSS	POD	FAR	POFD	#Par.	a	b	c	d	HSS	POD	FAR	POFD
38	20	27	6	5	-0.069	0.769	0.574	0.844	35	17	31	9	1	-0.292	0.654	0.646	0.969
18	14	19	12	12	-0.073	0.538	0.576	0.613	65	16	43	11	2	-0.293	0.593	0.729	0.956
69	23	50	4	0	-0.106	0.852	0.685	1.000	58	16	43	11	2	-0.293	0.593	0.729	0.956
43	16	22	10	8	-0.114	0.615	0.579	0.733	26	12	23	14	5	-0.355	0.462	0.657	0.821
1	16	19	10	6	-0.146	0.615	0.543	0.760	12	13	45	14	2	-0.383	0.481	0.776	0.957
70	21	48	6	1	-0.150	0.778	0.696	0.980	13	15	33	12	1	-0.384	0.556	0.688	0.971
60	14	18	12	7	-0.182	0.538	0.562	0.720	49	11	44	16	3	-0.433	0.407	0.800	0.936
68	16	22	10	5	-0.198	0.615	0.579	0.815	36	12	31	14	2	-0.447	0.462	0.721	0.939
15	14	19	12	6	-0.223	0.538	0.576	0.760	56	8	38	19	2	-0.587	0.296	0.826	0.950
25	17	30	9	2	-0.264	0.654	0.638	0.938	61	6	37	21	2	-0.666	0.222	0.860	0.949



## APÊNDICE B – EVENTOS INTENSOS E NÃO-INTENSOS

Tabela B.1 – Eventos intensos.

<b>Data</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Máx. Z<sub>h</sub></b>	<b>Data</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Máx. Z<sub>h</sub></b>
22/11/2011	-23,14 -46,35	60,0	08/01/2012	-23,44 -45,84	61,0
28/11/2011	-23,18 -45,64	60,0	08/01/2012	-23,37 -45,87	60,5
29/11/2011	-22,97 -45,84	63,0	08/01/2012	-23,39 -46,01	61,5
29/11/2011	-23,31 -45,71	61,5	08/01/2012	-23,50 -45,75	60,0
29/11/2011	-23,38 -45,85	62,5	12/01/2012	-23,44 -46,02	63,0
29/11/2011	-23,17 -45,56	60,5	12/01/2012	-23,69 -46,15	62,5
29/11/2011	-23,09 -45,70	60,0	12/01/2012	-23,15 -46,22	60,0
30/11/2011	-23,21 -46,30	60,5	22/01/2012	-22,99 -46,06	61,0
04/12/2011	-23,04 -46,15	61,0	22/01/2012	-23,12 -45,33	60,0
05/12/2011	-23,05 -45,9	61,5	01/02/2012	-23,47 -46,06	60,0
05/12/2011	-23,07 -45,77	63,5	09/02/2012	-23,41 -46,21	60,5
07/12/2011	-23,05 -46,38	60,5	09/02/2012	-23,56 -45,96	60,0
07/12/2011	-23,42 -45,80	60,5	14/02/2012	-23,16 -45,68	61,0
18/12/2011	-23,08 -46,12	61,5	20/02/2012	-23,16 -46,22	60,5
20/12/2011	-23,42 -46,04	61,5	22/02/2012	-23,10 -45,67	61,0
20/12/2011	-23,00 -45,66	62,5	23/02/2012	-23,53 -45,75	61,0
07/01/2012	-23,43 -45,82	60,0	27/02/2012	-23,19 -45,50	63,0
07/01/2012	-23,20 -45,60	63,5	02/03/2012	-23,40 -45,81	62,0

Tabela B.2 – Eventos não-intensos.

<b>Data</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Máx. Z<sub>h</sub></b>	<b>Data</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Máx. Z<sub>h</sub></b>
22/11/2011	-23,02 -46,39	49,5	01/02/2012	-23,22 -45,31	50,5
27/12/2011	-23,41 -46,49	50,0	01/02/2012	-23,24 -46,62	49,5
28/12/2011	-23,14 -45,58	46,5	01/02/2012	-23,37 -46,59	51,0
28/12/2011	-22,94 -45,77	48,0	01/02/2012	-23,07 -46,40	52,0
31/12/2011	-23,27 -46,15	51,5	03/03/2012	-23,58 -45,55	48,5
07/01/2012	-23,52 -45,52	52,0	03/03/2012	-23,26 -46,35	48,0
07/01/2012	-23,51 -45,75	50,0	16/03/2012	-23,29 -46,32	50,0
01/02/2012	-23,35 -46,55	51,5	16/03/2012	-23,18 -45,72	51,5
01/02/2012	-23,08 -45,58	53,5	31/03/2012	-23,51 -45,59	53,5
01/02/2012	-23,29 -46,43	51,0			