



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/12.20.22.41-TDI

**ESTUDO DA MORFOLOGIA DAS TEMPESTADES  
SEVERAS EM 3D E POTENCIAL APLICAÇÃO EM  
NOWCASTING**

Jojhy Sakuragi

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Carlos Frederico de Angelis, aprovada em 30 de novembro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3Q8GLTE>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

**Membros:**

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

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

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/12.20.22.41-TDI

**ESTUDO DA MORFOLOGIA DAS TEMPESTADES  
SEVERAS EM 3D E POTENCIAL APLICAÇÃO EM  
NOWCASTING**

Jojhy Sakuragi

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Carlos Frederico de Angelis, aprovada em 30 de novembro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3Q8GLTE>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Sakuragi, Jójhy.

Sa29e      Estudo da morfologia das tempestades severas em 3D e potencial aplicação em nowcasting / Jójhy Sakuragi. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xx + 137 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/12.20.22.41-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientador : Dr. Carlos Frederico de Angelis.

1. Nowcasting. 2. Radar meteorológico. 3. Célula de tempestade. 4. Merging e splitting. 5. Rastreamento de células. I. Título.

CDU 551.515.4:551.508.85

---



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/).

Aluno (a): **Jojhy Sakuragi**

Título: "ESTUDO DA MORFOLOGIA DAS TEMPESTADES SEVERAS EM 3D E POTENCIAL APLICAÇÃO EM NOWCASTING".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Meteorologia**

Dr. Eder Paulo Vendrasco



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

Dr. Carlos Frederico de Angelis



\_\_\_\_\_  
**Orientador(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP**

Dr. Marcelo Barbio Rosa



\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP**

Dr. Daniel Alejandro Vila



\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP**

Dr. Leonardo Calvetti



\_\_\_\_\_  
**Convidado(a) / UFPEL / Pelotas - RS**

Dr. Cesar Augustus Assis Beneti



\_\_\_\_\_  
**Convidado(a) / SIMEPAR / Curitiba - PR**

**Este trabalho foi aprovado por:**

**majoria simples**

**unanimidade**

**São José dos Campos, 30 de novembro de 2017**



*Dedico esta tese ao Guilherme, a Thainá, ao Taiyo e  
especialmente à minha sobrinha Sophia!*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio incondicional na realização deste trabalho, sem a qual não teria seguido e concluído essa jornada.

Ao meu amigo e orientador Dr. Carlos Frederico de Angelis pela liberdade de realizar esta pesquisa e pelas discussões calorosas que contribuíram para enriquecer o presente trabalho.

Ao amigo Dirceu Herdies e pela sua amizade e pelos constantes incentivos na finalização desta jornada.

Aos amigos William Escobar, Philipp Dias da Silva, Leticia Souza Covre e Wagner Flauber pelo apoio e grandes momentos de alegria nessa jornada.

Ao amigo Dr. Jens Didszun por compartilhar seus conhecimentos na utilização do software Rainbow e pelas valiosas discussões em Meteorologia por Radar.

Aos amigos César Mello e Bruno Galvão pelos momentos divertidos e troca de conhecimento entre hardware e software dos radares meteorológicos da Selex-SE.

Aos amigos do Cemaden, em especial ao João Garcia e ao Fernando Oliveira, assim como Eduardo Luz e Rogério Ishibashi pelas pequenas contribuições, mas importantes para tirar as pequenas pedras desse caminho.

Meu agradecimento a todas as pessoas anônimas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia simples de classificação de célula, porém inovadora chamada de Método de Expansão 3D. A partir do núcleo de refletividade máxima da célula de tempestade, o método começa a classificar cada *cluster* como parte do corpo da célula, desde que o valor da refletividade permaneça inferior até atingir o limite de 20 dBZ, definindo a borda externa da célula. Se o sinal de gradiente mudar para positivo durante a busca, significa que o método encontrou a borda entre duas células e a busca será interrompida. O centro de massa é ponderado pela refletividade e a direção inicial de procura pelo centro de massa no tempo subsequente é dado pelo *Uniform Wind Technique* ou *Volume Velocity Processing*, formando assim o vetor deslocamento. Determinando o ciclo de vida das células, um banco de dados com essas amostras é criado para ser utilizado como base para o nowcasting com ciclo de vida. Em comparação, essa metodologia foi superior em desempenho ao *Cell Tracking*. A sua previsibilidade chegou a 60% numa comparação qualitativa. O Método de Expansão permitiu também uma maior compreensão dos processos de *merging* e *splitting*, onde uma célula evolui e se mantém em detrimento da outra pela competição de vapor de água e advecção de calor.

Palavras-chave: Nowcasting. Radar Meteorológico. Célula de tempestade. Merging e Splitting. Rastreamento de células.



# STUDY OF SEVERE STORM MORPHOLOGY IN THREE DIMENSIONS AND POTENTIAL APPLICATION IN NOWCASTING

## ABSTRACT

This work presents a simple cell classification methodology, but innovative called the 3D Expansion Method. From the maximum reflectivity core of the storm cell, the method begins to classify each cluster as part of the cell body in the three directions, provided that the reflectivity value remain above the 20 dBZ threshold, defining outer edge of the cell. If the reflectivity gradient changes to positive during the search, it means that it found the border between two cells, so the search will be interrupted. The center of mass is reflectivity-weighted and an first guess direction of searching for the center of mass to subsequent time is given by Uniform Wind Technique or Volume Velocity Processing. By determining the life cycle of cells, a database with these samples is created and will be used as a basis for the nowcasting with life cycle. In comparison, this methodology was superior to the Cell Tracking algorithm. Its predictability reached 67% in a qualitative comparison. The Expansion Method also allowed for a better understanding of the processes of merging and splitting, where one cell evolves and remains at the expense of the other by the competition of water vapor and advection of heat.

Keywords: Nowcasting. Radar tracking. Weather radar. Morphology.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Diagrama conceitual do movimento de uma tempestade. . . . .	13
2.2 Planificação de uma supercélula com deslocamento para Leste. . . . .	14
2.3 Seção vertical de uma tempestade multicelular típica. . . . .	15
2.4 Seção horizontal e vertical dos ecos de radar para uma tempestade multicelular. . . . .	16
2.5 A perspectiva de uma tempestade supercélula que descreve o fluxo de ar da tempestade e a estrutura da refletividade. . . . .	18
2.6 Ilustração da elaboração dos segmentos 1D e 2D da tempestade. . . . .	22
2.7 Ilustração do método de identificação baseado na matemática morfológica. . . . .	24
2.8 Deslocamento anômalo da célula de tempestade devido à metodologia de identificação por limiar não posicionar corretamente o centroide. . . . .	24
2.9 Ilustração da limitação do elemento 1D na detecção resultando em duas tempestades separadas. . . . .	25
2.10 Possíveis leituras incorretas de trajetórias dos algoritmos de rastreamento. . . . .	26
2.11 Associação vertical da tempestade 3D para melhorar a componente 2D da tempestade. . . . .	26
2.12 Trajetória das células precipitantes definida pelos máximos de água líquida precipitável. . . . .	27
2.13 Representação esquemática dos vários estágios do ciclo de vida da célula de tempestade. . . . .	28
3.1 Localização do radar de Jaraguari/MS. . . . .	31
3.2 Transporte de umidade da Amazônia pelo LLJ. . . . .	32
3.3 Topografia da área de estudo. . . . .	33
4.1 Idealização do processo de identificação de cada elemento de volume das células 1 e 2. . . . .	39
4.2 Ilustração dos multivetores entre os centros de massa das células em $t_1$ e $t_2$ . . . . .	41
4.3 Geometria de concepção do <i>Uniform Wind Technique</i> . . . . .	43
4.4 Metodologia empírica utilizada na seleção do vetor deslocamento. . . . .	44
4.5 Ilustração do resultado da seleção dos vetores deslocamento entre centros de massa em dois tempos sucessivos. . . . .	45
4.6 Ilustração da descontinuação da trajetória pela metodologia de rastreio. . . . .	45
4.7 Ilustração da metodologia de construção do NCV. . . . .	48

4.8	<i>Nowcasting</i> do CTR baseado no CAPPI de 2 km de altitude. . . . .	49
5.1	Classificação da célula pelo Método da Expansão em 3D. . . . .	53
5.2	3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 56 e 57 dBZ. . . . .	55
5.3	3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 52 e 53 dBZ. . . . .	56
5.4	3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 48 e 49 dBZ. . . . .	57
5.5	3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 39 e 40 dBZ. . . . .	58
5.6	3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 20 e 21 dBZ. . . . .	59
5.7	Resultado da classificação de um sistema multicelular pelo 3DEM. . . . .	60
5.8	Trajetoграфия de duas células no dia 26/10/2015: 15:45 à 16:25Z. . . . .	64
5.9	Variação da (a) altitude, (b) refletividade e (c) volume das células durante as trajetórias. . . . .	69
5.10	Influência do UWT e do VVP na identificação da trajetória. . . . .	72
5.11	Trajetoграфия das células rastreadas no dia 02/11/2015 das 13 às 20Z. . . . .	75
5.12	Trajetoграфия da Célula 2019 em 02/11/2015. . . . .	77
5.13	Trajetoграфия das células rastreadas no dia 25/02/2016, das 17 às 23:55Z. . . . .	83
5.14	Trajetoграфия da Célula 2463 em 25/02/2016. . . . .	85
5.15	Observação do processo de <i>Merging</i> em diferentes altitudes. . . . .	100
5.16	Observação do processo de <i>Splitting</i> em diferentes altitudes. . . . .	104
5.17	Ilustração do NCV do dia 04/01/2017-18:25Z. . . . .	107
5.18	Continuação do NCV iniciado na Figura 5.17. . . . .	109
5.19	<i>Nowcasting</i> de 30 minutos do CTR baseada no CAPPI de 2 km do dia 04/01/2017 às 18:25Z. . . . .	112
5.20	<i>Nowcasting</i> de 30 minutos do CTR baseada no CAPPI de 2 km do dia 04/01/2017 às 18:10Z, 18:15Z e 18:20Z. . . . .	113
5.21	Correlação entre Refletividade e Volume da Célula 122. . . . .	118
5.22	Raiz cúbica do Volume versus refletividade da Célula 122. . . . .	119
5.23	Comportamento da Célula 122 no seu ciclo de vida de 60 minutos. . . . .	120
5.24	Ciclo de vida da Célula 86 do dia 25/10/2015. . . . .	122
5.25	Correlação entre refletividade do CM versus Volume. . . . .	123
5.26	Correlação entre refletividade do CM versus Volume da Célula 2395. . . . .	124
5.27	Dinâmica de evolução da Célula 2395. . . . .	125
5.28	Ciclo de vida de células com 35 minutos de rastreio. . . . .	126

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Configurações básicas da varredura volumétrica de Jaraguari. . . . .	34
5.1 Parâmetros das trajetórias do dia 02/11/2015. . . . .	76
5.2 Parâmetros das trajetórias do dia 25/02/2016. . . . .	84
5.3 Observado versus NCV feito no 25/02/2016-18:25Z. . . . .	108
5.4 Estatística da comparação entre NCV versus CTR. . . . .	114
5.5 Comparação entre NCV e o observado para ciclos longos. . . . .	115
5.6 Comparação entre NCV e o observado com filtro de parábola. . . . .	116
5.7 Tempo entre a ocorrência da refletividade máxima em relação ao volume máximo. . . . .	120



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDN	–	Bando de Dados de Nowcasting
CAPPI	–	Constant Altitude PPI
CEMADEN	–	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CM	–	Centro de Massa
COTREC	–	Continuity TREC
CPTEC	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSI	–	Índice crítico de sucesso
CTR	–	Cell Tracking
ETITAN	–	Enhanced TITAN
FAR	–	Falso alarme
Fortracc	–	Forecast and Track of Active Cloud Cluster
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPMet	–	Instituto de Pesquisa Meteorológica
KDP	–	Deslocamento de fase diferencial específica
MAX	–	Ponto de máxima refletividade
NCV	–	Nowcasting com Ciclo de Vida
NMM	–	Nível Médio do Mar
PhiDP	–	Deslocamento de fase
POD	–	Probabilidade de detecção
PPI	–	Plan Position Indicator
RhoHV	–	Correlação co-polar entre $Z_h$ e $Z_v$
SCIT	–	Storm Cell Identification and Tracking
TITAN	–	Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting
TREC	–	Tracking Radar Echoes by Correlation
UNESP	–	Universidade Estadual de São Paulo
UWT	–	Uniform Wind Technique
V	–	Velocidade radial
VIL	–	Água líquida integrada na vertical
VVP	–	Volume Velocity Processing
W	–	Largura espectral
ZDR	–	Refletividade diferencial
$Z_h$	–	Refletividade da onda horizontal
$Z_v$	–	Refletividade da onda vertical



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	4
1.2 Objetivo . . . . .	4
1.3 Estrutura da pesquisa . . . . .	6
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1 Morfologia das tempestades . . . . .	9
2.1.1 A célula de tempestade . . . . .	9
2.1.2 Classificação das tempestades . . . . .	11
2.1.3 Cisalhamento do vento . . . . .	11
2.1.4 Deslocamento da tempestade . . . . .	12
2.1.5 Estrutura da tempestade em termos de refletividade do radar . . . . .	13
2.1.5.1 Regiões de fraco eco (WER) . . . . .	14
2.1.5.2 Tempestades multicelulares ou unicelulares . . . . .	15
2.1.5.3 Tempestades de supercélulas isoladas . . . . .	17
2.1.6 Desenvolvimentos futuros para estudos sobre morfologia dos sistemas precipitantes . . . . .	17
2.2 Metodologias de Nowcasting . . . . .	19
<b>3 ÁREA DE ESTUDO E DADOS</b> . . . . .	<b>31</b>
3.1 Dados de radar . . . . .	34
<b>4 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>35</b>
4.1 Transformação de Coordenadas . . . . .	35
4.2 Método da Expansão em 3D . . . . .	37
4.3 Cálculo do centro de massa . . . . .	40
4.4 Cálculo do vetor deslocamento . . . . .	41
4.5 <i>Nowcasting</i> com Ciclo de Vida . . . . .	46
4.6 Comparação de <i>Nowcastings</i> . . . . .	48
4.7 Estudo da relação Refletividade x Volume . . . . .	50
<b>5 RESULTADOS</b> . . . . .	<b>51</b>
5.1 Método de Expansão 3D - 3DEM . . . . .	51

5.1.1	Tempestade unicelular . . . . .	51
5.1.2	Tempestade multicelular . . . . .	54
5.2	Trajetoграфия . . . . .	62
5.2.1	Trajetoграфия do Ciclo de Vida da Célula . . . . .	62
5.2.2	Influência do UWT e do VVP na trajetória . . . . .	70
5.2.3	Trajetoграфияs das células e sua Morfologia . . . . .	71
5.3	<i>Merging e Splitting</i> . . . . .	98
5.3.1	Análise da fusão entre células - <i>Merging</i> . . . . .	99
5.3.2	Análise da divisão entre células - <i>Splitting</i> . . . . .	102
5.4	<i>Nowcasting</i> com ciclo de vida . . . . .	106
5.5	Comparação da metodologia com abordagem tridimensional com o algoritmo de abordagem bidimensional Centroid Tracking . . . . .	112
5.6	Estudos sobre a Relação Refletividade x Volume das Células Convectivas	117
5.7	Sumário dos principais resultados obtidos na pesquisa . . . . .	128
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>133</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Centros operacionais de monitoramento de condições ambientais que afetam o cotidiano da população têm sido criados e estabelecidos por instituições governamentais e não governamentais em muitos países nos últimos anos. O objetivo do trabalho de monitoramento desses centros visa prevenir e mitigar as consequências de desastres naturais, cuja maioria dos eventos é de origem hidro-geo-meteorológica.

Para monitorar o risco de ocorrência de eventos consequentes de condições meteorológicas como enxurradas, alagamentos e deslizamentos de encostas, os centros operacionais necessitam de informações pretéritas e em tempo real do volume e da intensidade da precipitação que ocorre nos locais monitorados. Essas informações são provenientes de vários instrumentos como pluviômetros automáticos, radares meteorológicos, e satélites, e são utilizadas para se fazer o *nowcasting*, isto é, a previsão de curtíssimo prazo. O *nowcasting* da precipitação é o principal parâmetro de entrada dos modelos hidrológicos e geodinâmicos usados nos centros operacionais para se levantar a previsão do risco de ocorrência dos desastres de origem hidro-geológicos.

Para que a previsão de chuva para as próximas horas possa ser feita de forma que atenda às necessidades dos modelos hidrológicos e geodinâmicos, é necessário entender a dinâmica da evolução da chuva, principalmente os eventos severos que produzem um volume grande de água precipitada. O desenvolvimento e a evolução de precipitação convectiva intensa estão intimamente ligados às tempestades severas e, portanto, a compreensão da microfísica e da dinâmica dessas tempestades permitem o entendimento dos mecanismos de geração da precipitação. Do ponto de vista meteorológico, as estruturas horizontais e verticais são importantes indicadores da organização dos sistemas de nuvens produtoras de precipitação. Portanto, a estrutura tridimensional das nuvens precipitantes e sua evolução no tempo precisam ser continuamente monitoradas e observadas para assim permitir o acompanhamento de seus ciclos de vida.

Atualmente somente o radar meteorológico é capaz de fazer a observação da estrutura tridimensional das nuvens sendo, portanto, o único instrumento operacional que fornece dados com alta resolução espacial e temporal das nuvens precipitantes e permite acompanhar todo o seu ciclo de vida.

Vários estudos descritivos sobre a morfologia das tempestades utilizaram dados observados por radares meteorológicos e foram publicados como resultado de observações e experimentos científicos nos últimos 50 anos. Os principais estudos estão

resumidos nos artigos de Lemon e Doswell (1979), Browning (1986), Williamson (2005), Schoen e Ashley (2011). Os estudos realizados permitiram a criação de muitos algoritmos baseados em dados de radar e foram desenvolvidos para se fazer o *nowcasting* de eventos severos visando a mitigação de suas consequências. Como exemplo de algoritmos, cita-se o *Tracking Radar Echoes by Correlation* (TREC) desenvolvido por Rinehart e Garvey (1978), o *Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting* (TITAN) por Dixon e Wiener (1993) e *Storm Cell Identification and Tracking* (SCIT) por Johnson et al. (1998).

Análises criteriosas desses algoritmos e seus derivados indicam que os métodos existentes são ainda incapazes de fornecer um *nowcasting* superior a 30 minutos (WILSON et al., 1998; LAKSHMANAN; SMITH, 2010; PIERCE et al., 2012), o que não atende as necessidades dos centros operacionais, que precisam de previsões mais longas. Essa dificuldade em obter um *nowcasting* mais longo, faz com que os pesquisadores busquem alternativas e caminhos que mesclem metodologias criando algoritmos híbridos, aumentando a resolução da rede de estações (*mesonetworks*), e fazendo a assimilação de dados de radar nos modelos regionais de previsão numérica de tempo e incorporação de diferentes fontes de informações (MASS, 2012).

Uma das razões para o baixo desempenho dos algoritmos de *nowcasting* de eventos severos a partir de dados de radar meteorológico é associada à forma como são identificadas as tempestades observadas. A outra é a extrapolação linear para o *nowcasting* de tempestades nos algoritmos (WILSON et al., 1998).

Na maioria dos casos, os algoritmos utilizam uma abordagem em duas dimensões (2D) projetando a observação do radar em um plano cartesiano. Faz-se assim produtos como o *Plan Position Indicator* (PPI) e o *Constant Plan Position Indicator* (CAPPI) da célula da tempestade, delimitando a sua área por limiares de refletividade previamente estabelecidos. O algoritmo TITAN considera o limiar único de 35 dBZ de refletividade para definir a área da célula de tempestade e pode ser aplicado ao PPI ou ao CAPPI. O SCIT aumenta o número de limiares para melhor localizar o centroide, mas as propriedades como refletividade ou volume de água líquida na vertical (VIL) entre valores de limiares são desprezadas (HAN et al., 2009). No ETITAN (*Enhanced TITAN*), um procedimento chamado “matemática morfológica” foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a primeira classificação e revelar os máximos escondidos entre dois limiares, além de tentar resolver os problemas de *merging* e *splitting* das células rastreadas (JOHNSON et al., 1998; DIXON; WIENER, 1993; LAKSHMANAN et al., 2006; HAN et al., 2009).

Em relação ao ciclo de vida dos sistemas precipitantes, as extrapolações prognósticas dos algoritmos são lineares no deslocamento e constantes na intensidade. Isso significa que uma vez delineado o campo de intensidade de chuva do último instante observado/analísado, e rastreado a sua posição nos instantes anteriores, o *nowcasting* desse sistema manterá o campo de intensidade igual ao último levantado, e seu deslocamento no espaço seguirá uma linha reta por um período pré-estabelecido e fixo. Essas características de linearidades do deslocamento futuro e constância do campo de intensidade são o limite do que os algoritmos que trabalham com campos em duas dimensões podem produzir.

A variabilidade das tempestades quanto a sua forma, tamanho e intensidade torna a modelagem do ciclo de vida difícil, como já apontado por Seed (2003), Germann et al. (2006), Lakshmanan e Smith (2010). Isso faz com que o *nowcasting* de sistemas precipitantes de ocorrência local (escala de um *Cumulunimbus* ou Cb, por exemplo) e ciclo de vida curto (algumas dezenas de minutos), seja difícil de ser feito por técnicas extrapoladoras em duas dimensões e lineares. Para o *nowcasting* de radar de longa duração (maior que 1 hora), somente se tem relativa confiabilidade nos resultados quando ele é feito a partir da observação de sistemas precipitantes com ciclo de vida longo, tais como linhas de instabilidade, sistemas convectivos de mesoescala, supercélulas (BROWNING, 1986; DIXON; SEED, 2014).

Alguns algoritmos evoluíram para uma abordagem tridimensional (3D), associando componentes bidimensionais (2D) em mais níveis da estrutura vertical dos sistemas precipitantes, e um número maior de limiares de detecção para identificar núcleos mais intensos dentro das células já identificadas. O resultado é uma área 2D projetada em plano horizontal que não pode ser associada a uma tempestade 3D, pois não leva em conta a possível inclinação da estrutura da tempestade e a existência de mais núcleos entre limiares, comprometendo a posição do centroide e a sua previsibilidade (JOHNSON et al., 1998; UPTON, 2000; HANDWERKER, 2002; HAN et al., 2009; LI et al., 2012; OTSUKA et al., 2016). O ciclo de vida das células de tempestade está diretamente associada as suas dimensões assim como seu conteúdo de água, intensidade, umidade disponível, vento, o que torna modelar o ciclo de vida de um sistema precipitante uma tarefa complexa e de difícil execução (HAN et al., 2009; SHAH et al., 2015; LAKSHMANAN; SMITH, 2010).

Apesar dos grandes esforços no desenvolvimento de novos algoritmos, a identificação das células de tempestades continua sendo realizada através de limiares de refletividade do radar, sem considerar outros parâmetros físicos como volume, ciclo de vida,

centro de massa, etc. Portanto, para que se possa sair dos limites já alcançados pelos algoritmos lineares e de abordagem 2D, é necessário o desenvolvimento de novos métodos que avaliem toda a estrutura tridimensional e volumétrica dos sistemas precipitantes, sem a sua redução para duas dimensões. É necessário então levantar a parametrização dos sistemas precipitantes de forma mais fiel à sua dinâmica real, avaliar a dinâmica da evolução e ciclo de vida desses sistemas precipitantes, identificar os núcleos convectivos dos sistemas e descrever como se dá suas formações e extinções ao longo do tempo, evitando associar essa dinâmica com os efeitos de *splitting* e *merging* dos algoritmos lineares em duas dimensões.

Desta forma, considerando o estágio tecnológico atual que possibilita o uso de modernos radares de dupla polarização, o uso de ambientes computacionais de alto desempenho, aliado à necessidade dos centros operacionais de fazerem uso de *nowcasting* de chuva para melhorar a tempestividade e confiabilidade do monitoramento do risco de ocorrência de processos hidro-geológicos destrutivos, faz-se necessário a realização de pesquisas envolvendo a análise da estrutura tridimensional dos sistemas precipitantes para assim aprimorar as técnicas de *nowcasting* de chuva.

## 1.1 Motivação

Dada a limitada capacidade dos algoritmos atuais baseados em extrapolação linear dos campos de refletividade radar em duas dimensões, e dada a grande necessidade de se melhorar o *nowcasting* de chuva para aplicações críticas em vários setores da sociedade, entende-se que é necessário e possível desenvolver novas pesquisas visando quebrar o paradigma que vem sendo feito por pesquisadores de todo o mundo nos últimos 30 anos. Se por um lado a tentativa de se melhorar o *nowcasting* de chuva a partir da definição de núcleos convectivos baseados em limiares de refletividade do radar apresenta estagnação e nenhuma melhora no tempo de previsão, por outro lado a consideração de toda a estrutura tridimensional dos sistemas precipitantes, a análise do ciclo de vida e da dinâmica física desses sistemas, abre um novo horizonte de possibilidades para a realização de pesquisas e desenvolvimento de novos algoritmos que possam ampliar o tempo de *nowcasting* da chuva e facilitar a compreensão de processos internos da dinâmica física das nuvens antes não percebidos com os estudos em duas dimensões.

## 1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é pesquisar os sistemas precipitantes que ocorrem dentro da área de cobertura de um radar meteorológico e estudar a dinâmica desses siste-

mas focando na análise de seus parâmetros físicos como ciclo de vida, volume, centro de massa e posição do núcleo de máxima e as respectivas refletividades, vetor deslocamento médio do volume, vento horizontal nos níveis médios, vetor deslocamento da célula. Os parâmetros físicos citados serão descritos sob uma abordagem em três dimensões como parte da morfologia das tempestades severas e analisar os resultados para aplicação ou analisar o seu potencial em *nowcasting* de células de tempestade.

Esse objetivo principal será atingido a partir da realização dos seguintes objetivos específicos:

- Identificação e análise de todos os sistemas precipitantes ocorridos dentro da área de cobertura do radar meteorológico utilizado na pesquisa.
- Elaboração de uma metodologia de identificação da célula de tempestade em 3D baseado no Método de Expansão.
- Elaboração de um banco de dados com todos os parâmetros associados à dinâmica física dos sistemas precipitantes estudados.
- Estudo dos processos físicos envolvidos nos processos de separação (*splitting*) e de fusão (*merging*) de células convectivas.
- Avaliação do potencial da análise tridimensional completa como melhor alternativa para os métodos tradicionais com abordagem bidimensional.
- Avaliar o potencial de um algoritmo de *nowcasting* que identifique em que estágio do ciclo de vida a célula se encontra e apresente um *nowcasting* com ciclo de vida restante.
- Estabelecer uma assinatura entre parâmetros estimados para a identificação das células de tempestades.

O estudo dos sistemas precipitantes irá considerar a estrutura tridimensional desses sistemas a partir de uma abordagem que permita a descrição precisa da estrutura volumétrica das células precipitantes observadas pelo radar. O estudo aqui proposto busca em primeiro lugar responder uma série de questões científicas deixadas sem resposta ao longo dos últimos 50 anos, devido a limitação dos estudos atuais baseados na abordagem bidimensional dos dados de radar. Em segundo lugar, a pesquisa realizada busca contribuir para a elaboração de algoritmos e técnicas de *nowcasting* que atenda às necessidades atuais dos usuários desse tipo de previsão.

As principais perguntas científicas a serem respondidas são:

- Questão 1 - É possível identificar uma célula precipitante sem a utilização da metodologia tradicional por limiares de refletividade?
- Questão 2 - A identificação da célula de tempestade em 3D melhora o entendimento da localização espacial da célula e, conseqüentemente, o seu rastreo?
- Questão 3 - O chute inicial de deslocamento dos sistemas precipitantes é dado pelo vento médio ou o *Volume Velocity Processing* (VVP). O *Uniform Wind Technique* (UWT) pode ser uma opção complementar?
- Questão 4 - A análise volumétrica dos sistemas precipitantes permitirá uma compreensão melhor dos processos de separação (*splitting*) e fusão (*merging*) de células menores existentes dentro de uma célula maior?
- Questão 5 - É possível realizar *nowcasting* com ciclo de vida da célula de tempestade e ter desempenho superior à metodologia por extrapolação linear?
- Questão 6 - Existe alguma relação entre os parâmetros levantados das células de tempestade rastreadas?

### 1.3 Estrutura da pesquisa

A elaboração dessa pesquisa foi feita seguindo critérios e métodos científicos de investigação e foi estruturada em forma de capítulos para uma melhor compreensão de todos os aspectos abordados. Os capítulos foram elaborados conforme a seguinte sequência:

- Capítulo 1: Introdução mostrando os principais aspectos envolvidos no tema de estudo, a motivação para a realização da pesquisa e o objetivo a ser buscado através da pesquisa realizada.
- Capítulo 2: Neste capítulo é feita uma descrição detalhada da evolução dos métodos e dos algoritmos utilizados para a identificação de células precipitantes, rastreo e *nowcasting* por radar.
- Capítulo 3: É feita uma breve descrição das características dos dados de radar coletados e a área de estudo.

- Capítulo 4: Descreve a metodologia empregada nesse trabalho bem como o Método da Expansão 3D aqui proposto para a identificação de células de tempestade, o seu rastreo e o *nowcasting* com ciclo de vida.
- Capítulo 5: A aplicação da metodologia proposta e os resultados obtidos são apresentados e discutidos nesse Capítulo, onde as questões levantadas também são respondidas.
- Capítulo 6: Com base nas análises realizadas no Capítulo 5, neste Capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas, como também algumas sugestões para trabalhos futuros.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O monitoramento e observação das nuvens a partir de radares meteorológicos permite a obtenção de suas estruturas tridimensionais e o acompanhamento de seus ciclos de vida. Com isso, e utilizando a sequência cronológica das imagens produzidas pelos radares, é possível realizar vários tipos de análises e estudos da dinâmica física associada à evolução das nuvens no tempo e no espaço. Esta pesquisa concentrou esforços na realização de estudos envolvendo a morfologia das nuvens precipitantes e na previsibilidade de curtíssimo prazo dos sistemas precipitantes estudados. Enquanto o estudo da morfologia das nuvens é importante para conceituar e entender a dinâmica dos sistemas de tempo severo observados durante a execução do trabalho, o nowcasting permite prever a evolução de células de tempestades, seu rastreamento e sua extrapolação de curtíssimo prazo.

Os estudos realizados nessa pesquisa foram feitos após uma criteriosa análise na literatura científica produzida nos últimos 50 anos. Os trabalhos acadêmicos e científicos disponíveis mostram a evolução das pesquisas feitas por diversos autores nos dois temas aqui avaliados: morfologia de nuvens e nowcasting. A análise cronológica dos estudos anteriores, iniciando dos mais recentes e remontando aos mais antigos, mostram que os trabalhos mais recentes seguem a ideia e lógica dos trabalhos mais antigos, ou seja os mesmos conceitos e hipóteses assumidas a 50 anos atrás ainda são assumidas nos trabalhos atuais. Isso acontece porque todos os estudos, apesar de utilizarem dados tridimensionais obtidos pelos radares meteorológicos, manipulam e processam os dados reduzindo-os para uma condição bidimensional, o que elimina uma quantidade grande de informações fundamentais para descrever e entender a dinâmica de evolução dos sistemas precipitantes.

A consequência principal de se trabalhar com uma abordagem bidimensional é a exaustão na obtenção de resultados que auxiliem na elaboração de novas técnicas de nowcasting que propicie aumentar o tempo de previsão e produzir dados confiáveis para serem usados na parametrização física de nuvens nos modelos numéricos de previsão de tempo.

### **2.1 Morfologia das tempestades**

#### **2.1.1 A célula de tempestade**

A célula de tempestade é uma região compacta, dinâmica e com movimento vertical do ar relativamente forte dentro de uma nuvem ou sistema precipitante. No radar

meteorológico, as células de tempestade são identificadas como um volume de forma variável e com valores altos de refletividade em comparação com os demais valores das demais áreas que formam a nuvem. Normalmente as células de tempestades estão associadas à precipitação.

A maioria das tempestades é composta de várias células de vida curta conhecidas como células ordinárias. Em qualquer dado momento, tais tempestades consistem de uma sucessão de células comuns em diferentes fases de evolução. Existem três etapas na evolução dessas células a saber: fase cumulus, madura e dissipação (BROWNING, 1986).

A fase cumulus é caracterizada por correntes ascendentes carregadas de vapor de água na maior parte da célula, o que faz com que a nuvem cresça. Se a ascensão continuar, uma grande quantidade de vapor d'água condensa e eventualmente pode precipitar. A duração desse estágio é da ordem de 10 a 15 minutos (BROWNING, 1986).

A fase madura é caracterizada pela coexistência de movimento ascendente e descendente. As gotas de água geradas pela condensação do vapor de águas nos núcleos higroscópios crescem e a precipitação é iniciada provocando um arrasto viscoso entre o ar e as gotas, resultando em evaporação e resfriamento do ar. Esse processo físico gera um fluxo de ar descendente, que por sua vez gera uma frente de rajada próximo à superfície, que então soergue o ar úmido e quente à sua frente, alimentando o sistema. Esse processo tem uma duração que varia normalmente de 15 a 30 minutos (BROWNING, 1986).

A fase de dissipação apresenta fraco fluxo de ar ascendente que resulta no corte de umidade. Sem novas gotas se formando, o sistema começa a se dissipar e a precipitação é interrompida. Este estágio dura aproximadamente 30 minutos.

O tempo médio de vida de uma célula individual é de cerca de 40 minutos, durante os quais podem deslocar-se por cerca de 15 a 30 km na direção, em geral, dos ventos troposféricos médios. Uma tempestade que consiste de uma sequência de várias células pode, no entanto, persistir durante várias horas. Em média, a precipitação e a atividade elétrica numa célula duram 30 minutos e o volume onde ocorre a geração da carga na célula pode ser representado por um cilindro com base de 4 km de extensão, que no radar, o diâmetro das refletividades de 30 e 40 dBZ equivale as bases de aproximadamente 10 e 5 km de extensão (BROWNING, 1986).

### 2.1.2 Classificação das tempestades

Uma vez que a instabilidade de uma nuvem cumulus é suficiente para formar uma corrente ascendente, o desenvolvimento e o tipo de tempestade que se forma é dependente da força da corrente de ar ascendente.

As tempestades podem ser classificadas basicamente em três tipos:

- Supercélula: no radar consiste de uma célula dominante (eco intenso e extenso) rodeados por pequenas células (ecos menores pontuais) sendo caracterizada pela presença de mesociclone. Estas tempestades produzem grandes volumes de precipitação, descargas elétricas, granizo e tornados (LEMON; DOSWELL, 1979). No Brasil, embora sejam raras, já foram registradas ocorrências em Sumaré, no ano de 2001 e em Indaiatuba no ano de 2005.
- Multicélulas: são aglomerados de células que se propagam no espaço, sendo que sua dinâmica favorece a formação de novas células e dissipação de células antigas ao longo de seu ciclo de vida. As multicélulas não possuem uma forma organizada nas imagens de radar.
- Linha de instabilidade: consiste na existência de várias células e, em alguns casos, de supercélulas, que se organizam numa forma alinhada e deslocam-se ortogonalmente à essa formação.

Browning (1986) aponta algumas fragilidades na classificação listada anteriormente, em particular porque ambos os conjuntos de tempestade multicelulares e linhas de instabilidade podem conter supercélulas, então é sugerido a classificação seja da seguinte forma:

- Tempestade unicelular: esta pode consistir teoricamente de uma simples célula de curta duração ou uma supercélula de longa duração.
- Tempestade multicelular.
- Linhas de instabilidade.

### 2.1.3 Cisalhamento do vento

A intensidade do cisalhamento do vento vertical é crítico na determinação do tipo de tempestade que irá se formar.

Tempestades multicelulares com ar ascendente de curto período tendem a se formar em áreas de mínimo cisalhamento vertical. O baixo cisalhamento resulta em uma fraca injeção de ar na tempestade. Consequentemente, o fluxo que sai da nuvem alcança o solo sob a forma de uma corrente descendente de precipitação que empurra o ar mais frio para fora da tempestade como uma frente de rajada. Este por sua vez, corta a fonte de ar quente e úmido da tempestade, resultando em uma tempestade com correntes ascendentes de curta duração. As correntes ascendentes fracas também permitem a precipitação a cair sobre elas, o que pode, eventualmente, eliminar a corrente ascendente em sua totalidade.

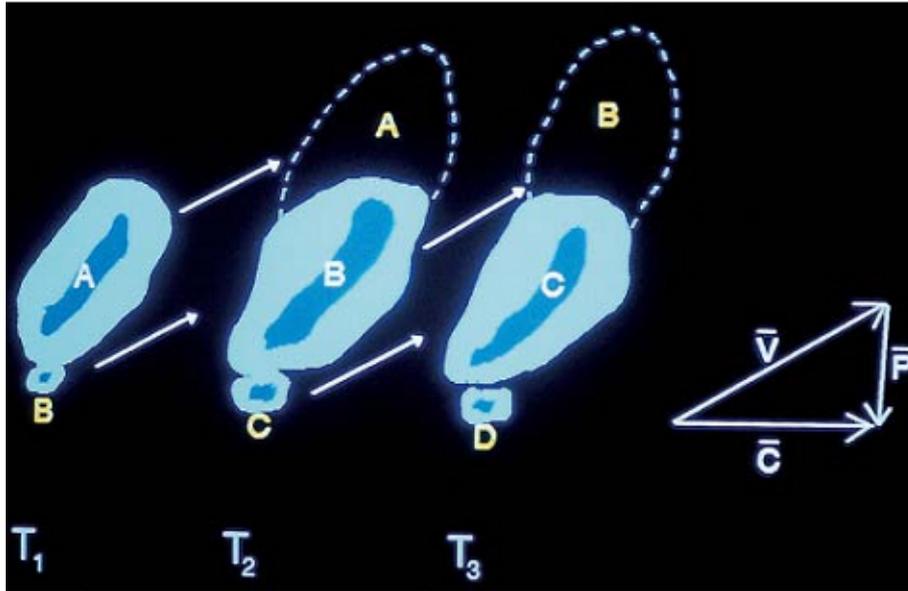
Em baixo cisalhamento, as tempestades tendem a ser menos organizadas em aglomerados multicelulares ou linhas de instabilidade, dependendo da forma como o mecanismo atmosférico que desencadeia, a tempestade é confinada a uma área local ou linear, como por exemplo, ao longo de uma frente (BROWNING, 1986).

Com o aumento do cisalhamento vertical do vento, as tempestades com correntes ascendentes persistentes são favorecidas. Forte cisalhamento resulta em forte injeção de ar na tempestade. A frente de rajada será confinada próxima a tempestade e a tempestade terá acesso a fonte de ar quente e úmido por mais tempo. Portanto, a corrente ascendente da tempestade vai tender a durar mais quando o ambiente tem forte cisalhamento vertical do vento. A precipitação tenderá a cair abaixo da corrente ascendente, o que permite essa corrente continuar por um período de tempo relativamente maior.

#### **2.1.4 Deslocamento da tempestade**

Numa linha de instabilidade, as células normais se movem próximo a velocidade do vento médio, enquanto que a linha como um todo se move aproximadamente normal à sua orientação e a uma velocidade diferente. Considere um exemplo onde as células individuais estão dispostas em uma linha norte-sul e a célula se movendo para nordeste (Figura 2.1). Com o desenvolvimento das novas células no extremo sul da linha e em dissipação no extremo norte, toda a linha se move para o leste.

Figura 2.1 - Diagrama conceitual do movimento de uma tempestade.



O  $\vec{V}$  é o movimento da célula, o  $\vec{C}$  é o deslocamento da tempestade e o  $\vec{P}$  é o vetor propagação.

Fonte: Williamson (2005).

Aglomerados de tempestades multicelulares (com todas as células normais), em um ambiente com cisalhamento do vento significativo, têm uma organização de estrutura semelhante. A diferença entre o movimento da célula individual e o movimento global da tempestade é novamente devido à célula e a propagação da corrente ascendente (WILLIAMSON, 2005). O movimento de tempestades supercélulas também se desvia da média do vento. Como explicado acima, a interação da tempestade com o perfil de cisalhamento vertical gera uma força do gradiente de pressão dinâmica dirigida verticalmente que promove continuamente nova corrente de ar ascendente sobre a corrente ascendente inicial. Além disso, a manifestação da vorticidade vertical dentro da corrente ascendente nos níveis médios promove ainda mais a sustentação dinâmica da corrente ascendente nos flancos.

### 2.1.5 Estrutura da tempestade em termos de refletividade do radar

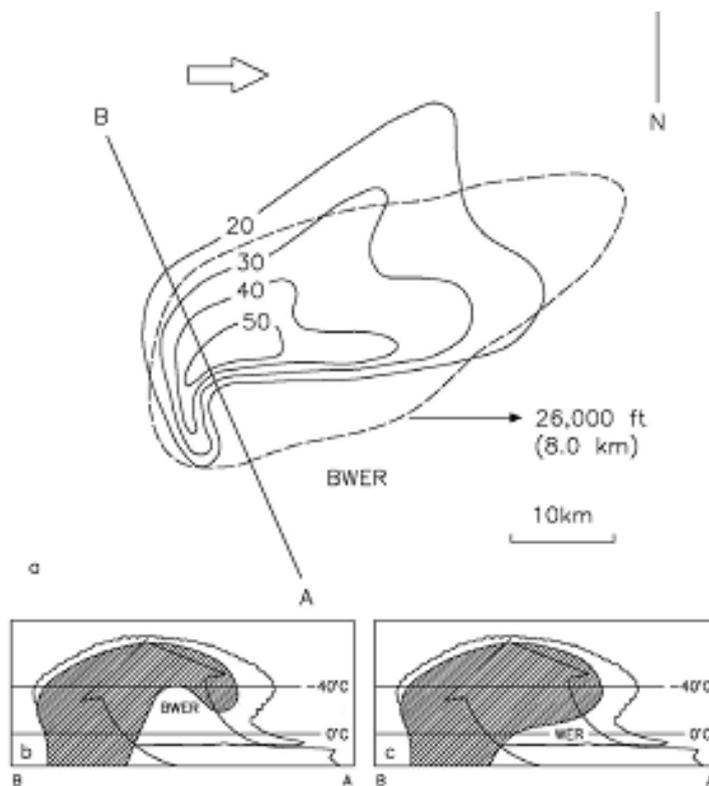
O campo de refletividade tri-dimensional do eco de radar de uma tempestade e sua evolução contém uma grande quantidade de informações sobre a sua intensidade e potencial de tempo severo. A partir do levantamento e acompanhamento dos valores

de refletividade do radar, pode-se identificar as diferentes fases do ciclo de vida dos sistemas precipitantes e células de tempestades, e assim descrever suas propriedades físicas e acompanhar seus ciclos de vidas.

### 2.1.5.1 Regiões de fraco eco (WER)

Esta região de fraco eco de radar ou WER está relacionada com um forte movimento ascendente na tempestade que provoca a dispersão de partículas de precipitação detectável ao radar (Figura 2.2). O fraco eco é devido à essa rápida ascensão, que faz com que as gotículas não tenham tempo de crescer para serem detectadas pelo radar nos níveis mais baixos da corrente ascendente. Além disso, a precipitação formada noutro local não é capaz de penetrar ou cair através dessa corrente ascendente.

Figura 2.2 - Planificação de uma supercélula com deslocamento para Leste.



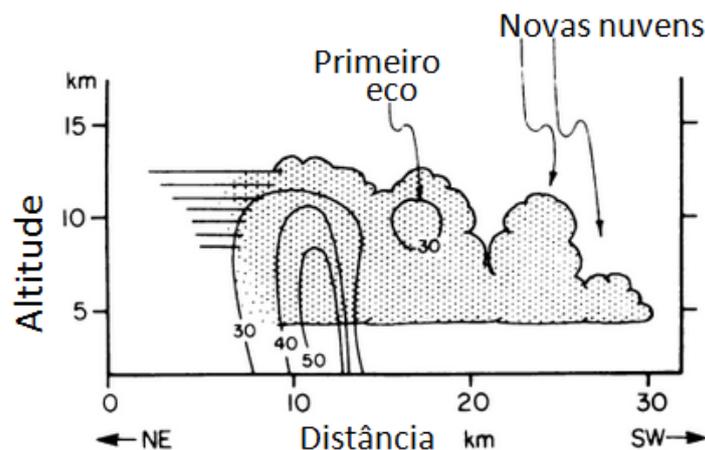
A refletividade dos baixos níveis em isolinhas e níveis médios em tracejado (acima). Corte vertical ao longo da linha AB com delimitado pelo BWER com a seta indicando o ar ascendente (b) e sem esse efeito (c).

Fonte: Figura original de Browning (1986).

### 2.1.5.2 Tempestades multicelulares ou unicelulares

As tempestades multicelulares são caracterizadas por sucessivas formações de novas células usualmente no flanco direito. Essas novas células aparecem como nuvens cumulus e algumas vezes organizadas em linha por mais de 30 km da célula madura 2.3. Esse tipo de tempestade normalmente se desenvolve fora da camada cumuliforme rasa e cresce rapidamente fundindo com a massa principal da nuvem após 10 a 40 minutos da sua formação. O primeiro eco de radar associado ao desenvolvimento inicial da precipitação usualmente aparece nestas nuvens justamente antes de se unirem à massa de nuvem principal. Na fusão das massas ocorre uma explosão de chuva forte e ocorrência de granizo que atingem o solo (DOSWELL, 1985).

Figura 2.3 - Seção vertical de uma tempestade multicelular típica.



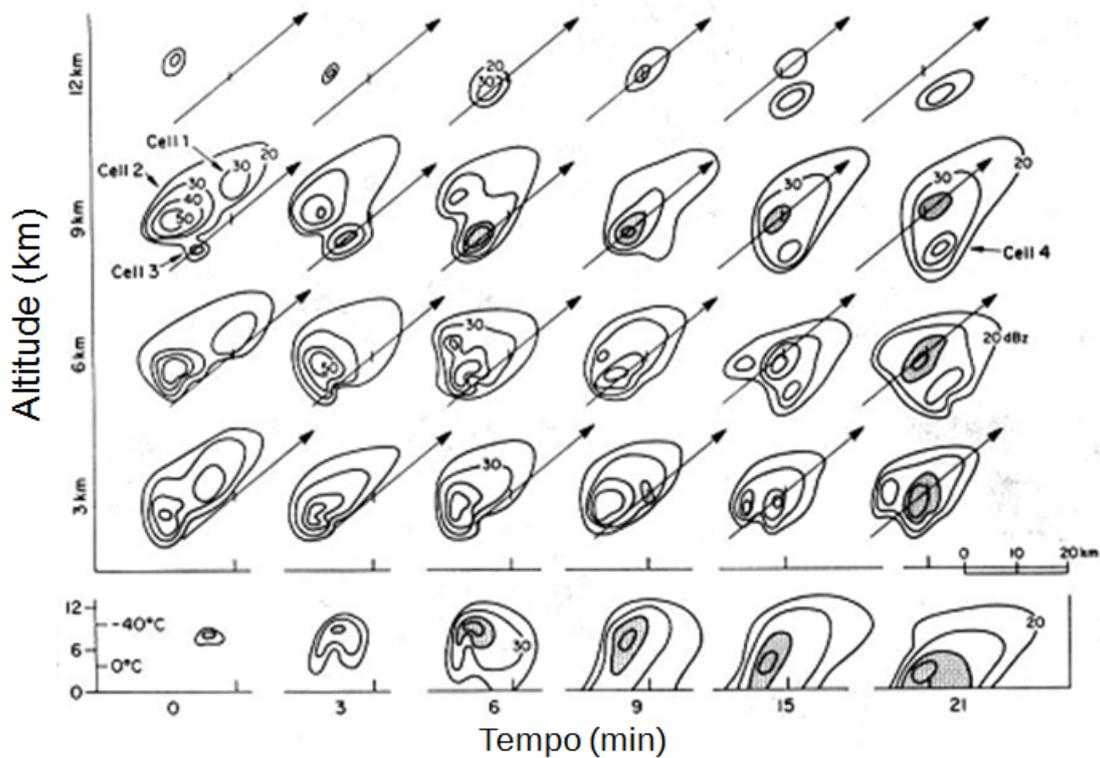
As refletividades estão representadas em isolinhas em intervalos de 10 dBZ.

Fonte: Browning (1986).

Combinando observação visual e por radar, um modelo de estrutura e evolução foi proposto para uma tempestade multicelular (BROWNING, 1986). Num dado momento, uma tempestade intensa pode conter de 2 a 4 células de tempestade e estas se desenvolvem a partir de torres de nuvens de 3 a 5 km de diâmetro, ascendendo numa velocidade de 3 a 5 m/s no flanco direito (célula 3 no instante 0 na Figura 2.4). Como a célula nova cresce e se torna o centro da nova tempestade, a célula

anterior (célula 2 na Figura 2.4) começa a decair enquanto outra se forma (célula 4). Novas células continuam a se formar em intervalos de 5 a 10 minutos e cada célula é indefinível ao radar até 10 a 20 minutos de sua formação.

Figura 2.4 - Seção horizontal e vertical dos ecos de radar para uma tempestade multicelular.



As refletividades estão em intervalos de 10 dBZ. As seções horizontais foram realizadas em alturas de 3, 6, 9 e 12 km. As setas indicam a direção de deslocamento da célula.

Fonte: Browning (1986).

A evolução da estrutura vertical de uma das células de radar (célula 3) é projetado na base da Figura 2.4. O primeiro eco aparece na troposfera superior depois de 10 minutos associada à nova nuvem que começa a ascender rapidamente. A rápida intensificação deste eco é interpretada como causado pelo crescimento do graupel em dimensão de milímetros. Logo após o primeiro eco aparecer, ele desenvolve uma forma invertida, forma de taça invertida parcialmente englobando uma região de eco

fraco (um valor desprezível) que dura apenas alguns minutos antes de todo o eco descer até a superfície e se extinguir.

