

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**MATHEUS JOSÉ ARRUDA LYRA**

**INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS FÍSICOS E SINÓTICOS NAS TRAJETÓRIAS DOS  
COMPLEXOS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO NORDESTE BRASILEIRO  
ENTRE 2008 E 2015**

**Maceió  
2018**

MATHEUS JOSÉ ARRUDA LYRA

INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS FÍSICOS E SINÓTICOS NAS TRAJETÓRIAS DOS  
COMPLEXOS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO NORDESTE BRASILEIRO  
ENTRE 2008 E 2015

Dissertação submetida ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Levit

Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dra. Natalia Fedorova

Maceió

2018

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**

Bibliotecária responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

- L992i Lyra, Matheus José Arruda.  
Influência dos processos físicos e sinóticos nas trajetórias dos complexos convectivos de mesoescala no nordeste brasileiro entre 2008 e 2015 / Matheus José Arruda Lyra. – 2018.  
72 f. : il.
- Orientador: Vladimir Levit.  
Coorientador: Natalia Fedorova.  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2018.
- Bibliografia: f. 68-72.
1. Meteorologia Sinótica. 2. Complexos convectivos de mesoescala – Nordeste, Brasil – 2008/2015. 3. Previsão do tempo. I. Título.
- CDU: 551.515.6(812/813)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

## CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-151.

**“INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS FÍSICOS E SINÓTICOS NAS  
TRAJETÓRIAS DOS COMPLEXOS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO  
NORDESTE BRASILEIRO ENTRE 2008 E 2015.”**

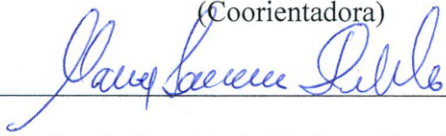
***Matheus José Arruda Lyra***


Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Vladimir Levit  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Natalia Fedorova  
(Coorientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo  
(Membro Interno)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mozar de Araújo Salvador  
(Membro Externo INMET)

**Março /2018**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, especialmente aos meus pais, Marco e Jaqueline pelo apoio e amor em todos os momentos. Ao meu irmão João Marcos pela amizade e por fazer silêncio durante a madrugada.

A Milena por toda paciência, ajuda e motivação que foram fundamentais para a construção e conclusão deste trabalho.

Aos meus professores e orientadores Vladimir Levit e Natalia Fedorova. Sempre serei grato pela confiança, aprendizado e oportunidade que recebi durante todo este ciclo.

Ao Hugo e o Lucas, meus amigos desde a época que nem sabíamos direito o que era uma Cb. Sou honrado por ter conhecido vocês e agradeço por toda ajuda desde as aulas de fundamentos à conclusão desta dissertação.

A todos da turma do Mestrado. Em especial ao Ítalo e Osmar, amigos que contribuíram bastante tanto para o desenvolvimento deste trabalho, quanto também na minha vida acadêmica.

A todos os meus irmãos do laboratório, principalmente ao João Pedro e a Yasmin pela amizade e ajuda durante os momentos de necessidade.

Aos meus amigos do ICAT, o qual foi minha segunda casa durante vários anos, agradeço a todos vocês, principalmente ao Gabriel pelos bons momentos de descontração e pelas idas ao velho pastel chinês com coca.

Aos OZA. Meus amigos, meus irmãos.

“Um único sonho é mais poderoso do que mil realidades”