### **2.1.5.3 Tempestades de supercélulas isoladas**

Tempestades de supercélulas, ilustradas na Figura 2.5, exibem algumas características básicas e persistentes que são muitas vezes surpreendentemente similares de tempestade para tempestade. Essas características são as seguintes:

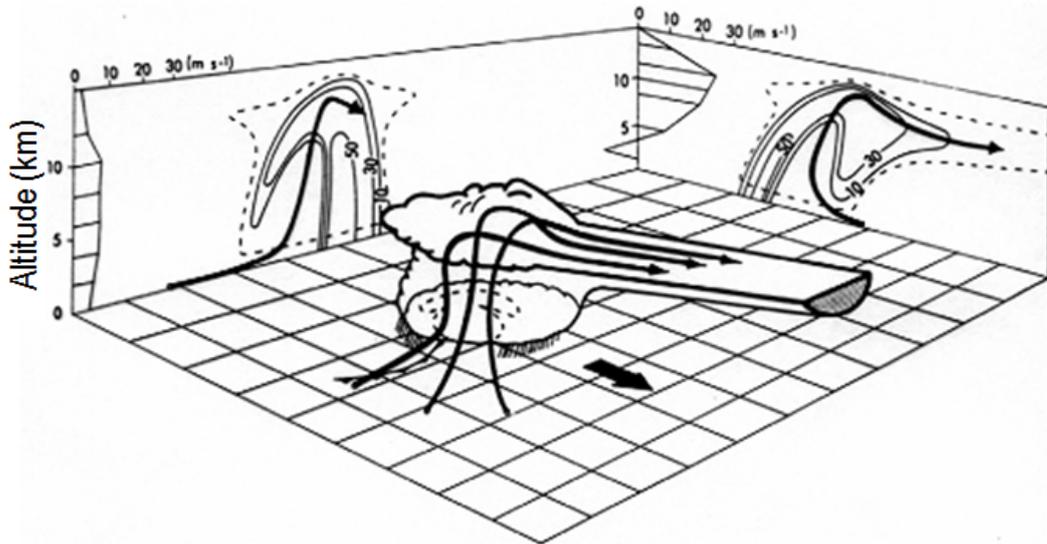
- Apresentam uma seção horizontal aproximadamente elíptica em altos níveis de dimensões muitas vezes maior que uma tempestade comum. Como consequência, uma extensa plumagem é observada no radar e isso faz parte de uma bigorna visível muito maior que se estende a jusante do núcleo principal da tempestade em altos níveis.
- Um persistente WER é encontrado no flanco da corrente ascendente; a WER é persistente e coberta por refletividade elevada ( $> 45$  dBZ).
- Apresenta um núcleo de alta refletividade (zona de granizo) que se estende por todo o caminho até o chão, fazendo fronteira com o WER no seu flanco esquerdo e traseiro, resultando em um gradiente de refletividade forte.

### **2.1.6 Desenvolvimentos futuros para estudos sobre morfologia dos sistemas precipitantes**

A classificação dos tipos de células de tempestades utilizam as propriedades físicas envolvidas na formação e evolução dos sistemas precipitantes. Com o advento do radar meteorológico, foi possível associar a observação aos estudos teóricos e chegarmos ao estado atual de conhecimento sobre os processos atmosféricos causadores de precipitação e fenômenos associados. Atualmente o estágio tecnológico empregado nos radares meteorológicos permite aprimorar esse conhecimento atual e compreender melhor a dinâmica de evolução dos sistemas precipitantes e células de tempestade. Portanto, novos estudos como esse conduzido nesse trabalho contribuem para melhor entender, classificar e representar o ciclo de vida e fases dos processos meteorológicos envolvidos na vida do sistemas precipitantes.

Schoen e Ashley (2011) apresentam uma classificação mais abrangente e detalhada das células de tempestade em seu trabalho, porém recomendam que uma climatologia mais temporalmente abrangente, que examine as morfologias de todos os eventos

Figura 2.5 - A perspectiva de uma tempestade supercélula que descreve o fluxo de ar da tempestade e a estrutura da refletividade.



As linhas pretas indicam a direção do fluxo ascendente e, a seta preta, a direção de deslocamento da tempestade.

Fonte: [Williamson \(2005\)](#).

convectivos principalmente os severos, seja realizado no futuro. Isso envolveria a análise dos tipos de tempestades associadas com milhares de relatórios de eventos graves de uma década ou mais. Infelizmente, a classificação manual de centenas ou milhares de tempestades a serem feitas por um indivíduo ou grupo de pesquisadores é pouco prática, senão uma tarefa impossível. A melhor solução para o avanço de uma climatologia de longo prazo de tipos de tempestade envolverá o desenvolvimento de uma eficaz detecção automática das células de tempestade e de algoritmos de classificação mais modernos, que considerem toda a estrutura tridimensional dos sistemas precipitantes.

No futuro, segundo [Schoen e Ashley \(2011\)](#), é recomendado que um sistema de classificação universal deva ser desenvolvido e adotado pelas comunidades operacionais e de investigação para fins de melhorar análises pós-eventos. Tal sistema, bem como climatologias resultantes, poderiam fornecer uma riqueza de informações para a melhoria dos sistemas de alertas, bem como a criação e implementação de novas estratégias de mitigação e redução de impactos causados por eventos severos

de tempo.

## 2.2 Metodologias de Nowcasting

O uso do radar meteorológico permitiu compreender que o acompanhamento no espaço e no tempo da evolução dos sistemas precipitantes poderia resultar em uma extrapolação que permitisse prever a posição futura dos sistemas em observação. Portanto, o nowcasting a partir de dados de radar poderia ser feito desde que se assegurasse uma contínua aquisição de dados.

As primeiras tentativas de se realizar o nowcasting utilizando o radar meteorológico foram feitas não utilizando os dados do radar em si, mas a partir da observação do movimento das feições e padrões das tempestades vistas nos planos cartesianos em que as imagens de radar se deslocavam de posição. A projeção dos bins obtidos na leitura de cada azimute da antena mostrava o campo de intensidade da refletividade radar, e a partir daí os estudos morfológicos e a realização de nowcasting se intensificaram.

Com a maior utilização do radar em centros operacionais, os operadores e previsores já indicavam a necessidade de procedimentos mais objetivos para a detecção de tempestades existentes, para assim poder extrapolar o seu desenvolvimento e a sua trajetória (WILSON; MUELLER, 1993). Muitas técnicas desenvolvidas para a previsão de curtíssimo prazo para as atividades convectivas foram incorporadas na forma de rastreamento de tempestades e, este rastreamento, tem um papel fundamental em qualquer algoritmo de nowcasting.

Austin (1985) utilizou a técnica de reconhecimento de padrão que procura feições em campos de dados sucessivos no tempo para deduzir o movimento da tempestade. Os precursores dessa técnica, segundo Rinehart e Garvey (1978), foram os trabalhos de Barge and Bergwall (1976) e Browning and Foote (1976) que usaram uma escala fina da estrutura de refletividade para determinar o fluxo de ar nas tempestades de granizo.

Outra técnica de rastreamento é a correlação cruzada. Um método simples que estima a correspondência entre duas matrizes de dados. Se as matrizes representam medidas correspondentes em dois tempos, com os dados que foram sujeitos a uma translação durante o intervalo desse tempo, então um método efetivo de estimar a translação é fornecido pela identificação da mudança que maximiza a correlação cruzada entre as duas matrizes (UPTON, 2000).

Os primeiros a empregarem a análise de correlação para a previsão de deslocamento

de células de tempestade foram Hilst and Russo (1960, citado por Smythe e Zrnica (1983)). Kessler e Russo (1963) e Kessler (1966) continuaram os estudos e calcularam computacionalmente escalas espaciais e tempo de vida de padrões reconhecíveis que poderiam ser úteis no estudo de processos de transporte em mesoescala.

Rinehart e Garvey (1978) utilizaram a correlação cruzada sobre os dados de refletividade de um radar convencional para estimar informações relativas aos movimentos tridimensionais dentro de uma tempestade. Na projeção original dos dados de radar, uma matriz inicial de refletividade é correlacionada com matrizes posteriores. Ao localizar a segunda matriz com a melhor correlação, um vetor movimento da matriz inicial é determinado. Este rastreamento objetivo do eco do radar com correlações é conhecido como *Tracking of Radar Echo with Correlations* (TREC). A análise foi realizada no plano de 3,3° de elevação com matriz de aproximadamente 8° de azimute x 6 km. Conceitualmente paralelo ao método acima, Smythe e Zrnica (1983) utilizaram um radar Doppler e estimaram o movimento da tempestade, de forma independente, a partir do campo de refletividade e da velocidade radial. Na comparação com um sistema duplo de radar Doppler, a velocidade radial teve maior correlação do que a refletividade na estimativa do campo de vento.

O trabalho de Crane (1979) foi o primeiro a tentar estimar o volume da tempestade. A célula bidimensional é identificada pelo contorno fechado de 3 dB menor que o máximo no campo de refletividade numa dada elevação e associando essa área em elevações sucessivas na vertical. Esse conjunto foi definido como “volume de célula”. As células detectadas apresentaram persistência e trajetórias que duraram 15 minutos e tamanho médio de 3 km de diâmetro. O vento médio é utilizado como percurso da direção para células novas. Em metodologia similar, Rosenfeld (1987) foi o primeiro a utilizar o limiar de refletividade para delinear a tempestade e então identificar as células dentro da tempestade em torno do local de máxima refletividade.

A técnica acima foi implementada por Dixon e Wiener (1993) conhecida como rastreamento por centroide e incorporada no algoritmo *Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting* (TITAN). O TITAN trabalha na projeção Cartesiana e a identificação da “tempestade” é dada pela região contígua que ultrapassa o limiar de refletividade de 35 dBZ. O tamanho e a forma da área da tempestade são projetados sobre um plano horizontal, isto é, a área como a tempestade seria vista diretamente acima, e o centroide dessa área é ponderado pelo valor de refletividade. Nessa projeção de área da tempestade, uma elipse é ajustada à sua forma incluindo

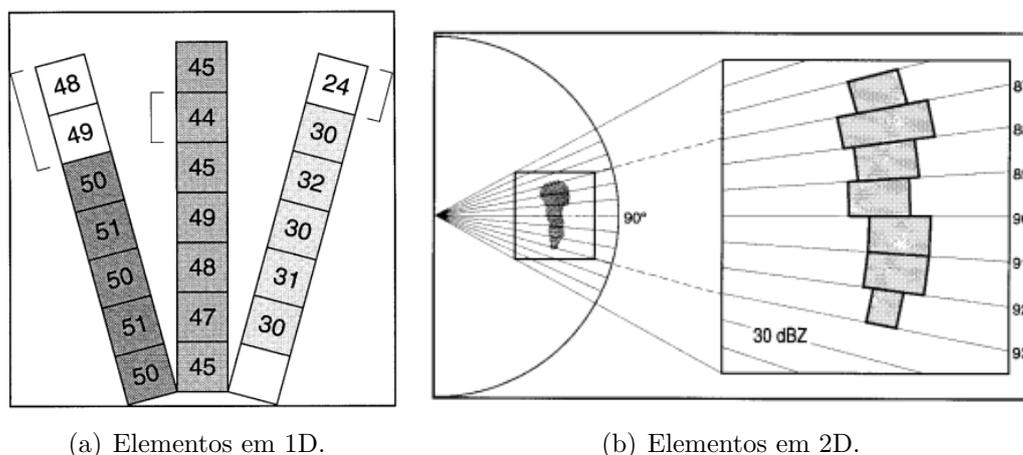
a sua orientação no espaço bidimensional. A previsão da trajetória é determinada pela função de custo mínimo entre o centroide no tempo  $t-1$  e todos os centroides no tempo  $t$ . Algumas falhas do algoritmo estão relacionadas ao formato irregular da tempestade pela utilização de um limiar na definição da tempestade, onde o formato do polígono não se ajusta ao formato elíptico, e também a sistemas com deslocamento lento que produzem grandes amplitudes na direção. Porém trouxe grandes avanços na área de rastreamento com aplicação operacional e em pesquisa.

Continuando o desenvolvimento do TREC, [Li et al. \(1995\)](#) minimizou a influência de vetores incorretos geralmente causados por ecos de terreno e usou a técnica variacional para forçar a continuidade dos vetores dos movimentos inferidos. Esse algoritmo melhorado denominado de *Continuity* TREC (COTREC) foi aplicado sobre uma região de orografia complicada. Os resultados foram relativamente melhores que o TREC, porém perceberam que o COTREC tinha uma tendência a retardar o movimento se comparado ao movimento obtido pelo Doppler. A principal razão é que a propagação dos ecos (crescimento/decaimento) e a translação dos ecos (com o vento) são fenômenos diferentes. Em termos de nowcasting, o COTREC foi capaz de prever com 20 minutos de antecedência um evento severo de tempestade.

Na solução do limiar único do TITAN, [Johnson et al. \(1998\)](#) propôs o *Storm Cell Identification and Tracking* (SCIT), um algoritmo com sete limiares de refletividade (30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60 dBZ). A tempestade é inicialmente identificada na radial determinando a componente 1D, em seguida, um conjunto de componentes 1D contíguos é identificado no plano de elevação gerando a componente 2D (Figura 2.6). Assim, nas elevações consecutivas, as componentes 2D são identificadas. O produto final é um centroide da célula de tempestade 3D. Estas células de tempestade são então classificadas pelo valor baseado na água líquida integrada na vertical (VIL). A previsão é baseada na distância mínima entre os centroides em tempos consecutivos e a direção inicial de procura é dada pelo vento médio. O algoritmo se perde em alguns momentos porque as células em decaimento ou recém formadas não estão sendo identificadas na proximidade de grandes células maduras e também não estão sendo identificadas as células que cumprem os critérios de tamanho e intensidade em apenas uma varredura de elevação. Outro ponto é a problemática das tempestades com lento deslocamento que aparentemente provocam grandes mudanças na direção, problemática também observada no TITAN.

O algoritmo TRACE3D apresentado por [Handwerker \(2002\)](#) é semelhante ao TITAN e ao SCIT. Utiliza o limiar mínimo de 35 dBZ para identificar as áreas de tempestade

Figura 2.6 - Ilustração da elaboração dos segmentos 1D e 2D da tempestade.



Área em cinza são os elementos escolhidos para os limites 30, 45 e 50 dBZ. O elementos em brancos não são contabilizados. A partir dos elementos 1D, o plano 2D é construído.

Fonte: Figura original de Johnson et al. (1998), pág. 265.

em cada elemento da radial, em seguida, da refletividade máxima é subtraído 10 dBZ definindo o local de máxima precipitação. A previsão de deslocamento é semelhante a metodologia empregada no TITAN, porém o chute inicial da direção é dado pelo VVP (Volume Velocity Processing) (WALDTEUFEL; CORBIN, 1979), vento médio estimado sobre um cilindro em torno do radar a partir do vento radial na camada entre 2 e 4 km de altitude. A metodologia inclui somente os núcleos de máxima precipitação denotando assim poucos elementos.

Observando os trabalhos, em geral, os algoritmos de identificação e rastreamento podem ser divididos em duas categorias: correlação cruzada e rastreamento de centroide. A correlação cruzada estima melhor a direção e velocidade da tempestade como um todo, porém é limitado no acompanhamento individual das células devido a uso de uma abordagem feita em duas dimensões. Já a técnica do centroide identifica melhor as células isoladas e fornece propriedades temporais da tempestade, entretanto depende de limiares que induzem a falsos diagnósticos quando há muitas células agrupadas.

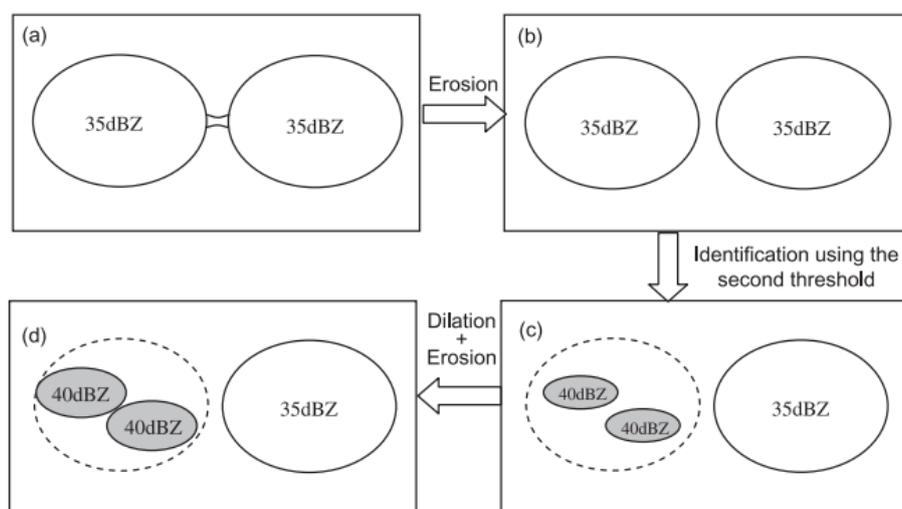
Uma excelente revisão dos métodos é apresentada por Wilson et al. (1998). Por outro lado, em seu trabalho de nowcasting para tempestades convectivas durante as Olimpíadas de Sidney, na Austrália, Wilson et al. (2004) sugere que, talvez, a melhor metodologia para nowcasting seja uma abordagem híbrida das categorias.

Com o passar dos anos, a técnica TITAN foi se aprimorando e aceitando vários formatos de radar para serem processados, além de dados auxiliares como descargas

elétricas, dados de estação meteorológica, entre outros. A técnica também passou por melhorias significativas como o emprego de duplo limiar de refletividade na identificação das células de tempestades, e utilização da técnica de sobreposição para determinação da trajetória acompanhada do método de otimização combinatória (WILSON et al., 1998; HAN et al., 2009; LAKSHMANAN; SMITH, 2010).

Em seu trabalho, Han et al. (2009) intitulado de ETITAN (*Enhanced TITAN*), apresentou um algoritmo melhorado no sentido de sanar as deficiências do TITAN acrescentando algumas mudanças. O uso da Matemática Morfológica para lapidar as estruturas das células de tempestade identificadas para corrigir falsos processos de fusão (*mergings*) e/ou revelar núcleos de máximas intensidades não detectados na aplicação do limiar de refletividade. A Figura 2.7 ilustra esse processo de lapidação (erosão + dilatação). Um outro ponto importante é a metodologia da estimativa do vetor movimento que é a mesma usada na técnica TREC (LI et al., 1995). Um vetor movimento do campo calculado pelo TREC é utilizado para a previsão do deslocamento de células de tempestades isoladas. Nesse aspecto, o algoritmo ETITAN pode ser considerado um algoritmo híbrido. Entretanto, mesmo com esses novos esquemas no tratamento, o deslocamento da célula de tempestade calculada pela translação do centroide nem sempre reflete a realidade como ilustrado na Figura 2.8. A raiz do problema ainda é a metodologia da utilização de limiar para a identificação das células que persiste em reduzir a obtenção dos dados em três dimensões e reduzir as análises para duas dimensões.

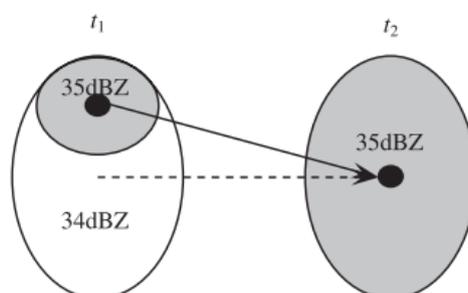
Figura 2.7 - Ilustração do método de identificação baseado na matemática morfológica.



Identificada a célula (a), a erosão (*erosion*) corrige o falso *merging* (b) e a dilatação (*dilation*) (c) equivale a um segundo limiar para identificar máximos ocultos (d).

Fonte: Figura original de Han et al. (2009), página 724.

Figura 2.8 - Deslocamento anômalo da célula de tempestade devido à metodologia de identificação por limiar não posicionar corretamente o centroide.

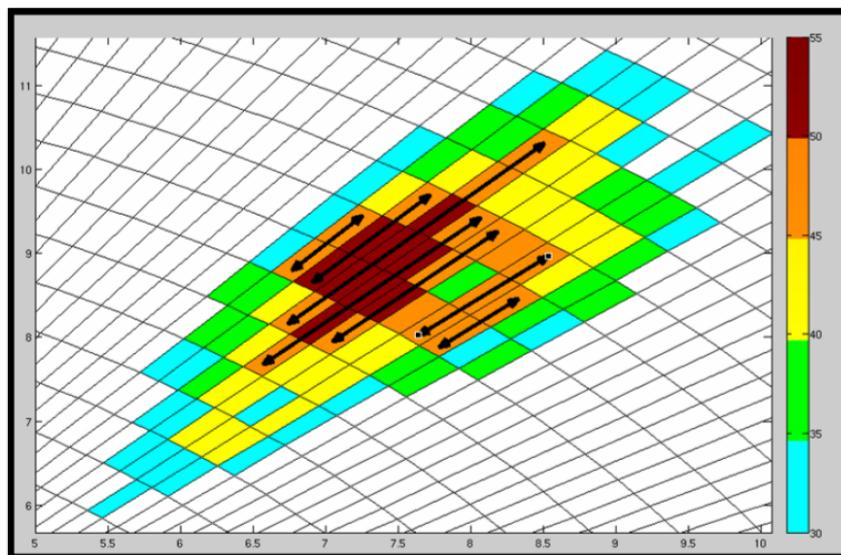


O vetor cheio é o deslocamento da célula, o vetor pontilhado é o vetor movimento real executado entre tempos sucessivos. O limiar de refletividade é de 35 dBZ.

Fonte: Figura original de Han et al. (2009), página 725.

No trabalho de Matthews e Trostel (2010), os resultados apresentados também incrementam o algoritmo SCIT com identificação da componente 2D diretamente no PPI e associando essas componentes na vertical de cima para baixo, isto é, da elevação mais alta para a mais baixa. Isso porque nas altas elevações, essas componentes estão mais separadas e nas baixas elas tendem a se misturar. Para identificação da componente bidimensional é utilizado um algoritmo de agrupamento de densidade.

Figura 2.9 - Ilustração da limitação do elemento 1D na detecção resultando em duas tempestades separadas.



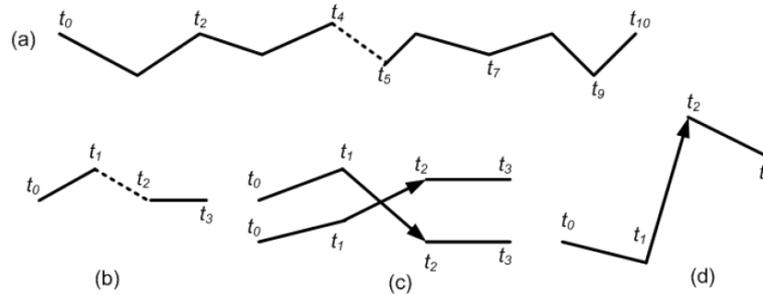
Mapa de refletividade mostra os segmentos criados pelo limiar de 45 dBZ.

Fonte: Figura original de Matthews e Trostel (2010), pág. 6.

A Figura 2.9 apresenta um exemplo da elaboração do elemento 1D, onde o SCIT e o TITAN falham na identificação da componente da tempestade propriamente dito devido ao método de varredura 1D. A aplicação do algoritmo em 3D eliminaria vários parâmetros requeridos para a identificação, mas haveria uma perda de eficiência computacional.

Lakshmanan e Smith (2010) afirma que associar células de tempestade através de quadros de imagens de detecção remota representa um problema difícil de ser resolvido porque as tempestades evoluem, dividem e fundem (*merges e split*) (Figura 2.10). O seu trabalho compara várias metodologias de associação da célula no tempo atual com o anterior verificando a duração da trajetória, o desvio padrão do VIL e o erro médio da posição do centroide. O desempenho depende muito do que é analisado e o algoritmo proposto de rastreamento com matemática mais refinada foi apenas satisfatório.

Figura 2.10 - Possíveis leituras incorretas de trajetórias dos algoritmos de rastreamento.

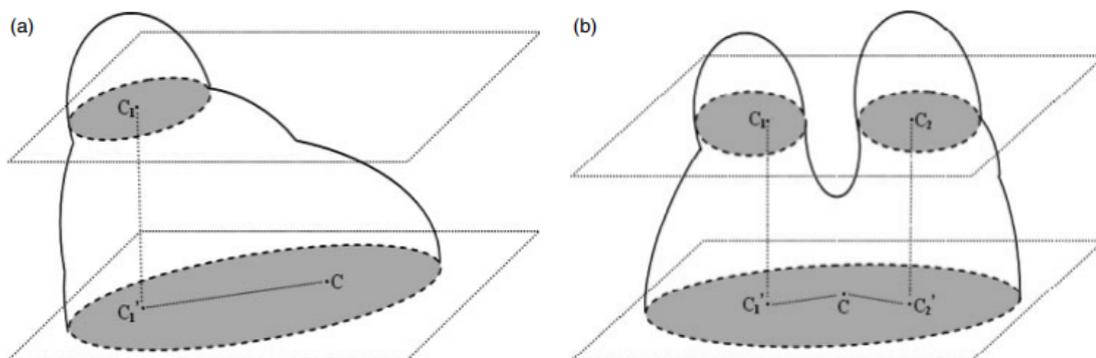


O tracejado em (a) e (b) indica associação de trajetória de células diferentes. Em (c) e (d), o vetor indica associação incorreta devido à “saltos”.

Fonte: Figura original de Lakshmanan e Smith (2010), página 702.

Li et al. (2012) propõe um novo método que reúne os pontos de tempestade contíguos para constituir a componente 2D da tempestade e melhorar a associação vertical de tempestade para construir a componente 3D das tempestades, o que pode superar as deficiências existentes nos métodos de identificação tradicionais (Figura 2.11). Por exemplo, os algoritmos TITAN e SCIT analisam a radial primeiramente, revelando a componente 1D, depois reúnem as componentes 1D para construir a componente 2D. As associações na vertical são para corrigir a inclinação da tempestade. O novo método promoveu razoável melhoria na identificação em contraste com os problemas encontrados no TITAN e SCIT.

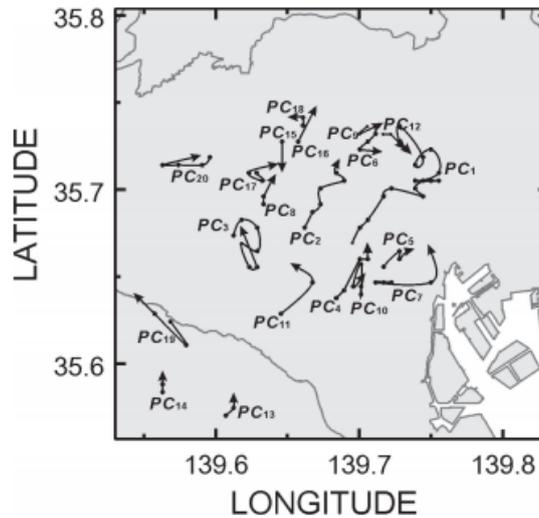
Figura 2.11 - Associação vertical da tempestade 3D para melhorar a componente 2D da tempestade.



Tempestade inclinada (a) e vários componentes nas camadas elevadas (b). Os  $C$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são os centros e  $C_1'$  e  $C_2'$  são as projeções dos centros  $C_1$  e  $C_2$  na base.

Fonte: Figura original de Li et al. (2012), página 20.

Figura 2.12 - Trajetória das células precipitantes definida pelos máximos de água líquida precipitável.

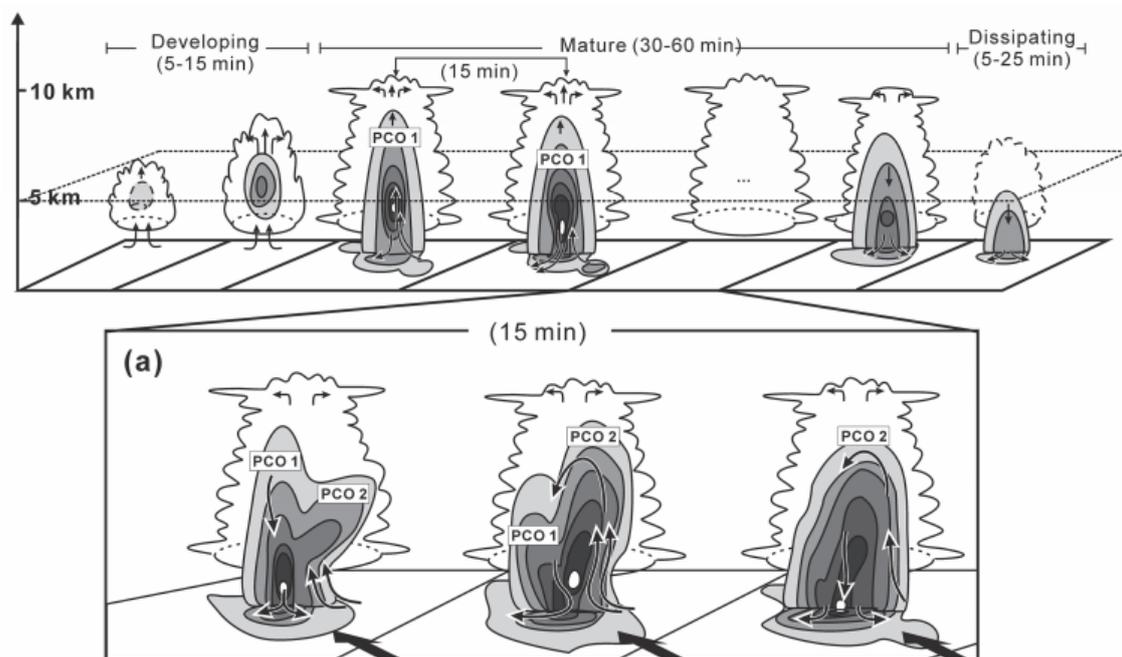


Os PCn indicam o n núcleos rastreados.

Fonte: Figura original de Kim et al. (2012), página 707.

O trabalho de Kim et al. (2012) utilizou dois radares de dupla polarização no estudo de tempestades multicelulares em 3D. As células precipitantes e núcleos foram definidos em base de conteúdo de água líquida. O trabalho chama a atenção para o curto ciclo de vida das células de menos de 30 minutos (5-25 minutos). As trajetórias identificadas baseadas em núcleos máximos de conteúdo de água líquida são quase caóticas e não apresentam linearidade o que dificulta o seu rastreo e principalmente o nowcasting (Figura 2.12). Entretanto, o trabalho descreve a dinâmica da evolução das células precipitantes didaticamente (Figura 2.13), semelhante ao trabalho de Browning (1986). O surgimento de uma nova célula pelo rápido fluxo ascendente, contígua a célula no estágio maduro, altera o fluxo e produz movimento descendente que praticamente força a célula madura a precipitar e diminuir sua atividade. A célula nova se desenvolve em detrimento da célula velha culminando a sua fase de dissipação. Esse fluxos nos níveis baixos que ascende rapidamente são importantes por advectar calor e vapor d'água e dão suporte de vida a essa nova célula (Figura 2.13a).

Figura 2.13 - Representação esquemática dos vários estágios do ciclo de vida da célula de tempestade.



As cores cinzas indicam a variação do conteúdo de água líquida e, os vetores, os principais componentes do fluxo de ar.

Fonte: Figura original de Kim et al. (2012), página 712.

Alguns trabalhos anteriores mencionaram mudanças repentinas da direção da trajetória das células de tempestade, principalmente quando o deslocamento desta é lento. Horvath et al. (2015) investigou mudanças na trajetória utilizando uma técnica híbrida com os algoritmos: TREC para interpolar imagens de 15 minutos para 1 minuto e o TITAN para a identificação das tempestades. O resultado do trabalho mostra que as trajetórias das tempestades sofreram desvios maiores que 40 e 60° em 23 e 13% dos casos, respectivamente. A velocidade máxima média foi em torno de 35-45 km/h.

Já o trabalho de Shah et al. (2015) utilizou como base a metodologia semelhante ao TITAN na identificação e rastreamento de tempestade como um todo, não de células. Para nowcasting foi utilizado uma estratégia de suavização exponencial de segunda ordem, onde o crescimento e decaimento de cada variável de interesse são considerados lineares. Também foi utilizada a Matemática Morfológica no auxílio à identificação da tempestade. Os resultados para 15 minutos de previsão indicam excelente precisão de 99,34%. Por outro lado, Lakshmanan e Smith (2010) critica

muito a metodologia de avaliação dos algoritmos de nowcasting que tendem, por si só, a superestimar os resultados em favor do algoritmo avaliado.

No Brasil, o TITAN é utilizado operacionalmente no Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet) da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), em Bauru. No Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Fortracc desenvolvido para análise e nowcasting de tempestades observadas por satélite foi adaptado para a utilização com dados de radar como no trabalho de [Queiroz \(2009\)](#). O Fortracc utiliza a correlação cruzada para estimar o movimento do sistema precipitante com resolução de 2 km. Outro algoritmo de *nowcasting* utilizado operacionalmente no Brasil é o *Centroid Tracking* ou CTR em instituições como o CEMADEN e também na Defesa Civil de Santa Catarina e de Pernambuco. O CTR é baseado em limiar de refletividade para a classificação de células de tempestade igual ao TITAN e incorpora a sobreposição de áreas como garantia de se tratar da mesma célula se deslocando.

Assim, os principais trabalhos na área de identificação e rastreamento de tempestades continuam sendo deficientes principalmente na identificação correta das células que compõe a tempestade. Outro ponto discutível, muitos algoritmos denominam metodologia em três dimensões, mas poucos utilizam realmente a informação em si como parte da solução do nowcasting. Mesmo o TITAN e o ETITAN, embora calcule o volume da célula, utilizam apenas a raiz cúbica do volume como parte da função de custo. Outro ponto fundamental é o algoritmo de nowcasting que, em alguns trabalhos, utilizam procedimentos matemáticos complexos, porém não incluem o ciclo de vida das células, apenas extrapolação linear que está longe da realidade operacional. Assim, o tempo de nowcasting fixo não reflete a realidade na maior parte dos casos, sendo que a previsibilidade da tempestade está diretamente relacionada à sua dimensão ([SEED, 2003](#); [GERMANN et al., 2006](#)). Por exemplo, uma tempestade de 12 km de tamanho tem um ciclo de vida da ordem de 30 minutos e um de 50 km, cerca de 2 horas. Um experimento utilizando o ETITAN realizado por [Dixon e Seed \(2014\)](#) mostra bem essa relação entre previsibilidade e dimensão da tempestade. No Experimento, uma tempestade organizada em linha, com comprimento superior a 50 km, foi possível prever a sua trajetória com precisão de até duas horas de antecedência, mesmo com extrapolação linear.



### 3 ÁREA DE ESTUDO E DADOS

A área de estudo do presente trabalho é aquela coberta pelo raio de varredura de 150 km do radar de Jaraguari, localizado a 26 km de Campo Grande/MS, região Centro-Oeste. A localização exata do radar está centrada nas coordenadas 20,2785°S e 54,4739°W (Figura 3.1). O radar meteorológico foi fabricado pela empresa Selex-SE, possui dupla polarização, opera na Banda S, Doppler, pulsado com feixe de micro-ondas de largura de 1°. O equipamento é mantido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN).

Figura 3.1 - Localização do radar de Jaraguari/MS.



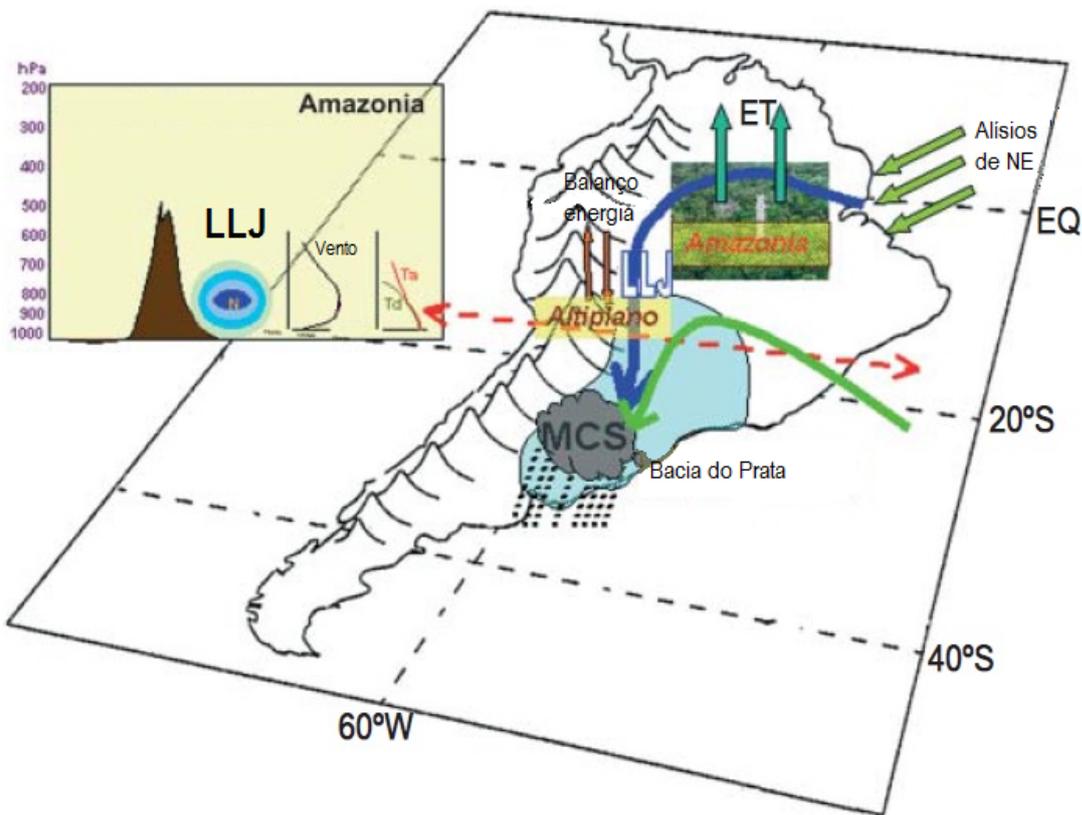
Raio de varredura de 150 km (verde) e 250 km (branco) centrados a partir da posição do radar.

Fonte: Produção do autor.

A área de estudo foi selecionada por estar situada em um local onde observar-se formações de tempestades severas com topos de nuvens convectivas que ultrapassam os 15 km de altitude. A principal forçante para as formações das células de tem-

pestades no local está associada à confluência entre o escoamento de umidade da Amazônia transportada pelo jato de baixos níveis (LLJ), que contornam os Andes pela sua face Leste e, a aproximação das frentes frias e sistemas convectivos de mesoescala que avançam do Sul do Brasil e oeste da América do Sul, respectivamente. A confluência dessas massas de ar promove o aumento da instabilidade atmosférica favorecendo a formação de convecção profunda sobre o Estado do Mato Grosso do Sul e adjacências (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Transporte de umidade da Amazônia pelo LLJ.



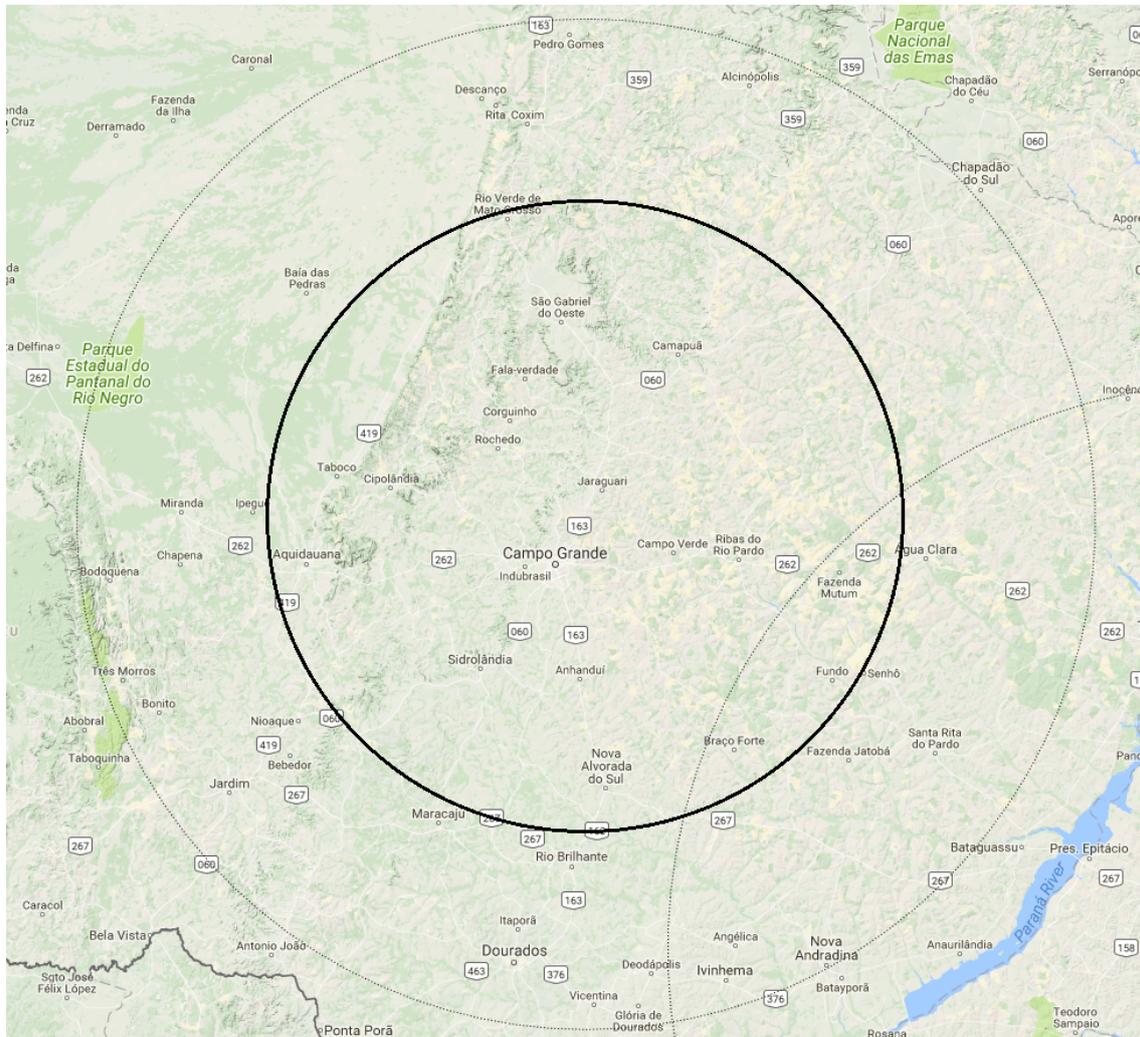
Modelo conceitual do (LLJ), a leste dos Andes, que transporta umidade da Amazônia (flecha azul) e do oceano Atlântico subtropical (flecha verde). A seta pontilhada é o local da seção vertical (quadro amarelo).

Fonte: Adaptado de Marengo (2004).

Uma componente importante da área de estudo é a topografia quase plana dessa região. A altitude em relação ao Nível Médio do Mar (NMM) possui variações entre 115 e 550 metros (de Aquidauna até São Gabriel do Oeste) dentro do raio de 150 km de varredura do radar (círculo preto), o que diminuí a complexidade das análises com

a mínima influência da orografia como forçante nas formações convectivas (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Topografia da área de estudo.



O raio de 150 km de varredura do radar está demarcado pelo círculo preto.

Fonte: Google (2017).

A formação de tempestades nessa região ocorre predominantemente quando o escoamento básico é de Noroeste para Sudeste, porém já foram observados convecções nos escoamentos de Sul para Norte e de Leste para Oeste, dependendo da situação sinótica vigente.

### 3.1 Dados de radar

O radar de Jaraguari opera na banda-S transmitindo e recebendo sinais polarizados simultaneamente na horizontal e na vertical, na frequência de 2,86 GHz. As variáveis polarimétricas geradas por esse radar são o fator de refletividade na polarização horizontal (Zh) que, por conveniência será tratado apenas como refletividade no restante do texto, a refletividade diferencial (ZDR), coeficiente de correlação copolar (RhoHV), velocidade radial (V), largura espectral (W), deslocamento de fase (PhiDP) e deslocamento de fase diferencial específica (KDP). Essas variáveis foram coletadas a cada 5 minutos de intervalo a partir da varredura volumétrica de 12 elevações (0,5°; 1,5°; 2,5°; 3,5°; 4,5°; 5,7°; 7,0°; 8,6°; 10,9°; 13,4°; 16,4° e 20,0°). Outras informações estão sobre os parâmetros de operação do radar estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Configurações básicas da varredura volumétrica de Jaraguari.

Parâmetro	Configuração
Raio de varredura	máximo 250 km
Número de elevações	12
Resolução espacial	250 metros
Resolução temporal	5 minutos
Resolução azimutal	1°
Amostragem	> 21
Velocidade da antena	11°/segundo
PRF 0,5 a 7°	600/480 Hz
PRF 8,6 a 20°	1200 Hz
Velocidade da antena	12 a 30°/segundo

Fonte: Produção do autor.

Todos os dados utilizados foram processados e classificados em dados meteorológicos e não-meteorológicos de acordo com a metodologia adaptada de [Schuur et al. \(2003\)](#), na qual os dados classificados como não-meteorológicos foram eliminados do arquivo volumétrico.

O período de estudo foi do dia 25/10/2015 a 12/01/2017. Nesse período foi possível avaliar uma quantidade muito grande de sistemas precipitantes e células de tempestades (> 50 mil células rastreadas), o que contribuiu para a elaboração do banco de dados dos parâmetros físicos de cada sistema observado que será detalhado nos capítulos seguintes.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho consistiu inicialmente da transformação de cada volume adquirido pelo radar em coordenada azimutal para coordenada cartesiana, georreferenciando cada elemento de volume observado. O objetivo do volume em coordenada cartesiana é a facilidade na implementação do algoritmo e também a eficiência computacional em termos de velocidade. Sobre o volume transformado foi aplicado Método de Expansão 3D, isto é, o núcleo mais intenso de refletividade é localizada e a procura por valores menores de refletividade é expandida a partir desse ponto para as bordas nas três direções. Essa técnica foi desenvolvida nesse trabalho de forma inédita para permitir a identificação do corpo de cada célula presente em cada sistema precipitante observado. Uma vez identificada cada célula, os centroides de cada célula são calculados utilizando os valores de refletividade de cada elemento de volume que compõe a célula como balizadores (função peso) calculando-se assim o centro de massa. Com o centro de massa de cada célula calculada, os multivetores entre as células nos tempo consecutivos são calculados identificando a trajetória executada por cada célula de acordo com as regras de seleção das trajetórias. As regras são fundamentadas na direção média de deslocamento dada nos níveis médios e também pela distância máxima permitida de deslocamento da célula entre tempos consecutivos. Um banco de dados de trajetórias de células são utilizadas como similaridade para fundamentar o nowcasting para a célula em análise.

Nas próximas seções, cada parte da metodologia descrita acima de forma resumida será detalhada minuciosamente para uma maior compreensão e clareza da técnica proposta nesse trabalho.

### 4.1 Transformação de Coordenadas

O radar adquire os dados a partir de cada *bin* iluminado pelo feixe em cada radial de rotação da antena. Cada *bin* do radar possui uma resolução de 250 metros e são adquiridos individualmente desde a saída do feixe na antena até a distância de 250 km do radar. Portanto, para cada azimute da antena, são adquiridos 1.000 *bins*. Após a conclusão de 360 graus de azimute, o radar aumenta a elevação da antena e repete o ciclo de coleta de dados, até que a última elevação seja concluída. O tempo total desse processo dura cinco minutos, quando então os dados volumétricos são disponibilizados para processamento. Essa forma de aquisição de dados é complexa para ser tratada computacionalmente, uma vez que a base de referência para o processamento é a forma cartesiana  $(x, y, z)$  ou  $(i, j, k)$ .

Para facilitar o processamento dos dados, um volume semelhante a um paralelepípedo composto por cubos de 250mx250mx250m é construído de modo a ocupar o volume do radar coincidindo com as suas fronteiras. O limite do raio de varredura do radar considerado foi de 150 km para um maior aproveitamento do volume observado quanto a estrutura vertical, uma vez que a partir dessa distância, o feixe mais baixo por pode atingir alturas acima da base das nuvens convectivas a serem analisadas. O total da estrutura volumétrica é composto de 1200x1200x60 cubos, limitando a vertical em 15 km, onde cada cubo terá as suas coordenadas ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ), com a abscissa de orientação oeste-leste, a ordenada sul-norte e a altitude em relação ao Nível Médio do Mar (NMM).

Dessa forma, uma função de transformação de coordenadas azimutal equidistante para cartesiana (Equação 4.1) é aplicada aos dados de varredura volumétrica:

$$f : R(az, r, el) \Rightarrow R(xr, yr, zr) \quad (4.1)$$

onde  $R(az, r, el)$  é uma variável polarimétrica qualquer,  $az$  é o ângulo de azimute,  $r$  é múltiplo de *bin* ou raio e  $el$  é o ângulo de elevação.  $R(xr, yr, zr)$  é a variável na coordenada cartesiana correspondente ao centro do tronco de cone do radar. O tratamento matemático é semelhante aos trabalhos de Zhang et al. (2005), Lakshmanan et al. (2006) e Langston et al. (2007), onde o valor de cada elemento de volume é a contribuição de todos os *bins* dentro de um raio de influência determinado ponderado pela distância.

Computacionalmente, para cada tronco de cone delimitado pelo tamanho do *bin*, um grupo de cubos dentro do raio de influência determinado receberá a contribuição do valor ponderado do dado de radar pelo inverso da distância Euclidiana. É importante ressaltar que para um determinado cubo pode haver influência das varreduras vizinhas tanto em azimute como na elevação ou em termos de *bins*, principalmente quanto mais distante for o ponto em relação a posição do radar.

Uma vez processado todo o volume de varredura do radar, o valor da variável interpolada em um determinado cubo,  $D(x_c, y_c, z_c)$ , é dado pelas equações 4.2 e 4.3:

$$D(xc, yc, zc) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L R(xr_i, yr_j, zr_k) / d_{ijk}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L 1 / d_{ijk}} \quad (4.2)$$

$$d_{ijk} = \sqrt{(xc - xr_i)^2 + (yc - yr_j)^2 + (zc - zr_k)^2} \quad (4.3)$$

onde  $R(xr_i, yr_j, zr_k)$  é o valor da variável em cada tronco de cone que influencia o cubo;  $d_{ijk}$  é a distância do centro do tronco de cone ao cubo; os índices  $N$ ,  $M$  e  $L$  dependem do raio de influência utilizado.

O raio de influência não é constante em todo volume devido ao aumento do volume do tronco de cone em consequência da abertura do feixe com o aumento da distância em relação ao radar. Portanto, o raio de influência é uma função da distância do radar.

Uma vez que a varredura volumétrica esteja representada em coordenadas cartesianas, um filtro *passa-baixa* é utilizado para suavizar o domínio do volume em termos de alta variação da refletividade. Essa alta variação da refletividade geraria um número elevado de núcleos ou centroides a serem classificados. Essa técnica também foi utilizada por [Choi et al. \(2009\)](#) para suavizar os campos de refletividade bidimensionais.