*J.R.R. Tolkien*

## RESUMO

A previsão do tempo de curto prazo, de sistemas de mesoescala, é relevante para estudos operacionais e compreensão da população em geral, devido aos diversos tipos de fenômenos adversos associados. Com isto, o principal objetivo deste estudo foi analisar os diferentes processos que influenciaram as trajetórias durante o desenvolvimento dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) na região Nordeste do Brasil (NEB) entre os anos de 2008 e 2015. Imagens do satélite METEOSAT no canal infravermelho (IR) e Vapor d'água (WV) auxiliaram a identificação dos eventos. A escolha dos casos, assim como os cálculos de suas características físicas foram realizadas através das normas propostas por Maddox (1980) com o auxílio do algoritmo de análise automática no software GNU Octave. Os dados de reanálise II do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) foram processados no software OpenGrADS para a confecção dos campos meteorológicos horizontais com o intuito de observar as condições sinóticas durante as ocorrências. Os valores diários de precipitação foram consultados através das estações automáticas e convencionais disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) da rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram identificados e analisados 57 casos de CCM na região de estudo, onde mais de 80% começaram a se desenvolver entre 00 - 03 UTC. A área de cobertura média destes CCM possuiu 120.000km<sup>2</sup>, com maior ocorrência entre 50.000 e 150.000km<sup>2</sup>. Dentre os principais sistemas sinóticos que atuam sobre o NEB, foram identificados os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Extremidades Frontais, Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs), Centros de circulação ciclônica e ventos alísios como os principais fatores que impulsionaram a formação dos eventos. As trajetórias dos CCM apresentaram variação de acordo com o sistema sinótico relacionado a sua formação e o relevo dos diferentes setores do NEB onde os mesmos se desenvolveram. Os CCM que evoluíram em latitudes mais próximas à linha do Equador foram correlacionados à ZCIT, onde seus escoamentos foram paralelos às direções das linhas de corrente em baixos níveis, predominantes para Oeste. Os casos formados sobre a Bahia tiveram maior influência da topografia local, com elevada atuação sobre o Oceano e próximo à costa. Desta forma, foi possível ressaltar a importância desses resultados para a previsão destes sistemas na região devido à sua complexidade e a vasta área que abrange o NEB.

**Palavras-chave:** Complexo Convectivo de Mesoescala. Nordeste Brasileiro. Previsão do tempo. Meteorologia Sinótica.

## ABSTRACT

Short-term weather forecast of the mesoscale systems is relevant for the operational studies and useful for the whole population due to the forecast of the various types of associated adverse phenomena. The main purpose of this study was the analyses of the different processes that influenced the trajectories during the development of the Mesoscale Convective Complexes (MCC) in the Brazilian Northeast (BNE) in 2008 – 2015. METEOSAT satellites images in the Infrared (IR) and Water vapor (WV) channels were used for the events identification. Maddox (1980) standards were used for the cases selection using the automatic analysis algorithm of GNU Octave software. National Center for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data II were used together with the OpenGrADS software for the meteorological fields construction. Daily precipitation were consulted through the automatic and conventional stations of the Meteorological Data for the Education and Studies (BDMEP) from the National Institute of Meteorology network (INMET) stations. Fifty-seven MCC cases have been analyzed in the study region, where more than 80% of them started the development between 00 - 03 UTC. The average coverage area of these MCC was 120,000 km<sup>2</sup>, with the highest occurrences mainly between 50,000 and 150,000 km<sup>2</sup>. Among the main BNE's synoptic systems were identified Upper Tropospheric Cyclonic Vortex (UTCV), Intertropical Convergence Zone (ITCZ), Frontal Extremity, Wave disturbance in trade winds, Cyclonic Circulation Center and Trade winds were identified as the principal factors that boosted events formation. MCC trajectories varied according to the synoptic systems related to their formation and relief of the BNE area where they developed. MCC developing in latitudes near the equator were correlated to the ITCZ, with the displacement parallel to streamlines directions at the low levels, predominant to West. The cases developed closer to Bahia state had greater influence of the local topography, with the high acting on the Ocean and near the coast. Thus, one could emphasize the importance of these results for the forecasting of these systems in the region because of its complexity and the extensive area that covers the NEB.

**Keywords:** Mesoscale Convective Complex. Brazilian Northeast. Weather Prediction. Synoptical Meteorology.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição geográfica e mensal dos CCM na América do Sul.....	18
Figura 2 - Recorte de imagem dos satélites GOES-12 e METEOSAT-9 no canal IR às 00 UTC do dia 08 de abril de 2014 com exemplificação da atuação dos sistemas frontais sobre o NEB.....	22
Figura 3 - Sequência esquemática da formação dos vórtices ciclônicos em 200hPa no Atlântico Sul.....	23
Figura 4 - Recorte da imagem do satélite GOES-16 às 18:15 UTC para o dia 12 de Maio de 2017.....	24
Figura 5 - a) Dipolo do Atlântico positivo (fase quente); b) Dipolo do Atlântico negativo (fase fria).....	25
Figura 6 - Esquema da rota das perturbações ondulatórias no campo dos ventos alísios de sudeste no Oceano Atlântico Sul.....	26
Figura 7 - Mapa da região de estudo.....	28
Figura 8 - a) Exemplo de imagem do canal infravermelho; b) Exemplo de imagem do canal de vapor d'água, ambas realçadas e disponíveis para o dia 08 de abril de 2014 às 09 UTC.....	29
Figura 9 - Esquema das etapas de processamento do algoritmo.....	30
Figura 10 - Cálculo da excentricidade de um CCM. Linha verde (a): eixo menor, linha vermelha (b): eixo maior.....	31
Figura 11 - Imagem do satélite METEOSAT no canal IR para o dia 15/01/2013 após a plotagem dos contornos calculados com o auxílio do algoritmo.....	32