## 4.2 Método da Expansão em 3D

Na metodologia de classificação 2D, o limiar de refletividade de 35 dBZ é utilizado para demarcar o domínio da célula como no TITAN ([DIXON; WIENER, 1993](#)), por exemplo. Numa estrutura 3D, a complexidade da metodologia é maior devido as diferentes estruturas que uma célula de tempestade pode apresentar (inclinada, ramificada, etc.) ou mesmo células agrupadas dificultando o estabelecimento de suas fronteiras. A metodologia do limiar de refletividade em 3D não distingue o domínio entre duas células semifundidas, onde o valor da refletividade na região em comum ultrapasse o valor do limiar utilizado, dificultando a classificação de duas células distintas.

A metodologia proposta no presente trabalho denominada de **Método da Expansão em 3D** foi elaborada visando contornar as dificuldades oriundas da complexidade das estruturas das células de tempestade em 3D. A abordagem é iniciada a

partir do núcleo mais intenso da célula expandindo em direção à borda da célula ou até que o valor de 20 dBZ de refletividade mínima seja atingido. Na existência de uma célula contígua, há a possibilidade de se classificar parte do corpo dessa célula como pertencente a célula em classificação. Esse problema foi contornado calculando-se o gradiente de refletividade a medida que a expansão da busca é realizada, isto é, como a expansão é do núcleo mais intenso para a borda, o gradiente de refletividade entre cada elemento de volume é negativo e a mudança do sinal indica que há outra célula presente e, portanto, a expansão deve ser interrompida. Porém a classificação simultânea de todas as células presentes no volume cartesiano aumenta a eficiência da classificação e delimitação de cada fronteira das células de tempestade. Então, como realizar a classificação simultânea a partir do núcleo de máxima refletividade de cada célula?

A resposta metodológica para o problema acima é variar a refletividade do valor máximo ( $Z_{max}$ ) dentro do volume cartesiano, em intervalos fixos ( $\Delta Z$ ) e realizar a classificação dos elementos de volume que tenham valores de refletividade dentro do intervalo vigente. Os intervalos seriam em ordem decrescente na seguinte sequência: ( $Z_{max} - \Delta Z$ ), ( $Z_{max} - 2\Delta Z$ ), ( $Z_{max} - 3\Delta Z$ ),..., ( $Z_{max} - n\Delta Z$ ), onde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  até que ( $Z_{max} - n\Delta Z$ ) = 20 dBZ.  $\Delta Z$  é o intervalo de procura que pode ser 0,1 ou 0,2 ou ... 1 ou 2, dependendo da precisão desejada. Quanto menor o  $\Delta Z$ , maior é a precisão da classificação assim como o custo computacional.

O pixel ou o elemento de volume ( $i, j, k$ ) de maior refletividade dentro do volume cartesiano recebe a etiqueta de  $n = 1$  e todos os outros elementos de volume classificados a partir desse elemento recebem a mesma etiqueta de identificação (Equação 4.4):

$$Z_{max}^{(n)}(i, j, k) \rightarrow Cell_{ID}(i, j, k) = n \quad (4.4)$$

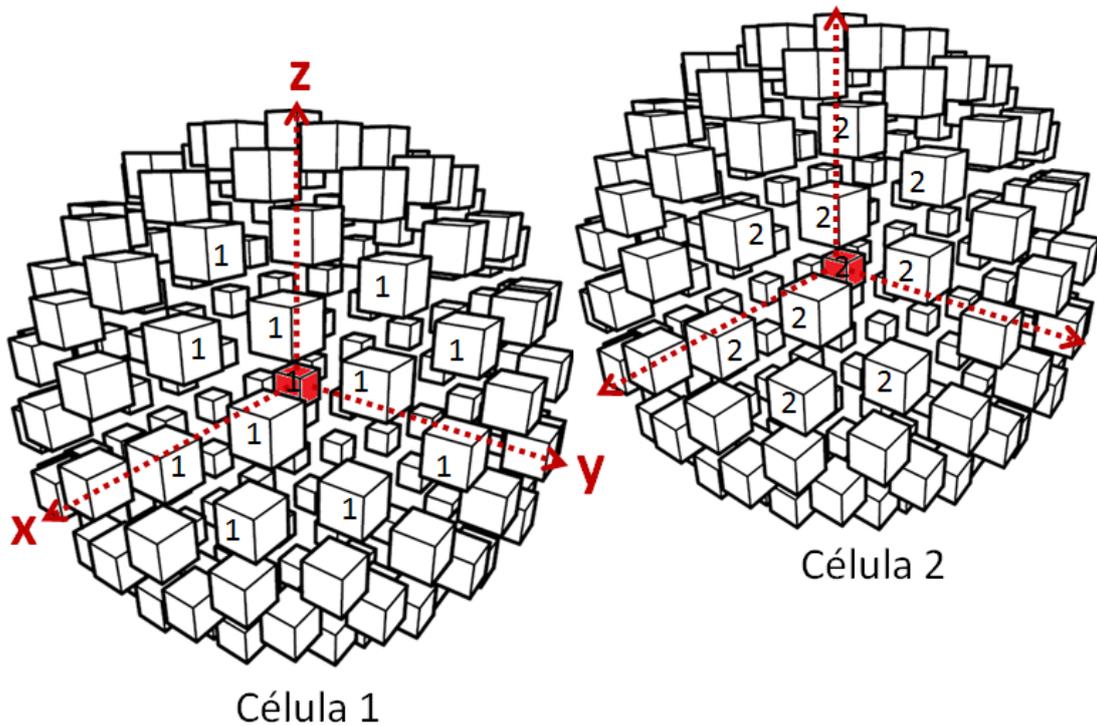
onde  $n$  representa a ordem da etiqueta, cujo valor inicial é 1.

Se durante a busca, um outro elemento de volume ( $i', j', k'$ ) que esteja isolado for identificado, esse elemento será considerado como núcleo de outra célula e receberá a etiqueta de  $n = 2$  (Equação 4.5) e assim sucessivamente.

$$Z_{max}^{(2)}(i', j', k') \rightarrow Cell_{ID}(i', j', k') = 2 \quad (4.5)$$

Após a classificação de todo o volume cartesiano, o corpo de cada célula é o agrupamento de todos os elementos de volume, que no caso são cubos de 250 metros de aresta, com a mesma etiqueta (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Idealização do processo de identificação de cada elemento de volume das células 1 e 2.



Os eixos indicam que a expansão é realizada nas três direções e os núcleos de cada célula estão em vermelho.

Fonte: Produção do autor

Quando há a existência simultânea de duas ou mais células próximas ou dentro da mesma tempestade (Figura 4.1), o método da expansão classifica todas as células ao mesmo tempo, sendo que o “encontro das fronteiras” das células é traduzido como a mudança no sinal do gradiente da refletividade (negativo para positivo) que define o limite de cada célula. Esse processo ocorre nas três dimensões definindo fronteiras com outras células nas vizinhanças laterais ou mesmo acima ou abaixo.

Uma vez definido o domínio da célula, os parâmetros descritivos da célula como a coordenada do centroide e do centro de massa, o volume da célula, o valor máximo

de refletividade e sua posição, principalmente em altura, assim como a morfologia de sua estrutura são calculados e analisados. Foi também estabelecida uma distância mínima de 6 pixels (1500 m) para o surgimento ou classificação de uma nova célula. Esse valor foi adotado no presente trabalho e pode ser alterado dependendo do seu objetivo ou resolução espacial da classificação.

### 4.3 Cálculo do centro de massa

O Centro de Massa, na Mecânica Clássica, é o ponto onde se concentra toda a massa do volume que, quando aplicado uma força nesse ponto, não há torque algum por parte do sistema. No caso de uma célula de tempestade, rastrear o centro de massa seria a melhor referência para descrever a sua trajetória em tempos sucessivos. A dificuldade de se encontrar o centro de massa de uma nuvem está relacionada com a dificuldade de se estimar a massa dessa nuvem, uma vez que dentro desse volume que delinea a nuvem há vários tipos de partículas (gota, gotícula, cristais de gelo de vários formatos e tamanhos etc.) e de não se conhecer a densidade dessa nuvem.

Porém, mesmo com as dificuldades inerentes, a massa da nuvem pode ser substituída por outro fator como refletividade, intensidade da precipitação, logaritmo da refletividade ou mesmo a própria unidade (HANDWERKER, 2002). Esses parâmetros são estimados a partir dos dados de radar meteorológico sendo que esse cálculo do “centro de massa” da célula é o centro de massa ponderado pela refletividade como o realizado por Dixon e Wiener (1993) entre outros.

A coordenada zonal do centro de massa  $xc_c$  de uma determinada célula com etiqueta  $n$  é dado pela Equação 4.6, como exemplificado abaixo:

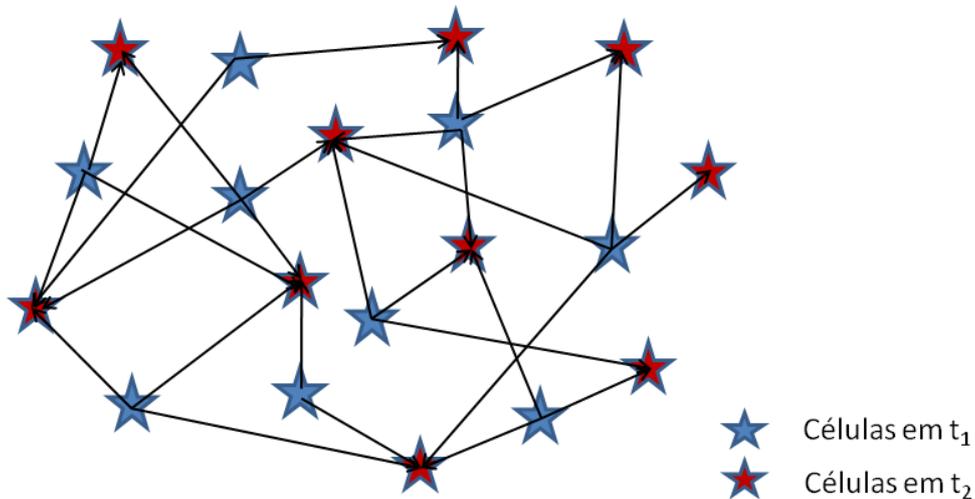
$$xc_c^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L Z_{ijk}^{(n)} xc_{ijk}^{(n)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L Z_{ijk}^{(n)}} \quad (4.6)$$

onde  $Z_{ijk}^{(n)}$  é o valor da refletividade do cubo  $xc_{ijk}^{(n)}$  de coordenadas  $ijk$ . As coordenadas  $yc_c^{(n)}$  e  $zc_c^{(n)}$  são calculadas analogamente. A Equação 4.6 pode ser simplificada utilizando como base de coordenadas as coordenadas cartesianas de grade, o (i, j, k), em vez das coordenadas geográficas como latitude, longitude e altitude ( $xc$ ,  $yc$ ,  $zc$ ).

#### 4.4 Cálculo do vetor deslocamento

Uma vez identificados cada corpo de célula de tempestade dentro do volume cartesiano no tempo  $t_1$ , os centros de massa de cada célula são calculados. Esse procedimento também é realizado no tempo sucessivo  $t_2$ . Os vetores deslocamento são o resultado do cruzamento de cada centro de massa das células no tempo  $t_1$  com os centros de massa das células no tempo  $t_2$ . O resultado desses cruzamentos geram multivetores como ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Ilustração dos multivetores entre os centros de massa das células em  $t_1$  e  $t_2$ .



As estrelas nas cores azul e vermelha representam os centros de massa das células nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

Para selecionar o vetor deslocamento entre os multivetores é necessário uma direção prévia de deslocamento das células entre os tempos  $t_1$  e  $t_2$ . Como o radar é Doppler, a direção prévia de deslocamento pode ser fornecida pelo produto do vento radial, o VVP (WALDTEUFEL; CORBIN, 1979), técnica empregada no trabalho de Handwerker (2002). O VVP representa o vento real com boa precisão em várias altitudes e a metodologia analisa o vento radial em cada PPI num raio máximo de 20 km em torno do radar. Esse vento calculado representa o vento médio em todo o domínio de varredura do radar, isto é, no caso do presente trabalho, 150 km de raio por 15 km de altura. Porém, durante os vários experimentos para o ajuste empírico da metodologia de seleção dos vetores deslocamento, foi observado que o VVP não

necessariamente representa o vento em todo o domínio de varredura do radar, isto é, em sistemas convectivos, principalmente distantes do radar, o VVP não representa a direção de deslocamento das células de tempestade dificultando o estabelecimento do vetor deslocamento.

Um outro produto da velocidade radial que representa melhor a direção de deslocamento é o *Uniform Wind Technique* (UWT), desenvolvido inicialmente por Persson e Anderson (1987) e implementado por Selex (2016). Essa técnica é simples e pode ser deduzido a partir da Figura 4.3. As componentes zonal e meridional são calculadas de acordo com a Equação 4.7 abaixo:

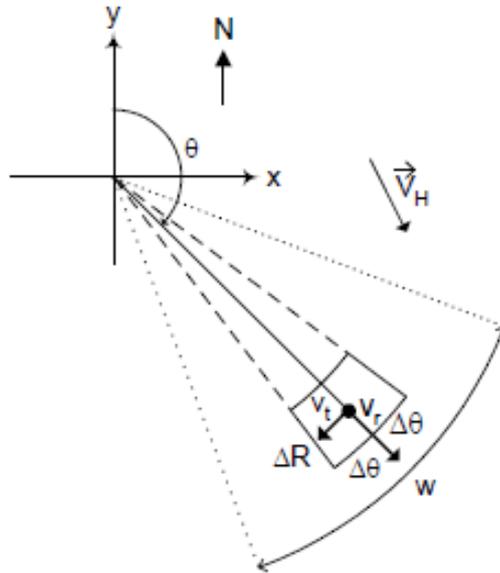
$$\vec{u} = \vec{V}_r \cdot \text{sen}(\theta) + \vec{V}_t \cdot \text{cos}(\theta) \quad e \quad \vec{v} = \vec{V}_r \cdot \text{cos}(\theta) - \vec{V}_t \cdot \text{sen}(\theta) \quad (4.7)$$

onde o vento tangencial  $\vec{V}_{t,i}$  no azimute  $i$  é dado por (Equação 4.8):

$$\vec{V}_{t,i} = \frac{\vec{V}_{r,i+\Delta\theta} - \vec{V}_{r,i-\Delta\theta}}{2 \cdot \Delta\theta_{rad}} \quad (4.8)$$

sendo  $\Delta\theta$  o tamanho do azimute tangencial e  $\Delta\theta_{rad}$  o mesmo, porém em unidade de radianos.

Figura 4.3 - Geometria de concepção do *Uniform Wind Technique*.



O vetor  $\vec{V}_H$  é o vento horizontal formado pelas componentes  $\vec{V}_r$  e  $\vec{V}_t$ .  $\Delta\theta$  é o tamanho do azimute tangencial e o  $\Delta R$  a tamanho do *bin*.  $w$  é o filtro passa-baixa aplicado.

Fonte: Selex (2016).

O UWT é um vento representado numa camada e no presente trabalho a camada adotada foi de 3 km com 500 metros de espessura acima e abaixo. Os maiores erros são provenientes de ruídos de céu claro que geram pixels com altos valores de velocidade. Um outro fator limitante é a elevação do feixe que pode não preencher a camada com dados. Para eliminação de valores espúrios, filtros são aplicados assim como uma função-peso Gaussiana para dar consistência ao campo de vento do UWT. Na ausência do UWT na região de análise da célula, uma média do *Volume Velocity Processing* (VVP) (WALDTEUFEL; CORBIN, 1979) na camada entre os níveis 2 e 6 km de altitude é utilizado.

Para cada vetor deslocamento ( $\vec{V}_d$ ) estabelecido, a sua direção é comparada com a direção do UWT e, na ausência deste, com o VVP. Uma flexibilização da direção é estabelecida de acordo com a velocidade do vetor deslocamento ( $|\vec{V}_d|$ ), cujo grau de variação da velocidade ( $\Delta \text{dir}$ ) aceita é em função da própria velocidade de deslocamento analisada (Figura4.4).

Figura 4.4 - Metodologia empírica utilizada na seleção do vetor deslocamento.

- Se  $|\mathbf{Vd}| \leq 6 \text{ px}$  (5 m/s ou 18 km/h)  
 $\Delta\text{dir} = \pm 100^\circ$  e  $|\mathbf{Vd}_{\text{max}}| = 1.5 * |\mathbf{VVP}_{\text{max}}|$
- Se  $6 < |\mathbf{Vd}| \leq 12 \text{ px}$   
 $\Delta\text{dir} = \pm 70^\circ$  e  $|\mathbf{Vd}_{\text{max}}| = 1.25 * |\mathbf{VVP}_{\text{max}}|$
- Se  $|\mathbf{Vd}| > 12 \text{ px}$  (10m/s ou 36 km/h)  
 $\Delta\text{dir} = \pm 40^\circ$  e  $\rightarrow |\mathbf{Vd}_{\text{max}}| = 1.0 * |\mathbf{VVP}_{\text{max}}|$

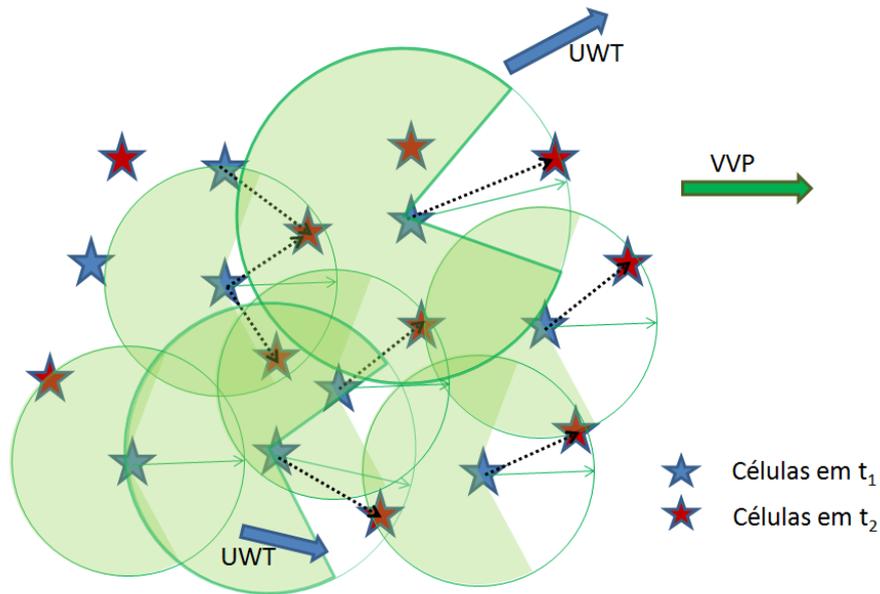
$\mathbf{Vd}$  é o vetor deslocamento entre dois centros de massa,  $\Delta\text{dir}$  é o grau de flexibilização da direção procurada, e  $\mathbf{VVP}_{\text{max}}$  é o VVP máximo observado na camada entre 2 e 6 km de altitude.

Fonte: Produção do autor.

Essa função apresentada na Figura 4.4 permite uma análise personalizada em termos do vetor deslocamento observado, atribuindo intervalos diferentes de  $\Delta\text{dir}$  e o deslocamento máximo ( $|\mathbf{Vd}_{\text{max}}|$ ) é sempre balizado pelo  $\mathbf{VVP}_{\text{max}}$  observado na camada entre 2 e 6 km de altitude. Uma ilustração do resultado da aplicação dessa metodologia na Figura 4.2 é apresentada na Figura 4.5. O raio da circunferência representa o  $|\mathbf{Vd}_{\text{max}}|$  e varia de acordo com o vetor deslocamento analisado. O setor não colorido representa o intervalo dado pelo  $\Delta\text{dir}$  que é inversamente proporcional ao tamanho do vetor deslocamento. Assim, cada vetor deslocamento é analisado com aplicação de parâmetros de seleção ou regras limitantes individuais.

Na ilustração da Figura 4.4 há a seleção de dois vetores deslocamento ao mesmo tempo para um único ponto de partida ou centro de massa, isto é, dentro das regras estabelecidas apresentadas na Figura 4.4, os dois vetores deslocamento são válidos. No estabelecimento do tempo  $t_3$ , a orientação da direção de procura não é mais dada pelo UWT ou o VVP. A própria direção do vetor deslocamento estabelecido entre os tempos  $t_1$  e  $t_2$  será utilizado como referência de direção para o vetor deslocamento entre os tempos  $t_2$  e  $t_3$ . Utilizando essa metodologia, um dos dois vetores deslocamento estabelecidos será naturalmente descontinuado por não encontrar correspondência de um outro centro de massa da célula, e esse processo está ilustrado na Figura 4.6.

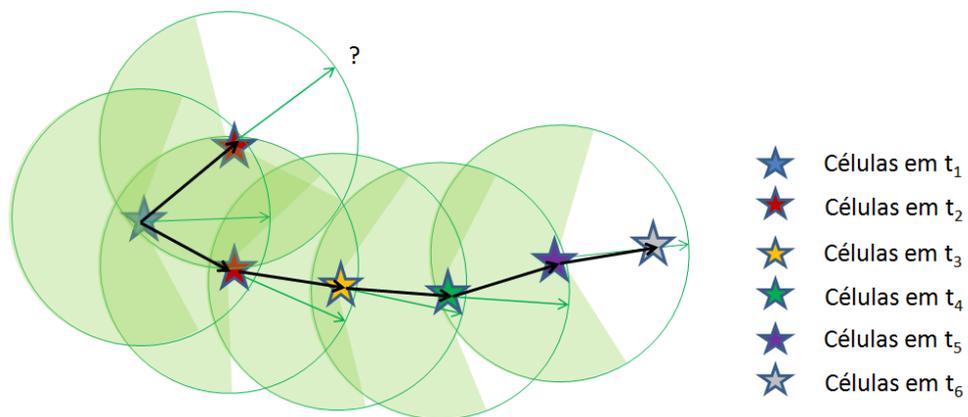
Figura 4.5 - Ilustração do resultado da seleção dos vetores deslocamento entre centros de massa em dois tempos sucessivos.



Direção de deslocamento dado pelo UWT e VVP nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ . Vetor pontilhado é o vetor deslocamento selecionado. O setor não colorido representa o  $\Delta dir$ .

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 - Ilustração da descontinuação da trajetória pela metodologia de rastreo.



As setas verdes são as direções de orientação em cada ponto de análise; as setas pretas são os vetores deslocamento selecionados, as estrelas coloridas são os centros de massas em tempos diferentes.

Fonte: Produção do autor.

#### 4.5 *Nowcasting* com Ciclo de Vida

O *nowcasting* dos algoritmos baseados em limiares de refletividade extrapola a previsão de curtíssimo prazo da posição futura da célula de tempestade baseada na configuração de tempo adotada (30 minutos por exemplo). Enquanto existir uma célula de tempestade, a previsão é sempre calculada para os próximos 30 minutos, independentemente se a célula já está em dissipação ou não. Se o operador fixar em 60 minutos, o resultado em caso de dissipação é mais crítico ainda.

O presente trabalho tem por objetivo diminuir essas extrapolações do *nowcasting* incluindo o ciclo de vida da célula de tempestade na confecção dessas previsões de curtíssimo prazo, sem a fixação do tempo de previsão. Para tal, um conjunto de ciclos de vida rastreados são selecionados para compor o Banco de Dados de *Nowcasting* (BDN) e deve conter as seguintes informações:

- a) no mínimo com 5 tempos de duração (no caso, 25 minutos);
- b) refletividade do centro de massa;
- c) refletividade máxima da célula; e
- d) volume da célula em  $km^3$ .

Composto o BDN, a confecção do *Nowcasting* com Ciclo de Vida (NCV) se inicia com dois pontos de observação da célula de tempestade, em tempos sucessivos, comparando as informações de volume, refletividades máxima e do centro de massa com as informações das células dentro do BDN. As correlações entre o observado e o BDN são calculados e uma função de custo mínimo foi desenvolvido para mensurar a melhor correlação das comparações.

Para a equação de regressão linear dos valores de refletividade observado ( $y$ ) e do BDN ( $x$ ) dada pela Equação 4.9, as condições para as constantes  $a$  e  $b$  são:

$$y(x) = ax + b \Rightarrow \begin{cases} a > 0.95 \\ b = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

O valor de correlação linear ( $r$ ) também é calculado e o mínimo exigido é de  $r > 0,9$ . Essa mesma analogia é utilizado para a correlação entre os volumes observado e o

do BDN. Uma média das correlações entre refletividades e volume é calculada e a melhor é o ciclo de vida selecionado dentro do BDN para compor o NCV.

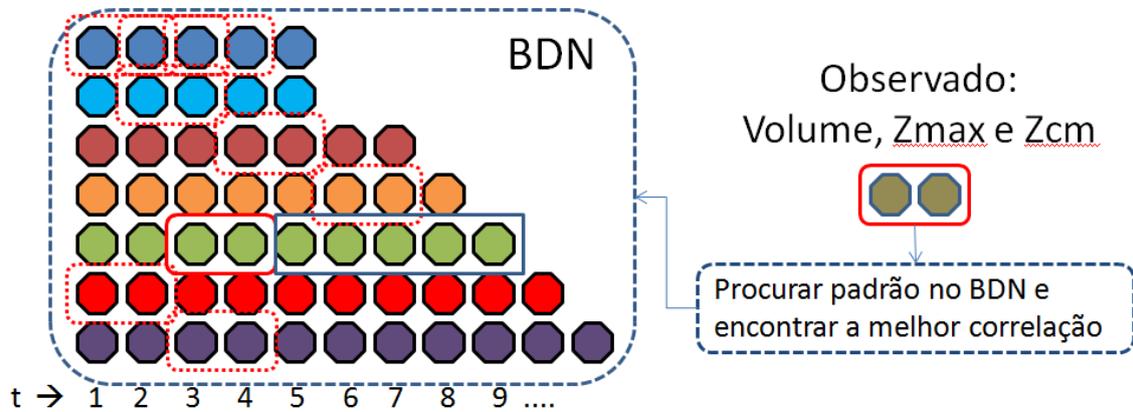
Para dois pontos de observação da célula em tempo sucessivos, há 4 pares de refletividades para a correlação e foi adicionado a origem para aumentar o número de pontos além de forçar a passagem da reta de regressão pela origem. No caso do volume, há apenas dois pares para a correlação, assim a adição da origem é necessária para estabelecer a correlação. Portanto, duas observações apresentam uma fragilidade no cálculo da correção. Para contornar essa deficiência, na observação de um terceiro ponto, este é incluído aumentando-se assim o número de pontos para a análise da correlação.

Na Figura 4.7 é ilustrado a metodologia da construção do NCV. Os retângulos vermelhos pontilhados indicam a comparação dos pares observados com os pares no BDN e a correlação é calculada e armazenada. No término da varredura dentro do BDN, o ciclo e a posição no tempo  $t$  é selecionado para compor o NCV (retângulo vermelho de linha contínua). Isso significa que a célula observada tem correspondência com a célula do BDN nos tempo  $t = 3$  e  $t = 4$ . Esse ciclo de vida selecionado no BDN tem tempo de vida  $t = 9$ , indicando que do tempo  $t = 5$  ao  $t = 9$  é o período restante do ciclo de vida analogamente da célula observada e este período irá compor o NCV.

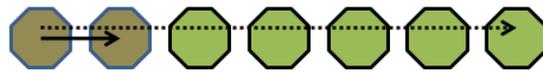
A direção do NCV (seta pontilhada) na Figura 4.7 é dada pela extrapolação da direção do vetor deslocamento entre os pontos observados, supondo que sejam os tempos  $t_1$  e  $t_2$ , indicado pela seta preta. O módulo do vetor deslocamento indica a distância que deve ser posicionada cada observação dos tempos  $t = 5$  ao  $t = 9$  do BDN a partir do último ponto de observação. Essa metodologia está ilustrada na parte inferior da Figura 4.7 e compõe o NCV.

A metodologia do NCV é inovadora no sentido de não ter o tempo de previsão de curtíssimo prazo fixo e o tempo da previsão é estabelecido por similaridade com eventos no passado. Esse fato, por outro lado, faz com que o BDN seja composto por um grande número de amostras de ciclos de vida de células de tempestades observados e também traz a dependência de observações regionais de sistemas precipitantes.

Figura 4.7 - Ilustração da metodologia de construção do NCV.



#### Elaboração do Nowcasting com Ciclo de Vida



Retângulos vermelhos pontilhado é a varredura par a par; retângulo vermelho é o par selecionado; o retângulo cinza é o *nowcasting*. Na parte inferior, é o observado mais o *nowcasting* formando o NCV.

Fonte: Produção do autor.

#### 4.6 Comparação de *Nowcastings*

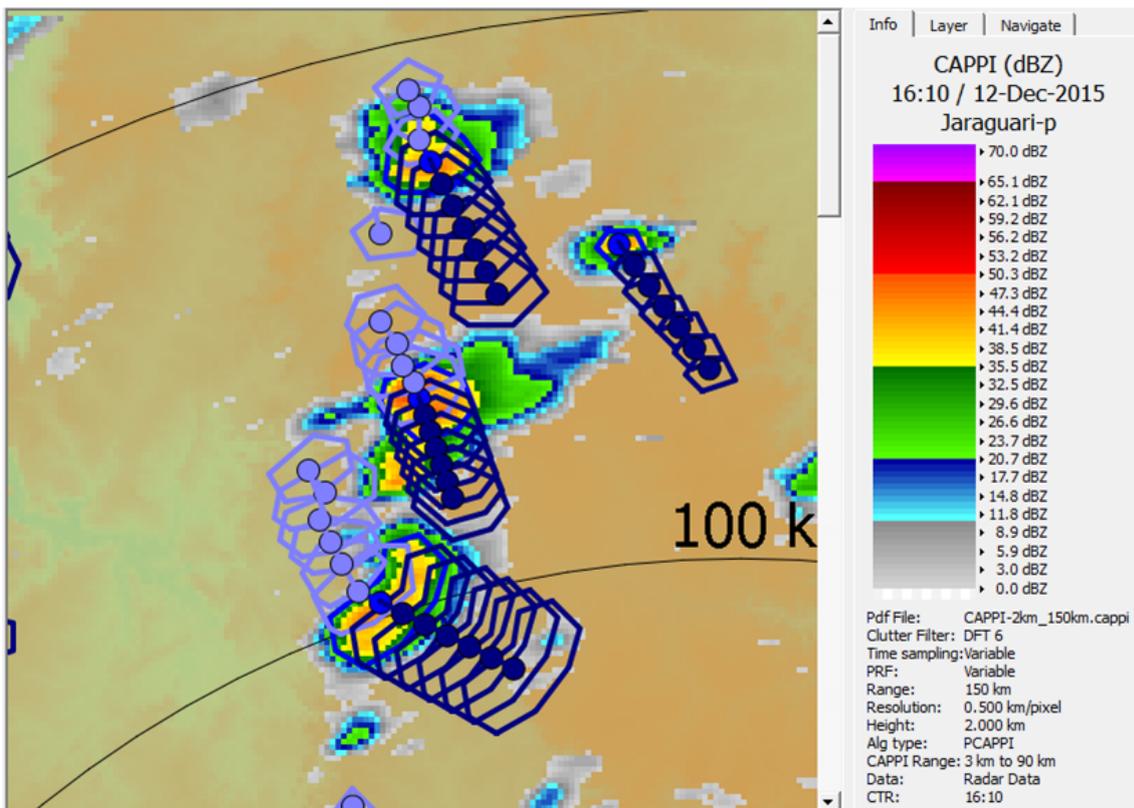
A avaliação de desempenho dos resultados de *nowcasting* será realizada com o CTR (*Centroid Tracking*), algoritmo operacional implementado no Cemaden pela Selex (2016). O CTR é semelhante ao TITAN e, para a comparação com o NCV, foi configurado com os seguintes parâmetros:

- baseado em limiar de refletividade: 30 dBZ;
- aplicado sobre o CAPPI de 2 km de altitude (bidimensional);
- diâmetro mínimo da célula: 3 km;
- centroide ponderado pela refletividade;
- sobreposição de células: 70%;

- direção inicial: VVP entre 1 e 4 km; e
- tempo de *nowcasting*: 30 minutos.

Um exemplo de saída gráfica do CTR é apresentado na Figura 4.8. A metodologia do CTR localiza a célula de tempestade baseado no limiar de 30 dBZ e traça o polígono de identificação (azul escuro). As posições da célula no passado estão demarcados pelos polígonos em tons de azul claro e a posição atual da célula em polígono azul. O centroide é ponderado pela refletividade e está demarcado como ponto no interior de cada polígono. A projeção inicial da direção e distância do *nowcasting* é dado pelo VVP entre as camadas de 1 e 4 km de altitude. Após o surgimento do segundo ponto de observação, a direção do *nowcasting* de 30 minutos é dada pela direção do vetor deslocamento entre a posição atual e a anterior.

Figura 4.8 - *Nowcasting* do CTR baseado no CAPPI de 2 km de altitude.



Os polígonos em azul representam a posição atual da célula, em azul claro a posição no passado e em azul escuro o *nowcasting* de 30 minutos.

Fonte: Produção do autor.

A avaliação de desempenho do nowcasting será através da utilização de duas tabelas de contingências, uma para o NCV proposto (*nowcasting* com ciclo de vida e tridimensional) e a outra para o CTR (*nowcasting* fixo e bidimensional), seguindo a metodologia proposta por [Wilks \(1995\)](#).

#### **4.7 Estudo da relação Refletividade x Volume**

A classificação utilizando o método de expansão (3DEM) das células de tempestade gerou uma gama de parâmetros descritivos. Por outro lado, a metodologia de rastreamento das trajetórias executadas pelas células de tempestade amarram o comportamento entre as próprias variáveis. Assim, para cada ciclo de vida rastreado pode haver um comportamento ou uma relação descritiva entre as variáveis.

O presente trabalho fez o cruzamento entre os vários parâmetros levantados entre os ciclos de vida das células de tempestade rastreadas e a hipótese mais promissora é a possível existência de uma relação de proporcionalidade entre a refletividade máxima ou do centro de massa com o volume, isto é, o volume pode ser deduzido por uma função exponencial do valor de refletividade:  $Vol \propto exp(Z)$ .

A seguir serão apresentados os resultados do presente trabalho.

## 5 RESULTADOS

Os resultados da metodologia aplicada estão divididos nas seguintes seções:

- Método da Expansão 3D  $\Rightarrow$  os resultados estão divididos em tempestade unicelular e multicelular, esta última demonstrando a eficiência de classificação da metodologia proposta em sistemas complexos onde ocorrem o *merging* e *splitting*.
- Trajetografia  $\Rightarrow$  é apresentado o resultado da metodologia de rastreamento, a importância da utilização do UWT em conjunto com o VVP como direção inicial de procura, as trajetografias, a morfologia observada e a análise dos processos de *merging* e *splitting* para uma melhor compreensão da dinâmica desses processos.
- Nowcasting com ciclo de vida  $\Rightarrow$  apresenta os resultados da comparação entre o NCV (3D) e o CTR (2D) utilizando duas tabelas de contigência, além de outros experimentos.
- Estudo da relação refletividade versus volume da célula convectivas  $\Rightarrow$  apresenta o volume como uma função exponencial da refletividade e discute o seu potencial para o nowcasting.

### 5.1 Método de Expansão 3D - 3DEM

Os dados volumétricos de refletividade obtidos pelo radar meteorológico na escala azimutal equidistante são convertidos para a escala cartesiana formando uma matriz tridimensional de 1200x1200x60 pontos, onde cada elemento da matriz representa um cubo de 250 metros de aresta denominado de unidade de volume e representa a resolução espacial utilizada no trabalho.

#### 5.1.1 Tempestade unicelular

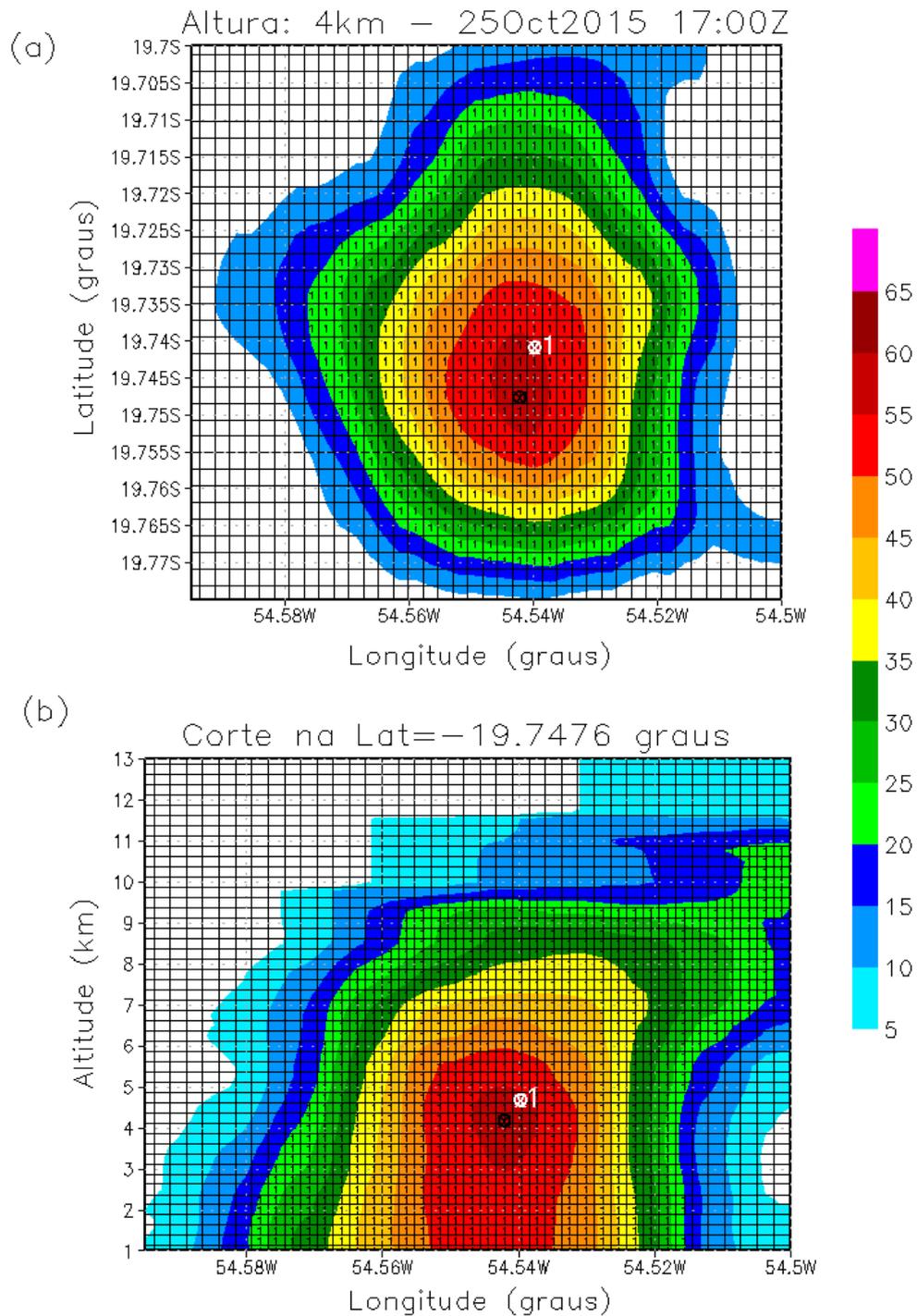
O resultado do 3DEM aplicado à varredura do dia 25/10/2015-17Z para a célula classificada como 1 pode ser vista na Figura 5.1 no CAPPI de refletividade em 4 km de altitude (a) e a seção vertical (b). O número 1 ou a etiqueta 1 indica que esta célula possui o elemento de maior refletividade (no caso 57,5 dBZ na altitude de 4 km) entre as células existentes nesse horário e a sua posição no espaço é demarcada pelo símbolo preto ( $\otimes$ ). O símbolo branco ( $\otimes$ ) indica a posição relativa do centro de massa que está localizada mais ao Norte. Essa diferença de posicionamento entre

o CM e MAX indica que a célula está levemente inclinada para Norte com mais elementos nessa direção.

A seção vertical foi realizada na latitude de  $-19,7476^\circ$  sobre os dados volumétricos nos limites da Figura 5.1a e o seu resultado é apresentado na Figura 5.1b. As faixas de cores indicam a escala de refletividade e todos os elementos classificados estão com a etiquetagem 1 até o limite da cor verde que representa a refletividade limite de 20 dBZ. A altitude do CM está ligeiramente numa altitude superior (500 metros) em comparação com a posição do MAX. O sistema também está com uma leve inclinação para Leste por causa da bigorna como pode ser visto nessa seção vertical.

Assim, as posições relativas do centro de massa (CM) e da refletividade máxima (MAX) fornecem uma ideia da distribuição interna da célula de tempestade, que no caso da Figura 5.1ab, a célula tem uma leve inclinação para Norte, bigorna para Leste e centro de gravidade ligeiramente acima da altitude do ponto de máxima refletividade.

Figura 5.1 - Classificação da célula pelo Método da Expansão em 3D.



CAPPI de 4 km de altitude (a) e seção vertical (b). Os símbolos (⊗) em preto e branco indicam a posição relativa do pixel de valor máximo e do centro de massa em termos de refletividade.

Fonte: Produção do autor.

### 5.1.2 Tempestade multicelular

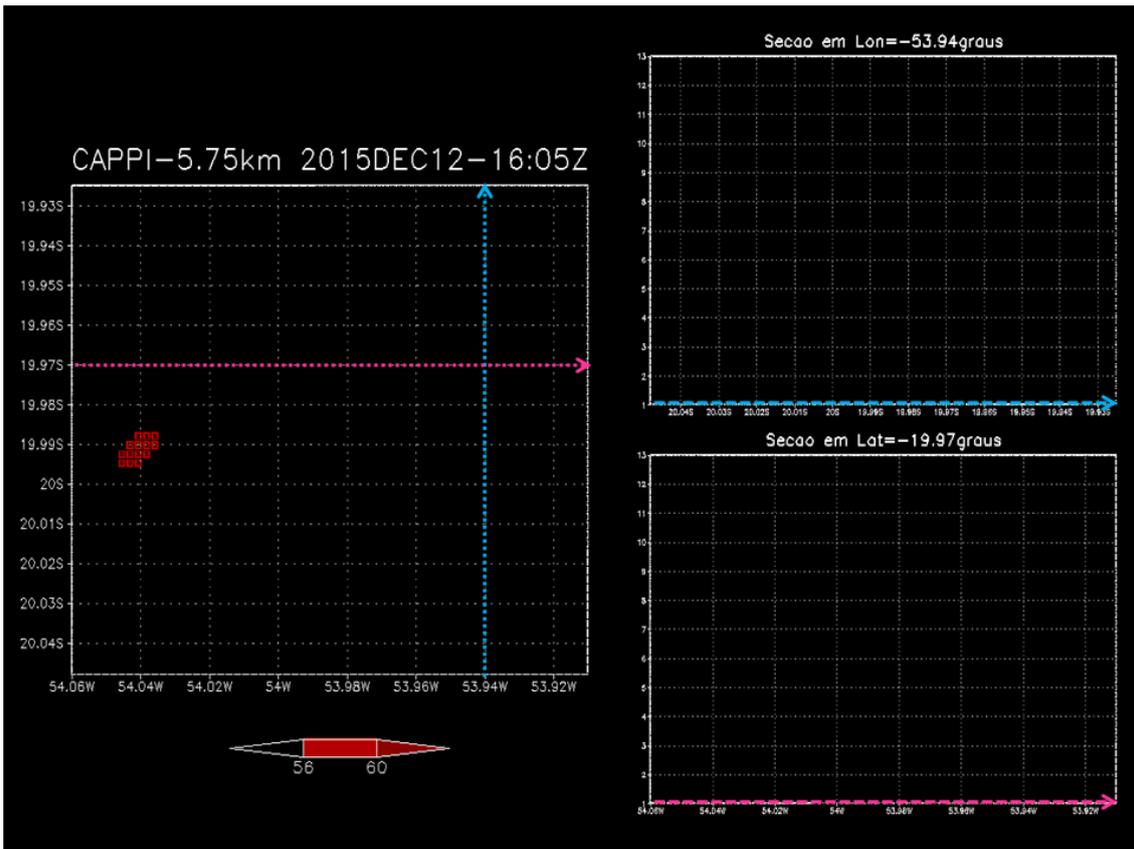
Em uma tempestade unicelular, a metodologia de classificação é simples de ser aplicada. Entretanto, numa tempestade multicelular, as células podem estar dividindo as mesmas fronteiras além de apresentar diferentes núcleos de máximos dificultando a classificação das mesmas. Nesta condição de múltiplas células agrupadas é onde a metodologia do 3DEM se destaca classificando as células de tempestade simultaneamente.

Nas figuras 5.2 a 5.6 são apresentadas uma sequência do CAPPI de 5,75 km de altitude do dia 12/12/2011, às 16:05Z. A máxima refletividade dentro desse volume cartesiano é de 56,7 dBZ e a sequência apresentará três células de tempestade.

A varredura da refletividade se inicia no intervalo entre 56 e 57 dBZ (Figura 5.2), uma vez que o máximo de refletividade nesse exemplo é de 56,7 dBZ. A classificação e a expansão do 3DEM se inicia com o elemento de volume máximo e verifica cada elemento de volume em torno do mesmo. Essa expansão e classificação obedece ao critério do gradiente de refletividade ser negativo na expansão ou até atingir o valor mínimo de 20 dBZ. Caso contrário, a classificação é interrompida. Na Figura 5.2, as setas pontilhadas representam as seções verticais na longitude (azul) e na latitude (rosa) projetadas nos painéis à direita superior e inferior, respectivamente. Os primeiros elementos de volume classificados estão marcados na cor vermelha e possuem a etiqueta  $n = 2$ .

Uma vez classificado todos os elementos no intervalo entre 56 e 57 dBZ, a próxima varredura abrange o intervalo entre 55 e 56 dBZ e assim sucessivamente. Todos os elementos serão classificados obedecendo a ordem de identificação das máximas como foi ilustrado na Figura 4.1.

Figura 5.2 - 3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 56 e 57 dBZ.

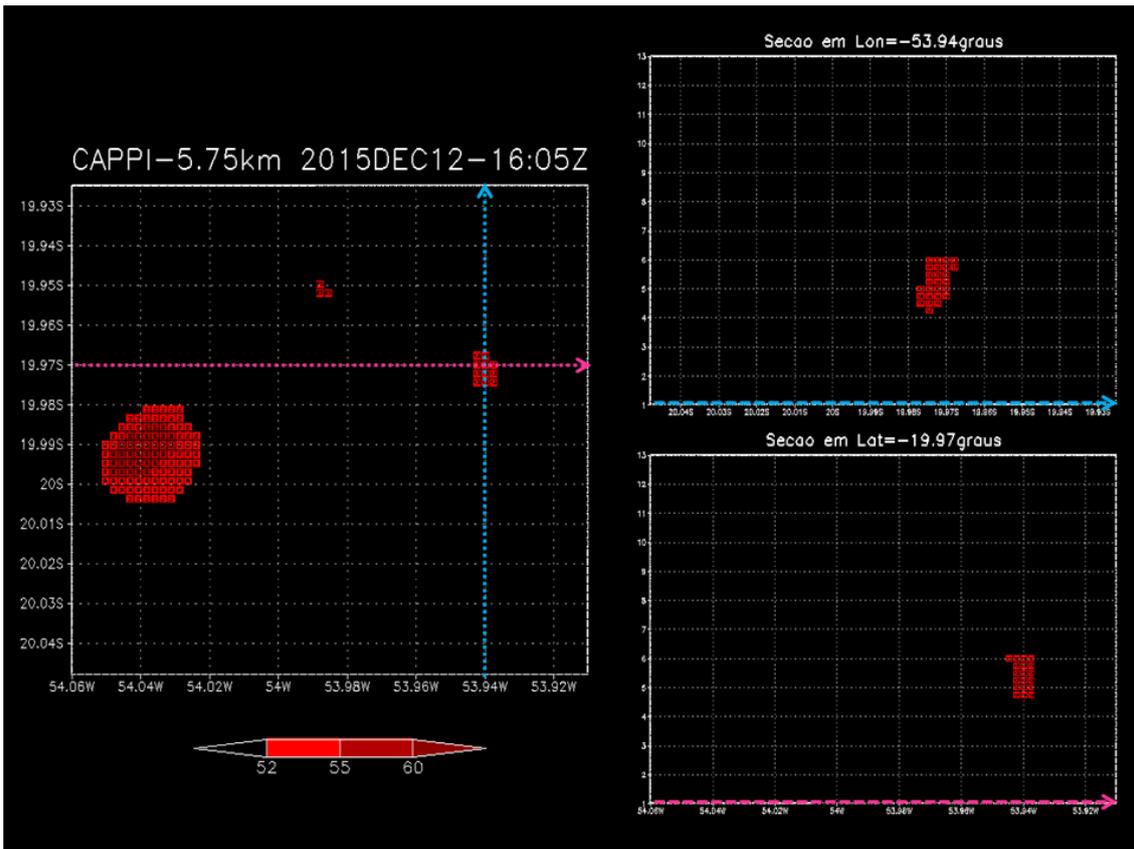


As seções verticais foram aplicadas na longitude e na latitude demarcadas pelas setas pontilhadas em azul e rosa, respectivamente. Em vermelho são os primeiros elementos de volume classificados.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.3, o intervalo da classificação está entre 52 e 53 dBZ e já surgem mais dois núcleos no CAPPI dessa altitude, isto é, já é possível identificar três grupos de elementos de volumes classificados. Nas seções verticais observa-se que a célula mais a direita possui parte do núcleo mais intenso (valor máximo de 53,4 dBZ) entre as altitudes de 4 e 6 km de altitude. Essa célula de tempestade possui etiqueta  $n = 13$ . A célula posicionada no centro possui máxima refletividade de 52,5 dBZ e etiqueta  $n = 20$ .

Figura 5.3 - 3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 52 e 53 dBZ.