Figura 12 - a) Imagem da saída final da trajetória de um CCM ao longo do ciclo de vida, calculada através do algoritmo; b) Imagem configurada no QGIS para melhor detalhamento.....	33
Figura 13 - a) Campo de pressão à nível do mar para o dia 10/05/2014; b) Linhas de corrente em 925hPa para o dia 23/04/2015; c) Divergência em 200hPa para o dia 12/05/2014; d) Advecção de temperatura em 925hPa para o dia 01/01/2015.....	34
Figura 14 - Postos pluviométricos da série histórica de dados do INMET na região de estudo.....	35
Figura 15 - Distribuição anual dos CCM entre 2008 e 2015 na região de estudo.....	37
Figura 16 - Distribuição mensal dos CCM entre 2008 e 2015 na região de estudo.....	37
Figura 17 - Distribuição dos CCM de acordo com as estações do ano a) Anualmente; b) Percentualmente por estação.....	38
Figura 18 - Horários de início da formação dos CCM analisados.....	41
Figura 19 - Horários em que os CCM alcançaram a área de extensão máxima.....	41
Figura 20 - Tempo de duração do ciclo de vida total dos CCM.....	42
Figura 21 - Áreas de extensão máxima dos CCM em análise.....	43
Figura 22 - Localizações dos centros dos CCM conforme suas áreas de extensão máxima....	43
Figura 23 - a) Campo de linhas de corrente em 1000hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 02/03/2015 às 05UTC.....	46
Figura 24 - a) Campo de linhas de corrente em 925hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 08/04/2010 às 04UTC.....	46
Figura 25 - a) Campo de linhas de corrente em 300hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 03/11/2013 às 17UTC.....	47

Figura 26 - a) Campo de linhas de corrente em 925hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 11/05/2009 às 00UTC.....	47
Figura 27 - a) Campo de linhas de corrente em 850hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 23/03/2013 às 10UTC.....	48
Figura 28 - a) Campo de linhas de corrente em 1000hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 11/11/2013 às 08UTC.....	48
Figura 29 - Frequência dos sistemas sinóticos associados à formação dos CCM em estudo...	49
Figura 30 - Distribuição mensal dos sistemas sinóticos ligados ao desenvolvimento dos CCM entre 2008 e 2015.....	50
Figura 31 - Localizações dos 57 casos de CCM identificados no NEB durante o período de estudo e suas respectivas trajetórias.....	51
Figura 32 - Localizações e trajetórias dos CCM divididas anualmente entre 2008 e 2015....	52
Figura 33- Localizações e trajetórias divididas entre todos os meses de ocorrência.....	54
Figura 34 - Mapas relativos aos deslocamentos em N1 a), N2 c) e N3 e); Mapas topográficos e trajetórias dos CCM formados em N1 b), N2 d) e N3 f).....	55
Figura 35 - a) Trajetórias dos CCM associados à ZCIT; b) Direções de deslocamento.....	56
Figura 36 - a) Trajetórias dos CCM associados à EF; b) Direções de deslocamento.....	57
Figura 37 - a) Trajetórias dos CCM associados ao VCAN; b) Direções de deslocamento.....	57
Figura 38 - a) Trajetórias dos CCM associados aos Alísios; b) Direções de deslocamento....	58
Figura 39 - a) Trajetórias dos CCM associados às POAS; b) Direções de deslocamento.....	58
Figura 40 - a) Trajetórias dos CCM associados à circulação ciclônica; b) Direções de deslocamento.....	59
Figura 41 - Variações dos valores relativos aos totais pluviométricos registrados para 24h dos casos de CCM.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas dos Complexos Convectivos de Mesoescala.....	17
Tabela 2 - Informações sobre disponibilidade de dados dos satélites METEOSAT.....	29
Tabela 3 - Datas de ocorrência dos CCM no Nordeste brasileiro entre 2008 e 2015.....	36
Tabela 4 - Características físicas dos CCM identificados durante os oito anos de estudo.....	39
Tabela 5 - Principais sistemas sinóticos associados à formação dos CCM.....	45
Tabela 6 - Trajetórias reais e comportamento das linhas de corrente nas horas iniciais do desenvolvimento dos CCM.....	60
Tabela 7 - Trajetórias reais e comportamento das linhas de corrente nas horas finais do desenvolvimento dos CCM.....	62
Tabela 8 - Valores de precipitação acumulada em 24h de todos os CCM e suas respectivas datas de ocorrência.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Célsius
$\theta_e$	Temperatura potencial equivalente
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
Cb	Cumulonimbus
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
EF	Extremidade Frontal
ENOS	El Niño Oscilação Sul
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
GNU	<i>GNU's Not Unix</i> (GNU Não é Unix)
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellites
GrADS	Grid Analysis and Display System
L	Leste
h	Hora(s)
hPa	Hectopascal
HS	Hemisfério Sul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	Infravermelho
K	Kelvin
Km	Quilômetro(s)
Km <sup>2</sup>	Quilômetro(s) quadrado(s)