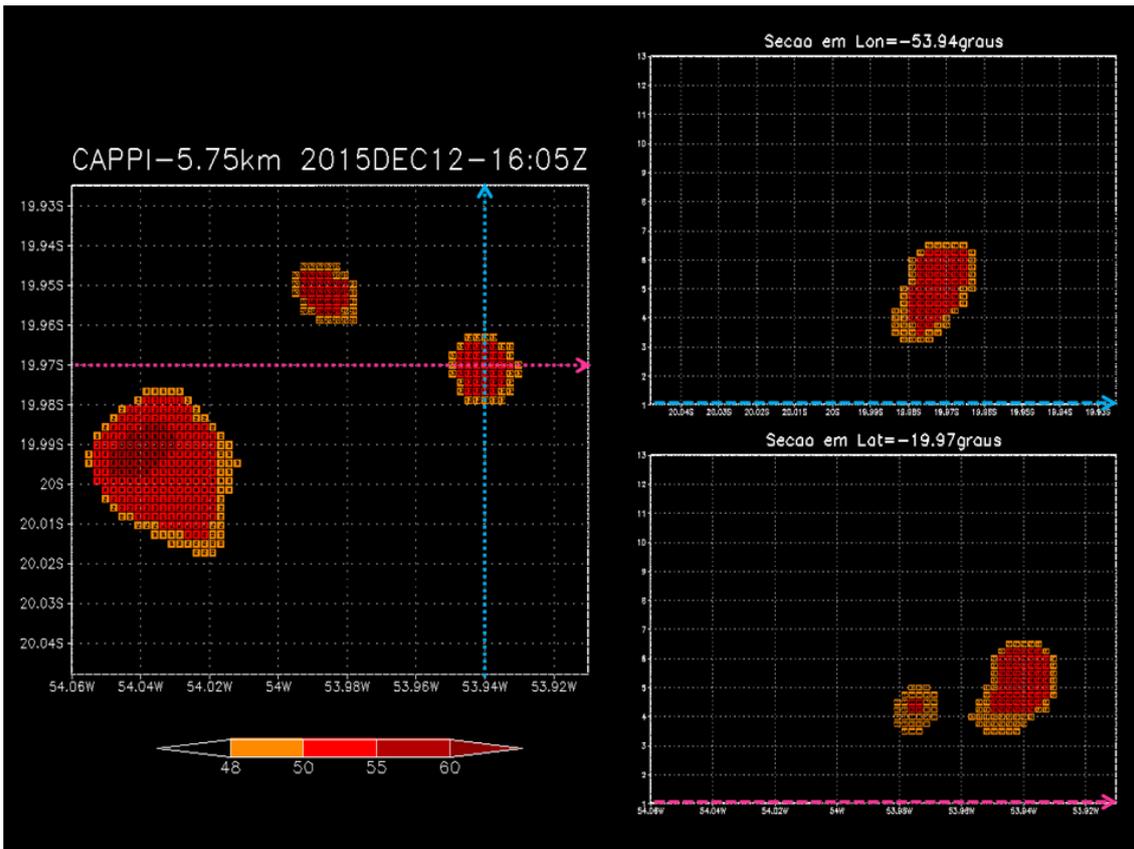


Idem a Figura 5.2.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.4, o intervalo de classificação agora é entre 48 e 49 dBZ de refletividade. Os elementos de volume com refletividades maiores que esse intervalo já foram classificados. Nessa classificação entre 48 e 49 dBZ já surge na seção vertical realizada na latitude  $-19,97^{\circ}$  (seta rosa), a célula central ou  $n = 20$ .

Figura 5.4 - 3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 48 e 49 dBZ.



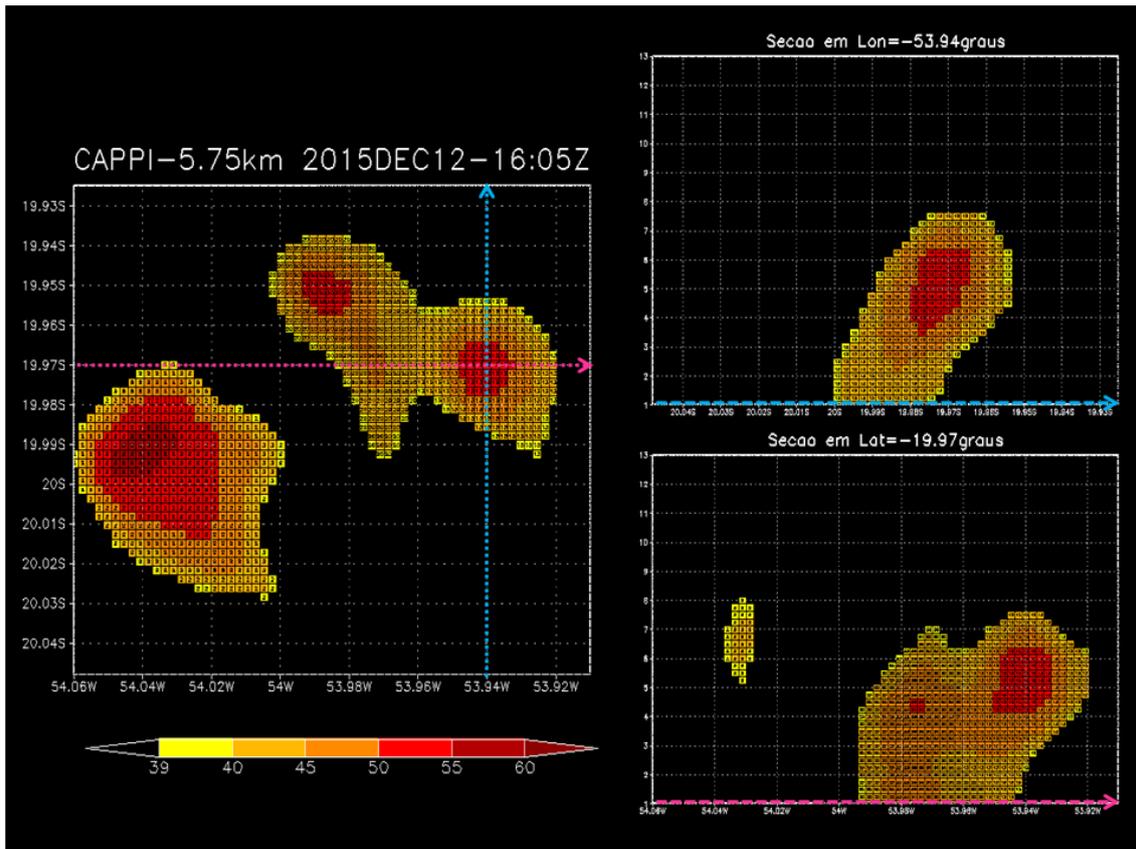
Idem a Figura 5.2.

Fonte: Produção do autor.

A expansão para a classificação entre as refletividades 39 e 40 dBZ mostra as fronteiras em colisão entre as células  $n = 20$  e  $n = 13$  e a intensidade desse valor de refletividade de ambas chegam a superfície, como pode ser observada na Figura 5.5.

A célula  $n = 2$  já mostra uma parte do seu volume nesse intervalo de refletividade na seção vertical da latitude entre 4 e 7 km de altitude (Figura 5.5).

Figura 5.5 - 3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 39 e 40 dBZ.



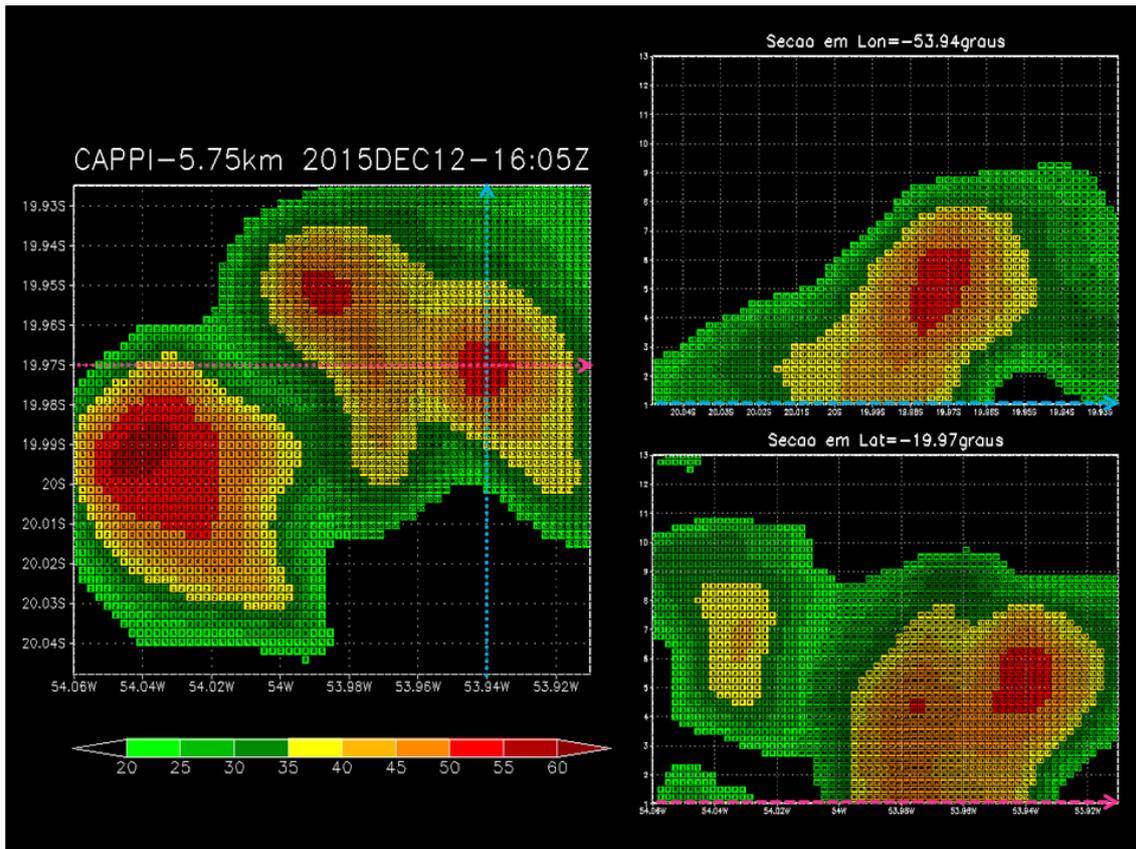
Idem a Figura 5.2.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.6 apresenta o término da classificação varrendo o último intervalo de refletividade entre 20 e 21 dBZ, onde os elementos de volume com valor mínimo de 20 dBZ compõem a borda mais externa da célula de tempestade.

Nesse sistema multicelular, a metodologia do 3DEM classificou as três células de tempestade simultaneamente nas três dimensões. A borda ou o limite das células é resguardada na metodologia do 3DEM, pois a expansão da classificação para a definição da fronteira é feita por ambos os lados das células em questão em direção a um “meio termo”, onde o encontro da expansão define a própria fronteira entre as células de tempestade.

Figura 5.6 - 3DEM aplicado ao intervalo de refletividade entre 20 e 21 dBZ.

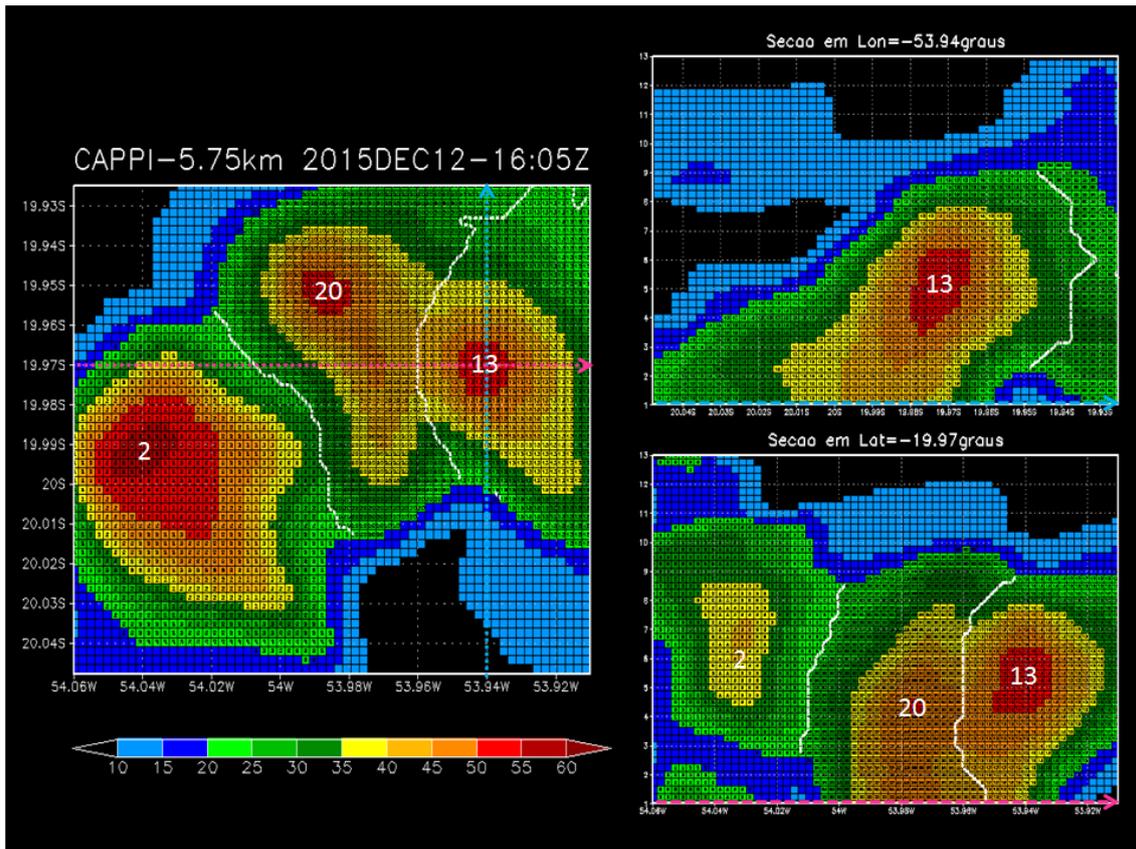


Idem a Figura 5.2.

Fonte: Produção do autor.

Após a classificação das células de tempestade, o corpo de cada célula é composta por todos os elementos de volume que possuem a mesma etiqueta de classificação. O resultado final da classificação pelo 3DEM é apresentado na Figura 5.7, onde as linhas brancas indicam as fronteiras entre as células assim como nas seções verticais.

Figura 5.7 - Resultado da classificação de um sistema multicelular pelo 3DEM.



As linhas brancas indicam as fronteiras entre as células e os números a identificação de cada célula de tempestade.

Fonte: Produção do autor.

Se o CAPPI fosse realizado em torno de 3 km de altitude, as células 20 e 13 estariam com as fronteiras dentro do limiar de 35 dBZ como pode ser observado na Figura 5.7. A classificação de células por limiar como no TITAN representaria essas duas células como uma única célula e o centro de massa estaria próxima à célula 13. Observando a intensidade dessas células nas seções verticais e no CAPPI de 57,5 km de altitude, a estrutura das células mostra que as duas células está em estágio diferente em seu ciclo de vida. A Célula 13 está em plena atividade crescendo nas camadas médias com refletividade de valores altos concentradas entre 3 e 7 km de altitude. Outra informação que pode ser extraída é que o corpo da Célula 13 apresenta inclinação para Norte (seção na longitude da Figura 5.7) indicando forte atividade convectiva. A Célula 20 apresenta o núcleo de refletividade máxima em torno de 4,5 km de altitude, porém refletividades da ordem de 40 a 45 dBZ são observados a superfície

indicando início do estágio de dissipação.

Entre as células 2, 20 e 13, a Célula 2 é a que tem maior atividade convectiva, uma vez que apresenta o núcleo de maior refletividade (56,7 dBZ a 5,75 km de altitude). Uma hipótese é que a atividade de outras células de tempestade gerem frentes de rajada que ajudam no levantamento de massa, gerando correntes ascendentes intenso que advectam vapor d'água e calor (Figura 5.7).

Falhas na metodologia 3DEM foram observadas em regiões de borda da varredura onde o sistema começa a entrar no campo de observação do radar e também elementos de alto valor em termos de refletividade provenientes de ruídos não eliminados no processo de filtragem. Outro fator importante que pode de certa forma comprometer o método é a cobertura deficiente formando espaço entre elevações de varreduras. Como filtragem de ruídos, o método limita um mínimo de 250 elementos como célula de tamanho inicial que corresponde a um volume de 3,9 km<sup>3</sup> ou um cubo de aresta de 1,6 km, aproximadamente. Este valor foi observado empiricamente e é o suficiente para inibir a detecção de um novo sistema em detrimento de um ruído.

A metodologia do 3DEM é simples mas se mostrou bastante eficiente na classificação de células de tempestade mesmo em um sistema multicelular, driblando as deficiências das metodologias de classificação por limiares de refletividade (DIXON; WIENER, 1993; JOHNSON et al., 1998; HAN et al., 2009). Outra vantagem do 3DEM é executar a classificação da célula em três dimensões e não construir a célula a partir de cada dimensão e ir agrupando como no caso do TITAN e SCIT como já discutido por Matthews e Trostel (2010).

## 5.2 Trajetografia

A identificação correta da célula de tempestade e as coordenadas do seu CM em tempo sucessivos é de suma importância para a rastreabilidade das posições dessa célula no tempo e estabelecer o seu ciclo de vida. O ciclo de vida de uma célula tem como base as três fases da célula de tempestade: fase cumulus ou crescimento, fase madura e fase de dissipação (BROWNING, 1986). As células que não são corretamente identificadas, principalmente no tempo sucessivo podem resultar em rastreamentos errados e em informações de ciclos de vida incorretos como já discutido por Lakshmanan e Smith (2010).

### 5.2.1 Trajetória do Ciclo de Vida da Célula

Com a identificação das células em tempos sucessivos pelo 3DEM, os multivetores são calculados (direção e distância Euclidiana em 3D) entre as células no instante  $t_1$  e as células no instante  $t_2$ . A informação da direção de deslocamento do sistemas precipitantes assim como a distância máxima entre os instantes é necessária para selecionar os multivetores e conectar a célula que estava posicionada no instante  $t_1$  com a posicionada no instante  $t_2$ . Essa conexão entre diferentes instantes da posição da célula define a sua trajetória que pode ser expressa em termo do vetor deslocamento.

A direção de deslocamento inicial é fornecida pelo UWT e, na ausência desta, o VVP. A distância máxima de deslocamento permitido das células é proporcional a velocidade máxima dado pelo VVP, ou seja,  $VVP_{max} * 60 * 5$  que é a distância percorrida na velocidade máxima do VVP em 5 minutos, mesma frequência entre as varreduras volumétricas do radar. A variação da direção de deslocamento é em função do  $VVP_{max}$  permitindo uma flexibilização de direção de acordo com as regras apresentadas na Figura 4.4.

Essas informações baseadas no UWT e no VVP são utilizadas apenas nos instantes  $t_1$  e  $t_2$  para estabelecer o vetor deslocamento da célula. Para o instante  $t_3$ , o próprio vetor deslocamento prévio é utilizado como referência de direção e deslocamento máximo para estimar a posição da célula no instante  $t_3$  e realizar a conexão da trajetória.

Utilizando uma sequência de CAPPIS de 4 km de altitude do dia 26/10/2015, entre 15:45 e 17:10Z (figuras 5.8, de a a r), o ciclo de vida de duas células e suas trajetórias na forma de linhas são apresentadas: 1132 (azul) e 1369 (linha preta). A linha cheia

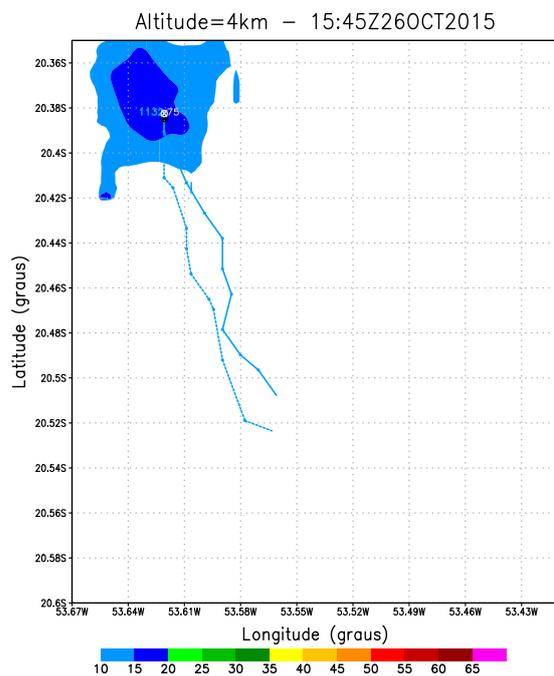
representa as localizações sucessivas do centro de massa (ponto branco) e a linha tracejada o ponto de máxima refletividade de cada célula.

A célula 1132 é inicialmente identificada no radar às 15:45Z com a máxima refletividade de 39,5 dBZ no nível de 6,5 km de altitude (Figura 5.8a). O aparecimento da célula no radar nesse nível primeiramente indica movimentos ascendente intensos que devem constituir a nuvem de cristais de gelo e graupel. O volume inicial dessa célula rastreado foi de 113,8 km<sup>3</sup> (Figura 5.9). Cinco minutos depois, o núcleo aumentou de intensidade para 50 dBZ na altitude de 5 km e também de volume para 298 km<sup>3</sup> (figuras 5.8b). Essa alimentação continua nos próximos 15 minutos (figuras 5.8c-e) mantendo a atividade mais intensa acima de 5 km de altitude com máximas de 52,9 (15:55Z); 55,3 (16Z) e 51,9 dBZ (16:05Z) e volumes de 416,1; 500,9 e 590,9 km<sup>3</sup>, respectivamente (Figura 5.9).

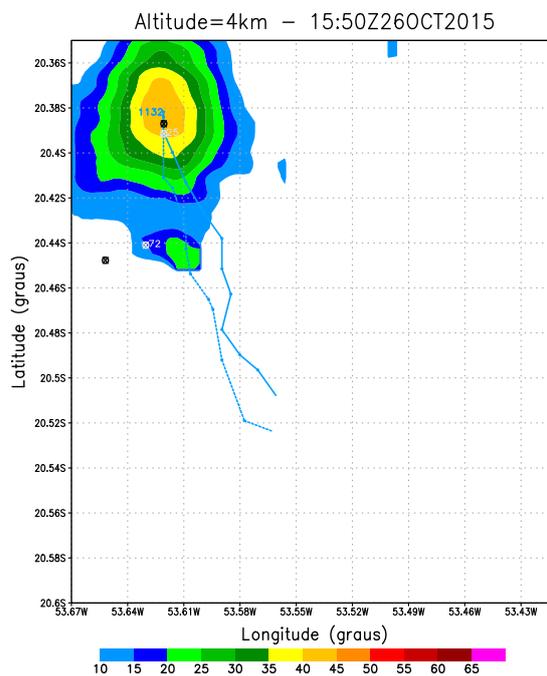
Após um certo tempo de movimento ascendente intenso, a sustentação da massa nos níveis médios por esse fluxo ascendente fica instável vindo a colapso, ou seja, é a fase da precipitação de gotas grandes e as vezes granizo. Nessa fase também é gerada a frente de rajada cujo papel é fundamental para elevação da umidade próxima à superfície e este fornecerá o vapor d'água necessário para a continuidade do sistema precipitante.

Na Figura 5.8e, às 16:05Z, um pequeno núcleo começa a surgir a nordeste da célula, porém o crescimento não se concretiza nas imagens sucessivas. Às 16:10Z (Figura 5.8f), o volume da célula 1132 atinge o máximo (610,5 km<sup>3</sup>) com o centro de massa em 4,8 km de altitude, indicando a maturidade e caminhando para o início da fase de dissipação do sistema nas próximas imagens (figuras 5.8f-l). Os parâmetros do ciclo de vida da célula 1132 estão descritos nos gráficos da Figura 5.9a-c.

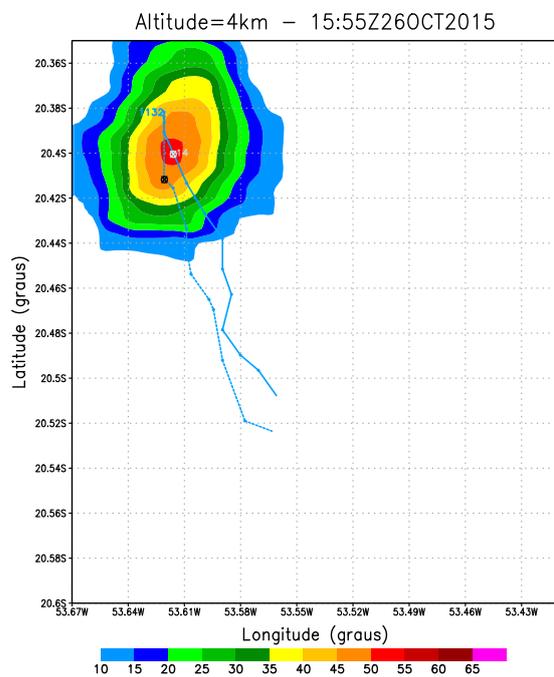
Figura 5.8 - Trajetografia de duas células no dia 26/10/2015: 15:45 à 16:25Z.



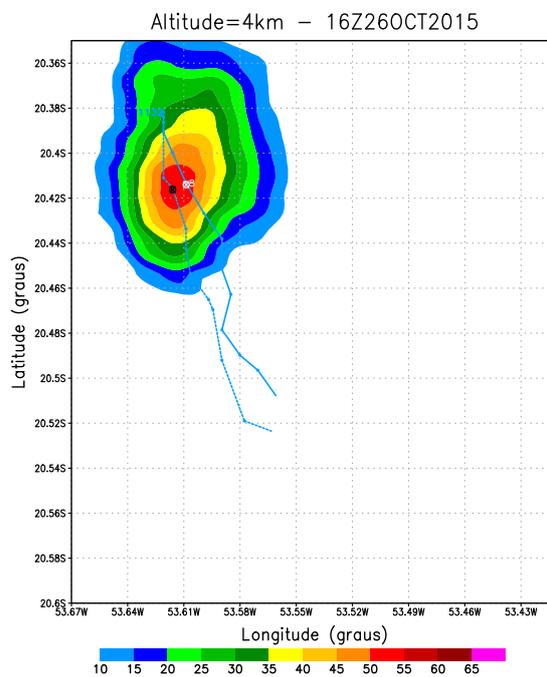
(a) 20151026-1545Z



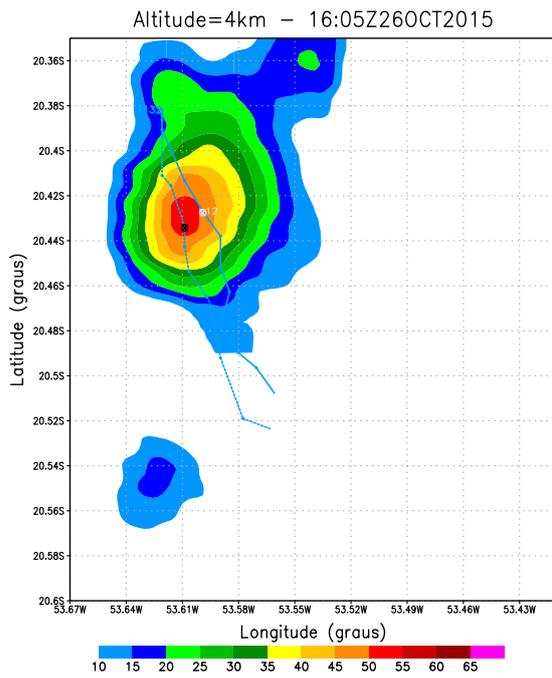
(b) 20151026-1550Z



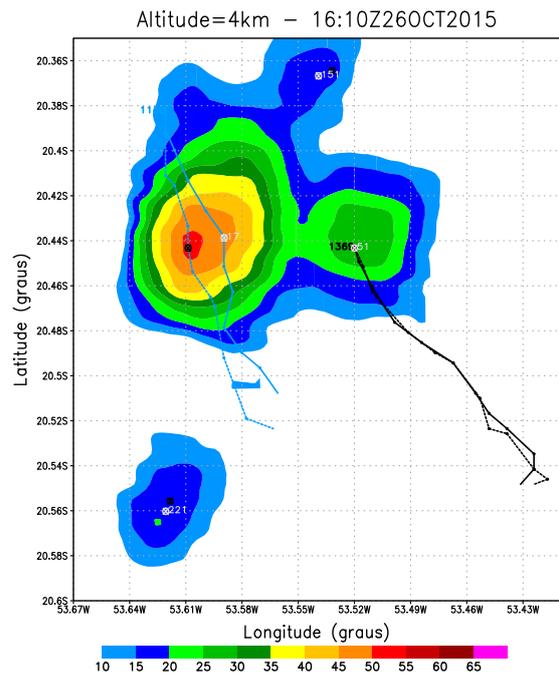
(c) 20151026-1555Z



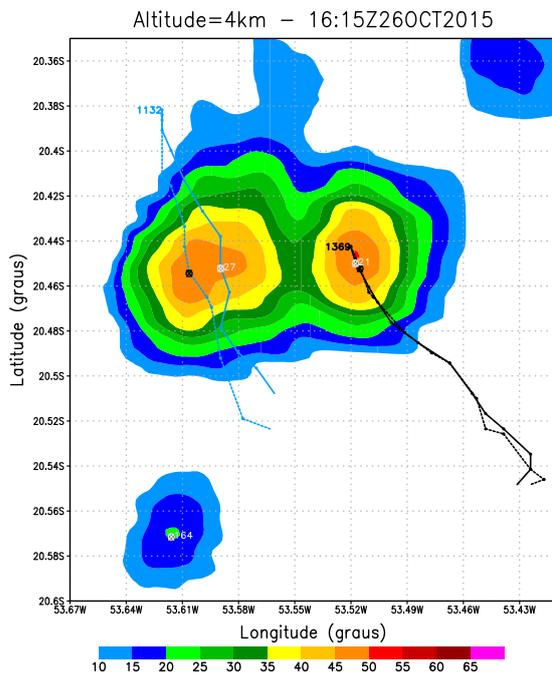
(d) 20151026-1600Z



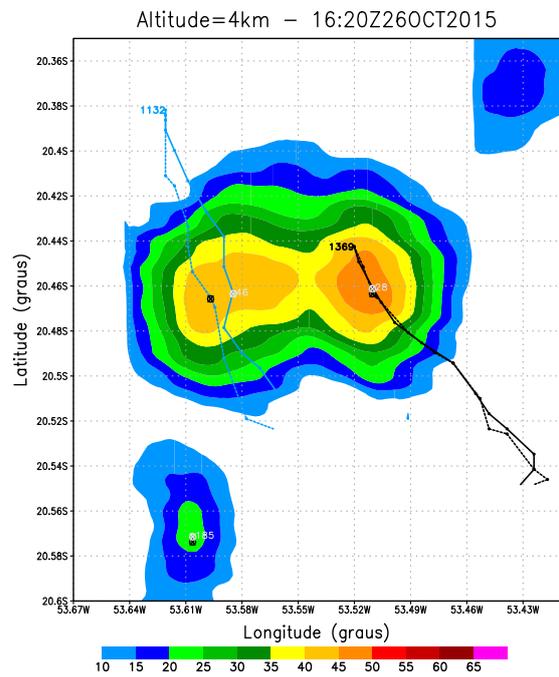
(e) 20151026-1605Z



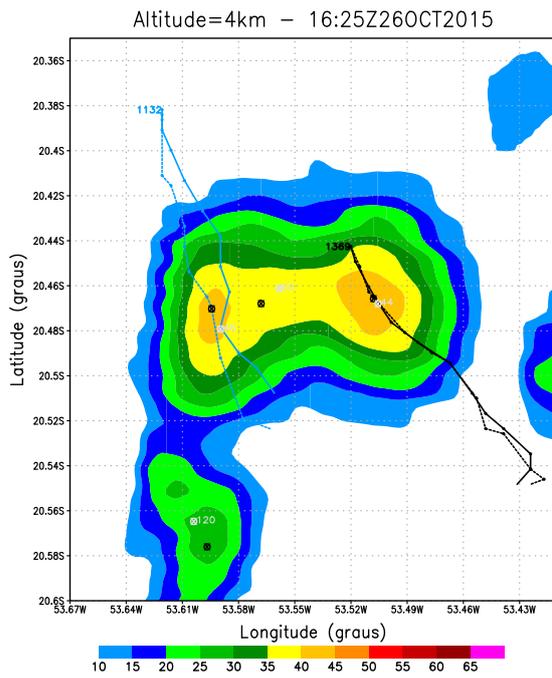
(f) 20151026-1610Z



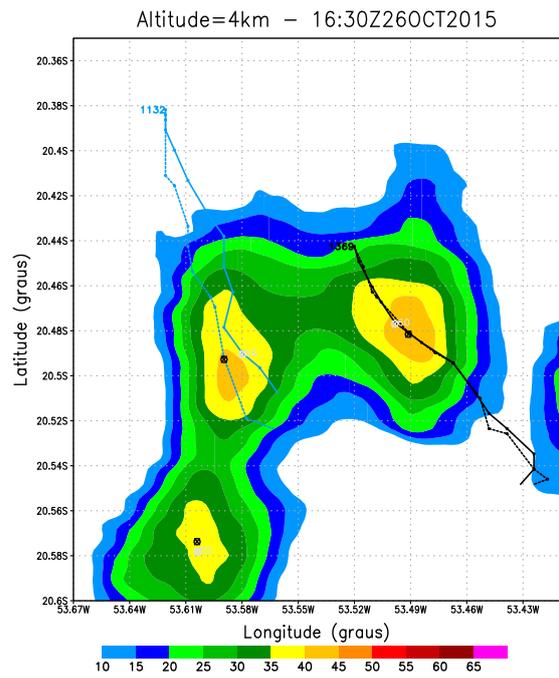
(g) 20151026-1615Z



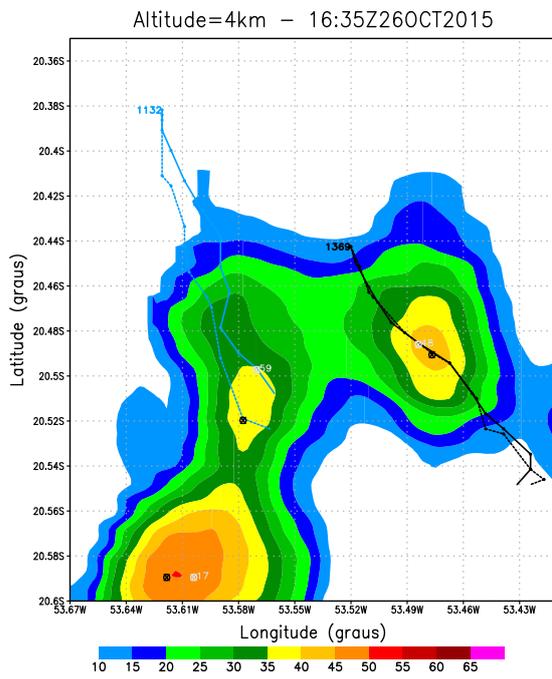
(h) 20151026-1620Z



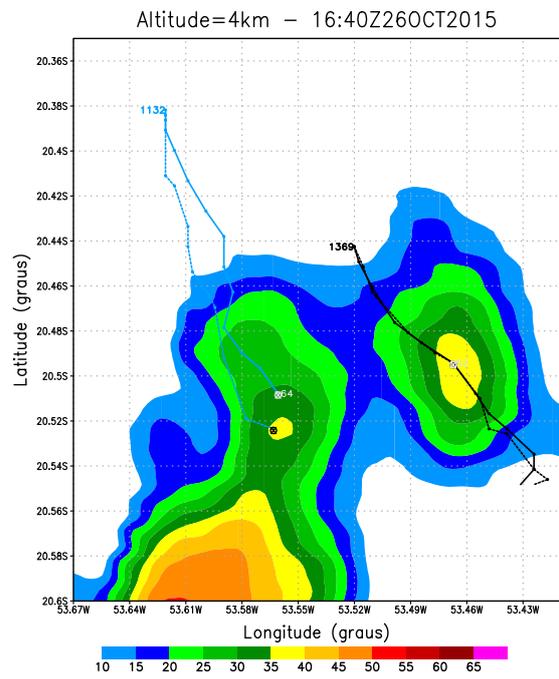
(i) 20151026-1625Z



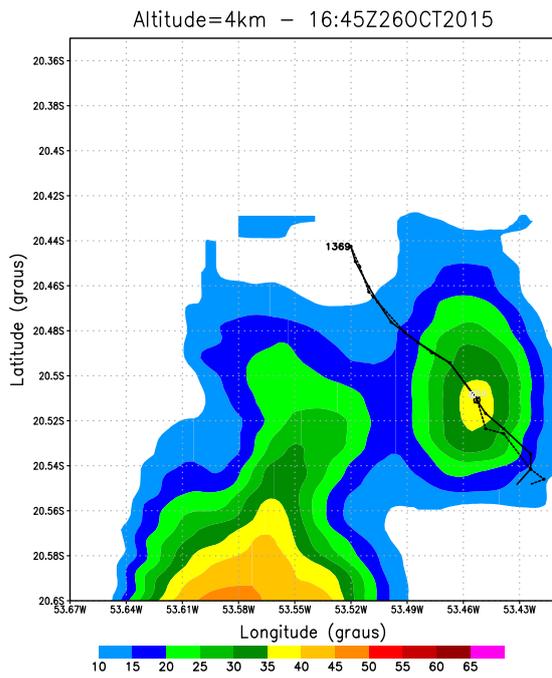
(j) 20151026-1630Z



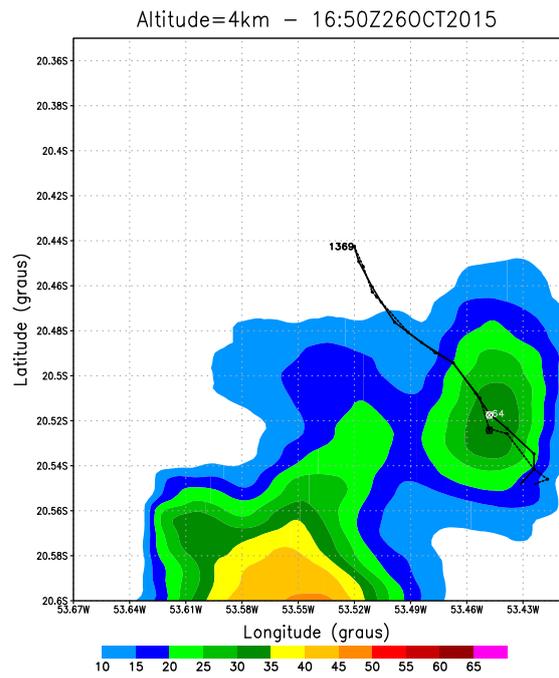
(k) 20151026-1635Z



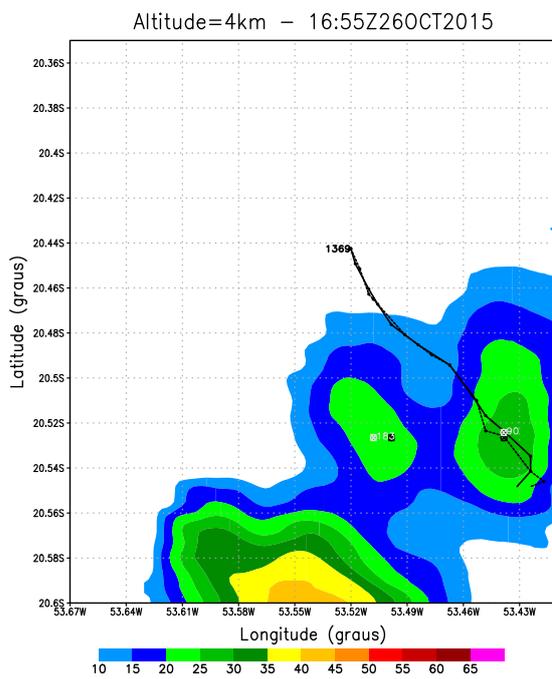
(l) 20151026-1640Z



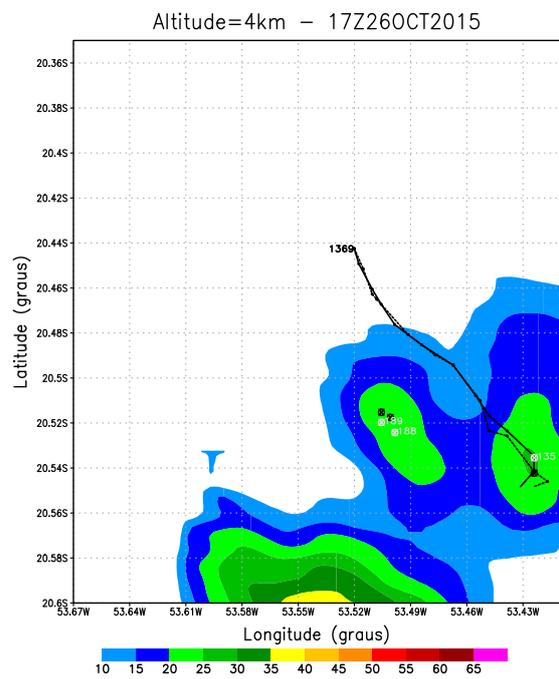
(m) 20151026-1645Z



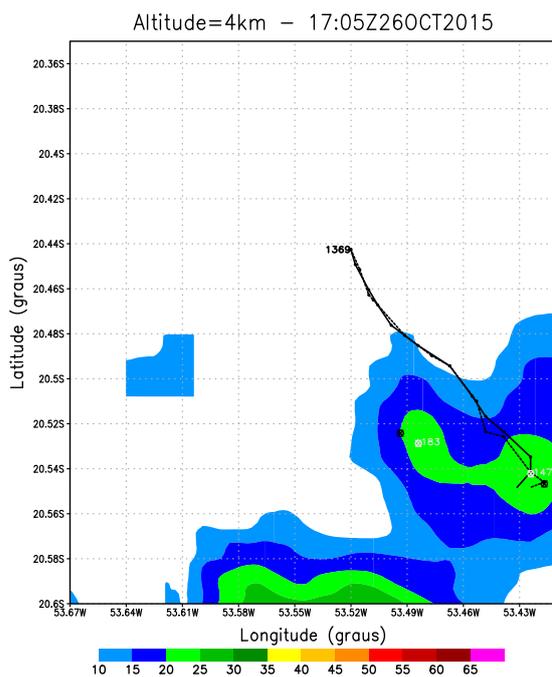
(n) 20151026-1650Z



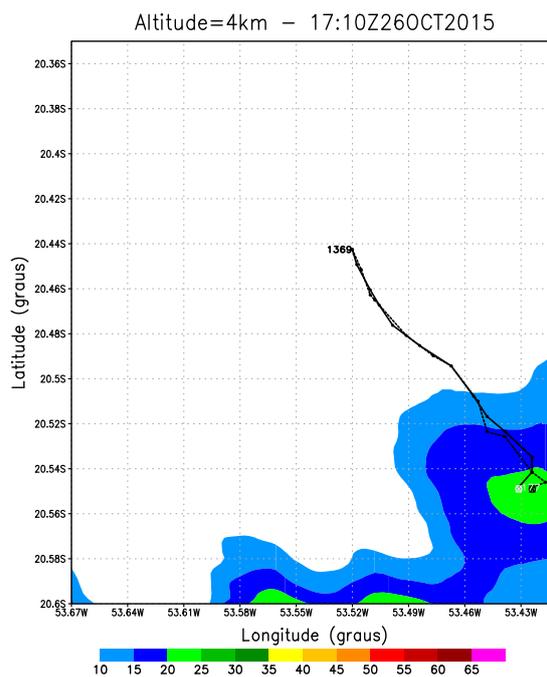
(o) 20151026-1655Z



(p) 20151026-1700Z



(q) 20151026-1705Z



(r) 20151026-1710Z

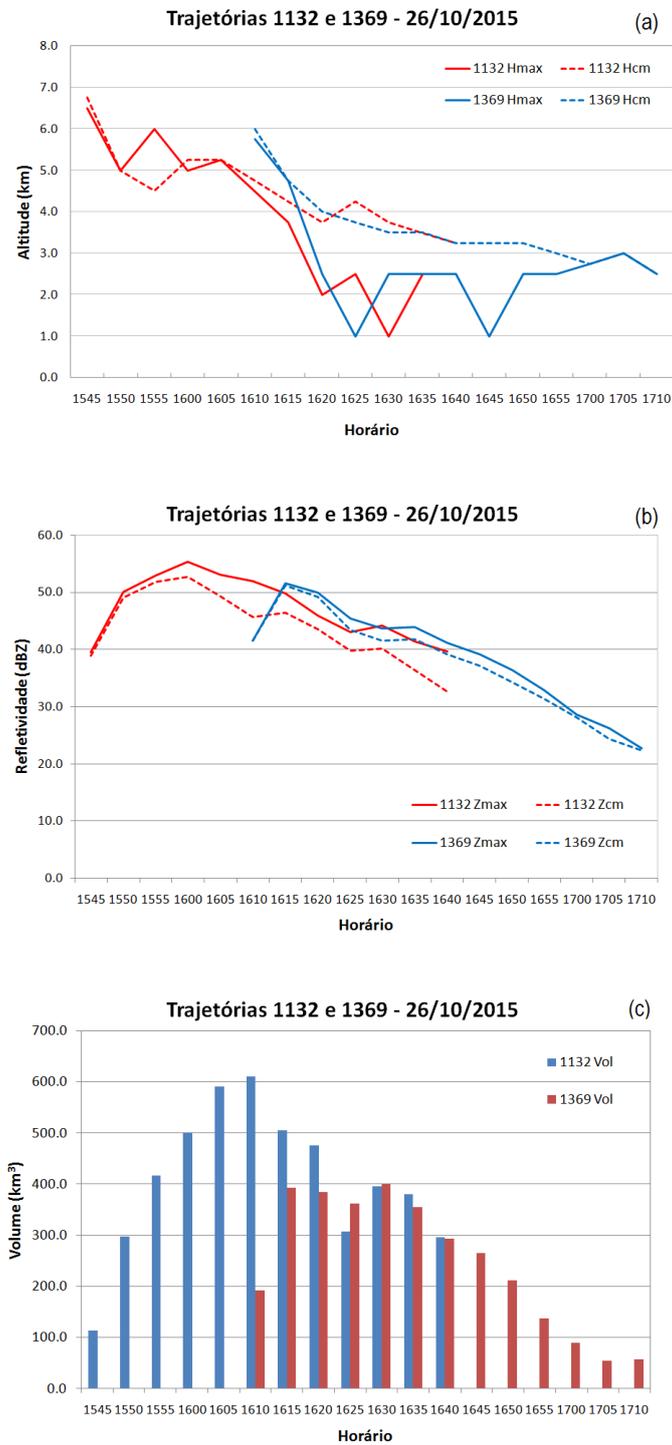
A posição de máxima refletividade e o centro de massa são indicados pelos pontos pretos e brancos. A trajetória pontilhada se refere ao máximo e a contínua ao centro de massa.

Fonte: Produção do autor.

A outra célula de número 1369 surge contígua à Leste da célula 1132 na altitude de 5,75 km e com 41,5 dBZ de máxima refletividade, com volume inicial de 191,6 km<sup>3</sup>, portanto, início mais intenso e maior volume que a célula 1132 (Figura 5.8f). Durante o ciclo de vida da célula 1369, as proximidades dos núcleos de máxima e do centro de massa observadas e assim como as proximidades das linhas indicam uma distribuição mais equilibrada da massa em torno do eixo vertical. Essa mesma analogia aplicada à trajetória da célula 1132 indica um sistema levemente inclinado para Leste.

A análise dos gráficos na Figura 5.9a-c indica que a célula 1369 teve um crescimento menor em volume e em intensidade no seu ciclo se comparada a célula 1132. O ápice da célula foi às 16:15Z com refletividade máxima de 50,6 dBZ e volume de 400 km<sup>3</sup> às 16:30Z (Figura 5.8j). A máxima refletividade, que apresentou queda constante a partir das 16:15Z corrobora a diminuição de atividade da célula (Figura 5.9b). O ciclo de vida completo da célula 1369 foi de 13 tempos, ou seja, 65 minutos e a da célula 1132 foi de 12 tempos (60 minutos).

Figura 5.9 - Variação da (a) altitude, (b) refletividade e (c) volume das células durante as trajetórias.



As cores azul e vermelha representam as trajetórias das células 1132 e 1369, respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

A metodologia usada nesse trabalho permitiu verificar que a classificação e acompanhamento da evolução das duas células analisadas às 16:20Z (Figura 5.8h), estão bem definidas com os pontos de máxima refletividade em cada extremidade. Esse resultado mostra uma diferença muito grande dos resultados obtidos nos algoritmos de classificação de célula, que utilizam uma abordagem bidimensional e apenas um limiar de refletividade (por exemplo, 35 dBZ) como o TITAN. Nesses algoritmos tradicionais a classificação obtida representaria apenas uma célula e o centro de massa seria em algum ponto entre as máximas das células. Portanto, nos algoritmos atuais, a descrição da dinâmica das nuvens perde toda a capacidade de se analisar o interior de uma nuvem, pois a definição de um limiar fixo de classificação impede a observação do interior dessa nuvem em uma micro escala. Portanto, o uso a abordagem tridimensional, que considera cada *bin* iluminado pelo radar, como feito aqui nesse trabalho, representa a quebra de um paradigma que vem sendo mantido nos últimos 50 anos. Essa metodologia de estabelecer limiares fixos é a maior fonte de erro para a classificação de células de tempestades. Isso impede a identificação do centro de massa corretamente, dificultando a inferência da trajetória da célula e limitando a realização de um nowcasting mais preciso e eficaz.

### 5.2.2 Influência do UWT e do VVP na trajetória

O uso de radar meteorológico permite identificar o momento em que uma célula é formada e inicia seu ciclo de vida. A partir desse momento, a dinâmica dessa célula fará com que ela siga seu ciclo de vida, e na maioria dos casos, a célula seguirá uma trajetória imposta pelos parâmetros físicos envolvidos nesse processo dinâmico da atmosfera. Para efeitos de previsibilidade e nowcasting, após detectar o momento de nascimento de uma célula convectiva, é necessário prever para onde o centro de massa dessa célula irá se deslocar. Portanto, é necessário estabelecer um critério para se prever o deslocamento desse centro de massa no instante futuro.

Na técnica do TRACE3D, Handwerker (2002) utilizou o VVP como direção inicial de deslocamento da célula de tempestade. A desvantagem é que essa estimativa do vento é baseada em dados num cilindro de raio de 20 km em torno do radar que não necessariamente é representativa em todo o domínio de observação do radar.

Essa pesquisa propôs e testou uma abordagem nunca utilizada nos algoritmos tradicionais desenvolvidos nas últimas décadas que é o UWT. O UWT é o vento horizontal calculado em camadas em diferentes altitudes e muito mais representativa quando o vento varia dentro do domínio do radar. A dedução do UWT está descrito na Metodologia do presente trabalho. A desvantagem do UWT é que este parâmetro é mais

sensível a presença de ruídos como as de céu claro gerando valores espúrios. Outra desvantagem é a sensibilidade para valores muito pequenos de velocidade radial. A grande vantagem é a grande densidade de dados o que permite descrever com maior precisão a variabilidade do vento em todo o domínio de varredura do radar.