mm	Milímetro
$m \cdot s^{-1}$	Metro por segundo
N	Norte
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCDC	National Climatic Data Center
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NE	Nordeste
NEB	Região Nordeste do Brasil
NO	Noroeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
O	Oeste
OL	Onda de Leste
POAs	Perturbações Ondulatórias nos Alísios
S	Sul
SC	Sistema Convectivo
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SE	Sudeste
SO	Sudoeste
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> (Tempo Universal Coordenado)
VCAN	Vórtice Ciclônico em Altos Níveis
VCMN	Vórtice Ciclônico de Médios Níveis
WV	Vapor d'água
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Complexos Convectivos de Mesoescala.....</b>	<b>17</b>
2.1.1	Complexos Convectivos de Mesoescala na América do Sul.....	18
2.1.2	Padrões de deslocamento.....	20
<b>2.2</b>	<b>Sistemas sinóticos atuantes na região Nordeste do Brasil.....</b>	<b>21</b>
2.2.1	Extremidade Frontal.....	21
2.2.2	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).....	22
2.2.3	Ventos Alísios.....	23
2.2.4	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	24
2.2.5	Perturbações Ondulatórias no Campo dos Alísios (POAs).....	26
2.2.6	Centros de baixa pressão no NEB.....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2</b>	<b>Dados e produtos de satélite.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Identificação dos casos.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b>Algoritmo de análise automática.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Cálculo das características físicas.....</b>	<b>31</b>

<b>3.6</b>	<b>Análise de direção e trajetórias.....</b>	<b>32</b>
<b>3.7</b>	<b>Dados de reanálise.....</b>	<b>33</b>
<b>3.8</b>	<b>Campos sinóticos horizontais.....</b>	<b>33</b>
<b>3.9</b>	<b>Análise de precipitação.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Ocorrências de CCM no NEB.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Sazonalidade.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Características físicas.....</b>	<b>38</b>
4.3.1	Horários de formação e extensão máxima dos CCM.....	40
4.3.2	Tempo de duração.....	42
4.3.3	Áreas.....	42
<b>4.4</b>	<b>Situações sinóticas associadas à formação dos CCM.....</b>	<b>44</b>
4.4.1	Ocorrências.....	44
4.4.2	Frequências.....	49
4.4.3	Sazonalidade dos sistemas.....	49
<b>4.5</b>	<b>Trajetoárias.....</b>	<b>51</b>
4.5.1	Divisão anual.....	52
4.5.2	Divisão mensal.....	53
4.5.3	Divisão entre diferentes regiões.....	54
4.5.4	Sistemas.....	56



<b>4.6</b>	<b>Trajétórias em relação às linhas de corrente.....</b>	<b>59</b>
4.6.1	Desenvolvimento.....	59
4.6.2	Dissipação.....	62
<b>4.7</b>	<b>Precipitação.....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) caracterizam-se como um conjunto de nuvens Cumulonimbus (Cb) frias e espessas que apresentam a forma circular e crescimento vertical explosivo em um intervalo de tempo entre 6 a 12 horas e associam-se, frequentemente, com eventos de precipitação intensa, acompanhados de fortes rajadas de vento (Maddox, 1980). O estudo destes sistemas é bastante importante para a população do Nordeste brasileiro devido a necessidade da previsão de formação destes eventos extremos. Fenômenos adversos associados como precipitações intensas, trovoadas e granizo acabam causando enchentes, alagamentos e deslizamento de terra, conseqüentemente grandes perdas sociais e econômicas.

A literatura clássica não inclui o NEB como região propícia para o desenvolvimento de CCM (SILVA DIAS, 1987; VELASCO e FRITSCH, 1987). Entretanto, estudos mais recentes documentaram a ocorrência de CCM sobre o NEB (GOMES FILHO et al., 1996; FEDOROVA et al., 2008; MILHAHN JÚNIOR, 2013; LYRA, 2016). As primeiras pesquisas sobre CCM a longo prazo na região foram realizadas por Fedorova et al. (2008) através de estudos do desenvolvimento destes sistemas observando as trajetórias das parcelas de ar geradas a partir do modelo HYSPLIT. Posteriormente, Fedorova et al. (2009) realizaram estudos termodinâmicos através da análise dos índices de instabilidade.

Os principais sistemas de Mesoescala atuantes na região Nordeste do Brasil são os CCM e linhas de instabilidade, em que suas formações estão relacionadas aos seguintes sistemas de escala sinótica: Sistemas Frontais, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs). Assim como sistemas de menor escala como as Brisas Marítimas impulsionadas pelos ventos Alísios (MILHAHN et al., 2012).

Impactos consequentes do tempo severo são complexos e variam de acordo com as trajetórias, intensidade e tempo de duração dos fenômenos, ressaltando ainda mais a importância da previsão à curto prazo. Desta forma, o presente estudo busca analisar de forma detalhada as trajetórias dos CCM ocorridos no Nordeste brasileiro entre os anos de 2008 e 2015 e suas relações com processos sinóticos locais. Em adição, serão averiguadas propriedades dos CCM como áreas e horários de atuação calculadas a partir do algoritmo de análise automática e de informações de dados de reanálise.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Complexos Convectivos de Mesoescala

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) foram identificados e definidos por Maddox (1980), através de estudos na região central dos Estados Unidos da América baseando-se em características físicas que podem ser observadas através de imagens de satélite. O autor os definiu como sistemas que possuem um aglomerado de nuvens convectivas, com estrutura vertical profunda constituída por nuvens cumulonimbus (Cb). São sistemas aproximadamente circulares e com crescimento explosivo em um intervalo de tempo de 6 a 12 horas (SILVA DIAS, 1987).

Os critérios utilizados por Maddox (1980) na identificação destes sistemas foram baseados em características físicas obtidas com técnicas de realce em imagens de satélite no canal infravermelho, e levaram em consideração o tamanho e a duração do sistema (Tabela 1).

**Tabela 1 - Características físicas dos Complexos Convectivos de Mesoescala.**

Características físicas	
Tamanho:	<b>A</b> – Área $\geq 100.000 \text{ km}^2$ . Cobertura de nuvens com temperaturas $\leq -32^\circ\text{C}$ ; <b>B</b> – Área $\geq 50.000 \text{ km}^2$ . Cobertura de nuvens com temperaturas $\leq -52^\circ\text{C}$ ;
Início:	Quando as definições de tamanho A e B sejam satisfeitas.
Duração:	As definições de tamanho A e B deverão persistir por um período $\geq 6\text{h}$
Extensão Máxima:	Quando a definição do tamanho A ( $-32^\circ\text{C}$ ) alcançar seu tamanho máximo.
Forma:	Excentricidade $\geq 0,7$ no momento de máxima extensão.
Término:	Quando as definições de tamanho A e B já não são satisfeitas.

Fonte: Autor, 2018. Adaptado de Maddox, 1980.

Segundo Maddox (1980) o ciclo de vida de um CCM pode ser dividido em quatro fases: Gênese, desenvolvimento, maturação e dissipação. Durante a gênese, há condições propícias de instabilidade, tal como movimentos ascendentes, fornecimento de umidade na baixa troposfera e instabilidade convectiva associada à influência topográfica. No estágio de desenvolvimento, os movimentos ascendentes se intensificam em médios níveis, assim como saturação do ar nessas camadas, caracterizando a convergência em baixos níveis e divergência em altos. Durante o estágio de maturação, há um maior fornecimento de instabilidade,