Nas imagens da Figura 5.10a-h (CAPPI de 3 km) mostram um trajetória de uma célula num ambiente em que o UWT (vetor roxo) e o VVP (vetor preto) que, em alguns momentos estão os sentidos praticamente oposto nos horários de 17:50 e 18Z do dia 29/12/2016 (figuras 5.10d e f).

O UWT é mais sensível a erros do que o VVP, o VVP tem maior assertividade próximo ao radar devido a sua metodologia de cálculo (WALDTEUFEL; CORBIN, 1979; PERSSON; ANDERSON, 1987). Assim, em situações que os sistemas está em desacordo com o VVP, o UWT é essencial como primeira opção de direção para estabelecer o vetor deslocamento.

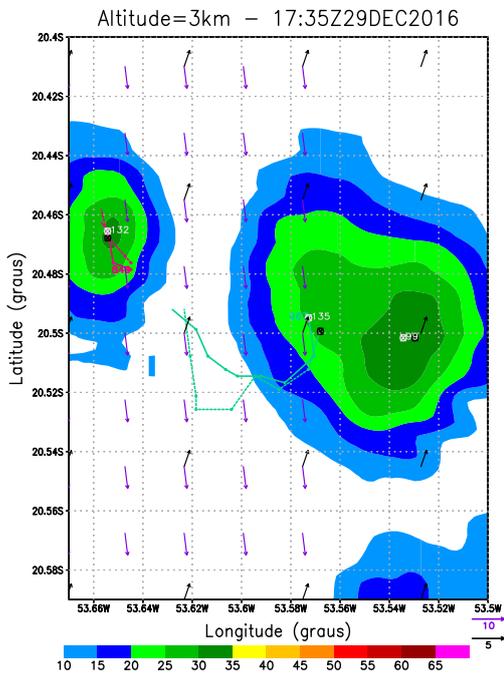
Na Figura 5.10a, às 17:35Z surge um segundo núcleo (a oeste da maior célula) identificado pelo ponto preto que se intensifica na imagem seguinte e o vetor deslocamento ou parte da trajetória é estabelecida para sul. Às 17:45Z a célula começa a se deslocar para oeste (figuras 5.10c e d que, onde nessa última imagem o vetor do sudoeste do UWT se opõe ao VVP, porém muito mais intenso (vide vetor de referência na base direita da Figura 5.10d). Essa disputa reflete no deslocamento sudoeste do ponto de máxima da célula, porém mantém zonal o centro de massa (Figura 5.10e). Nas próxima imagens se observa que o UWT diminui de intensidade e vai alternando para noroeste mudando a trajetória para quase norte.

Essa mudança de trajetória indica a importância do campo de vento e sua influência durante o ciclo de vida da célula. Um teste interessante para uma melhor comprovação da metodologia de rastreamento seria aplicar num campo de vento obtido pela sobreposição de dois radares Doppler.

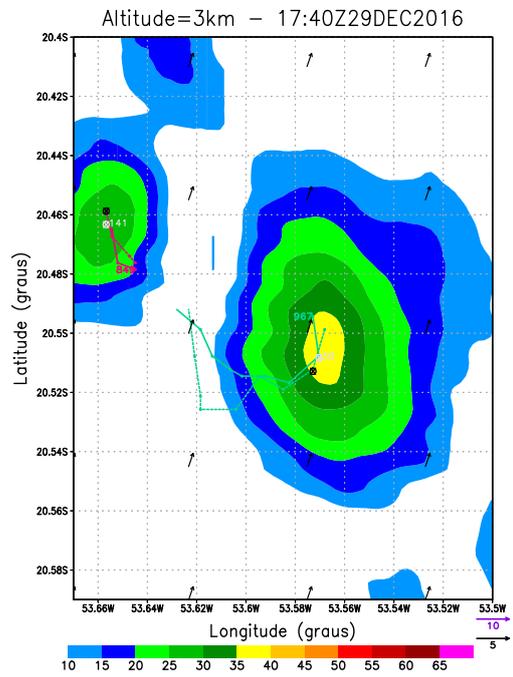
### 5.2.3 Trajetórias das células e sua Morfologia

As trajetórias executadas pelas células de tempestade seguem a zona de maior instabilidade para a sobrevivência da própria célula. Embora algumas áreas preferencias podem ser limitadas dependendo da situação sinótica vigente, como a aproximação de um frente fria, ou por obstáculos naturais, porém essas forçantes de escala sinótica não estão presentes no caso da área monitorada pelo radar de Jaraguari para os casos estudados. Para analisar as trajetórias dos sistemas precipitantes atuantes

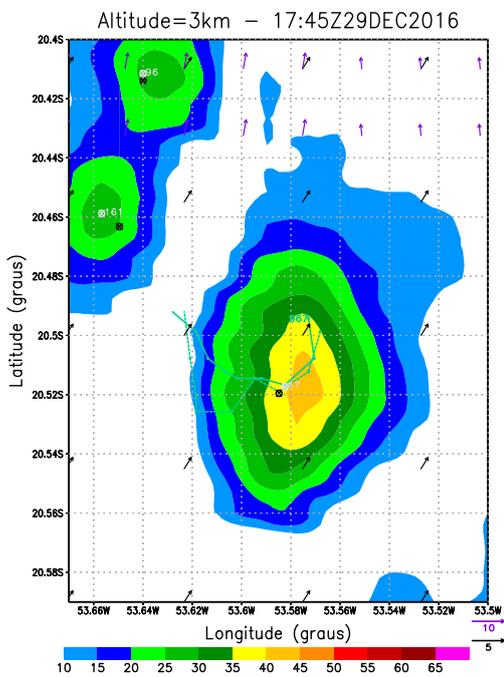
Figura 5.10 - Influência do UWT e do VVP na identificação da trajetória.



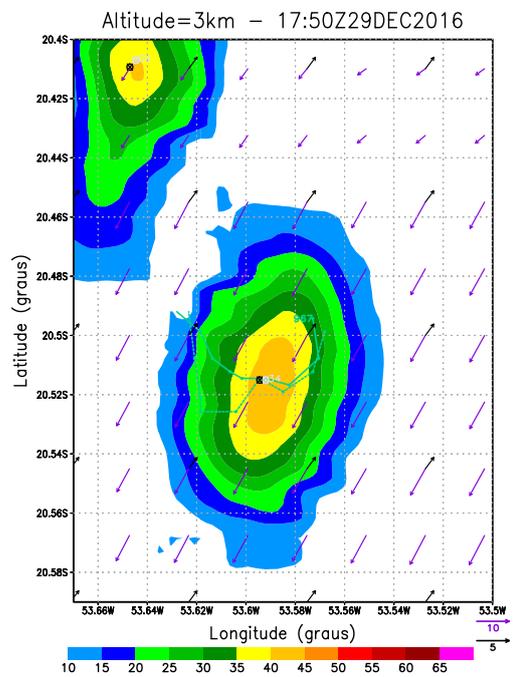
(a) 20161229-1735Z



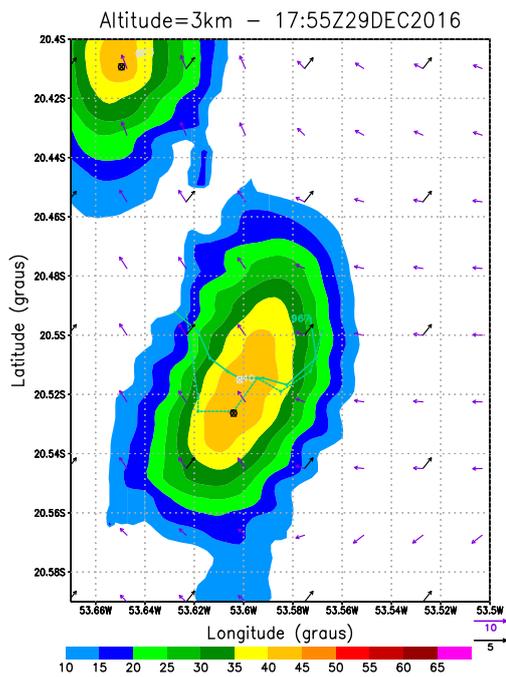
(b) 20161229-1740Z



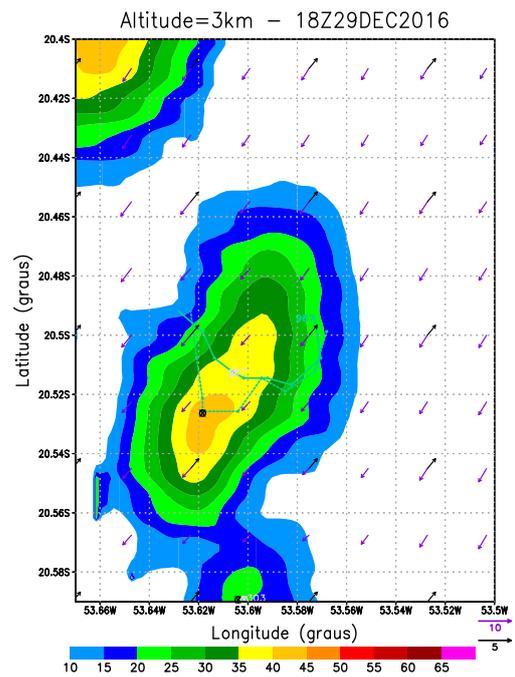
(c) 20161229-1745Z



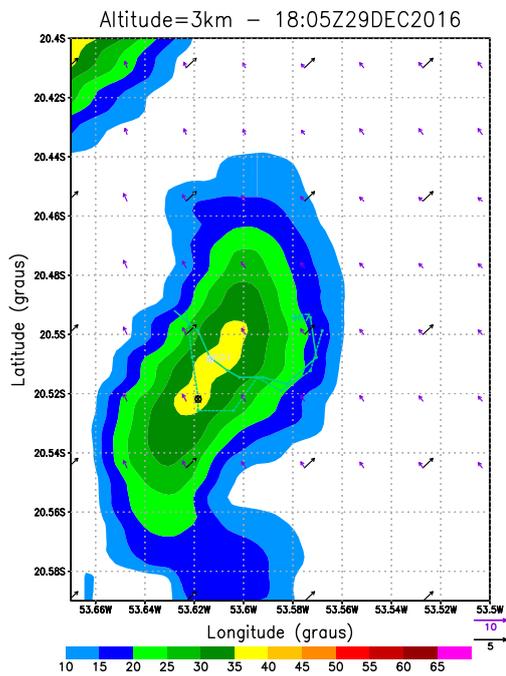
(d) 20161229-1750Z



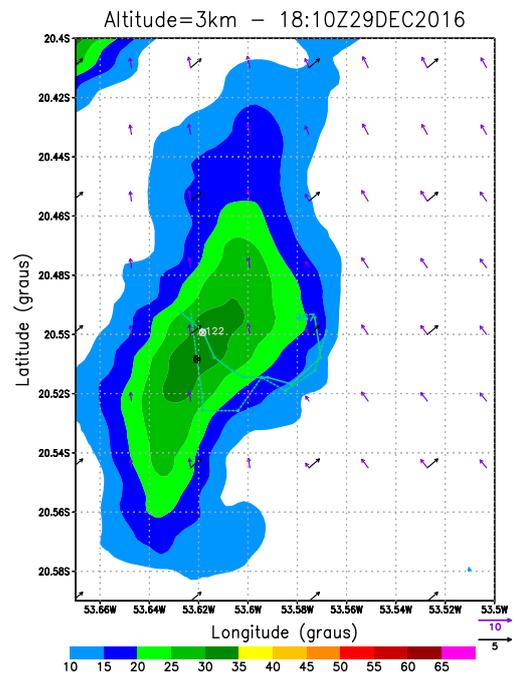
(e) 20161229-1755Z



(f) 20161229-1800Z



(g) 20161229-1805Z



(h) 20161229-1810Z

O vetor UWT (roxo) é centrado em 3km e o VVP (preto) é a média na camada entre 2 e 6 km de altitude.

Fonte: Produção do autor.

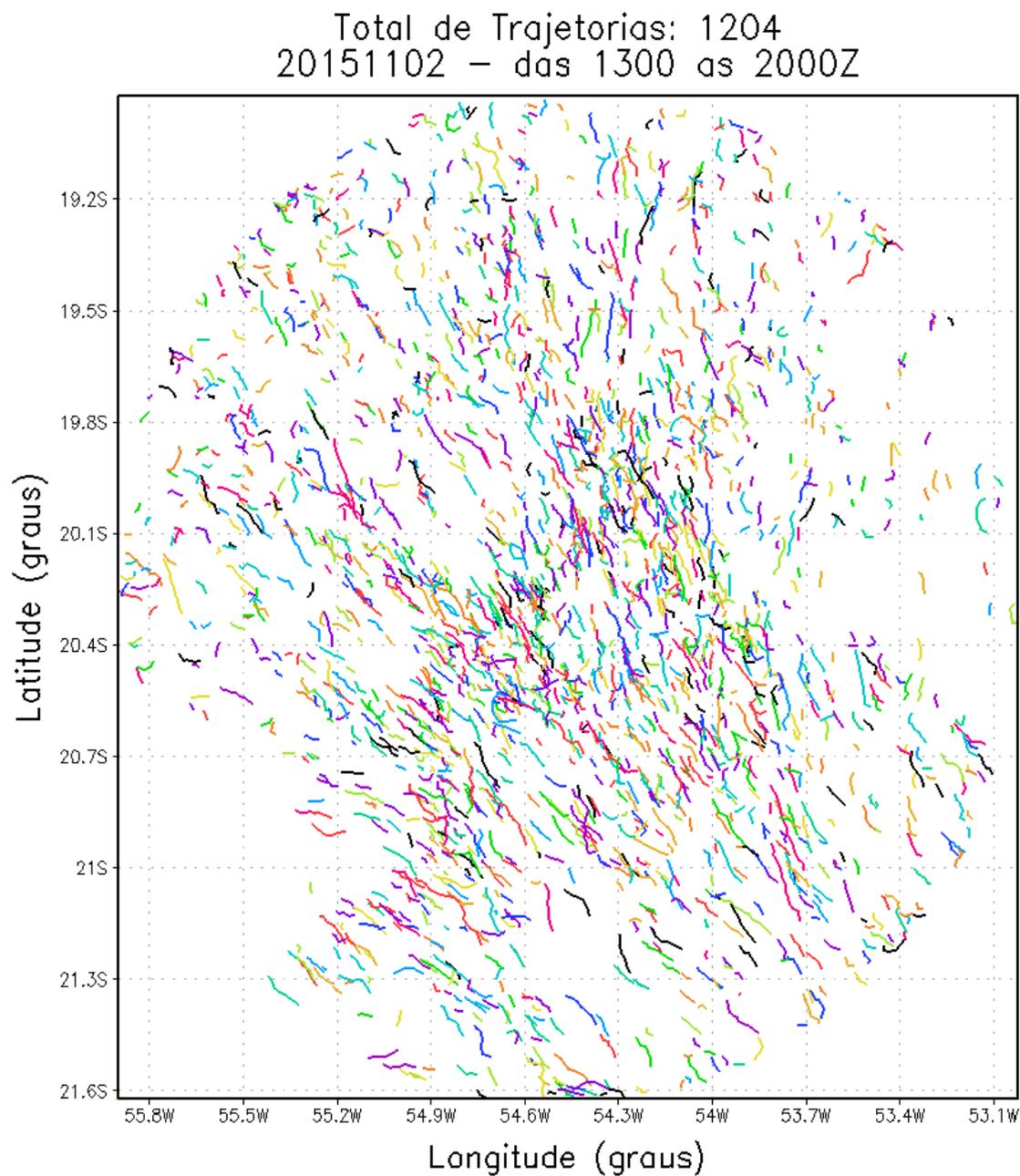
na área de cobertura do radar, dois dias de rastreamento foram selecionados, nos quais a característica do dia 02/11/2015 foi a de um grande número de células de tempestades com ciclos de vida curto a médio e, em contrapartida, no dia 25/02/2016, o predomínio foi por células com ciclos de vida mais prolongados.

Na Figura 5.11 é apresentada todas as 1204 células de tempestades rastreadas no dia 02/11/2015, das 13 às 20Z. À princípio, parece haver uma densidade maior de trajetórias sobre uma faixa estreita que se orienta de SW (20,7°S, 54,9°W) para NE (19,8°S, 54,0°W), passando próximo e ao norte do radar (centro da imagem). Essa região é constituída por uma escarpa leve variando na média de 100 para 500 metros de altitude, indicando que a topografia tem um papel considerável no desenvolvimento das células de tempestade. Para uma análise das características das células de tempestade, a Tabela 5.1 foi constituída com as seguintes informações:

- Tempo: tempo de vida da célula (minutos).
- Num: número de células rastreadas com mesma duração do ciclo de vida.
- Vel: velocidade média de deslocamento da célula (km/h).
- Hcm: altitude inicial máxima do centro de massa (km).
- Hmax: altitude inicial máxima do centro de máxima (km).
- Vol: volume máximo observado das células (km<sup>3</sup>).
- Zcm: refletividade máxima do centro de massa (dBZ).
- Zmax: refletividade máxima do centro de máxima (dBZ).
- Dir: direção média de deslocamento da célula (°).
- MDDir: diferença máxima da direção inicial entre a célula e o VVP (°).

O objetivo de se levantar esses parâmetros é fornecer uma descrição quantitativa das células de tempestade rastreadas como: qual o ciclo de vida predominante e suas características, a velocidade média de deslocamento dessas células, a altitude inicial que essas células são detectadas e qual o desvio máximo entre a direção estabelecida de deslocamento em relação à direção orientada inicialmente pelo UWT ou VVP.

Figura 5.11 - Trajetórias das células rastreadas no dia 02/11/2015 das 13 às 20Z.



As diferentes cores foram utilizadas para realçar as trajetórias das células.

Fonte: Produção do autor.

Como esperado, há um grande número de trajetórias de 15 minutos (458 células)

que são compostos por 4 coordenadas de centros de massa formando três vetores deslocamento (Tabela 5.1). A velocidade média de translação dessas célula é de 19,6 km/h o que equivale a um deslocamento médio de 4,9 km. A altitude máxima registrada do centro de massa foi 8 km com a máxima refletividade em 6,8 km, indicando a existência de uma nuvem convectiva com grande desenvolvimento vertical. O volume médio foi de 315,5 km<sup>3</sup> que pode ser interpretada como um cubo de aresta de 6,8 km. A maior refletividade registrada nessas células de 15 minutos de duração foi 59,1 dBZ. Na determinação da direção inicial, a maior diferença entre a direção efetivamente estabelecida e o dado pelo VVP foi de 142,7°, portanto, nesse caso o UWT foi utilizado para essa determinação inicial de direção da trajetória. Ou seja, a maior variação da direção é  $\Delta dir = \pm 100^\circ$ , de acordo com as regras estabelecidas na Figura 4.4, o que significa que teve uma reorientação de direção dada pelo UWT o que explica a diferença maior que 100°.

Tabela 5.1 - Parâmetros das trajetórias do dia 02/11/2015.

Tempo min	Num —	Vel (km/h)	Hcm (km)	Hmax (km)	Vol (km <sup>3</sup> )	Zcm (dBZ)	Zmax (dBZ)	Dir (°)	MDDir (°)
15	458	19,6	8,0	6,8	315,5	54,0	59,1	30,4	142,7
20	277	19,3	7,0	7,0	291,8	53,2	56,8	31,1	121,5
25	154	19,9	6,0	6,8	243,8	52,5	56,3	30,2	110,2
30	131	19,0	7,2	7,8	280,3	50,7	55,5	29,0	106,9
35	71	19,1	6,2	7,5	241,2	50,1	57,7	28,3	88,6
40	45	18,9	7,0	5,8	211,4	50,3	56,5	26,5	95,2
45	18	19,7	6,8	6,2	192,4	49,4	54,8	28,7	74,2
50	22	18,1	6,2	6,5	325,9	51,1	55,8	28,0	88,8
55	8	19,7	4,8	4,5	132,9	47,0	48,7	23,5	49,5
60	7	19,0	5,5	5,8	218,7	48,4	49,0	16,1	32,6
65	6	19,6	5,5	5,0	174,0	49,5	53,4	17,3	34,0
70	4	17,5	4,8	4,8	123,5	48,4	49,5	22,8	46,7
80	1	19,5	3,5	3,8	73,7	35,8	38,3	19,6	19,6
85	1	20,5	4,5	4,2	409,2	42,1	46,5	1,8	1,8
90	1	22,1	3,8	2,5	183,4	40,9	45,7	2,0	2,0
Total	1204								

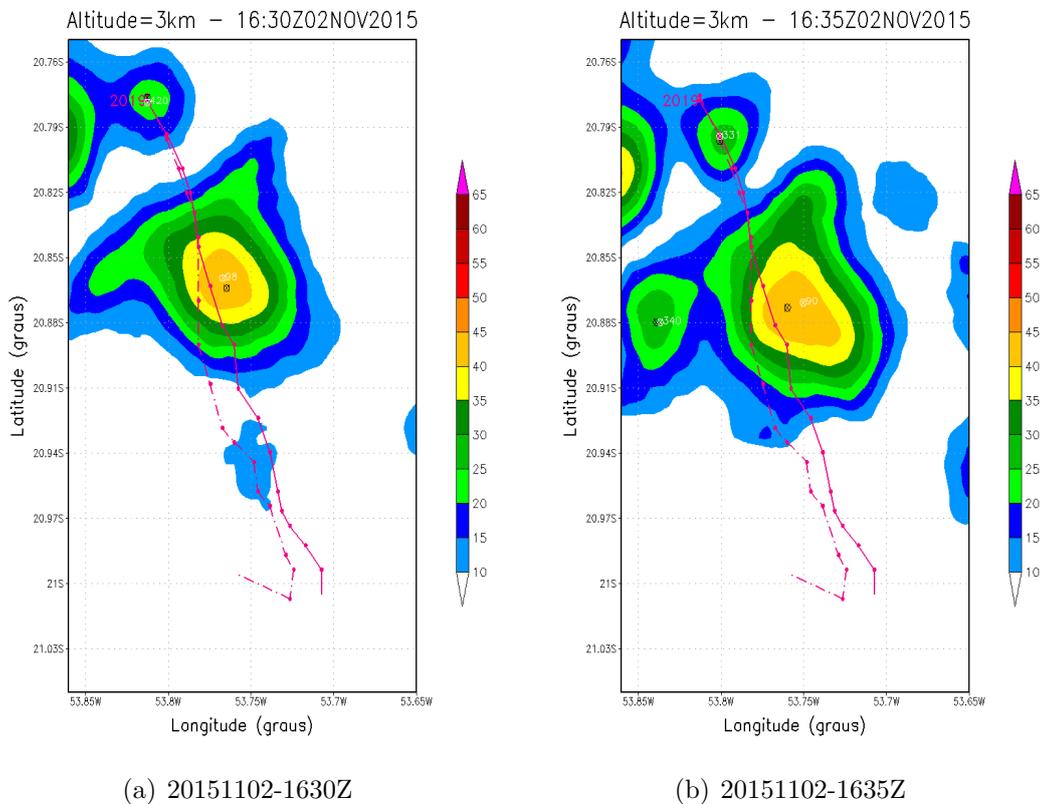
Fonte: Produção do autor.

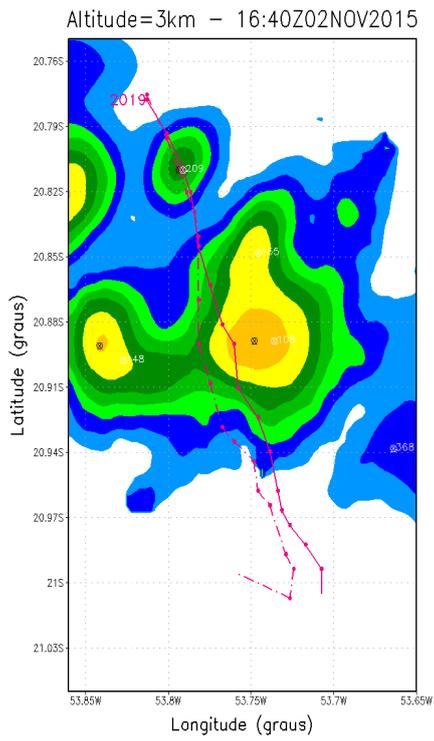
As células de tempestade de 20 minutos de duração são no total 277 e, as de 25 minutos, 154. Somando as três primeiras classes, o montante é de 889 e representa 73,8% do total de células rastreadas, ou seja, a maior parte das células de tempestade rastreadas tem ciclo de vida inferior a 30 minutos (Tabela 5.1). Esse fato dificulta

em muito a realização de nowcasting superior 30 minutos além de apresentar desvio maior da direção inicial. Por outro lado, as trajetórias de 80 e 90 minutos possuem apenas uma célula de tempestade rastreada e têm características de fraco desenvolvimento vertical, uma vez que a altitude máxima do centro de massa não ultrapassa os 3,8 km, com volume pequeno e refletividade máxima menor que 45,7 dBZ.

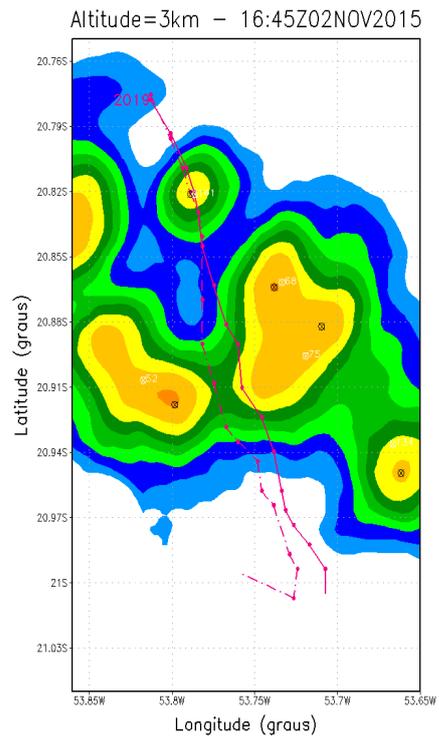
A trajetória de 85 minutos registrada na Tabela 5.1 pertence à célula de tempestade 2019 e tem um volume médio expressivo de 409,2 km<sup>3</sup> (equivale a um cubo de aresta 7,4 km) e refletividade máxima de 46,5 dBZ. O ciclo de vida dessa célula de tempestade teve início às 16:30Z, o centro de máxima em 4,2 km de altitude, e com término às 18Z. O volume máximo ocorreu às 17:20Z e chegou aos 757,9 km<sup>3</sup> (~ 9 km de aresta). A refletividade máxima de 45,2 dBZ ocorreu no horário às 17:15Z. A velocidade média de deslocamento da célula 2019 foi de 20,5 km/h. Toda a trajetória da célula e seus estágios pode ser visto na sequência do CAPPIs de 3 km de altitude apresentada na Figura 5.12.

Figura 5.12 - Trajetória da Célula 2019 em 02/11/2015.

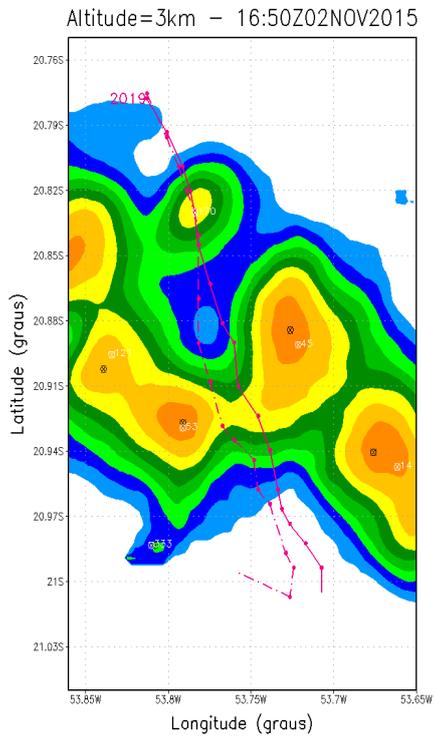




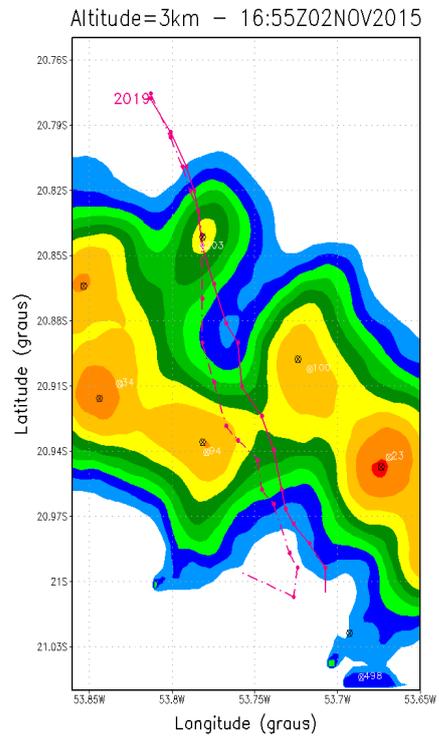
(c) 20151102-1640Z



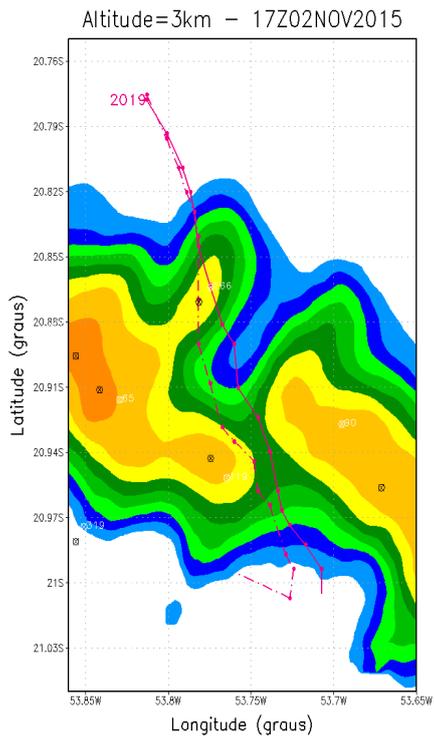
(d) 20151102-1645Z



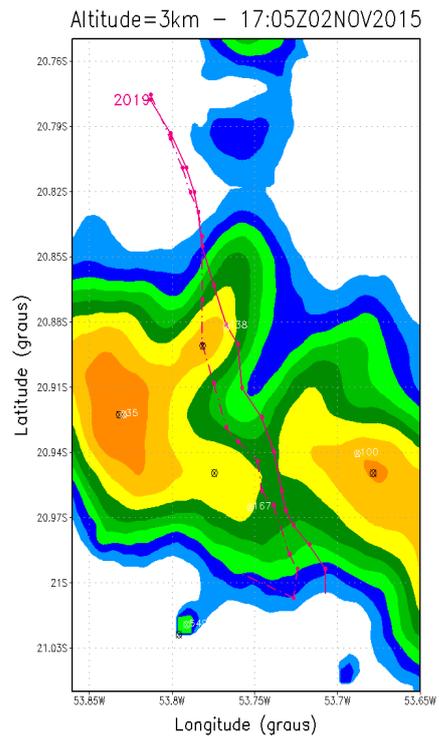
(e) 20151102-1650Z



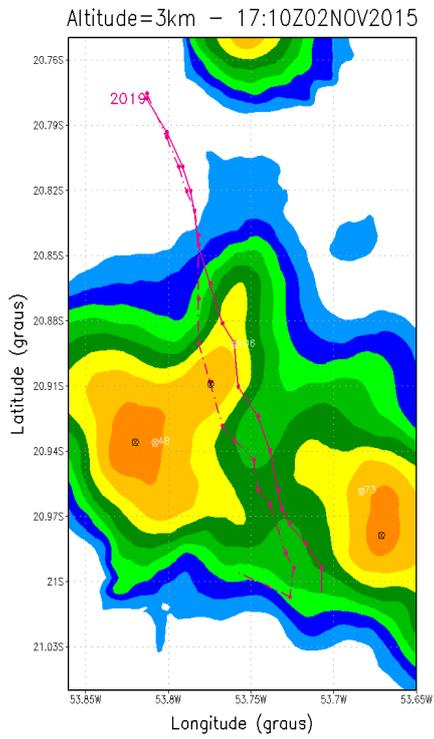
(f) 20151102-1655Z



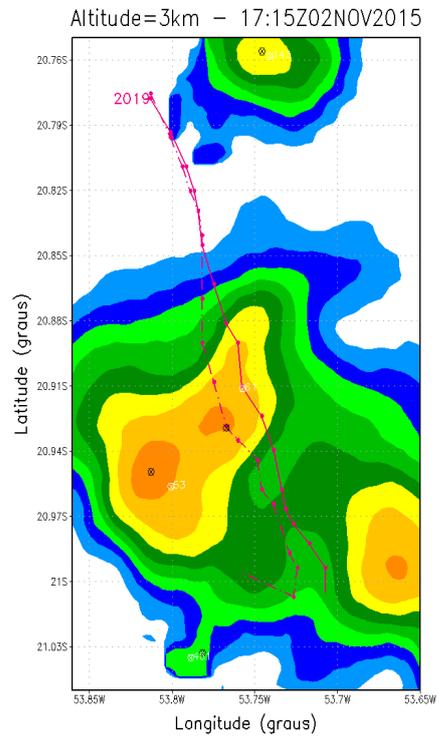
(g) 20151102-1700Z



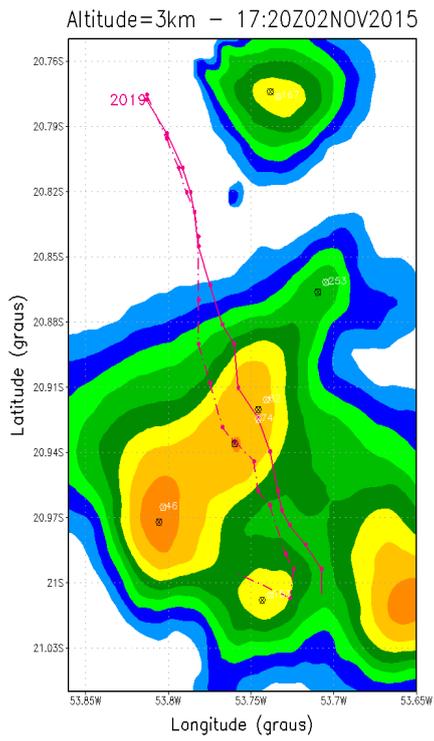
(h) 20151102-1705Z



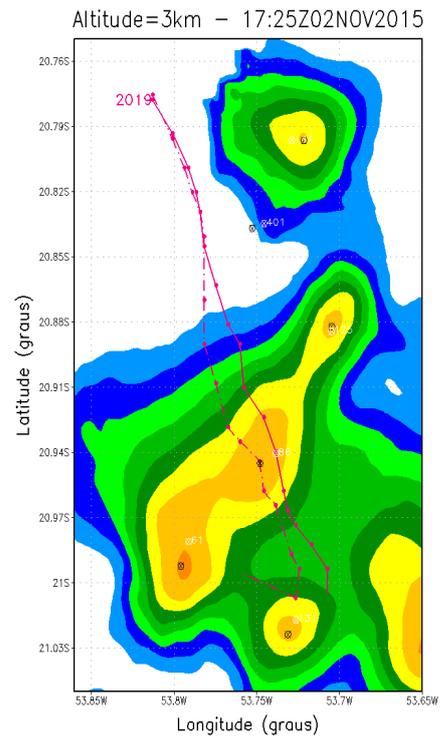
(i) 20151102-1510Z



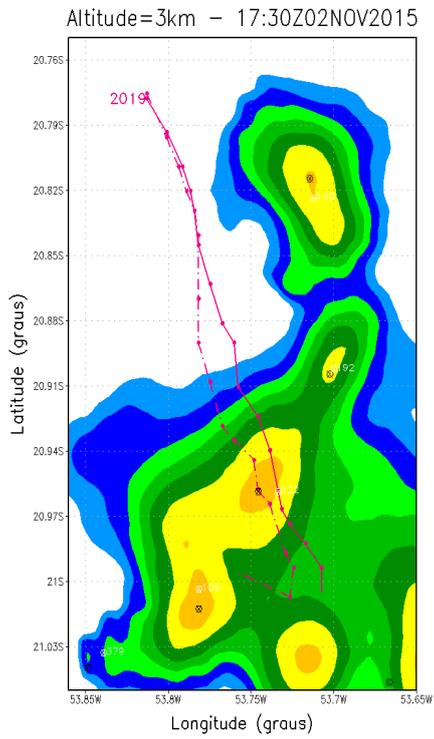
(j) 20151102-1515Z



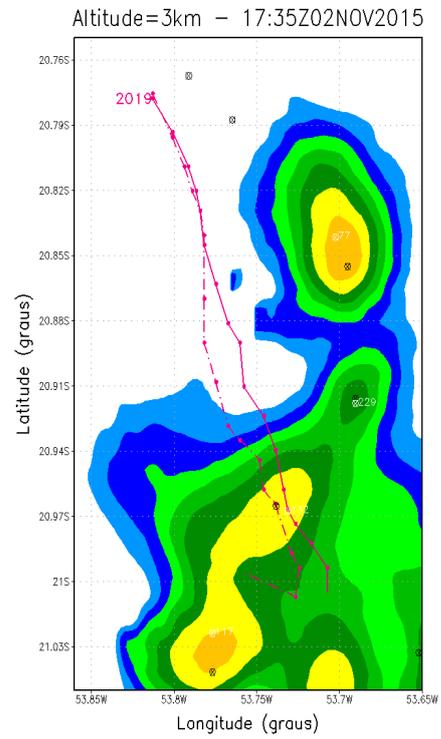
(k) 20151102-1520Z



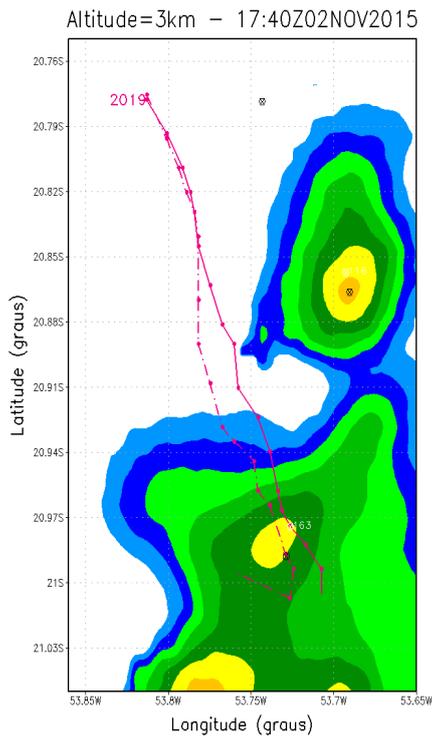
(l) 20151102-1525Z



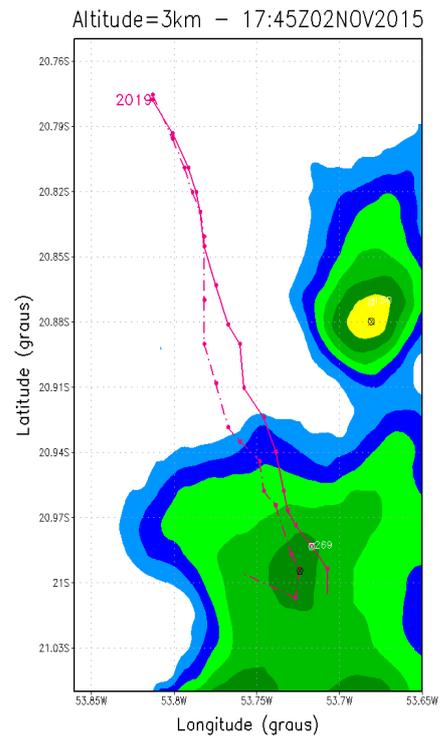
(m) 20151102-1730Z



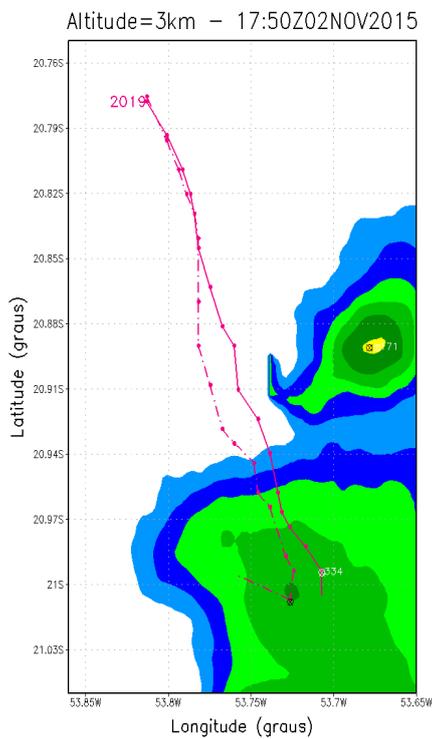
(n) 20151102-1735Z



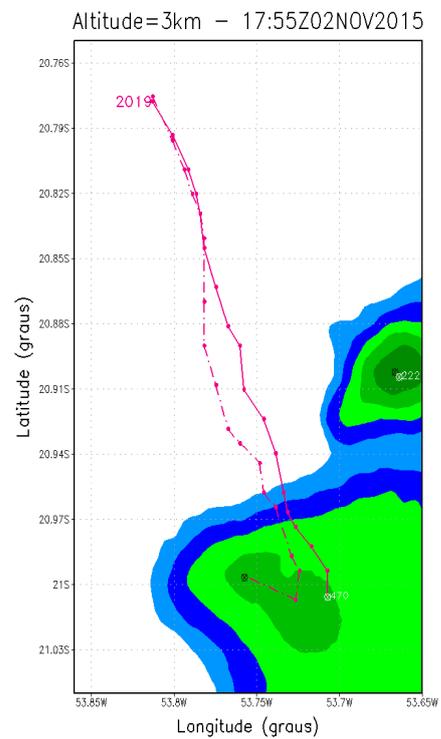
(o) 20151102-1740Z



(p) 20151102-1745Z



(q) 20151102-1750Z



(r) 20151102-1755Z

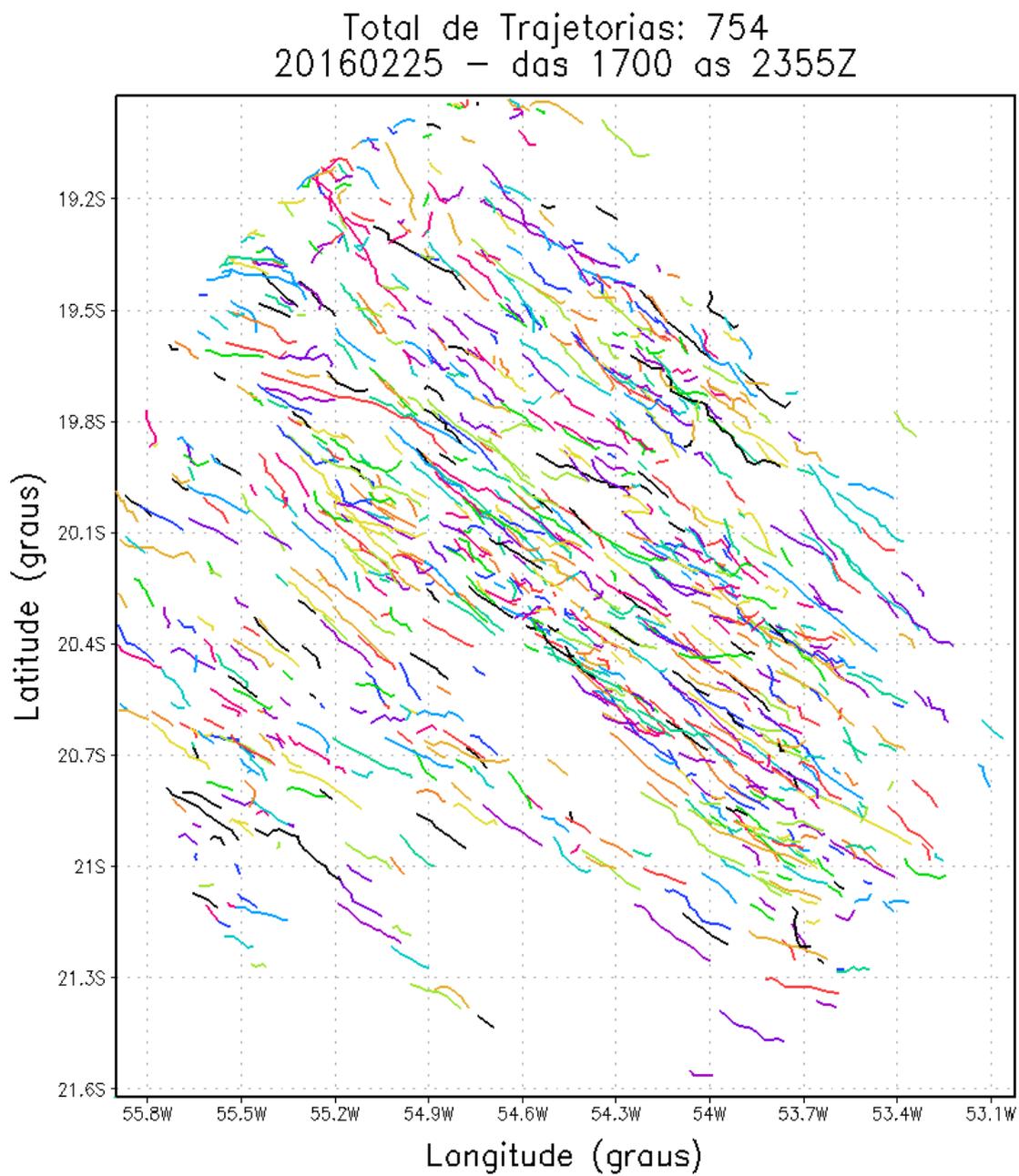
Linha cheia é a trajetória do centro de massa e a tracejada do centro de máxima.

Fonte: Produção do autor.

As trajetórias das células de tempestade rastreadas no dia 25/02/2016, das 17 às 23:55Z, estão traçadas na Figura 5.13 e totalizam 754 células. Cada linha representa o deslocamento da célula de tempestade durante o seu ciclo de vida que, em comparação com as trajetórias da Figura 5.11, qualitativamente tem maior duração. O deslocamento básico tem orientação de NW para SE e distribuídas na porção centro-NE da área de cobertura do radar.

Para uma análise quantitativa, a Tabela 5.2 resume as características das células do dia 25/02/2016. A velocidade média de deslocamento das células é maior (variação de 26,7 a 32,0 km/h) do que as do dia 02/11/2015, que varia entre 17,5 e 22,1 km/h (Tabela 5.1). Outro ponto de comparação é o número de células de tempestades identificadas nas três primeiras classes totalizando 419 e representa 55,6% do total, ou seja, 18,2% a mais de células com tempo de vida superior a 30 minutos. Assim, uma velocidade maior de deslocamento da célula indica, a princípio, uma velocidade de fluxo básico nas camadas médias maior, o que diminui a interação entre as células vizinhas e a competição pelo vapor d'água entre as próprias células. Por outro lado, esse rápido deslocamento das células de tempestade promove a destruição da célula na retaguarda e a advecção do ar quente na dianteira, mantendo a estrutura dinâmica da célula de tempestade por mais tempo. Essa renovação da estrutura da célula depende do fluxo de vapor d'água disponível que pode variar durante o ciclo e, essa variação, pode ser observado pela mudança na intensidade da refletividade da célula.

Figura 5.13 - Trajetórias das células rastreadas no dia 25/02/2016, das 17 às 23:55Z.



As diferentes cores foram utilizadas para realçar as trajetórias das células.

Fonte: Produção do autor.

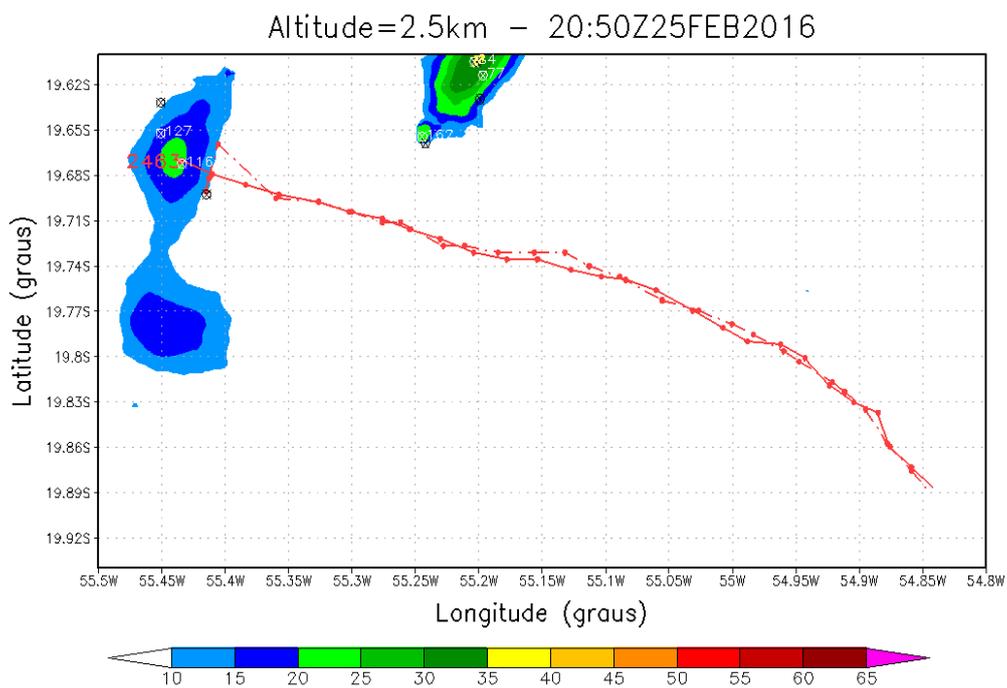
Tabela 5.2 - Parâmetros das trajetórias do dia 25/02/2016.

Tempo	Num	Vel	Hcm	Hmax	Vol	Zcm	Zmax	Dir	MDDir
min	—	(km/h)	(km)	(km)	(km <sup>3</sup> )	(dBZ)	(dBZ)	(°)	(°)
15	181	26,9	7,0	7,2	402,4	52,8	54,4	21,6	99,2
20	137	27,3	7,0	7,5	269,7	50,9	55,8	16,3	100,5
25	101	26,7	6,8	5,2	295,1	53,4	56,4	19,4	81,1
30	78	27,6	6,2	5,5	234,2	51,3	52,7	14,9	74,3
35	68	27,8	6,2	7,5	233,5	51,7	54,5	17,4	67,1
40	45	27,9	6,0	5,8	238,4	48,8	52,3	15,6	58,8
45	47	28,4	6,0	7,0	203,5	47,3	51,7	15,7	61,5
50	32	27,8	6,8	7,8	193,0	49,4	54,0	16,4	64,5
55	15	28,7	5,0	5,8	147,8	50,3	52,3	15,0	49,6
60	13	29,1	5,0	6,0	155,7	49,5	52,8	10,3	17,6
65	10	27,5	5,2	4,0	203,6	50,6	53,0	10,1	26,2
70	5	29,0	4,5	5,0	198,9	46,0	48,6	9,1	15,4
75	5	27,3	4,2	4,0	184,3	42,9	49,4	11,4	27,8
80	6	28,3	7,5	7,8	293,0	45,0	51,5	9,7	20,1
85	6	28,3	3,8	4,2	159,4	47,8	50,6	16,9	48,1
90	2	28,2	3,5	3,0	197,2	39,4	43,9	9,8	15,7
105	1	29,7	4,5	4,2	180,9	40,4	43,5	2,8	2,8
110	1	30,4	5,0	5,2	102,8	44,1	48,8	9,4	9,4
125	1	32,0	3,2	3,0	134,3	42,8	45,3	3,2	3,2
Total	754								

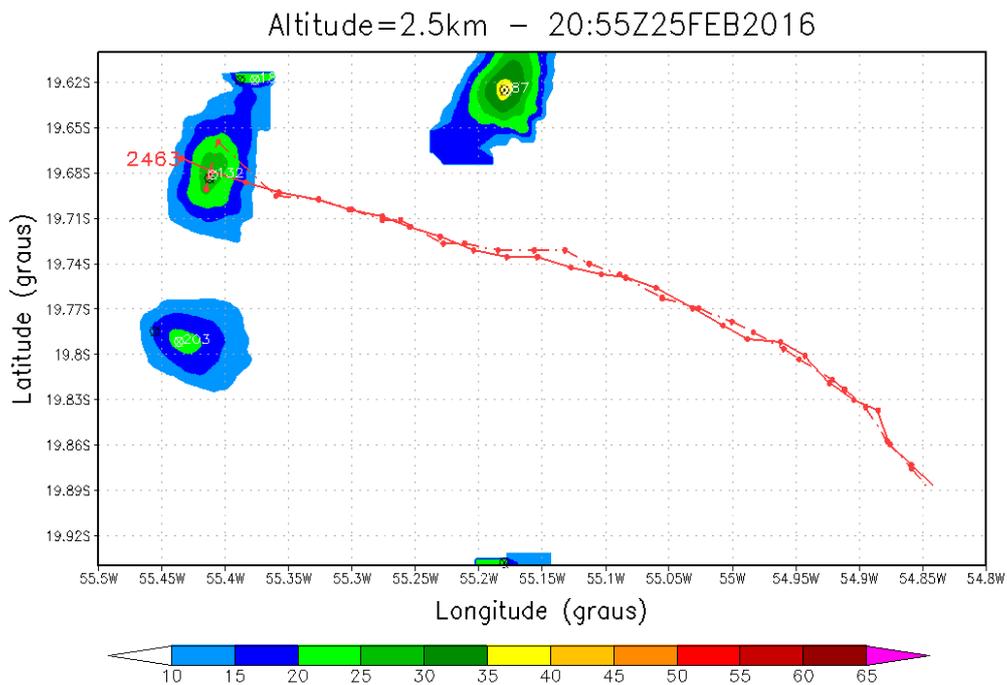
Fonte: Produção do autor.

Três células apresentaram tempo de vida superior a 90 minutos (Tabela 5.2) e uma, em particular, atingiu 125 minutos de duração. Esta célula identificada como Célula 2463 iniciou o seu ciclo às 20:50Z com altitude de 1 e 1,75 km do centro de massa e da máxima, respectivamente, diferente da maioria das células que iniciam numa altitude superior. O centro de máxima dessa célula não passou dos 3,0 km de altitude. O volume médio foi de apenas 134,3 km<sup>3</sup> (aresta de 5,1 km) atingindo o máximo às 22:35Z com 269,3 km<sup>3</sup> (aresta equivalente a 6,5 km) próximo ao final do ciclo de vida às 23Z. A refletividade máxima foi às 22:30Z com 45,3 dBZ. A trajetória realizada pela célula 2463 pode ser vista na sequência dos CAPPI de 2,5 km de altitude apresentada na Figura 5.14. A Célula 2463 teve vários período de intensificação de 40,5 dBZ às 21Z; 39,3 dBZ às 21:25Z e de 45,3 dBZ às 22:30Z e pode ser observado nas figuras 5.14c, 5.14h e 5.14u, respectivamente.

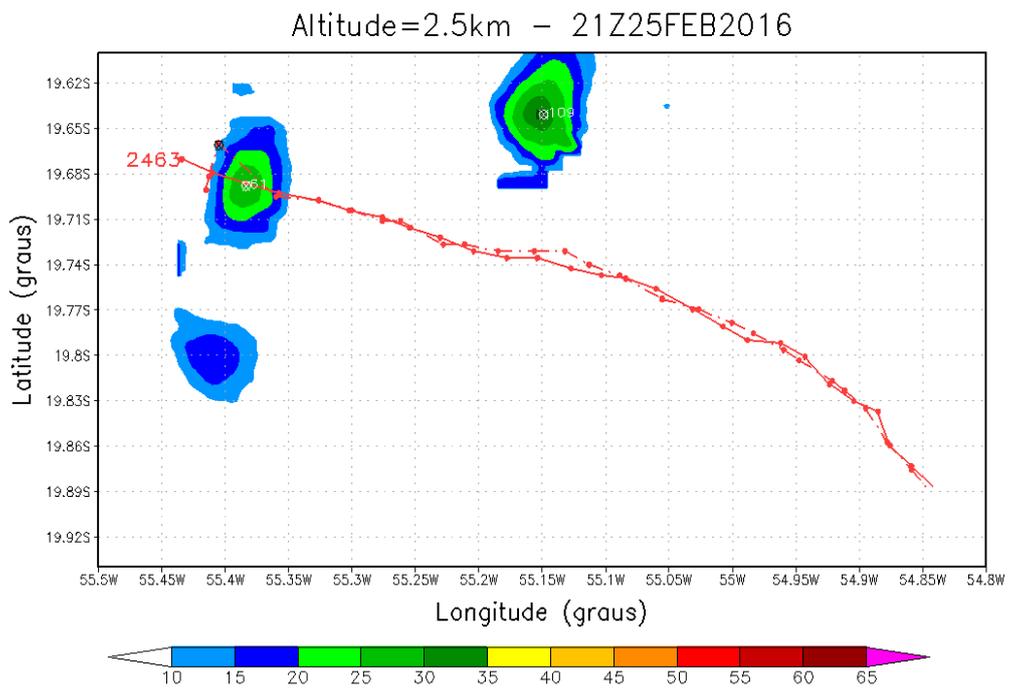
Figura 5.14 - Trajetória da Célula 2463 em 25/02/2016.



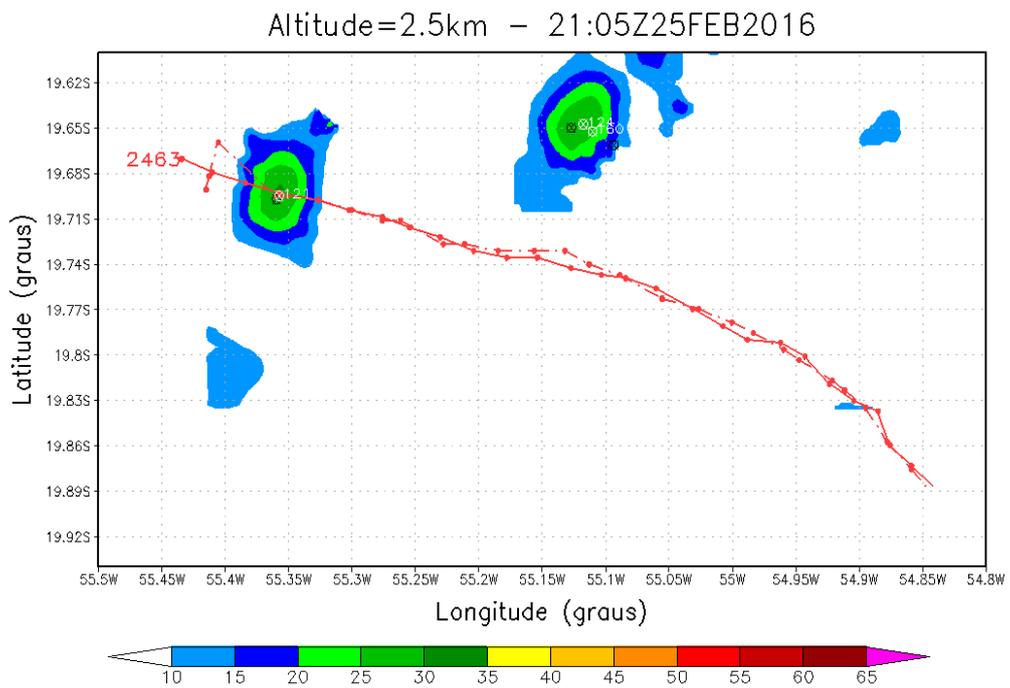
(a) 20150225-2050Z



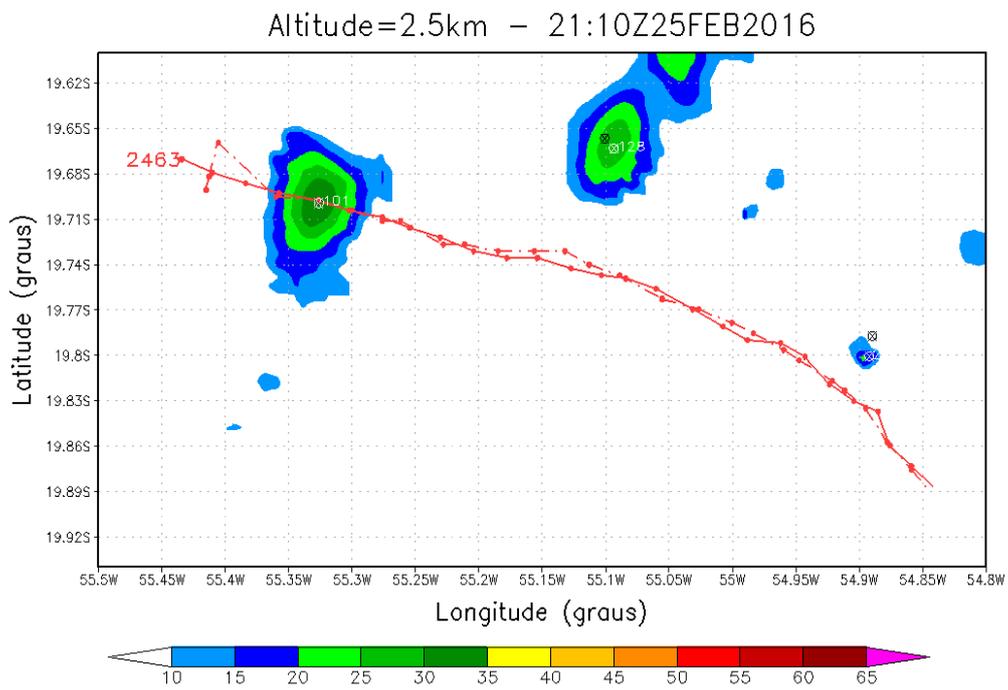
(b) 20150225-2055Z



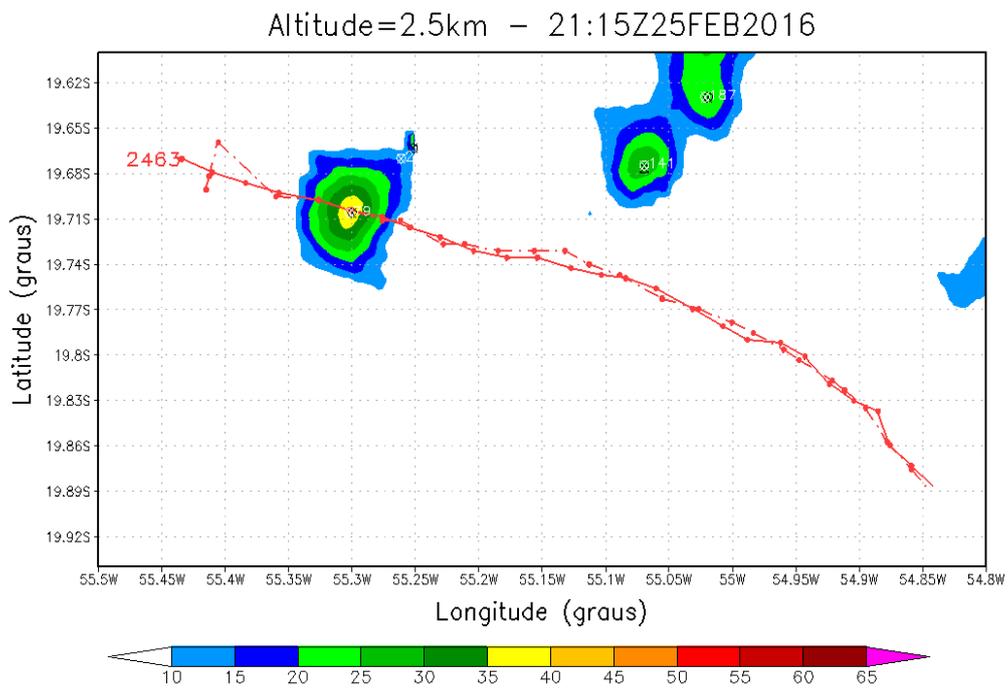
(c) 20150225-2100Z



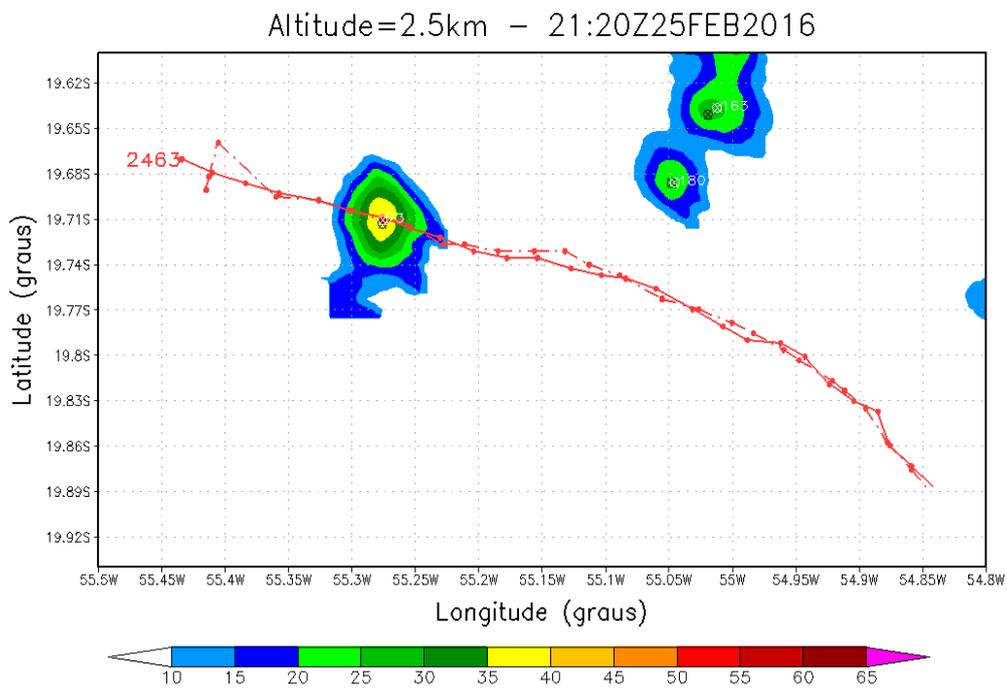
(d) 20150225-2105Z



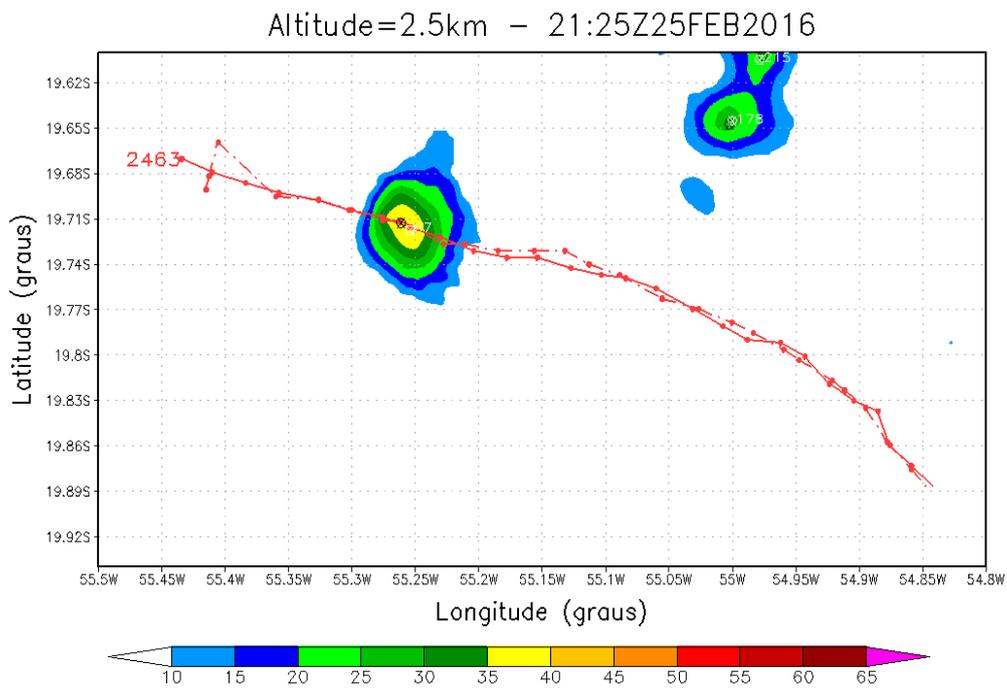
(e) 20150225-2110Z



(f) 20150225-2115Z

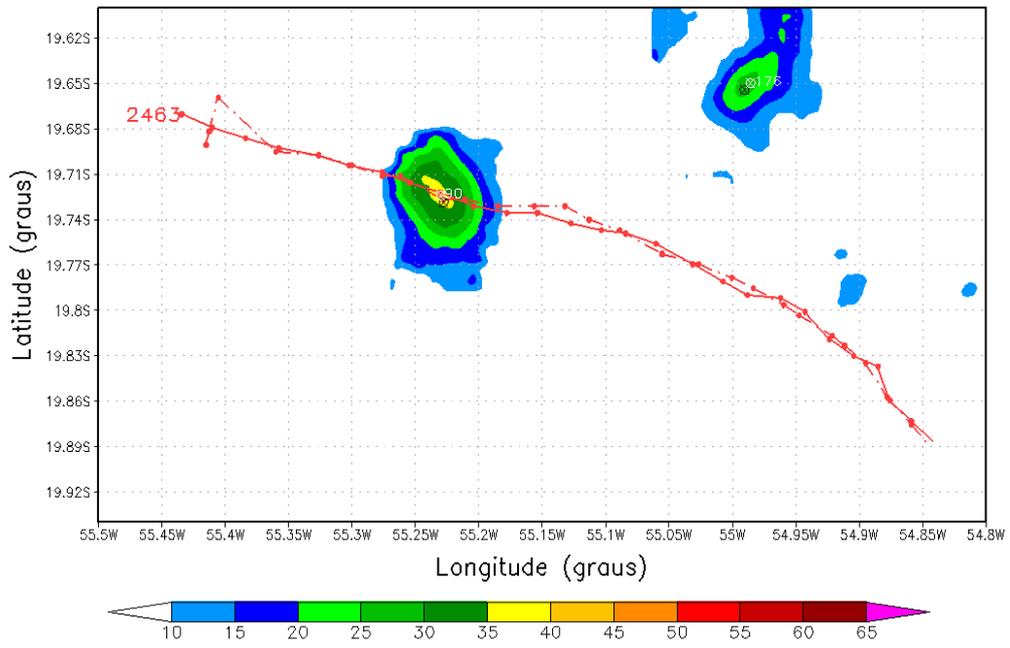


(g) 20150225-2120Z



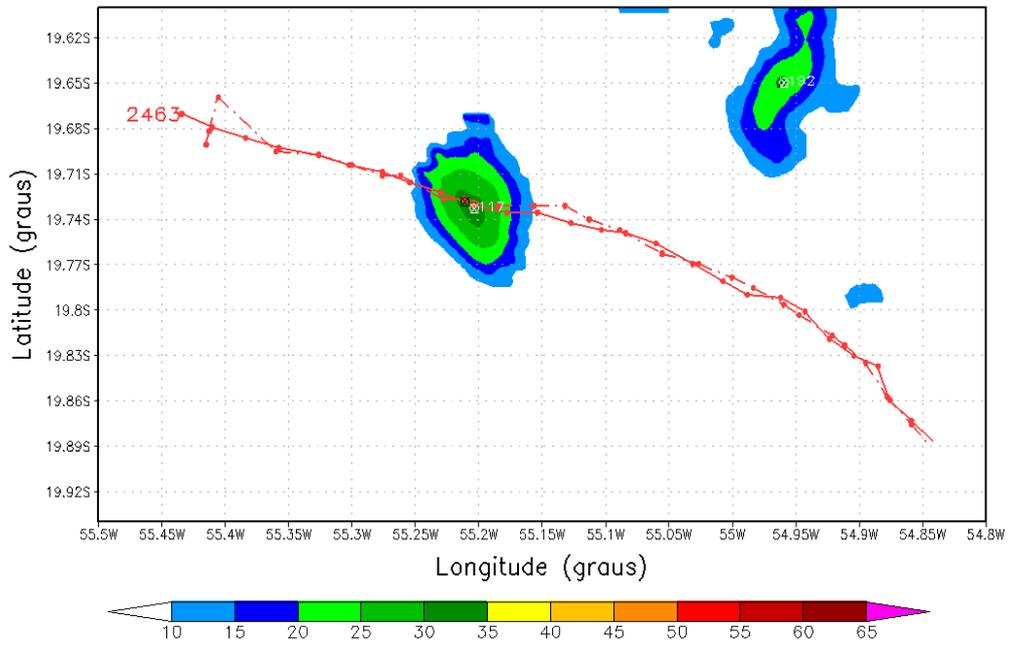
(h) 20150225-2125Z

Altitude=2.5km - 21:30Z25FEB2016

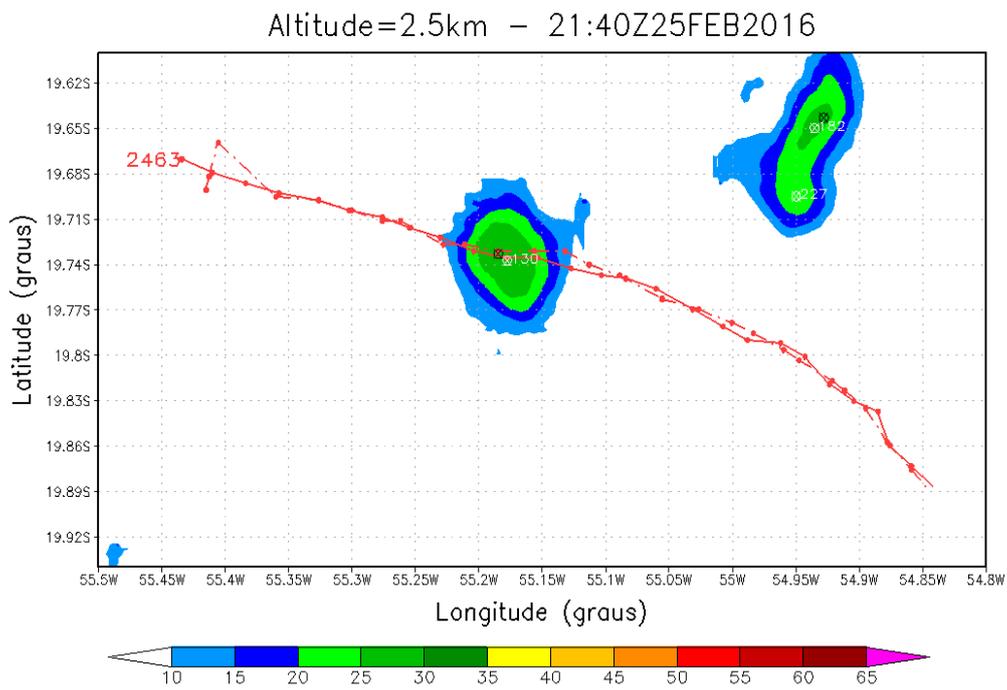


(i) 20150225-2130Z

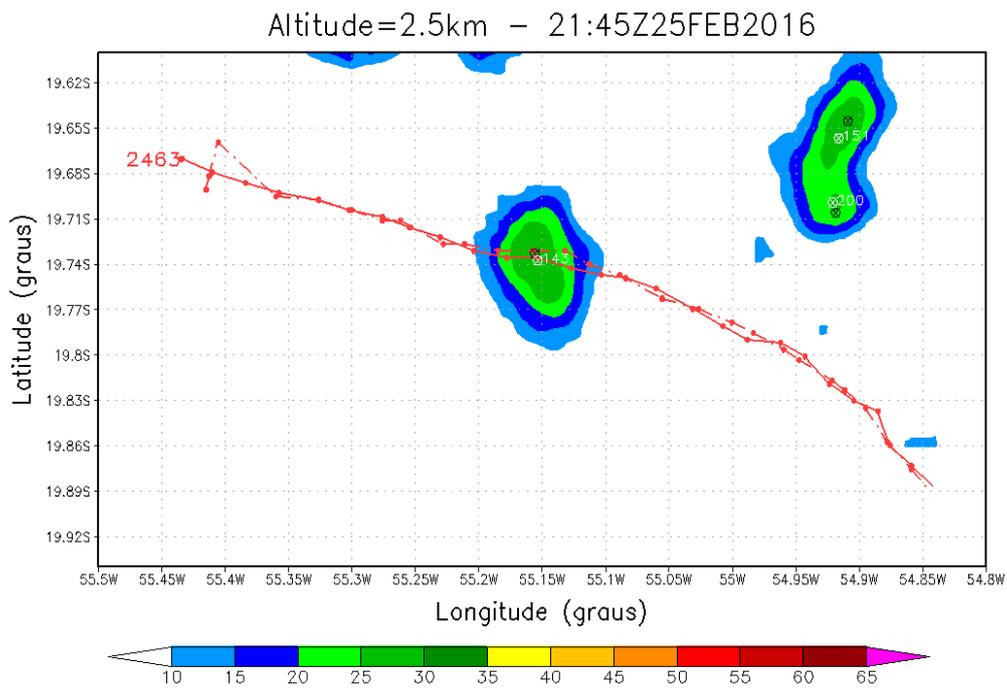
Altitude=2.5km - 21:35Z25FEB2016



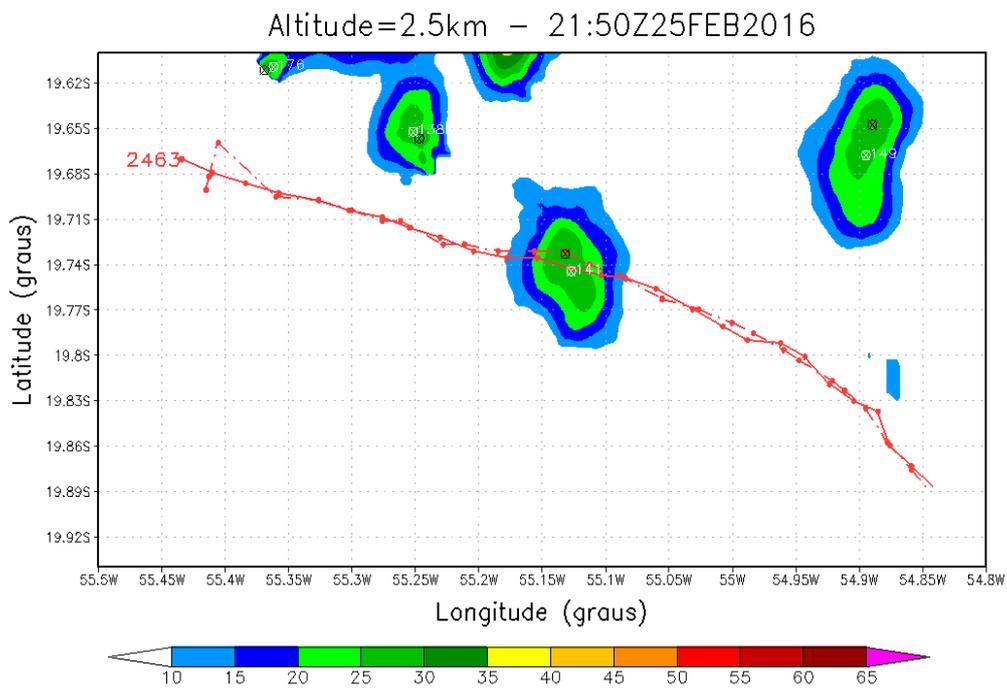
(j) 20150225-2135Z



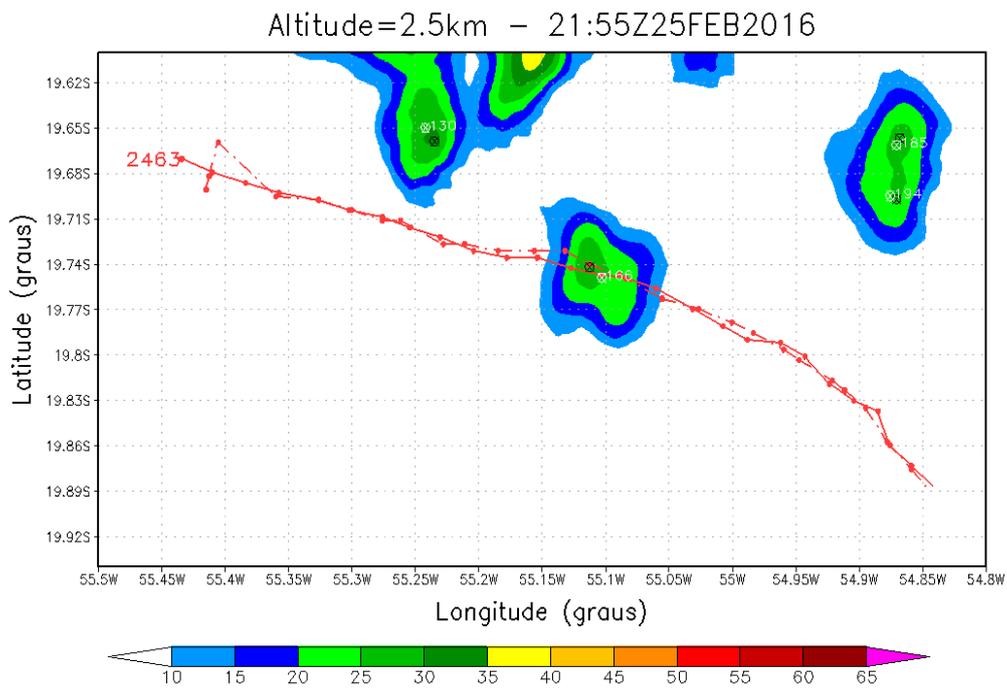
(k) 20150225-2140Z



(l) 20150225-2145Z

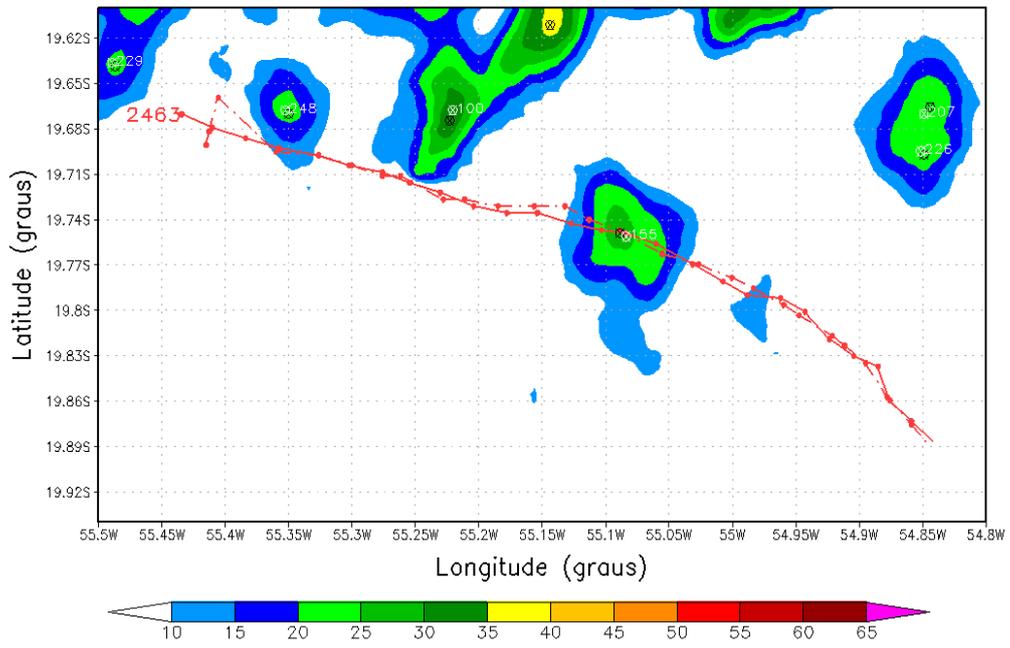


(m) 20150225-2150Z



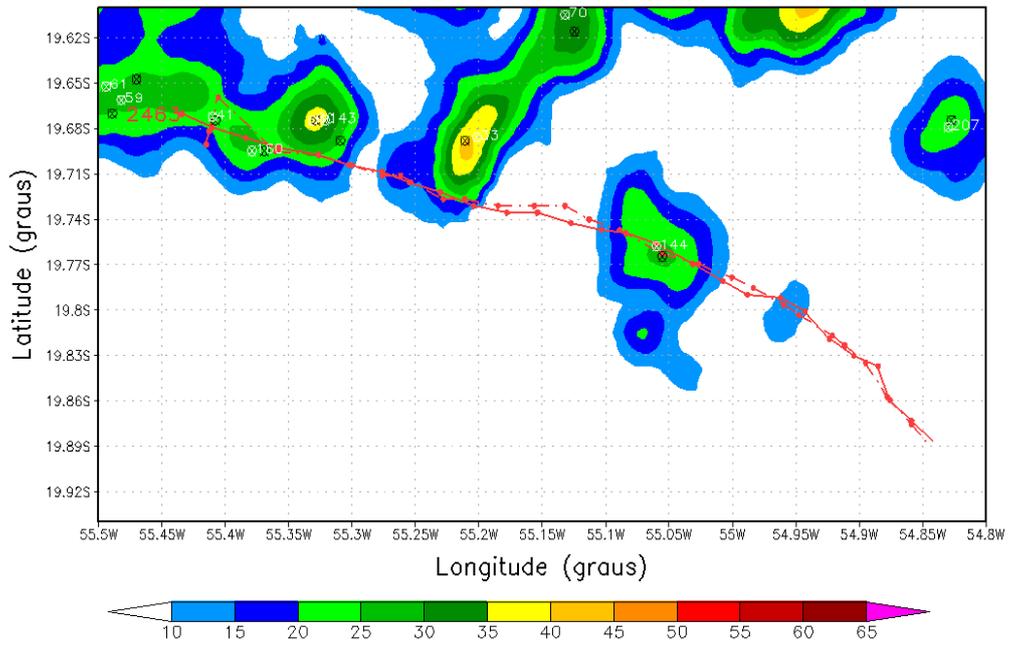
(n) 20150225-2155Z

Altitude=2.5km - 22Z25FEB2016



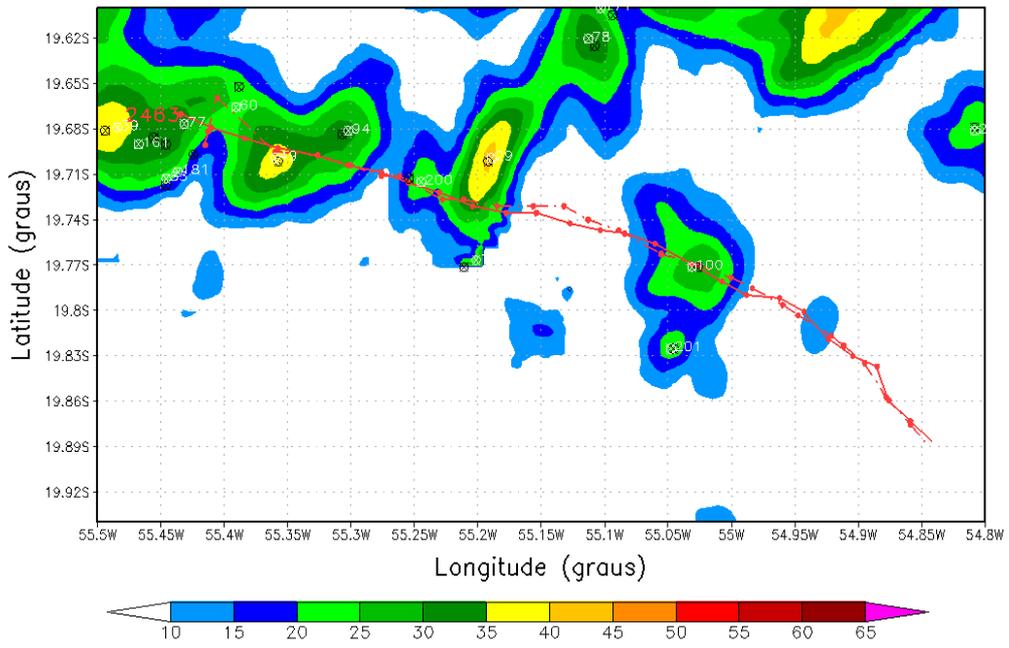
(o) 20150225-2200Z

Altitude=2.5km - 22:05Z25FEB2016



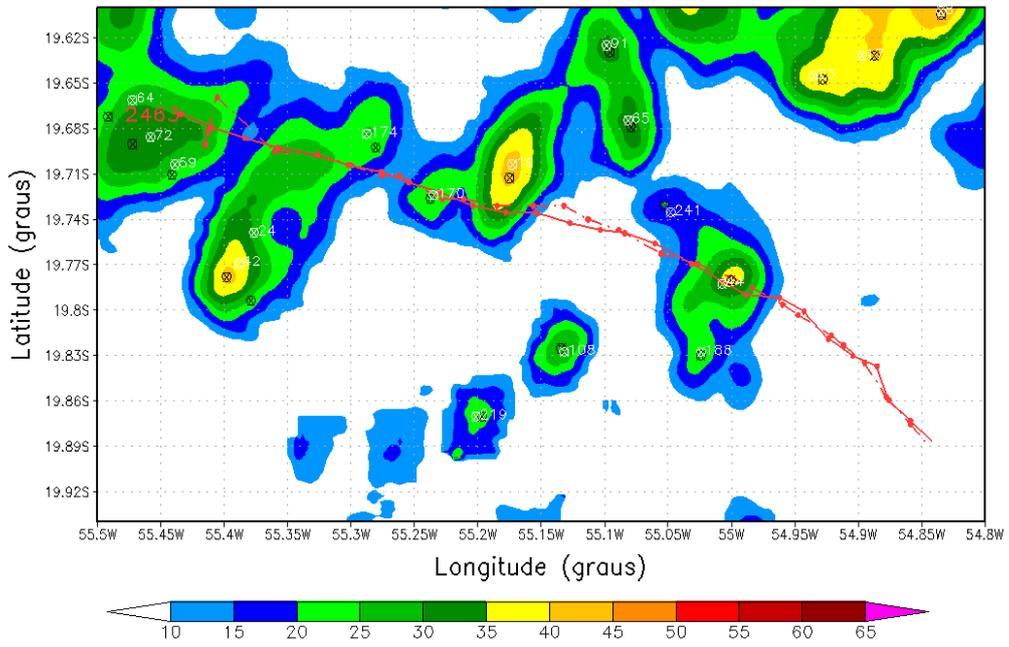
(p) 20150225-2205Z

Altitude=2.5km - 22:10Z25FEB2016



(q) 20150225-2210Z

Altitude=2.5km - 22:15Z25FEB2016

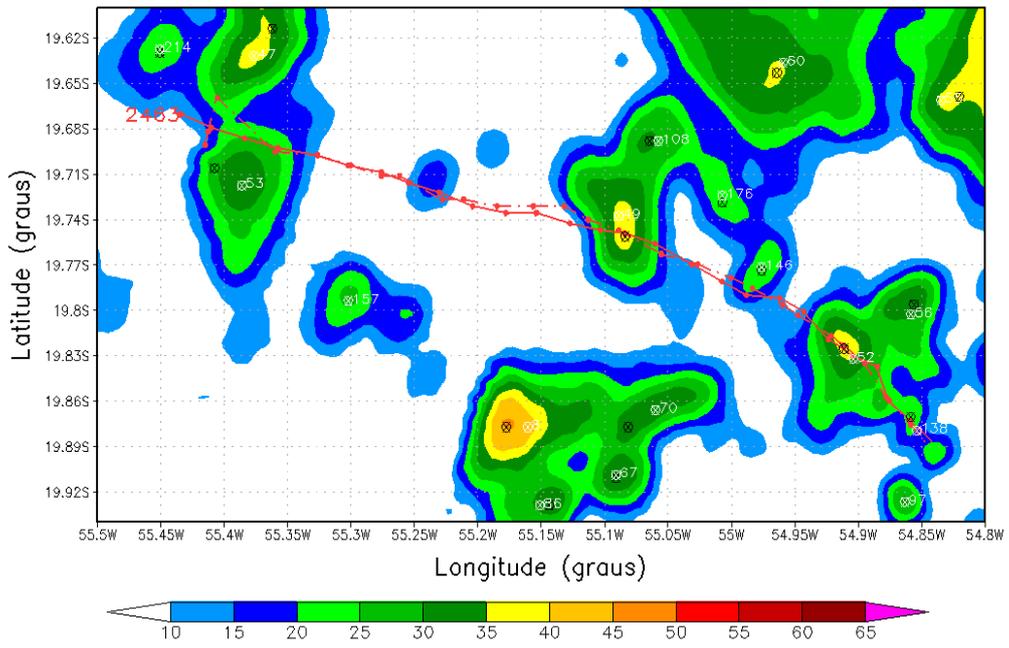


(r) 20150225-2215Z



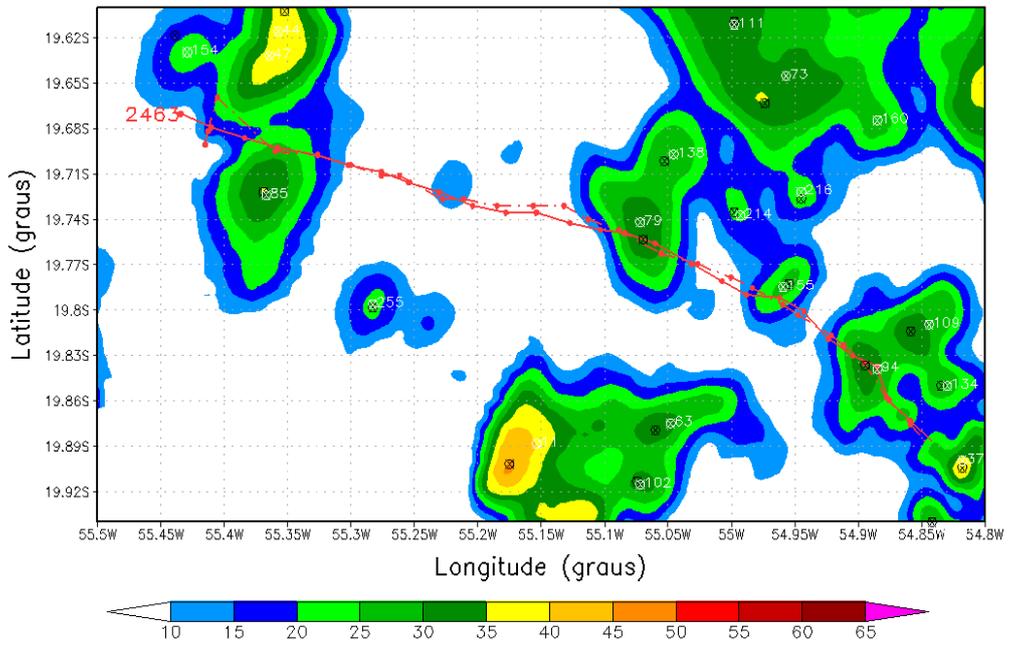


Altitude=2.5km - 22:40Z25FEB2016

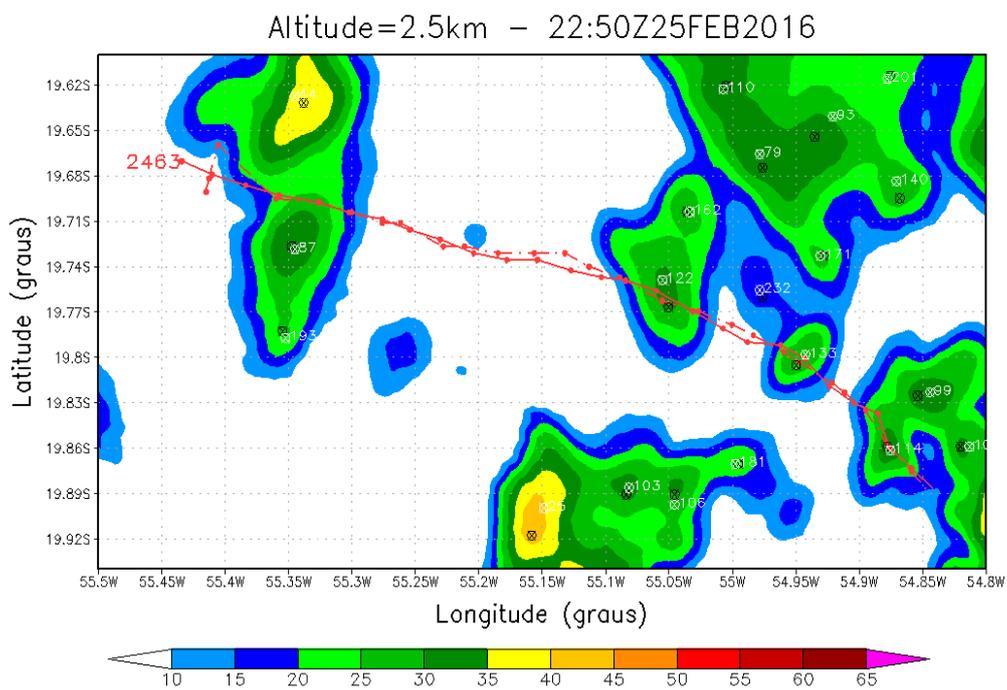


(w) 20150225-2240Z

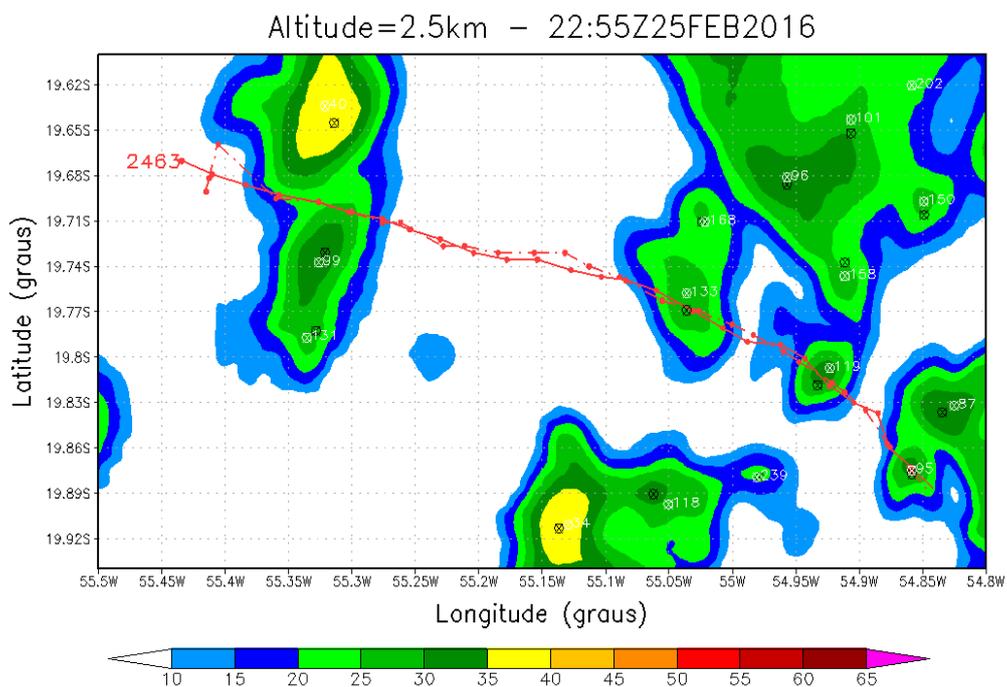
Altitude=2.5km - 22:45Z25FEB2016



(x) 20150225-2245Z



(y) 20150225-2250Z



(z) 20150225-2255Z

Linha cheia é a trajetória do centro de massa e a tracejada do centro de máxima.  
 Fonte: Produção do autor.

### 5.3 *Merging e Splitting*

Desde os primeiros trabalhos que utilizaram radar meteorológico com a abordagem bidimensional e uso de limiares fixos de refletividade para identificar, classificar e rastrear células convectivas, desenvolveram-se algoritmos que possuem módulos para tratar especificamente a ocorrência de fusão (*merging*) ou divisão (*splitting*) de células de tempestades. Esse tratamento foi necessário ser implementado pois foi a única maneira de se explicar, a partir de um campo de refletividade em duas dimensões, o aparecimento ou o desaparecimentos de núcleos de alta refletividade entre uma imagem e outra obtidas em um instante e o instante subsequente da coleta de dados.

Assim, os algoritmos desenvolvidos a partir da uso de limiares fixos de classificação consideram que uma célula convectiva se divide (*splitting*) quando em um instante tem-se somente um núcleo classificado pelo algoritmo, e no instante subsequente tem-se dois ou mais núcleos classificados. Da mesma forma, os algoritmos consideram uma fusão de células convectivas (*merging*), quando em um instante tem-se duas ou mais células classificadas e no instante subsequente tem-se somente uma.