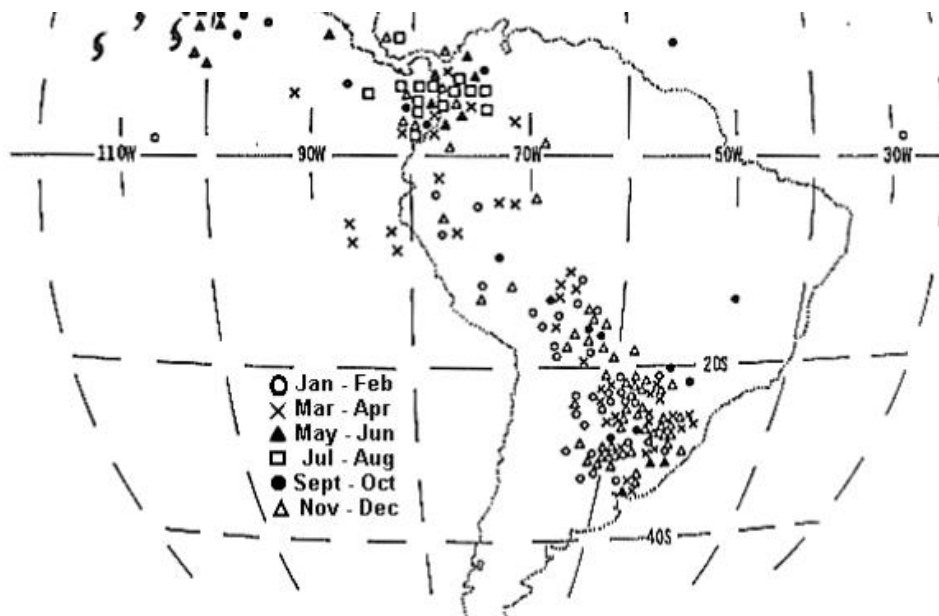
auxiliando na insaturação de uma região de precipitação definida, de acordo com a região do fluxo ascendente de massa. A dissipação dos CCM ocorre quando a instabilidade perde seu fornecimento de energia interrompendo o desenvolvimento associado as fases anteriores. Essa fase pode acontecer devido à influência do deslocamento do sistema, que ao penetrar em alguma região onde as características de fornecimento de instabilidade supracitadas inexistem.

Estes sistemas, de forma geral, são noturnos e continentais, tanto os de latitudes médias quanto os tropicais nos dois hemisférios, o seu ciclo de vida começa poucas horas depois da formação de células convectivas ocorrentes no final da tarde ou começo da noite, sua máxima extensão ocorre durante a madrugada e o sistema persiste até a manhã (VELASCO e FRITSCH, 1987).

### 2.1.1 Complexos Convectivos de Mesoescala na América do Sul

Velasco e Fritsch (1987) mapearam as regiões de ocorrência e analisaram das trajetórias dos CCM na América do Sul (Figura 1). Neste estudo, foi apresentado que no ciclo de vida destes sistemas e seu tamanho máximo ocorre durante a madrugada na grande maioria dos casos analisados.

**Figura 1 – Distribuição geográfica e mensal dos CCM na América do Sul**



Fonte: Velasco e Fritsch (1987).

Velasco e Fritsch (1987) utilizaram critérios similares ao de Maddox (1980) na identificação de CCM na América do Sul, porém com limites de temperaturas diferentes:  $-40^{\circ}$  a  $-42^{\circ}\text{C}$ , ao invés de  $-32^{\circ}\text{C}$  e,  $-62^{\circ}$  a  $-64^{\circ}\text{C}$ , ao invés de  $-52^{\circ}\text{C}$ , mantendo os valores de área. Os

CCM subtropicais da América do Sul se desenvolvem um pouco mais tarde e duram um pouco mais, além de serem 60% maiores que nos Estados Unidos, já os CCM tropicais tem dimensões parecidas, durando de 1 a 3 horas a menos (SILVEIRA, 2010).

Na região Nordeste do Brasil, são observados sistemas meteorológicos de Mesoescala como linhas de Instabilidade, CCM ou Cb isolados, associados à ocorrência de elevados valores pluviométricos. Até o presente estudo, alguns estudos documentaram ocorrência de CCM sobre o NEB em diferentes anos (GOMES FILHO et al., 1996; FEDOROVA et al., 2008; SILVA et al., 2008; MILHAHN JÚNIOR, 2013; LYRA, 2016).

Fedorova et al. (2008) realizou um primeiro estudo a longo prazo sobre estes sistemas na região, analisando fatores que influenciaram a gênese e desenvolvimento destes sistemas através das trajetórias das parcelas de ar geradas a partir do modelo HYSPLIT entre os anos de 1999 e 2009. Posteriormente, Fedorova et al. (2009) analisaram as características morfológicas dos CCM assim como a influência da topografia e instabilidade convectiva.

Albuquerque (2011) analisou as trajetórias dos CCM formados na região costeira do NEB, relatando também a influência do El Niño Oscilação Sul (ENOS) através dos valores das anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do Pacífico na formação dos casos. Milhahn Júnior (2013) apresentou uma relação entre a formação dos CCM com sistemas sinóticos que atuam na região, sendo eles: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis, Extremidade frontal, Zona de Convergência Intertropical e Alísios. O autor também identificou a presença das Correntes de Jato do Nordeste Brasileiro (CJNEB) em 63% dos casos identificados.

Através de um estudo termodinâmico, Lyra (2016) analisou a qualidade de previsão através de dados de trajetória da parcela do modelo HYSPLIT, com auxílio de perfis verticais de temperatura. Onde estes perfis previstos apresentaram resultados satisfatórios com até 24 horas de antecedência dos eventos de CCM.

Gonçalves (2016) verificou relações entre o campo gravitacional lunar com a formação dos CCM na região leste do NEB, através da elevação do nível do mar. Sendo observadas o comportamento da maré e fase lunar com a duração do CCM. Destes, 63% atingiram o tamanho máximo durante a enchente da maré, enquanto a dissipação ocorreu em 56% na vazão da maré. Mais recentemente, Milhahn Júnior (2016) desenvolveu um algoritmo para análise e detecção automática de CCM na região Nordeste brasileira. O qual permite calcular características dos sistemas, tal como duração, tamanho e excentricidade.

Lyra et al. (2017) observaram que há uma maior frequência de desenvolvimento de CCM quando o ENOS se configura na fase positiva (El Niño), assim como a TSM neutra influencia positivamente na formação dos mesmos.

### 2.1.2 Padrões de deslocamento

No continente africano, Blamey e Reason (2011) identificaram a formação de CCM com elevada frequência no setor sul da região, entre 20° e 35°S. Fatores locais como elevada TSM, proveniente da corrente de Agulhas e a presença de montanhas próximo à costa favorecem a forte ascendência de ar neste setor. Os CCM da região apresentam um padrão de deslocamento para Leste, principalmente nos casos identificados sobre a África do Sul devido à fortes fluxos de Oeste presentes em médios níveis sobre estas latitudes (BLAMEY e REASON, 2011).

Os sistemas de Mesoescala analisados por García-Herrera (2005) durante um ano de estudo na região próxima ao Mar Mediterrâneo na Europa desenvolveram-se principalmente no mês de setembro, um período de elevada atividade convectiva na região. O rastreamento das trajetórias destes sistemas revelou uma tendência comum para um componente de deslocamento para o leste.

As direções de propagação média dos Sistemas Convectivos (SC) na América do Sul lembram o padrão de circulação em larga escala, os movimentos para leste geralmente em médias latitudes e movimentos para oeste perto do equador (LAU e CRANE, 1995). Nas latitudes mais elevadas no inverno do Hemisfério Sul (HS), as trajetórias, principalmente, apresentam-se de oeste (O) com movimento de convecção associada com frentes frias. As trajetórias observadas durante o verão e o outono no sul da América do Sul são semelhantes aos obtidos por Guedes e Dias (1984) e Velasco e Fritsch (1987).

Durante o inverno no HS, as trajetórias médias nos trópicos estão todas alinhadas zonalmente ao norte do equador e sobre o norte da América do Sul, mas tornam-se mais desorganizada (direções variadas) durante o verão no HS com uma vida útil mais curta. O alinhamento zonal muda primeiro sobre a América do Sul no outono, onde os SC se propagam para oeste com uma vida útil média de cerca de 12-18 horas. Ao longo da costa do nordeste do Brasil as trajetórias dos SC refletem as linhas de instabilidade sazonal formada do continente para o oceano (KOUSKY, 1980).

A trajetória dos CCM subtropicais tem geralmente início na região a leste dos Andes em uma latitude média de 25°S. Em 25 casos estudados por Figueiredo e Scolar (1996), 70%

deslocaram-se para leste e sudeste (atingindo o Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) e 30% deslocaram-se para nordeste e norte, atingindo a região Sudeste do Brasil.

Albuquerque (2013) verificou que 59, de um total de 80 casos de CCM estudados em um período de 10 anos, no NEB apresentaram trajetória evidente e com fluxo semelhante à direção do campo sinótico de linhas de corrente no nível de 400hPa. Além disso, o ângulo entre as linhas de corrente e as trajetórias dos CCM foi menor ou igual  $22,5^\circ$  em 57 destes eventos.