Essa visão simplista de *splitting* e *merging* esconde a verdadeira dinâmica de evolução das células convectivas uma vez que sua estrutura tridimensional não é considerada na análise bidimensional. Desta forma, o uso de uma abordagem que considera toda a estrutura tridimensional do sistema precipitante, e uma metodologia de classificação que não usa limiar fixo, mas sim encontra o centro de massa das células presentes no sistema precipitante analisado, permite entender melhor a dinâmica de evolução do sistema precipitante, e concluir que não há processos de *splitting* e *merging*, mas sim uma disputa interna das células por vapor de água. Essa disputa resulta em dois processos:

- a) o fortalecimento de uma célula e extinção das demais, fazendo-se aquela que melhor se alimentou de vapor de água prevalecer como célula única do sistema precipitante;
- b) a partir de um excesso de vapor de água, cria-se uma atmosfera que permite que duas ou mais células evoluam concomitantemente dentro de um mesmo sistema precipitante, até que a disputa por vapor de água as conduzam ao processo de fortalecimento e extinção citado anteriormente.

### 5.3.1 Análise da fusão entre células - *Merging*

No dia 04/02/2016, entre 17:40 e 18:05Z, foi observado um processo de fortalecimento de uma célula convectiva (*Merging* na abordagem de limiar fixo) de duas células como ilustrado nas figuras 5.15a-r, onde cada coluna representa os CAPPIs nas altitudes de 1, 3 e 6 km, respectivamente. As diferentes altitudes permitem a observação do processo em diferentes níveis.

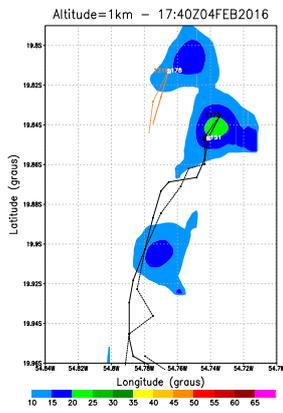
Nas figuras 5.15a-c das 17:40Z, duas células classificadas (1216 e 1173) têm suas trajetórias traçadas pelas linhas identificadas na cor laranja e preta, respectivamente, tendo esta última cinco minutos a mais no ciclo (segundo ponto da trajetória). O ciclo de vida da célula 1216 é curto (17:40 às 17:55Z), com desenvolvimento rápido e maior intensidade do que a célula 1173. O processo de dissipação da célula 1216 ocorre às 17:55Z (Figura 5.15j) com o aumento da área de refletividade no CAPPI de 1 km. No horário seguinte, às 18Z, a identificação dessa célula não foi mais possível pela metodologia utilizada nessa pesquisa, o que indica a extinção dessa célula. A descontinuidade da trajetória laranja foi devido a localização do centro de massa (ponto branco) às 17:55Z ter recuado ligeiramente em relação à posição anterior (17:50Z), isto é, recuo de trajetória, o que é um fator limitante da metodologia e deve merecer atenção para ser minimizado em estudos futuros.

Com o aumento da intensidade da refletividade da célula 1216, principalmente nos baixos níveis indicando colapso, a célula 1173 aumenta sua intensidade no nível de 3 km com a máxima passando de 50 dBZ (início do vermelho na escala de refletividade) no CAPPI de 3 km da Figura 5.15k. Com a extinção da competição pelo fluxo de umidade, esse “excedente” permitiu o aumento do volume da célula 1173 com intensificação em toda a sua estrutura vertical como pode ser observada no CAPPI de 6 km (Figura 5.15o). Isso permitiu um ciclo de vida mais longo com rastreamento de trajetória até às 18:35Z (sequência final da trajetória restante).

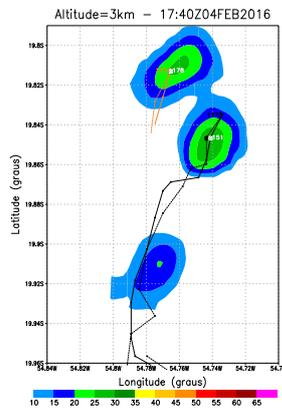
Na ótica da abordagem de classificação de limiar fixo e análise bidimensional desse processo de fusão baseada apenas no CAPPI de 3 km de altitude resultaria na interpretação de que duas células se fundem em uma única, e esta se propaga até o final de seu ciclo de vida. Entretanto, a análise na vertical revela uma interpretação diferente, onde duas células competem pelo vapor d’água e, dependendo da dinâmica interna de cada célula, uma célula entra em dissipação forçada pela presença da outra, enquanto outra célula de tempestade beneficiada pela falta de competição continua a se alimentar do vapor de água presente na nuvem e mantém o seu desenvolvimento, prolongando o seu ciclo de vida. Essa interação entre as células

é semelhante ao descrito no trabalho de Kim et al. (2012), que descreve a teoria envolvida na dinâmica de nuvens.

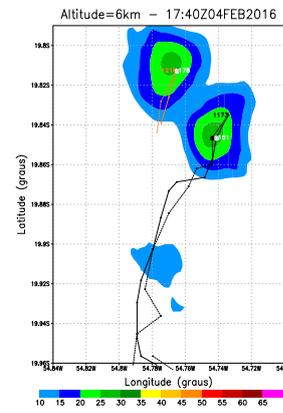
Figura 5.15 - Observação do processo de *Merging* em diferentes altitudes.



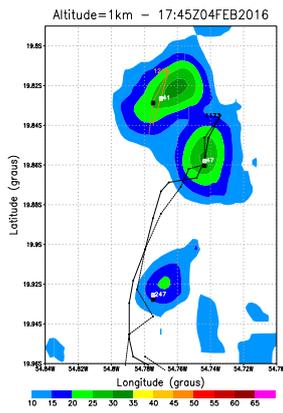
(a) CAPPI 1 km (17:40Z)



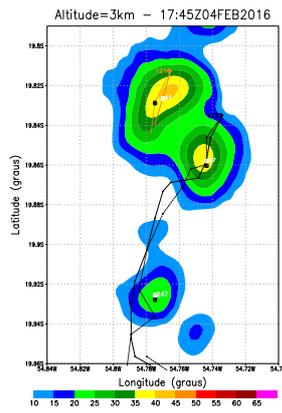
(b) CAPPI 3 km (17:40Z)



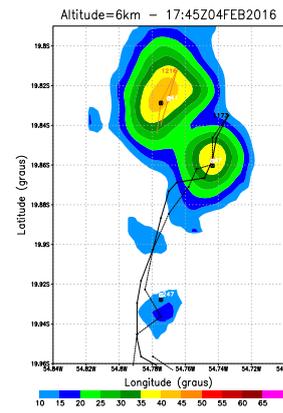
(c) CAPPI 6 km (17:40Z)



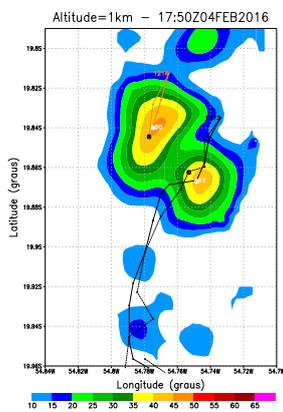
(d) CAPPI 1 km (17:45Z)



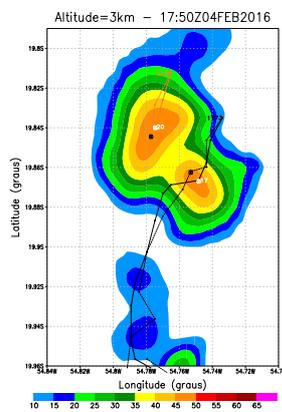
(e) CAPPI 3 km (17:45Z)



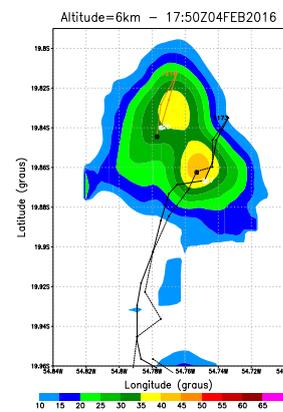
(f) CAPPI 6 km (17:45Z)



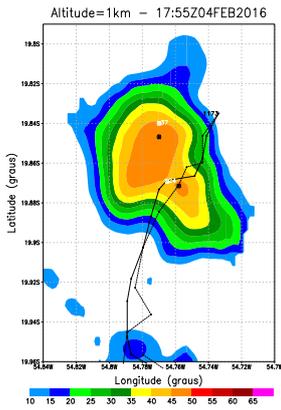
(g) CAPPI 1 km (17:50Z)



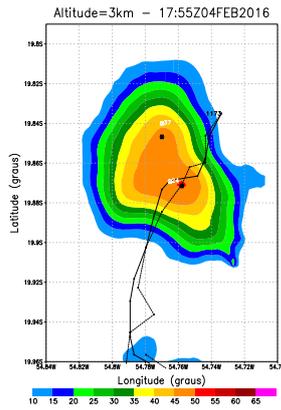
(h) CAPPI 3 km (17:50Z)



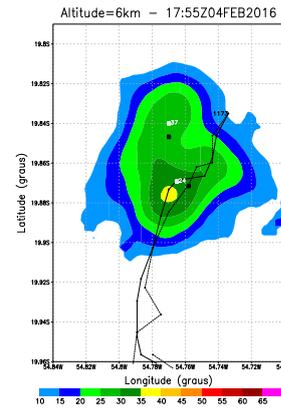
(i) CAPPI 6 km (17:50Z)



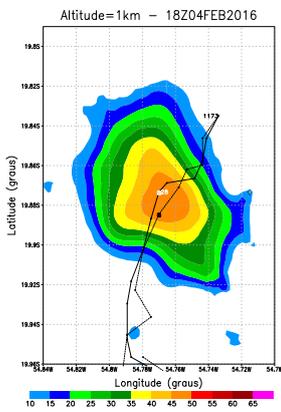
(j) CAPPI 1 km (17:55Z)



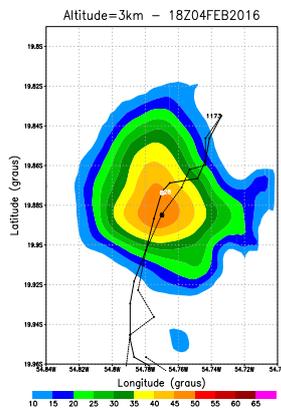
(k) CAPPI 3 km (17:55Z)



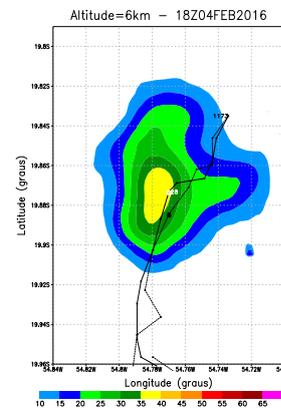
(l) CAPPI 6 km (17:55Z)



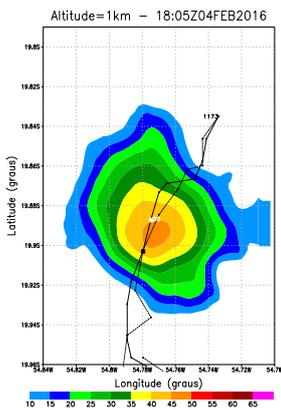
(m) CAPPI 1 km (18Z)



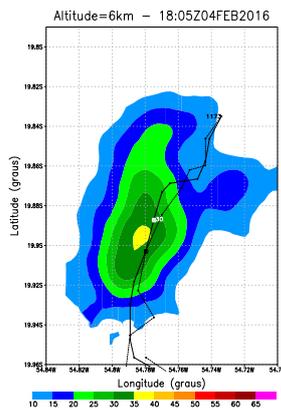
(n) CAPPI 3 km (18Z)



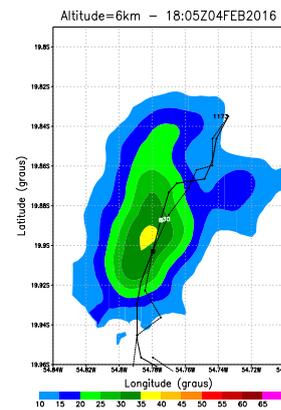
(o) CAPPI 6 km (18Z)



(p) CAPPI 1 km (18:05Z)



(q) CAPPI 3 km (18:05Z)



(r) CAPPI 6 km (18:05Z)

Os pontos nas células indicam o máximo de refletividade (preto) e o centro de massa (branco).

Fonte: Produção do autor.

### 5.3.2 Análise da divisão entre células - *Splitting*

O termo *splitting* é utilizado nos algoritmos de limiar único para indicar o processo de divisão de uma célula de tempestade gerando duas ou mais novas células de tempestade ou continuação de uma e geração de outras novas células.

A Figura 5.16 apresenta um caso de divisão de células que ocorreu no dia 04/01/2017, entre às 18:35Z e 18:40Z, onde cada coluna representa a altitude do CAPPI em 1 km (esquerda), 3 km (centro) e 6 km (direita) para a análise em diferentes níveis.

A Célula 373 é identificada no radar às 18:25Z com refletividade máxima de 35,3 dBZ em 5,5 km de altitude, e se intensifica aumentando a refletividade para 48,2 dBZ na altitude de 4 km (Figura 5.16b).

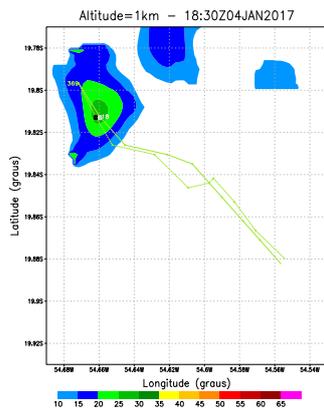
No CAPPI de 6 km (Figura 5.16f) às 18:35Z já aparece uma deformação da estrutura superior indicando um “ramo” formado por movimento ascendente no lado NE da célula de tempestade, e esta interação pode ser observada também na Figura 5.16e com certa deformação para o lado leste da célula. No horário seguinte, às 18:40Z, o núcleo de máxima dessa nova célula já é identificado pelo Método de Expansão com 41,4 dBZ de refletividade na altitude de 2,75 km e volume de 74,8 km<sup>3</sup>. A máxima refletividade da célula principal na altitude de 4 km de é de 41,1 dBZ e seu volume é de 95,3 km<sup>3</sup>. Em termo de altitude do centro de massa, as duas estão localizadas exatamente em 3,25 km.

Em termos descritivos, a célula nova é distribuída verticalmente e a sua maior intensidade se localiza na parte inferior da célula, enquanto que a célula principal tem topo mais alto e com forte movimento ascendente, uma vez que na parte inferior a sua área de domínio é pequena e sua intensidade é maior que a célula nova. No horário das 18:45Z, a célula principal se intensifica aumentando a sua intensidade na altitude de 6 km (Figura 5.16l) em comparação ao horário anterior e também na sua base (Figura 5.16j).

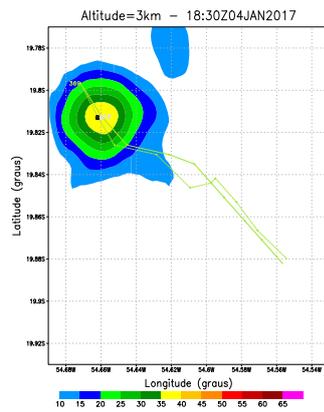
Às 18:50Z, a célula principal perde intensidade no topo e aumenta na camada intermediária e na base, indicando início da fase de dissipação (Figura 5.16p e q). A célula nova consegue aumentar a sua intensidade e também em volume (113,6 km<sup>3</sup>) em relação a célula principal (107,8 km<sup>3</sup>) (Figura 5.16n). No instante seguinte, a célula principal reduz mais o seu volume para 76,3 km<sup>3</sup> enquanto a célula nova aumenta para 120,7 km<sup>3</sup>, principalmente nas camadas médias e baixas, indicando a próxima fase que é a dissipação da célula de tempestade (Figura 5.16q).

Na abordagem tradicional de classificação por limiar fixo, interpreta-se que houve uma divisão da célula principal (splitting), resultando na formação de um novo sistema precipitante. Porém, ao se analisar a estrutura tridimensional do sistema observado, interpreta-se que o fato da célula principal desse sistema precipitante não ter aumentado de intensidade logo após a sua detecção foi devido a presença de outra célula de tempestade mais a nordeste, o que favoreceu o surgimento da segunda célula devida a grande oferta de vapor d'água presente na atmosfera local para poder sustentar outro sistema próximo.

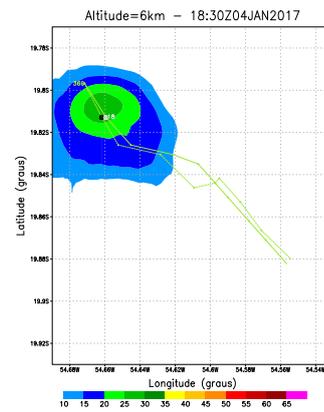
Figura 5.16 - Observação do processo de *Splitting* em diferentes altitudes.



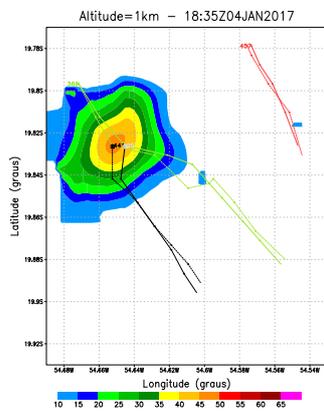
(a) CAPPI 1 km (18:30Z)



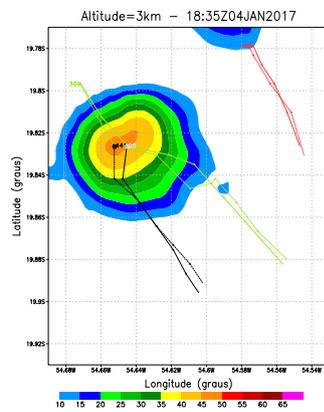
(b) CAPPI 3 km (18:30Z)



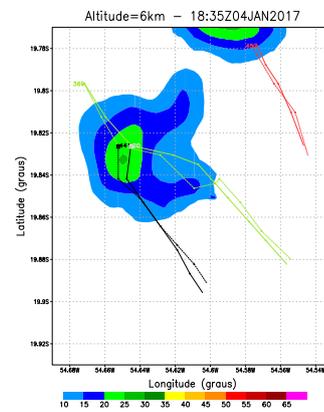
(c) CAPPI 6 km (18:30Z)



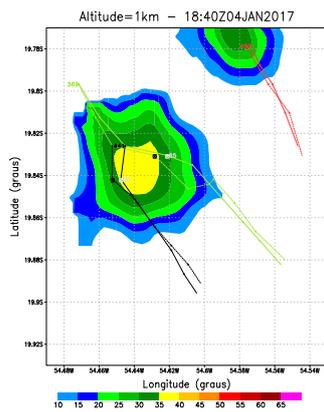
(d) CAPPI 1 km (18:35Z)



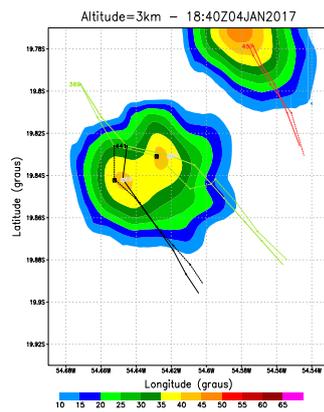
(e) CAPPI 3 km (18:35Z)



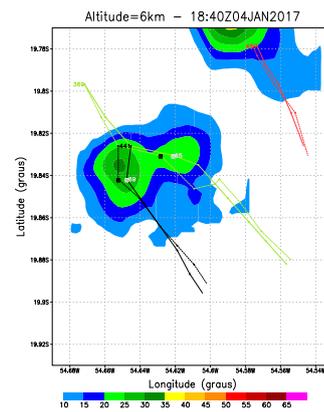
(f) CAPPI 6 km (18:35Z)



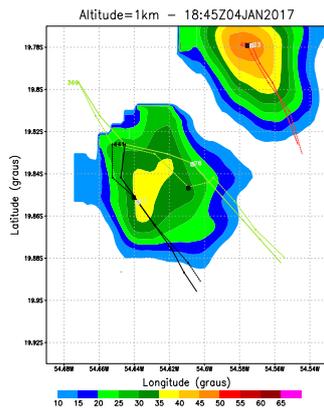
(g) CAPPI 1 km (18:40Z)



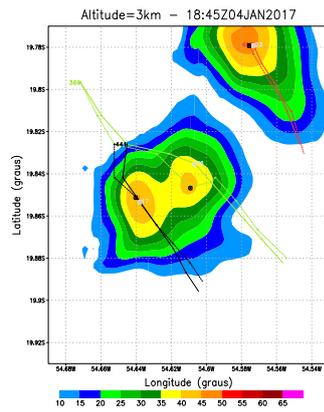
(h) CAPPI 3 km (18:40Z)



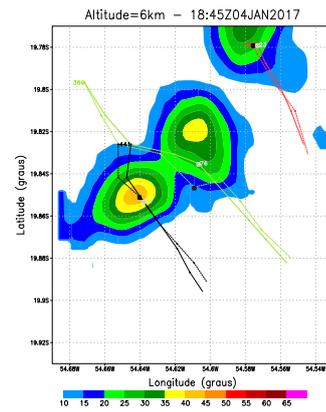
(i) CAPPI 6 km (18:40Z)



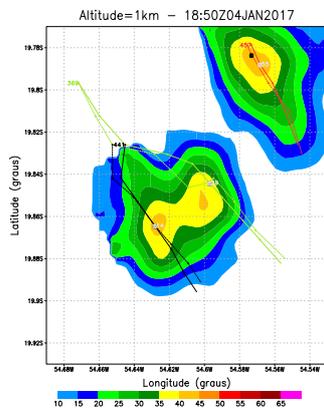
(j) CAPPI 1 km (18:45Z)



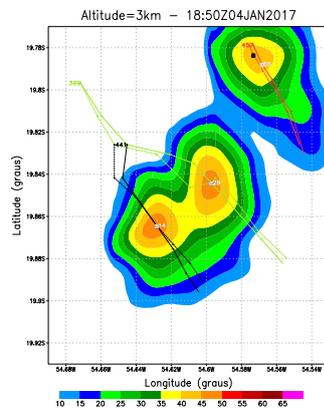
(k) CAPPI 3 km (18:45Z)



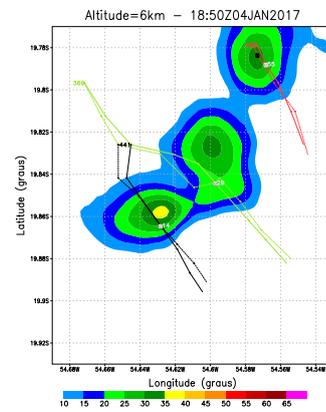
(l) CAPPI 6 km (18:45Z)



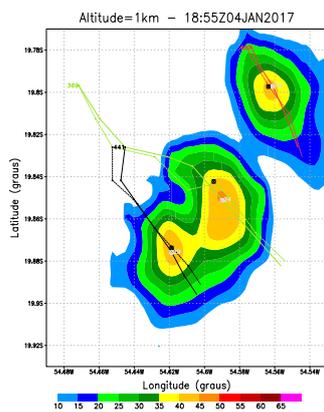
(m) CAPPI 1 km (18:50Z)



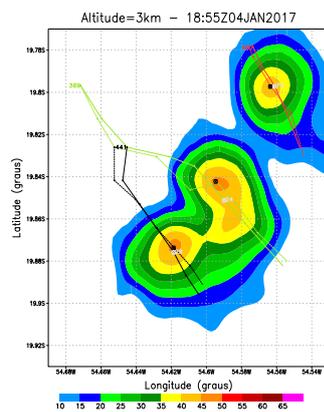
(n) CAPPI 3 km (18:50Z)



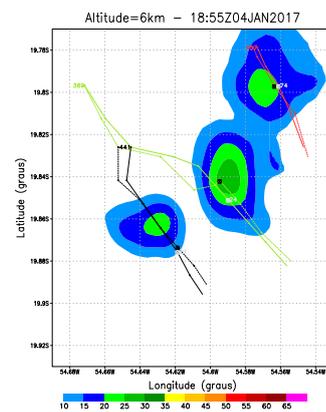
(o) CAPPI 6 km (18:50Z)



(p) CAPPI 1 km (18:55Z)



(q) CAPPI 3 km (18:55Z)



(r) CAPPI 6 km (18:55Z)

Os pontos nas células indicam o máximo de refletividade (preto) e o centro de massa (branco).

Fonte: Produção do autor.

## 5.4 *Nowcasting* com ciclo de vida

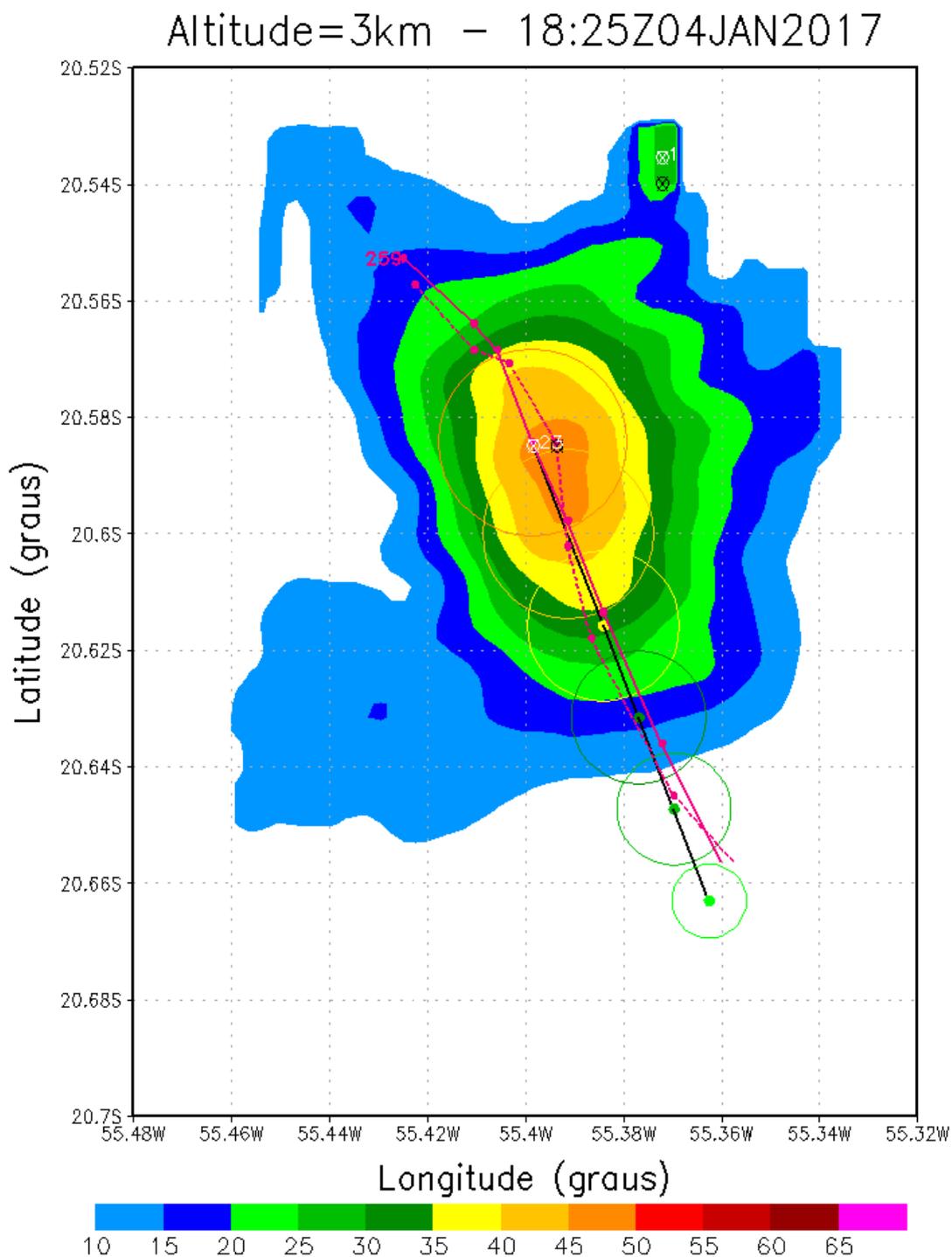
Os algoritmos de *nowcasting* desenvolvidos a partir da classificação de células convectivas usando limiar fixo de refletividade realizam previsões de curtíssimo prazo extrapolando linearmente a célula de tempestade ou a própria tempestade, na qual o tempo de previsão é definido pelo usuário. Do ponto de vista operacional, esse tipo de extrapolação não tem sido útil devido às grandes incertezas geradas na previsão. Para uso operacional e atendimento às necessidades críticas que exigem maior tempo de previsão e melhor confiabilidade dessa previsão, é necessário um *nowcasting* mais elaborado. Assim, esse trabalho estudou o potencial de se gerar *nowcasting* a partir de propriedades volumétricas das células convectivas e também considerando seus ciclos de vida.

As células de tempestade usadas para avaliar o potencial da abordagem tridimensional estudada nesse trabalho para a realização de *nowcasting* foram selecionadas segundo critérios que indicam a fase cumulus, a fase madura e a fase dissipação no comportamento do volume da célula. Com esta seleção de ciclos de vida foi criado um Banco de Dados de *Nowcasting* (**BDN**) que será utilizado como base para a construção do *Nowcasting* com Ciclo de Vida ou **NCV**.

Para esse estudo, o BDN foi construído para armazenar ciclo de vida de células de tempestades com no mínimo 5 pontos ou 25 minutos de observação. Em cada ciclo de vida contem informações de volume da célula, os valores de refletividade do CM e da MAX. Três conjuntos de BDN foram construídos como experimentos de sensibilidade, o primeiro mais geral com ciclos curtos e médios (inicialmente com 20 minutos duração) com 3681 amostras, o segundo para ciclos mais longos com 30 minutos de duração no mínimo, totalizando 2187 amostras e, o terceiro, se baseia no primeiro conjunto, porém mais elaborado com 1557 amostras.

A Figura 5.17 apresenta uma saída do NCV de uma célula selecionada do BDN. A linha preta indica a direção futura da célula baseada nas coordenadas dos pontos do centro de massa, que podem ter dois pontos para indicar a direção ou três pontos, que nesse caso é utilizado uma média das direções. Assim, o tamanho do seguimento é proporcional ao  $m$  ou tempo restante do ciclo de vida. Os círculos representam uma ideia qualitativa da dimensão da célula (proporcional ao volume) e as cores indicam a intensidade da refletividade máxima de acordo com a escala de cores (Figura 5.17). Como comparação, a trajetória da célula de tempestade é traçada pelas linhas vermelhas que representam o deslocamento do centro de massa (cheia) e do centro de máxima refletividade (tracejada).

Figura 5.17 - Ilustração do NCV do dia 04/01/2017-18:25Z.



Linha tracejada é o trajeto do centro de máxima e a cheia do centro de massa. Os círculos indicam uma noção qualitativa da dimensão do volume e, as cores, a intensidade da refletividade.

Fonte: Produção do autor.

A máxima refletividade no instante 18:25Z foi de 47,3 dBZ que na escala é representada pela cor laranja e está representada também pelo primeiro círculo. Nos instantes seguintes que é a parte do nowcasting propriamente dito, a célula perde intensidade gradativamente assim como o seu volume indicado pelo tamanho dos círculos. A Tabela 5.3 mostra a comparação dos valores observados versus os valores do NCV realizado às 18:25Z. Examinando os dados, o NCV apresenta excelente correlação.

Tabela 5.3 - Observado versus NCV feito no 25/02/2016-18:25Z.

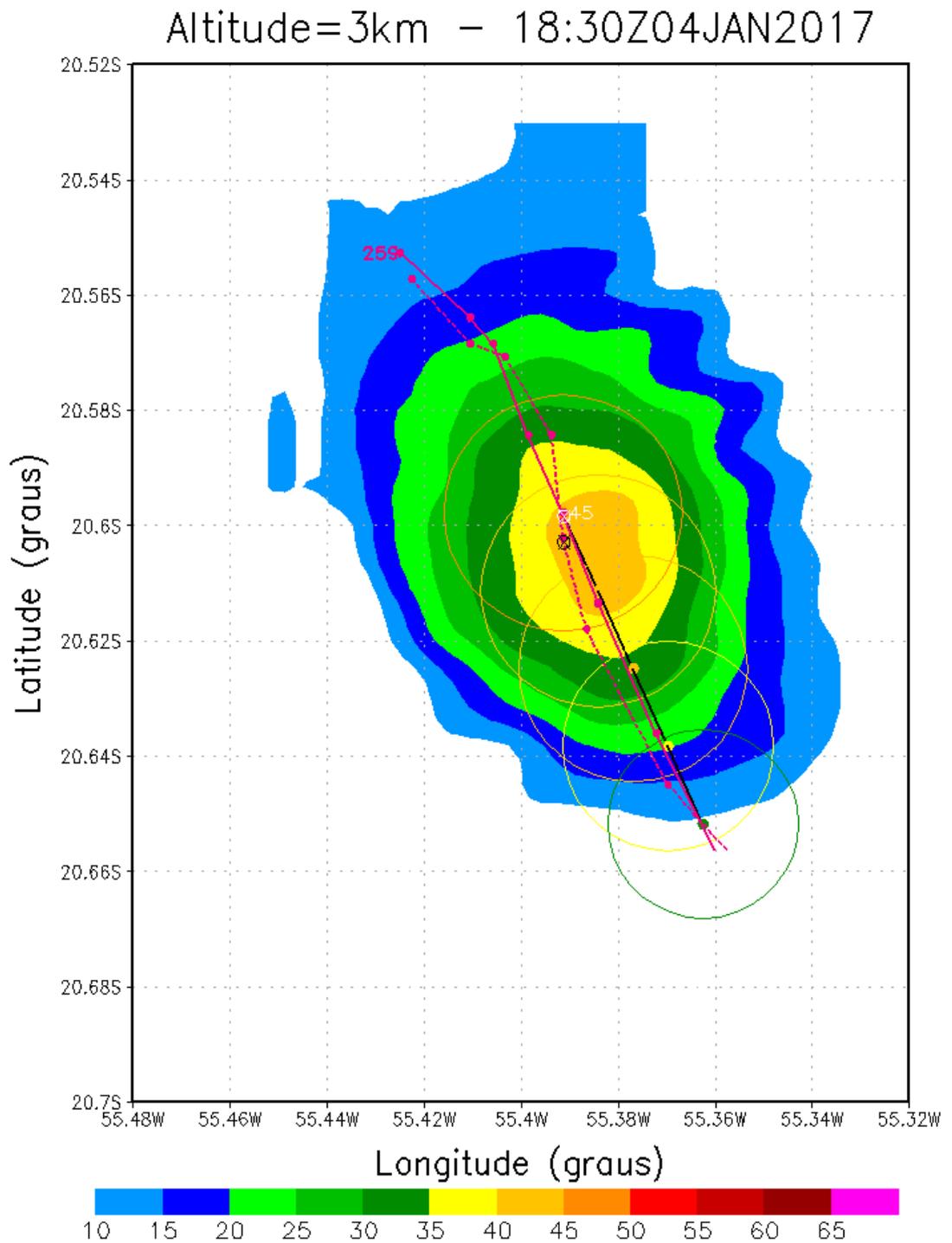
Hora	Max. observado	Nowcasting
18:30Z	45,1 dBZ	40 a 45 dBZ
18:35Z	38,1 dBZ	35 a 40 dBZ
18:40Z	33,1 dBZ	30 a 35 dBZ
18:45Z	26,7 dBZ	25 a 30 dBZ
18:50Z	15-20 dBZ	20 a 25 dBZ

Fonte: Produção do autor.

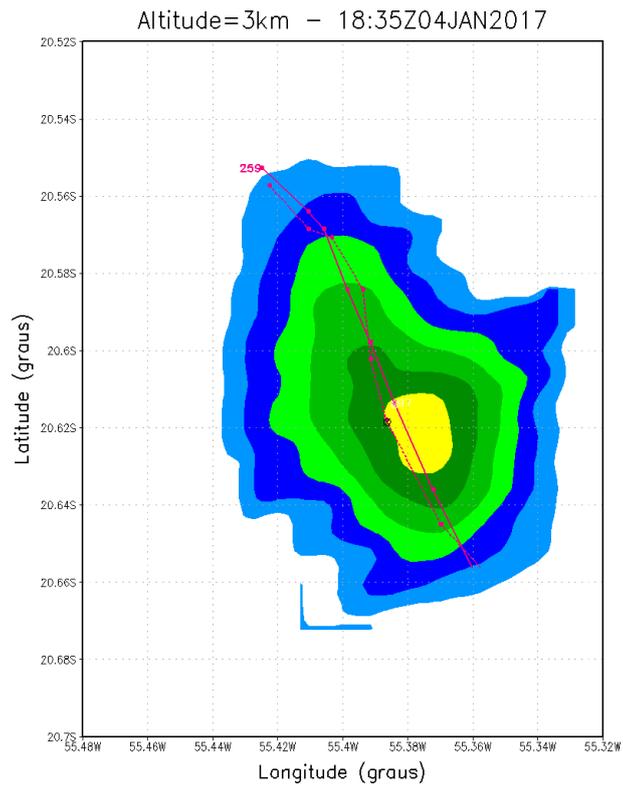
Os máximos observados do ciclo de vida da célula de tempestade, citados na Tabela 5.3, podem ser acompanhados na Figura 5.18, exceto o horário das 18:50Z, figura não apresentada.

Um novo NCV é apresentado na Figura 5.18a, isto é, foram utilizados três pontos, da imagem presente mais dois tempos passados, porém sequencial, para a consulta dos dados observados às 18:30Z no BDN. O padrão correspondente extraído do BDN resultou no NCV apresentado na Figura 5.18a. Além do círculo laranja que é o valor atual (45,1 dBZ), o nowcasting novo projetou os quatro tempos à frente, dois em laranja claro (40 a 45 dBZ) para às 18:35 e às 18:40Z, uma em amarelo (35 a 40 dBZ) para às 18:45Z e uma verde (30 a 35 dBZ) para às 18:50Z.

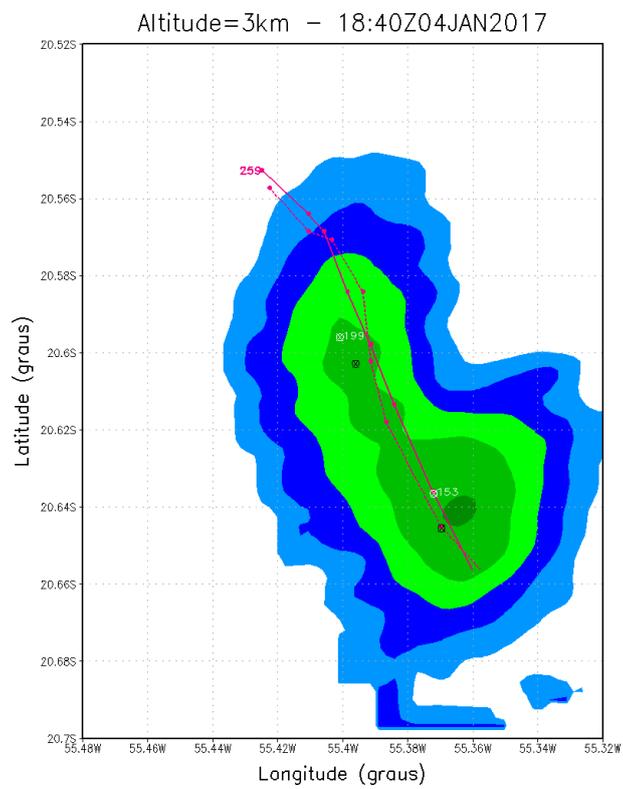
Figura 5.18 - Continuação do NCV iniciado na Figura 5.17.



(a) CAPPI 3 km (18:30Z)

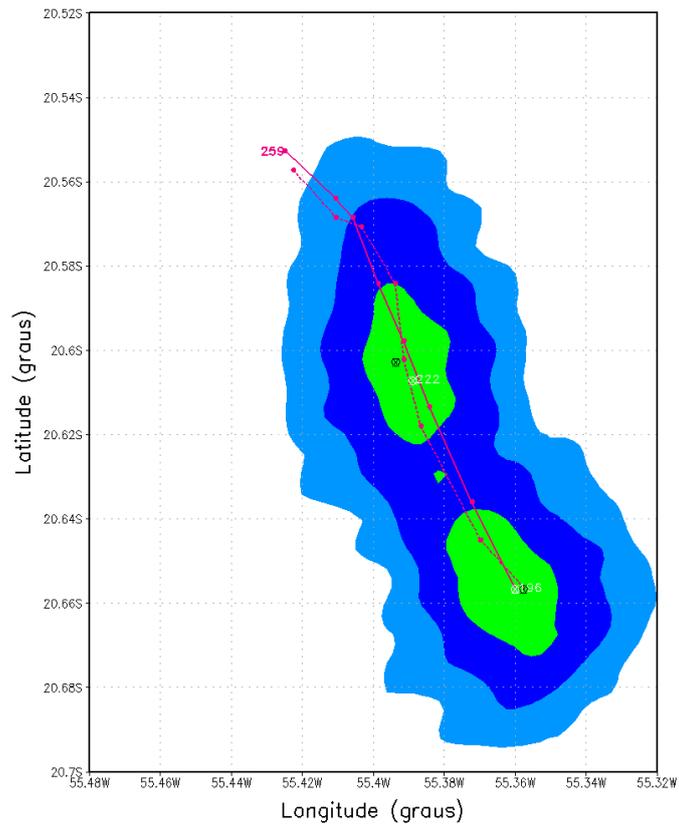


(b) CAPPI 3 km (18:35Z)



(c) CAPPI 3 km (18:40Z)

Altitude=3km - 18:45Z04JAN2017



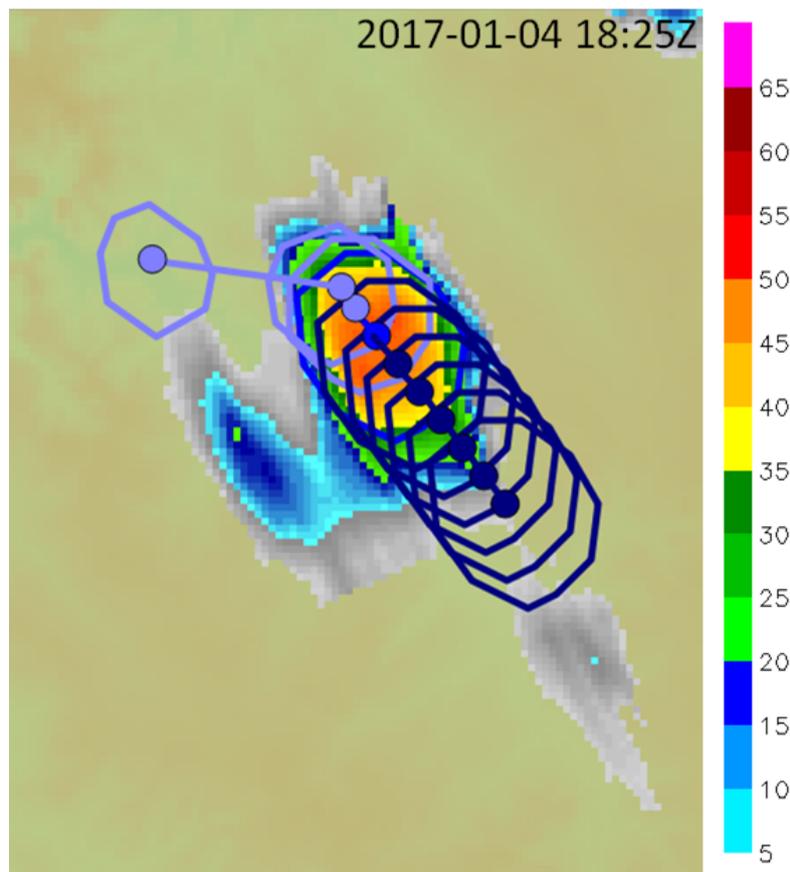
(d) CAPPI 3 km (18:45Z)

Fonte: Produção do autor.

## 5.5 Comparação da metodologia com abordagem tridimensional com o algoritmo de abordagem bidimensional Centroid Tracking

A comparação dos resultados do NCV aqui proposto com outro modelo tradicional de centroides, o *Centroid Tracking* (CTR) implementado pela Selex (2016), foi realizada com o objetivo de se avaliar o desempenho de ambos, e verificar se há ganhos significativos no nowcasting quando se usa o método NCV. O limiar de refletividade do CTR foi fixado em 30 dBZ para a definição da célula de tempestade com diâmetro mínimo de 3 km e tempo de nowcasting do CTR foi fixado em 30 minutos com saída a cada 5 minutos, como já descrito na Metodologia. Um exemplo de saída do nowcasting gerado pelo CTR pode ser visto na Figura 5.19.

Figura 5.19 - Nowcasting de 30 minutos do CTR baseada no CAPPI de 2 km do dia 04/01/2017 às 18:25Z.



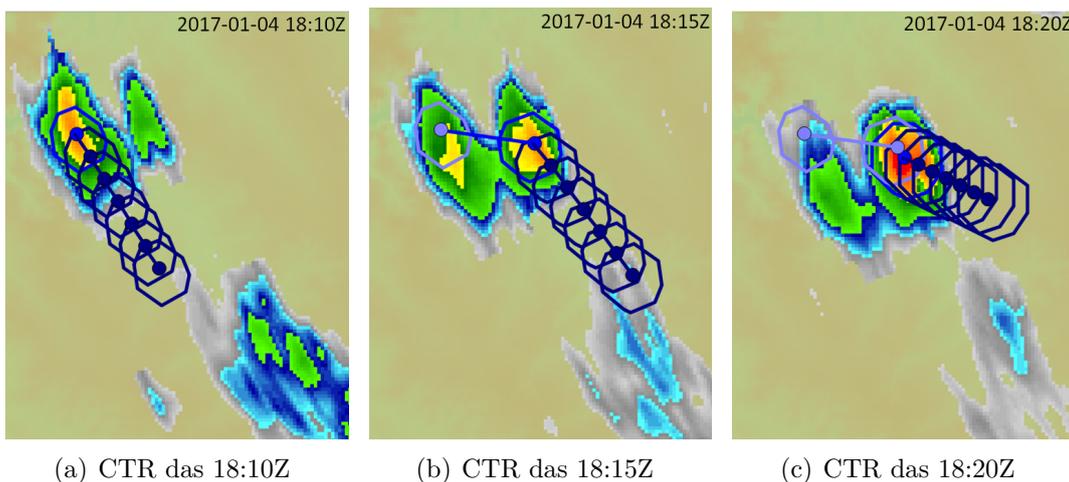
Cor dos polígonos: as posições da célula no passado estão em azul claro, a posição atual em azul e as posições no futuro a cada 5 minutos em azul escuro.

Fonte: Produção do autor.

A identificação da trajetória passada da célula de tempestade pelo CTR na Figura 5.19 não está coerente com o deslocamento entre a posição inicial e a seguinte, isto é, o vetor deslocamento é muito grande em comparação com os outros deslocamentos. Para uma análise mais detalhada na compreensão desse “salto”, a Figura 5.20 apresenta as imagens anteriores do dia 04/01/2017 às 18:25Z.

Na Figura 5.20a das 18:10Z mostra uma célula ativa mais a oeste e uma nova célula começa a crescer do lado leste. Às 18:15Z (Figura 5.20b), a célula mais a oeste perde intensidade e a nova célula se intensifica, cuja proximidade provocou o erro de identificação da trajetória passada pelo CTR. Na Figura 5.20c, a nova célula se intensifica às 18:20Z.

Figura 5.20 - Nowcasting de 30 minutos do CTR baseada no CAPPI de 2 km do dia 04/01/2017 às 18:10Z, 18:15Z e 18:20Z.



Mesma legenda da Figura 5.19.

Fonte: Produção do autor.

Como parâmetros de comparação entre o nowcasting proposto e o CTR, uma tabela de contingência foi levantada e três índices foram calculados seguindo a metodologia de Wilks (1995). O POD: probabilidade de detecção; FAR: falso alarme; e o CSI: índice de sucesso crítico.

Para construção da tabela de contingência, algumas regras de comparação entre o nowcasting e o observado foram adotadas e contabilizados como corretas:

- diferença máxima de 5 minutos entre o *nowcasting* realizado e o observado;
- intensidade da refletividade do *nowcasting* com o observado aproximado; e
- direção entre o dado pelo *nowcasting* e o observado aproximado.

Essas condições mínimas foram estabelecidas para gerar sobreposição mínima de parâmetros entre o NCV e o CTR para compor a tabela de contingência.

Como exemplo de comparação, a Figura 5.17 é comparada com a Figura 5.19 e os três pontos citados anteriormente são subjetivamente avaliados com o observado. Nesse caso, o número de tempo restante do ciclo de vida da célula de tempestade prevista está coerente nas duas metodologias assim como a direção de deslocamento, porém a intensidade do *nowcasting* do CTR não está correta, uma vez que é uma extrapolação da condição do instante de partida do *nowcasting*. Diferentemente do NCV onde o próprio algoritmo determina a duração do evento, no CTR isso deve ser configurado previamente, deixando a cargo do usuário impor a duração do evento. Isto exemplifica bem a importância de se implementar um *nowcasting* que tenha ciclo de vida.

Para a composição do BDN foram utilizados os ciclos de vida das células de tempestades rastreadas nos dias 25/10/2015, 02/11/2015, 15/01/2016, 04/02/2016, 23/12/2016, 24/12/2016 e 25/12/2016, que qualitativamente compostos por ciclos curtos e médios, totalizando **3681** ciclos selecionados e com tempo de vida mínimo de 30 minutos (ou 6 pontos que formam o ciclo de vida). Importante observar que não foi utilizado filtro de formato de variação do volume com o tempo ou filtro de parábola. O NCV foi gerado para os dias 03, 04, 09 e 12/01/2017. As comparações entre os algoritmos foram computadas com 87 amostras e a tabela de contingência montada. Os parâmetros foram calculados e os resultados estão na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Estatística da comparação entre NCV versus CTR.

Algoritmo	NCV			CTR		
	POD	FAR	CSI	POD	FAR	CSI
30 min	60,8%	22,4%	51,7%	25,7%	48,6%	20,7%

Fonte: Produção do autor.

Os resultados da Tabela 5.4 indicam que o NCV registrou 60,8% (POD) de acertar

um evento dado que o evento realmente ocorreu, 22,4% (FAR) foram alarmes falsos e 51,7% (CSI) é o percentual de acerto das estimativas. No caso do CTR, os índices foram baixos com POD de 25,7%, com 48,6% de falso alarme e CSI de 20,7%. Esses baixos resultados se devem principalmente ao rigor das regras para comparação.

Um comparativo para células com ciclo de vida longo foi realizado para analisar a capacidade NCV efetivamente realizar previsões “longas”. Para esse objetivo, o BDN foi construído utilizando dias com ciclos longos predominantes qualitativamente: 26/10/2015, 12/12/2015, 09/01/2016, 26/01/2016 e 25/02/2016. Foram **2187** ciclos de vida selecionados já aplicando o filtro de parábola no volume. O NCV foi aplicado somente ao dia 02/12/2016, que também tem predominância de ciclos longos e os resultados estão na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Comparação entre NCV e o observado para ciclos longos.

Ciclo	POD	FAR	CSI
Longo	52,2%	17,2%	47,1%

Fonte: Produção do autor.

Em termos gerais, os valores de assertividade desse experimento diminuíram se comparada à Tabela 5.4 e uma das razões é o número de pontos utilizados para a correlação cruzada entre os dados da célula observada e o BDN, que são três pares de valores refletividade do centro de massa, refletividade máxima e volume. Para trajetórias longas talvez seja necessário um número maior de pontos para “ancorar” a correlação cruzada e também permitir que o comportamento de enfraquecimento e intensificação da célula seja adicionada a seleção dos ciclos de vida para compor o BDN.

Para analisar o papel do filtro de comportamento do volume dentro ciclo de vida da célula de tempestade, as células selecionadas do BDN foram submetidos ao filtro de parábola, diminuindo de **3681** para **1557** amostras, uma redução de 42%. Com esse novo conjunto no BDN, o NCV foi aplicado para os mesmos dias, ou seja, os dias 03, 04, 09 e 12/01/2017. As comparações foram apenas entre o NCV e o observado e os resultados estão na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Comparação entre NCV e o observado com filtro de parábola.

Ciclo	POD	FAR	CSI
Curto a Médio	66,7%	12,5%	60,9%

Fonte: Produção do autor.

O número de total de amostras levantadas foi de 69 para a confecção da Tabela 5.6. Se comparada a Tabela 5.4, a assertividade aumento ligeiramente. O POD foi de 60,8% para 66,7%, o FAR diminuiu de 22,4% para 12,5% e o CSI aumentou de 51,7% para 60,9%. Essa melhoria nos resultados demonstra que é importante a seleção correta e adequada das células identificadas e com ciclo bem definido. Ciclos de vida que tem o volume aumentando ou diminuindo constantemente indica um rastreamento da célula de tempestade incompleta, em alguns casos contemplando apenas o início ou o final do ciclo de vida. Um outro fator é a baixa amostragem de células no BDN, uma vez que foram detectados células sem NCV indicando uma baixa ou inexistente correlação com as amostras.

Finalizando as análises, o método de NCV é viável e encoraja o aprimoramento da metodologia. Parte do prosseguimento deste trabalho incluiria estruturar o BDN com um número maior de amostras. Outro ponto de investimento em pesquisa é o método de correlação entre células de tempestade observadas com as células do BDN através de ferramentas matemáticas mais elaboradas. Um estudo com redes neurais poderia se mostrar factível na solução das escolhas das amostras (RIVOLTA et al., 2006; XINGJIAN et al., 2015), ou então, um conjunto de árvores de decisões (floresta de decisões) para eleger o perfil mais adequado ao observado (DAS et al., 2017).

## 5.6 Estudos sobre a Relação Refletividade x Volume das Células Conectivas

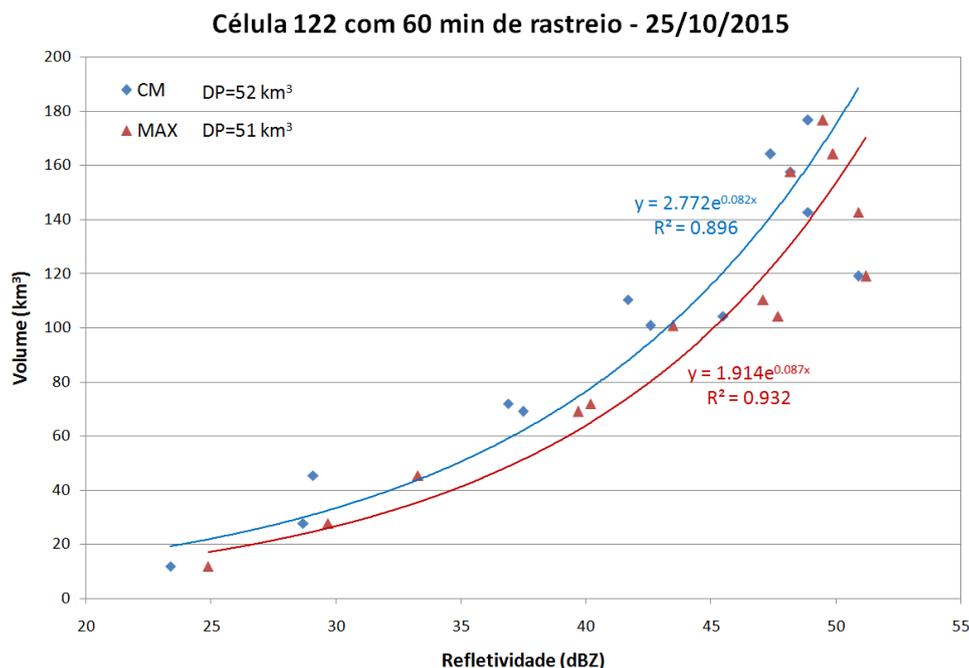
A identificação de uma célula de tempestade e a estimativa de seu centro de massa (CM) do volume dessa célula ponderado pela sua refletividade máxima (MAX), permitiram fazer o rastreo dessa célula de tempestade durante o seu ciclo de vida. A duração mínima do ciclo de vida rastreado foi de 3 pontos (3 imagens seguidas), o equivalente 10 minutos a partir do momento inicial de detecção da célula nos dados de radar. O tempo máximo rastreado foi de 25 pontos, isto é, a célula teve um ciclo de vida de 125 minutos de duração. Os dados mencionados foram levantados a partir da análise da Célula 2395 do dia 25/02/2016).

Analisando as células com no mínimo 7 pontos de ciclo de vida, ou 35 minutos, para ter um mínimo de pares de dados, vários cruzamentos foram realizados entre os parâmetros volumétricos das células como altura do CM, altura do centro de máxima refletividade, direção e velocidade de deslocamento da célula, volume da célula, diferença de volume entre os tempos sucessivos, refletividade do CM, refletividade máxima (MAX). Essas análises foram feitas na busca de padrões de correlação entre os parâmetros para descrever uma possível relação que permita uma análise prognóstica da célula de tempestade.

Um padrão encontrado foi relacionado ao ciclo de vida de uma célula de tempestade e seu volume, ou seja, o volume da célula aparentemente cresce exponencialmente em relação à refletividade máxima (MAX). Ou seja, a célula de tempestade inicia a sua fase de crescimento com o volume como uma função exponencial da refletividade, atinge o máximo dessa curva na fase madura e retorna para o mínimo pela mesma curva na sua fase de dissipação.

Para exemplificar a correlação entre volume e refletividade foi utilizado a Célula 122 de 60 minutos de rastreamento do dia 25/10/2015. As refletividades do CM e da MAX versus o volume durante o ciclo de vida dessa célula estão plotados num gráfico de dispersão da Figura 5.21. O índice de correlação do volume com a refletividade do CM e da MAX é de 0,896 e 0,932, respectivamente, com desvios padrões (DP) de 52 e 51 km<sup>3</sup>. Uma curva exponencial foi ajustada para cada dispersão como é mostrado na Figura 5.21, onde a linha azul é referente ao CM e a vermelha a MAX.

Figura 5.21 - Correlação entre Refletividade e Volume da Célula 122.



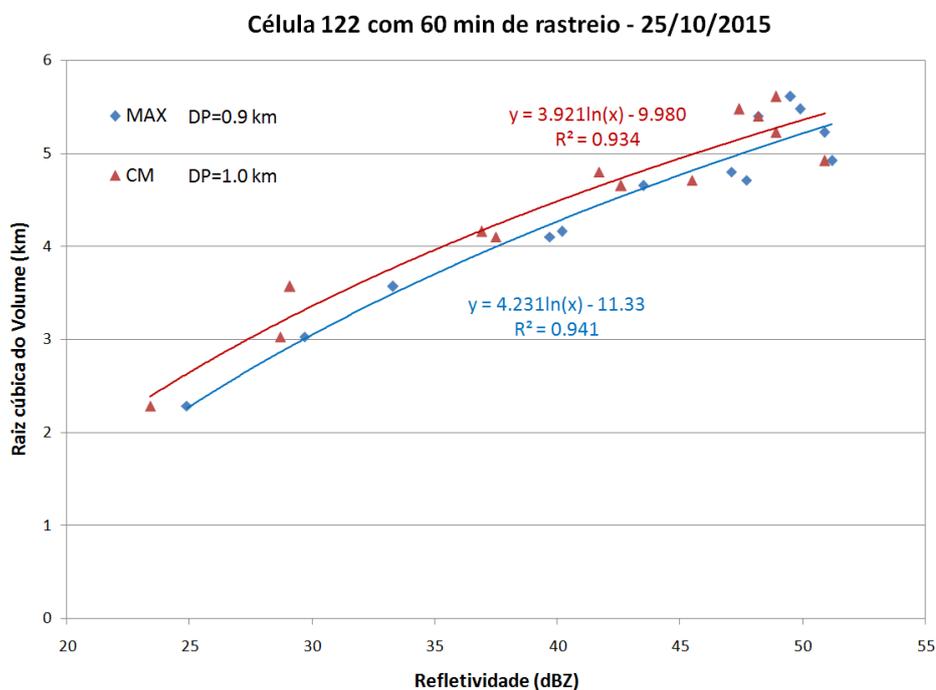
Fonte: Produção do autor.

Nessa análise da Célula 122 (Figura 5.21), a correlação entre refletividade do CM e o volume foi menor se comparada com a correlação entre a refletividade máxima e o Volume. Em primeira análise, o volume seria melhor representado pelos picos de refletividade máxima indicando o estado de atividade da célula, uma vez que a refletividade do CM se aproxima mais de um valor médio, suavizando o comportamento do volume.

O volume da célula é constituído por três dimensões e isso impacta diretamente no cálculo do desvio padrão. Para diminuir esse impacto no crescimento cúbico pode-se aproximar a célula para um cubo e extrair a sua aresta, reduzindo-a de três dimensões para uma dimensão. Com essa aproximação, a Figura 5.21 foi reconstruída e está representada na Figura 5.22. A curva que melhor se ajusta aos pontos é a logarítmica e o desvio padrão diminuiu em duas ordens de grandeza para 0,9 e 1,0 km para o MAX e o CM, respectivamente, versus a raiz cúbica do volume. A redução do desvio padrão diminuiu consideravelmente o intervalo de variação na busca pelo volume dada a refletividade, restringindo a faixa de comportamento da célula de tempestade durante o seu ciclo de vida. Para um objetivo prognóstico, esse

procedimento de redução de dimensão parece ser o mais adequado.

Figura 5.22 - Raiz cúbica do Volume versus refletividade da Célula 122.

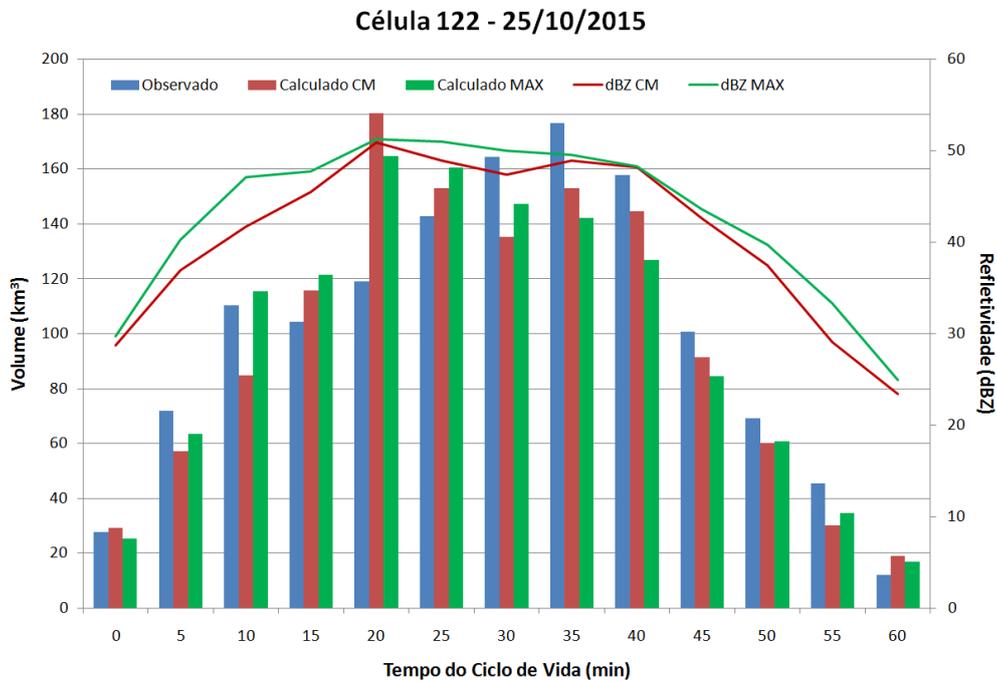


Fonte: Produção do autor.

A Célula 122 foi rastreada durante 60 minutos e, nesse tempo, o volume apresentou uma pequena diminuição aos 15 minutos de vida, sendo que atinge o máximo crescimento em 35 minutos de vida com  $176,6 \text{ km}^3$ , seguida de um rápido decaimento no volume no restante do ciclo (coluna azul na Figura 5.23). Como comparação das equações exponenciais de ajuste, os volumes foram calculados utilizando as respectivas equações sobre os valores de refletividade do CM e da MAX (coluna vermelha para CM e verde para MAX na Figura 5.23). O máximo volume projetado pelas equações exponenciais de ajuste ocorre aos 20 minutos com  $180,1$  e  $164,6 \text{ km}^3$ , respectivamente, para CM e MAX, e subestimando o volume máximo observado aos 35 minutos. Essas diferenças contribuem significativamente para o valor do Desvio Padrão (DP) de  $52$  e  $51 \text{ km}^3$ . Esse máximo do volume calculado utilizando as equações exponenciais se deve a refletividade máxima atingir o máximo nesse tempo do ciclo com  $51,2 \text{ dBZ}$ . Assim as equações exponenciais ajustadas indicam o máximo volume de acordo com a máxima refletividade, porém na dinâmica dessa célula de tempestades.

tade, o volume máximo ocorre somente 10 minutos depois que a célula atingiu a sua máxima refletividade.

Figura 5.23 - Comportamento da Célula 122 no seu ciclo de vida de 60 minutos.



Fonte: Produção do autor.

A diferença do instante da ocorrência entre os máximos de refletividade e do volume depende da dinâmica da célula de tempestade. Um levantamento estatístico dessas diferenças entre os instantes foi realizado sobre uma amostra de 4 dias de rastreamento: 25/10/2015, 02/11/2015, 25/02/2016 e 03/01/2017. Os resultados estão resumidos na Tabela 5.7 divididos por diferença de tempo e tempo do ciclo de vida.

Tabela 5.7 - Tempo entre a ocorrência da refletividade máxima em relação ao volume máximo.

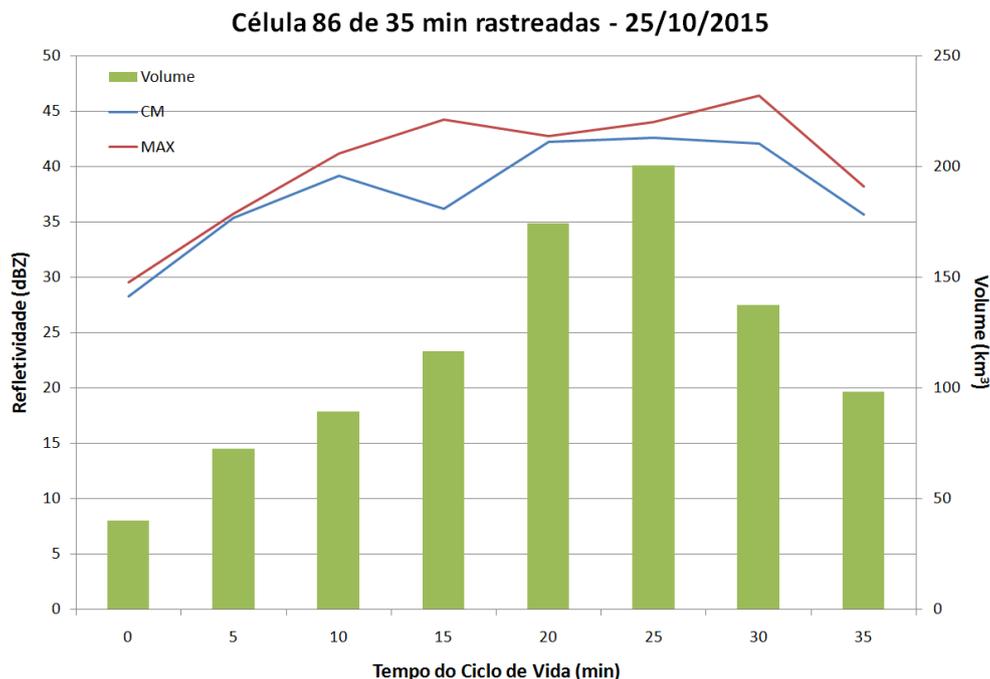
Ciclo de vida	T-15min	T-10min	T-5min	T	T+5min
35 min	-	5%	18,5%	70%	15,5%
50 min	-	8%	24%	48%	20%
>60 min	22%	-	33,3%	44,4%	-
Total	3,7%	5,6%	22,2%	55,6%	13%

Fonte: Produção do autor.

As diferenças de tempo entre a máxima refletividade e o volume máximo chega a 15 minutos para ciclos de vida maiores que 60 minutos com 22% de ocorrências (Tabela 5.7). A maior parte ocorre no mesmo instante ou com leve atraso de 5 minutos totalizando 77,7% dos casos. Normalmente, as células de ciclo de vida longo são células menores cuja dinâmica de ajuste entre volume e máxima refletividade é rápida. Uma hipótese para o volume se atrasar para atingir o máximo pode ser a geração da parte estratiforme ou a acomodação da sustentação da massa que entra em colapso.

Há casos onde o volume máximo ocorre antes da célula atingir o máximo de refletividade como nos ciclos de vida de 35 e 50 minutos com mais de 15% das ocorrências (Tabela 5.7). Uma hipótese para esse “adiantamento” pode ser o início da precipitação de pequenos granizo abaixo da altitude de congelamento, onde o granizo é coberto por uma fina camada de água líquida aumentando levemente a refletividade máxima. Essa precipitação não necessariamente aumenta o volume uma vez que a célula de tempestade pode estar já encaminhando para a fase de dissipação como pode ser visto na Figura 5.24, onde retrata o ciclo de vida da Célula 86 do dia 25/10/2015. O volume da Célula 86 atinge o máximo aos 25 minutos do ciclo de vida e somente na observação posterior é que a refletividade atinge o seu máximo com 46,4 dBZ.

Figura 5.24 - Ciclo de vida da Célula 86 do dia 25/10/2015.



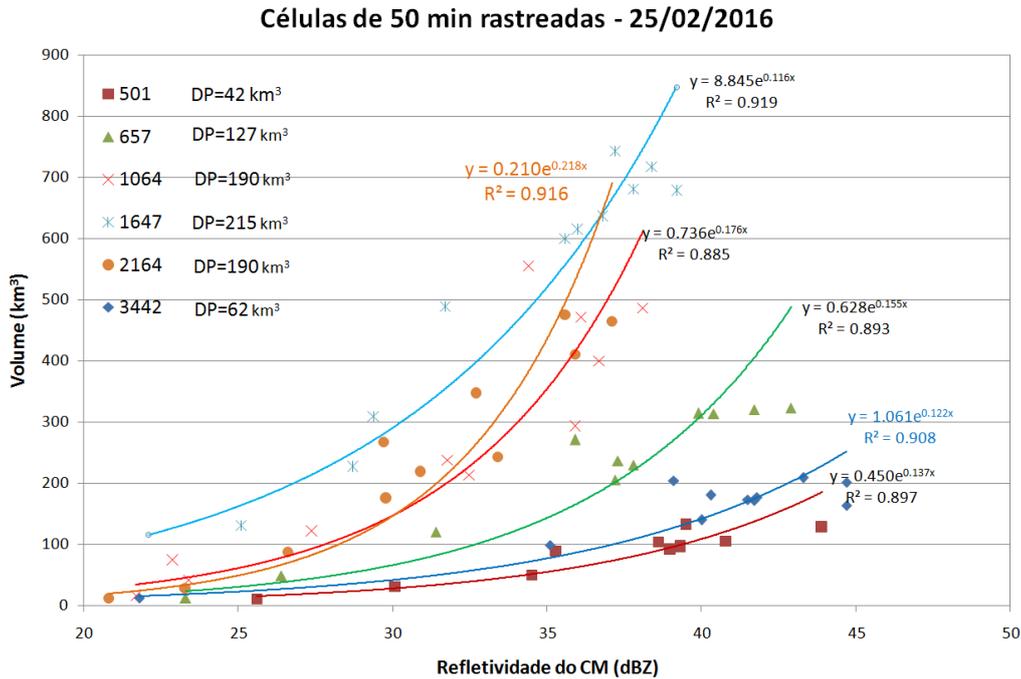
Fonte: Produção do autor.

Em geral, a Tabela 5.7 indica que a maioria das células de tempestade durante o seu ciclo de vida atinge a máxima expansão no volume quando esta tem a máxima atividade em termo de intensidade de refletividade (55,6% dos casos na média).

A Célula 122 ou mesmo a 86 possuem volumes em torno de 200 km<sup>3</sup>, cuja aproximação para um cubo, resultaria em uma célula equivalente a ter lado de 5,8x5,8x5,8 km<sup>3</sup>, bastante reduzida para as dimensões de um Cb, por exemplo. Uma investigação para células de tempestades com dimensões expressivas era necessária para averiguar se a relação exponencial entre a refletividade e o volume continuava verdadeira.

A Figura 5.25 é constituída por células de tempestades que duraram 50 minutos em seu ciclo de vida, cujas dimensões máximas em termos de volume variam entre 200 e 700 km<sup>3</sup>. A Célula 1647 rastreada no dia 25/02/2016 tem volume máximo de 743,8 km<sup>3</sup> que equivale a um cubo de 9 km de lado. Mesmo para essas dimensões, a relação entre refletividade e volume segue uma curva exponencial. A principal observação nesse caso é que a maior correlação foi entre a refletividade do CM e volume, e não da refletividade máxima (MAX).

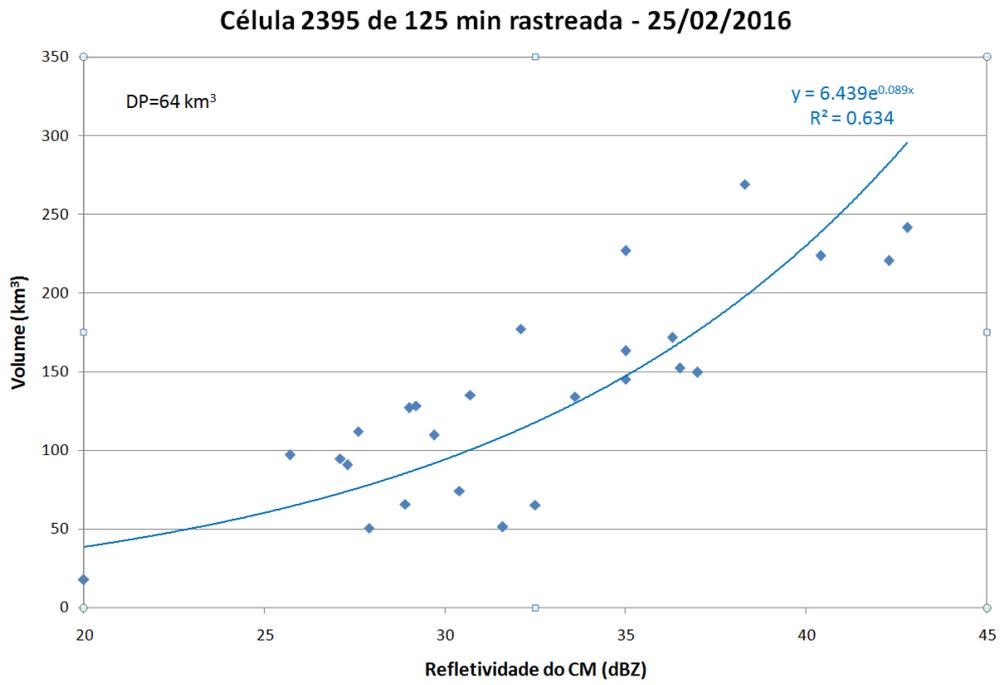
Figura 5.25 - Correlação entre refletividade do CM versus Volume.



Fonte: Produção do autor.

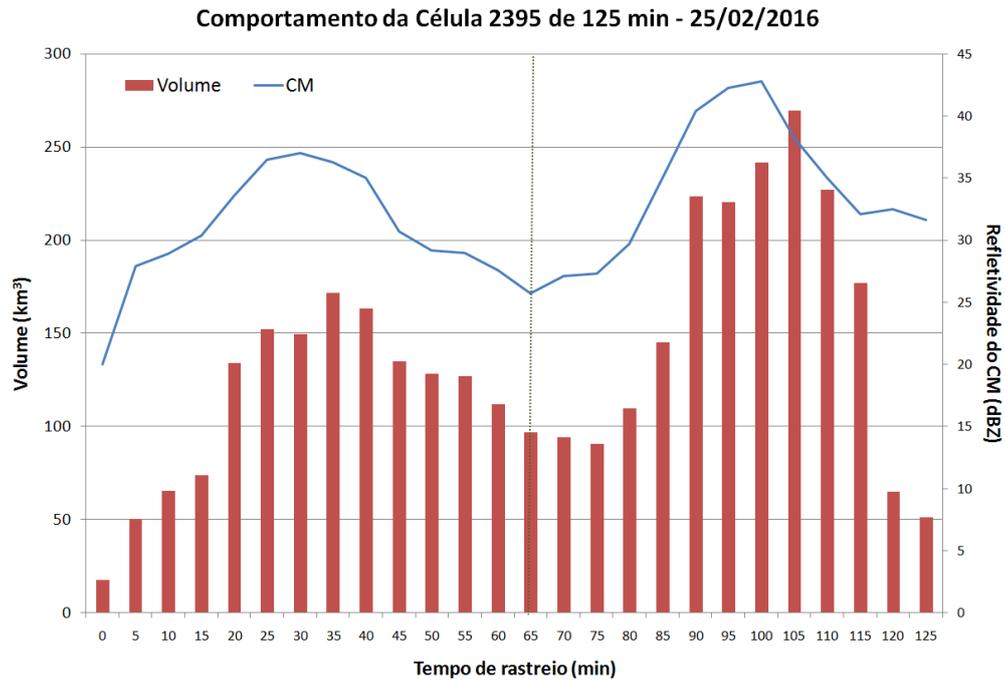
Para a mesma data, dia 25/02/2016, a Célula 2395 foi rastreada por 125 minutos e a relação exponencial entre refletividade e volume se manteve, porém com um valor de correlação bem inferior (0,634) (Figura 5.26). A dispersão dos pontos em torno da curva é relativamente baixa resultando num desvio padrão de 64 km<sup>3</sup>. Essa Célula de tempestade teve um ciclo de vida longo e diferentes fases na sua dinâmica de evolução que pode ser dividida em duas partes como destacado na Figura 5.27. A primeira parte constitui a primeira hora, onde a célula de tempestade quase completou as três fases (crescimento, madura e dissipação). A parte dois começa no minuto 65, onde a célula começa a se intensificar com maior injeção de vapor d'água resultando num rápido aumento do seu volume.

Figura 5.26 - Correlação entre refletividade do CM versus Volume da Célula 2395.



Fonte: Produção do autor.

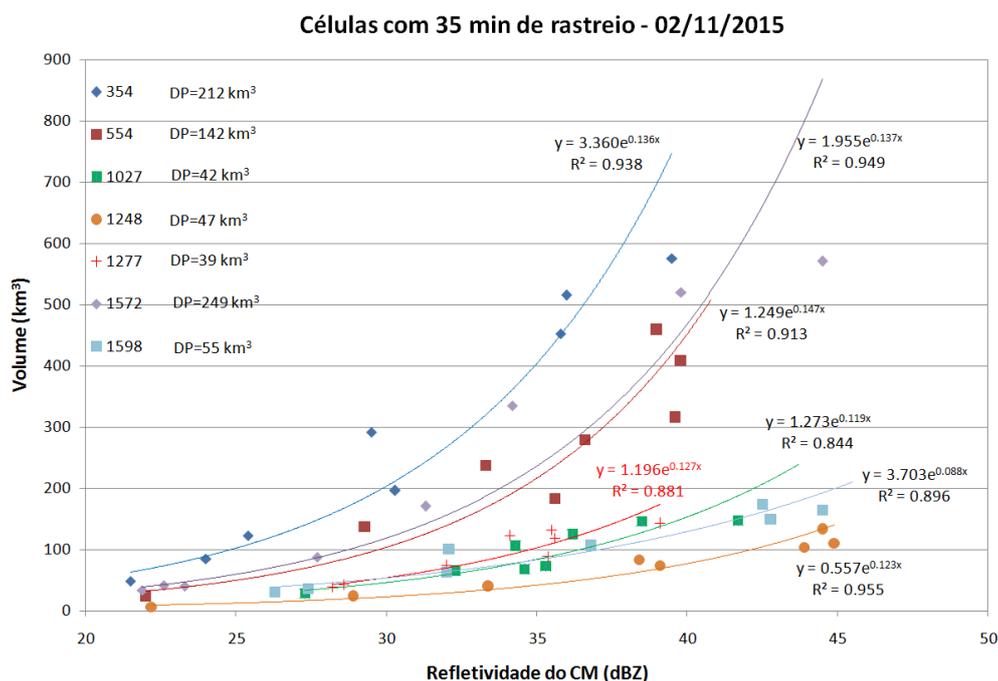
Figura 5.27 - Dinâmica de evolução da Célula 2395.



Fonte: Produção do autor.

Para ciclos de vida curtos como 35 minutos, as células de tempestade rastreadas no dia 02/11/2015 são individualmente correlacionadas e apresentadas na Figura 5.28. Todas as curvas apresentam boa correlação para ajustes exponenciais mesmo para ciclos curtos.

Figura 5.28 - Ciclo de vida de células com 35 minutos de rastreo.



Fonte: Produção do autor.

O objetivo principal de estabelecer essa relação de variação exponencial entre refletividade e volume foi avaliar a possibilidade de se obter o prognóstico comportamental da célula no início do seu ciclo de vida. Uma vez identificadas duas ou três etapas iniciais do ciclo da célula de tempestade, e conhecendo a curva exponencial baseada nas informações de volume e refletividade, as etapas seguintes do ciclo de vida poderiam ser identificadas antecipadamente. Porém, duas dificuldades são identificadas e que dificultam o emprego desse objetivo: o tempo de vida da célula de tempestade é uma incógnita e a dificuldade de se identificar a melhor curva exponencial que se ajuste à sua fase inicial (volume menor), uma vez que o desvio padrão coloca todas as curvas no mesmo intervalo inicial. Essas questões necessitam de mais investigação científica e de ferramentas matemáticas mais elaboradas para o tratamento adequado do problema. Se essas questões fossem resolvidas, essa propriedade do comportamento exponencial entre refletividade e volume seria a solução para o nowcasting por radar.

Porém, enquanto esforços para encontrar uma solução física e matemática que permita realizar o nowcasting perfeito não é encontrada, uma metodologia alternativa que envolve a extrapolação do volume da célula em função das variáveis volumétricas

do ciclo de vida da célula armazenadas no BDN está em teste nesse momento. Os resultados serão apresentados em uma etapa posterior à conclusão desse trabalho. O método consiste em aplicar os resultados obtidos no item 5.4 com a associação do volume estimado pelo método descrito nesse item para cada momento de vida previsto para a célula que está sendo rastreada.

## 5.7 Sumário dos principais resultados obtidos na pesquisa

Essa pesquisa teve como objetivo principal “pesquisar os sistemas precipitantes que ocorrem dentro da área de cobertura de um radar meteorológico e estudar a dinâmica desses sistemas focando na análise de seus parâmetros físicos como ciclo de vida, volume, centro de massa, e posição do núcleo de máxima intensidade e respectivas refletividades, vetor deslocamento médio do volume, vento horizontal nos níveis médios e vetor deslocamento da célula”. Esse objetivo foi cumprido através da proposição de uma metodologia inédita aplicada aqui para analisar as propriedades volumétricas dos sistemas precipitantes avaliados. Tal metodologia fez uso de uma abordagem estritamente tridimensional, e estudou um número muito grande de células convectivas de diferentes dinâmica de evolução.

O estudo aqui realizado produziu uma série de resultados novos que certamente contribuirão para a mudança do paradigma de classificação de células convectivas a partir do uso de classificação por limiar fixo de refletividade e reduzindo uma nuvem volumétrica em um campo de refletividade de duas dimensões. Os resultados aqui apresentados também mostraram o enorme potencial de se realizar um nowcasting com confiabilidade e tempo de previsão que atenda às necessidades dos centros operacionais de monitoramento meteorológico a partir de radares meteorológicos.

Como forma de melhor compreender e registrar os avanços obtidos nessa pesquisa, um sumário com os principais resultados é apresentado a seguir respondendo as questões inicialmente levantadas na introdução:

- a) Questão 1. O Método de Expansão 3D proposto identificou e classificou as células de tempestades convectivas usando uma técnica de expansão tridimensional, partindo dos núcleos de refletividade mais intensos para as bordas. Essa metodologia utilizou os intervalos de refletividade como balizadoras/controladora na classificação dos elementos de volume dessas células e os resultados são superiores aos da metodologia por limiares de refletividade. Essa metodologia do 3DEM classificou sem a necessidade de outros métodos complementares como a Matemática Morfológica de Han et al. (2009).
- b) Questão 2. A identificação da célula utilizando o 3DEM caracterizou a distribuição da estrutura da célula de tempestade na vertical, evidenciando a necessidade de incorporar a estrutura tridimensional na análise. A consequência desse fato é o melhor posicionamento do centro de massa da

célula de tempestade que impacta diretamente no algoritmo de rastreamento de trajetória como citado por Han et al. (2009). Esse conjunto de fatores permitiu o rastreamento de uma célula de tempestade por 125 minutos.

- c) Para a Questão 3, a utilização do UWT como direção inicial para o rastreamento inicial da trajetória da célula de tempestade foi importante para cobrir a não representatividade do vento dado pelo VVP no domínio de varredura do radar. Isso foi constatado nas tabelas 5.1 e 5.2, onde uma variação maior que  $100^\circ$  entre a direção inicial dada pelo VVP e a célula rastreada foi registrada. Isso indica que o UWT foi utilizado para a correção da orientação inicial da direção. Esse procedimento entre a utilização do UWT e do VVP aumenta a precisão do rastreamento em locais que o vento não está sendo representado adequadamente pelo VVP.
- d) Questão 4. A metodologia do 3DEM e do rastreamento proporcionou melhor entendimento dos processos de *splitting* e *merging* das células de tempestade. Cada célula de tempestade possui dinâmica própria e não existe fusão entre as células, mas sim uma disputa intensa pelo vapor d'água que definirá qual célula de tempestade continuará o seu ciclo de vida e qual se dissipará. No caso do *splitting*, uma nova célula começa a crescer devido à própria célula mãe gerar frentes de rajada que proporcionam levantamento de massa e forte convecção na própria vizinhança. Essa forte convecção dá início ao crescimento de uma célula contígua à célula mãe que, com o tempo, elas seguem caminhos independentes.
- e) Questão 5. O NCV se mostrou viável e possui desempenho superior ao *nowcasting* realizados pelos algoritmos que utilizam limiares de refletividade como o CTR. O POD calculado sobre os resultados do NCV apresenta valor superior a 60% enquanto que o POD do CTR chega a 26%. A metodologia do NCV já permite a realização de comparações quantitativas com os eventos observados, esse procedimento é inédito em *nowcasting* por radar na comunidade científica onde apenas comparações qualitativas eram realizadas.
- f) Uma importante contribuição desse trabalho é a descoberta da assinatura no comportamento entre Volume x Refletividade no ciclo de vida das células de tempestade (Questão 6), onde o comportamento segue uma relação exponencial entre essas variáveis e que ainda precisa ser melhor investigada para a utilização como *nowcasting* por radar.



## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido o Método de Expansão para identificação de células de tempestade. Os algoritmos tradicionais publicados na literatura científica que fazem a identificação de células convectivas baseada em limiares de refletividade fixos apresentam dificuldades na classificação justamente por apresentarem limiares fixos. As dificuldades permanecem as mesmas mesmo havendo algoritmos que consideram mais limiares (TITAN, ETITAN, SCIT, CTR). A presença de núcleos entre limiares de refletividade resulta em uma determinação errada do centroide e dificulta o rastreamento da célula de tempestade. Em alguns algoritmos é utilizada a técnica denominada de Matemática Morfológica para a lapidação da célula para revelar as suas faces.

A técnica do Método de Expansão 3D proposta nessa pesquisa não necessita de ferramentas adicionais, uma vez que analisa a célula a partir do seu núcleo mais intenso expandindo em direção as bordas nas três direções e classifica as células individualmente mesmo imersos em uma estrutura multicelular. Portanto, o Método de Expansão para a identificação da célula de tempestade é significativamente superior em desempenho às técnicas por limiar ou limiares de refletividade.

A identificação correta das células de tempestade aliado a maior resolução espacial e temporal permitiu a análise das ocorrências de nascimento e extinção de células dentro de sistemas precipitantes, antes chamados de fusão (*merging*) e divisão (*splitting*) nos métodos tradicionais publicados até o momento. Os resultados dessas análises indicam que cada célula tem a sua dinâmica própria e não se misturam, portanto, dinamicamente não há a fusão ou separação de células. As suas fases dentro do ciclo de vida são fortemente influenciadas pela presença contígua da outra célula, dificultando ou acelerando os processos dinâmicos como intensificação e dissipação da célula de tempestade assim como a precipitação. A parte comum ao processo é a competição pelo vapor d'água e advecção de calor entre as células, onde dependendo da estrutura vertical, uma célula pode forçar a fase de dissipação com movimentos descendente sobre a outra e, esta célula quando se dissipa não consome mais vapor d'água, então esse excedente acaba intensificando a outra célula.

Uma vez definida a metodologia de classificação de células convectivas, foi possível desenvolver um método de rastreamento dessas células bastante robusto e que permite o rastreamento longo das células de tempestade. A utilização de informações de vento como UWT e/ou do VVP, acoplados ao centro de massa ponderado pela refletividade é uma boa combinação com bons resultados para se definir a direção inicial do

deslocamento da célula a ser rastreada. A maior deficiência desse método é quando a célula de tempestade se desloca quase que transversal a direção do UWT ou VVP, ou então quando não há avanço ou ocorre retrocesso da posição do centro de massa da célula de tempestade. São questões que necessitam de aprimoramento.

Os estudos para verificar o potencial de se usar a abordagem tridimensional para realizar o nowcasting da células identificadas e prever seus respectivos ciclos de vida e trajetórias, o *Nowcasting* com Ciclo de Vida (NCV) apresentaram resultados promissores. O NCV registrou um POD de 60,8% contra 25,7% do CTR. Utilizando o filtro de parábola, o desempenho do NCV aumentou 66,7% de POD. Devido a metodologia do NCV, os resultados do *nowcasting* podem ser comparados quantitativamente com o observado.

A metodologia do NCV deve ser aprimorada utilizando ferramentas matemáticas mais elaboradas para estabelecer a similaridade entre os dados observados e o BDN com maior precisão. Nos experimentos, em determinados momentos não houve identificação de padrão entre a célula observada e os padrões armazenados no Banco de Dados de Nowcasting (BDN), indicando a falta de amostras de ciclos de vida. Outro ponto que necessita de desenvolvimento é uma metodologia de correlação cruzada mais robusta entre os parâmetros observados e os armazenados no BDN.

Este estudo mostrou que nos ciclos de vida das células de tempestades, a variação do volume é uma função exponencial da refletividade. Essa curva exponencial é prejudicada porque as máximas do Volume e da Refletividade não ocorrerem no mesmo instante, gerando desvios padrões consideráveis. Uma alternativa apresentada é utilizar a raiz cúbica do volume para diminuir a ordem de grandeza do desvio padrão, embora essa transformação inverta a relação que era exponencial para logarítmica. Estudos mais aprofundados são necessário para transformar essa relação em um novo nowcasting por radar e seria a continuidade natural do presente trabalho.

Como linhas de pesquisa para trabalhos futuros sugere-se a utilização de redes neurais ou floresta de decisão para a elaboração do nowcasting por radar, um estudo de assimilação de nowcasting por radar em modelo de previsão de tempo no impacto das previsões de curtíssimo prazo e, por fim, pela sua alta resolução espacial e temporal, empregar os radares Phased Array para a descrição dos processos de interação entre células de tempestade, principalmente em sistemas multicelulares densos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTIN, G. L. Application of pattern-recognition and extrapolation techniques to forecasting. **Eur. Space Agency J. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 9, p. 147–155, 1985. 19

BROWNING, K. A. **Thunderstorm morphology and dynamics**: General circulation of middle-latitude thunderstorms. University of Oklahoma, Norman, OK: E. Kessler, 1986. 133-152 p. 2, 3, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 27, 62

CHOI, J.; OLIVEIRA, F.; SOCOLOFSKY, A. Storm identification and tracking algorithm for modeling of rainfall fields using 1-h nexrad rainfall data in texas. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 7, p. 721–730, 2009. 37

CRANE, R. K. Automatic cell detection and tracking. In: IEEE TRANS. GEOSCI. ELECTRON. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 1979. v. 17, n. 4, p. 250–262. 20

DAS, S.; CHAKRABORTY, R.; MAITRA, A. A random forest algorithm for nowcasting of intense precipitation events. **Advances in Space Research**, v. 60, n. 6, p. 1271–1282, 2017. 116

DIXON, M.; SEED, A. Developments in echo tracking-enhancing titan. In: ERAD2014-THE EIGHTH EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY. **Proceedings...** Garmisch-Partenkirchen, DE, 2014. v. 15. 3, 29

DIXON, M.; WIENER, G. Titan: Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting - a radar-based methodology. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 10, n. 6, p. 785–797, 1993. 2, 20, 37, 40, 61

DOSWELL, C. A. **The operational meteorology of convective weather**. Boulder, CO: NOAA Tech. Memo, 1985. 240 p. 15

GERMANN, U.; ZAWADZKI, I.; TURNER, B. Predictability of precipitation from continental radar images. part iv: Limits to prediction. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 63, p. 2092–2108, 2006. 3, 29

GOOGLE. **Google Earth**: Version 7.1.7.2606. 2017. São José dos Campos. 33

HAN, L.; FU, S.; ZHAO, L.; ZHENG, Y.; WANG, H.; LIN, Y. 3d convective storm identification, tracking and forecasting - an enhanced titan algorithm. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 26, p. 719–732, 2009. 2, 3, 23, 24, 61, 128, 129

HANDWERKER, J. Cell tracking with trace3d - a new algorithm. **Atmospheric Research**, v. 61, p. 15–34, 2002. 3, 21, 40, 41, 70

HORVATH, A.; SERES, A. T.; NEMETH, P. Radar-based investigation of long-lived thunderstorms in the carpathian basin. **Quartely Journal of the Hungarian Meteorological Service**, v. 19, n. 1, p. 390–51, 2015. 28

JOHNSON, J. T.; MACKEEN, P. L.; WITT, A.; MITCHELL, E. D.; STUMPF, G. J.; EILTS, M. D.; THOMAS, K. W. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced wsr-88d algorithm. **Weather and Forecasting**, v. 13, n. 2, p. 263–276, 1998. 2, 3, 21, 22, 61

KESSLER, E. I. Computer program for calculating average lengths of weather radar echoes and pattern bandedness. **Journal of Applied Meteorology**, v. 23, p. 569–574, 1966. 20

KESSLER, E. I.; RUSSO, J. A. J. A program for the assembly and display of radar-echo distributions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 2, p. 582–593, 1963. 20

KIM, D.-S.; MAKI, M.; SHIMIZU, S. X-band dual-polarization radar observation of precipitation core development and structure in a multi-celular storm over zoshigaya, japan, on august 5,2008. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 90, n. 5, p. 701–719, 2012. 27, 28, 100

LAKSHMANAN, V.; SMITH, T. An objective method of evaluating and devising storm-tracking algorithms. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 701–709, 2010. 2, 3, 23, 25, 26, 28, 62

LAKSHMANAN, V.; SMITH, T.; HONDL, K.; STUMPF, G.; WITT, A. A real-time, three-dimensional, rapidly updating, heterogeneous radar merger technique for reflectivity, velocity, and derived products. **Weather and Forecasting**, v. 21, p. 802–823, 2006. 2, 36

LANGSTON, C.; ZHANG, J.; HOWARD, K. Four-dimensional dynamic radar mosaic. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 24, p. 776–790, 2007. 36

LEMON, L. R.; DOSWELL, C. A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornado genesis. **Montly Weather Review**, v. 107, p. 1184–1197, 1979. 2, 11

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, p. 1286–1300, 1995. 21, 23

LI, N.; WEI, M.; NIU, B.; MU, X. A new radar-based storm identification and warning technique. **Meteorological Applications**, v. 19, p. 17–25, 2012. 3, 26

MARENGO, J. Interdecadal variability and trends of rainfall across the amazon basin. **Theoretical and applied climatology**, v. 78, n. 1, p. 79–96, 2004. 32

MASS, C. Nowcasting: The promise of new technologies of communitacion, modeling and observation. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 93, p. 797–809, 2012. 2

MATTHEWS, J.; TROSTEL, J. An improved storm cell identification and tracking (scit) algorithm based on dbscan clustering and jpda tracking methods. **American Meteorological Society, Atlanta, GA.[online] Available from: [http://ams.confex.com/ams/90annual/techprogram/paper\\_164442.htm](http://ams.confex.com/ams/90annual/techprogram/paper_164442.htm)**, 2010. 24, 25, 61

OTSUKA, S.; TUERHONG, G.; KIKUCHI, R.; KITANO, Y.; TANIGUCHI, Y.; RUIZ, J. J.; SATOH, S.; USHIO, T.; MIYOSHI, T. Precipitation nowcasting with three-dimensional space-time extrapolation of dense and frequent phase-array weather radar observations. **Weather and Forecasting**, v. 31, p. 329–340, 2016. 3

PERSSON, P. O. G.; ANDERSON, T. A real time system: automatic wind field interpretation of doppler radar wind components. In: SYMP. MESOSCALE ANALYSIS AND FORECASTING. **Proceedings...** Vancouver, European Space Agency, SP282, 1987. p. 61–66. 42, 71

PIERCE, C.; SEED, A.; BALLARD, S.; SIMONIN, D.; LI, Z. **Weather radar, wind profiler, ionospheric radar, and other advanced applications: Nowcasting, doppler radar observations.** Shangai, CH: InTech, 2012. 97-142 p. 2

QUEIROZ, A. P. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar.** 128 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, dezembro 2009. 29

RINEHART, R. E.; GARVEY, E. T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. **Nature**, v. 273, n. 5660, p. 287–289, 1978. 2, 19, 20

- RIVOLTA, G.; MARZANO, F. S.; COPPOLA, E.; VERDECCHIA, M. Artificial neural-network technique for precipitation nowcasting from satellite imagery. **Advances in Geosciences**, v. 7, p. 97–103, 2006. 116
- ROSENFELD, D. Objective method for analysis and tracking of convective cells as seen by radar. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 4, p. 422–434, 1987. 20
- SCHOEN, J. M.; ASHLEY, W. S. A climatology of fatal convective wind events by storm type. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 10, p. 109–121, 2011. 2, 17, 18
- SCHUUR, T.; RYZHKOV, A.; HEINSELMAN, P.; ZRNIC D. BURGESS, D.; SCHARFENBERG, K. **Observations and classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar**. Norman, OK: NOAA/CIMSS, 2003. 46 p. 34
- SEED, A. A dynamic and spatial scaling approach to advection modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, p. 381–388, 2003. 3, 29
- SELEX. **Software Manual: Rainbow5 - products and algorithms**. Neuss: Selex EX GmbH 0 Gematronik Weather Radar Systems, 2016. 514 p. 42, 43, 48, 112
- SHAH, S.; NOTARPIETRO, R.; BRANCA, M. Storm identification, tracking and forecasting using high-resolution images of short-range x-band radar. **Atmosphere**, v. 6, p. 579–606, 2015. 3, 28
- SMYTHE, G. R.; ZRNIC, D. S. Correlation analysis of doppler radar data and retrieval of the horizontal wind. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 22, p. 297–311, 1983. 20
- UPTON, G. J. G. Using volumetric radar data to track horizontal and vertical movements of storms. **Phys. Chem. Earth (B)**, v. 25, n. 10-12, p. 1117–1121, 2000. 3, 19
- WALDTEUFEL, P.; CORBIN, H. On the analysis of single doppler data. **J. Appl. Meteorol.**, v. 18, p. 532–542, 1979. 22, 41, 43, 71
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric science**. San Diego, CA: Academic Press, 1995. 467 p. 50, 113
- WILLIAMSON, S. P. **Federal Meteorological Handbook: Doppler radar meteorological observations - part b: Doppler radar theory and meteorology**. Washington, DC: U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE/NOAA, 2005. 219 p. 2, 13, 18

- WILSON, J. W.; CROOK, N. A.; MUELLER, C. K.; SUN, J.; DIXON, M. Nowcasting thunderstorm: a status report. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, p. 2079–2099, 1998. 2, 22, 23
- WILSON, J. W.; EBERT, E. E.; PIERCE, C. E.; SAXEN, T. R.; ROBERTS, R. D.; MUELLER, C. K.; SEED, A. Sydney 2000 forecast demonstration project: Convective storm nowcasting. **Weather and Forecasting**, v. 19, p. 131–150, 2004. 22
- WILSON, J. W.; MUELLER, C. K. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. **Weather and Forecasting**, v. 8, p. 113–131, 1993. 19
- XINGJIAN, S.; CHEN, Z.; WANG, H.; YEUNG, D.-Y.; WONG, W.-K.; WOO, W.-C. Convolutional lstm network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. In: **Advances in neural information processing systems**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 802–810. 116
- ZHANG, J.; HOWARD, K.; GOURLEY, J. J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: examples of convective storms and stratiform rain echoes. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 22, p. 30–42, 2005. 36



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.