## **2.2 Sistemas sinóticos atuantes na região Nordeste do Brasil**

Segundo Silva et al. (2011), existem diversos sistemas que provocam precipitação convectiva na região Nordeste do Brasil, dentre eles pode-se citar: as Brisas Marítimas, Sistemas Frontais, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Ondas de leste (OL), Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs), Extremidade Frontal (EF) e Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN). Lyra et. al (2016) e Milhahn Júnior et. al (2012) identificaram a influência de alguns destes sistemas supracitados à formação dos CCM no NEB em diferentes períodos de análise.

### **2.2.1 Extremidade Frontal**

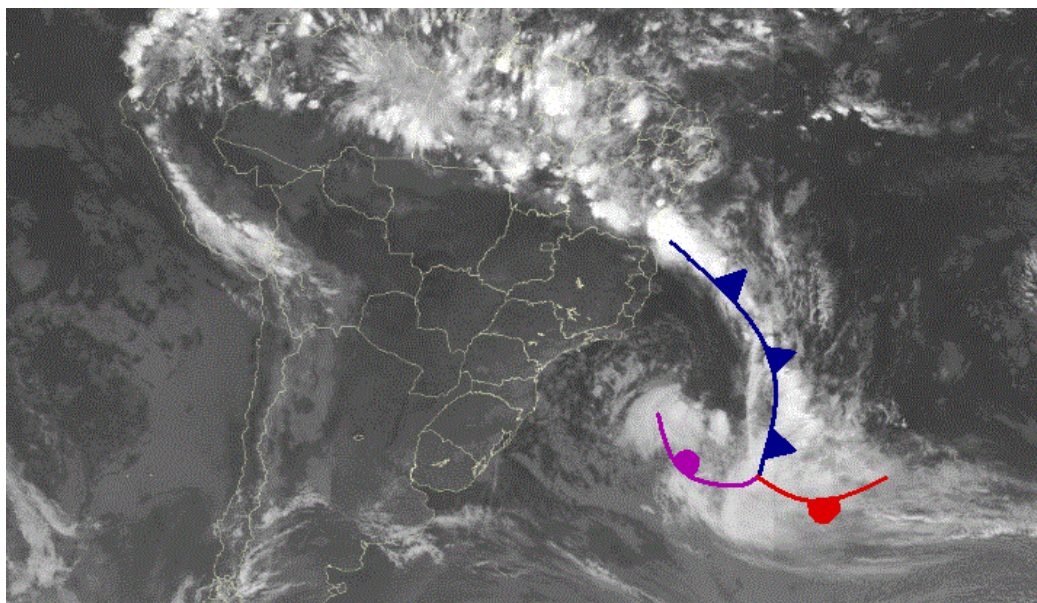
A definição de sistema frontal mais abrangente foi feita por Holton (1979): “Zonas frontais podem ser definidas por regiões com alta assimetria na forma, com fortes ventos e fortes gradientes de temperatura”. Estes sistemas são constituídos de uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície denominado ciclone ou vórtice frontal.

Segundo Fedorova (2001) quando o ar frio avança e substitui o ar quente, a zona frontal é chamada de frente fria. Caso o ar quente se desloque e substituir o ar frio, é definida uma frente quente. Se nenhuma das massas de ar avançar sobre a outra, a frente é chamada estacionária. O processo de oclusão, ou frente oclusa, ocorre quando frentes quentes e frias se alternam sucessivamente, formando chuvas leves e contínuas, sobre um mesmo local.

Kousky (1979) mostrou que as extremidades destes sistemas frontais alcançam a parte sul do NEB ao longo de todo o ano, como exemplificado na Figura 2, tendo um papel importante no índice pluviométrico entre dezembro-janeiro, principalmente no estado da Bahia; são associados com o aumento da precipitação ao longo da costa, desde a Bahia até o Rio Grande do Norte, durante os meses de inverno, por conta do maior gradiente de temperatura, chegando a afetar a precipitação até o norte do Ceará.

Sinhori (2015) mostra que os casos de frentes frias que atingem o NEB, sofrem modificação em suas estruturas e nebulosidades, onde vento e vorticidade apresentam características frontais em baixos níveis, enquanto a variável de temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) apresenta superfície frontal em médios e altos níveis.

**Figura 2 – Recorte de imagem dos satélites GOES-12 e METEOSAT-9 no canal IR às 00UTC do dia 08 de abril de 2014 com exemplificação da atuação dos sistemas frontais sobre o NEB.**



Fonte: CPTEC/INPE; NOAA/EUMETSAT.

### 2.2.2 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis são sistemas sinóticos fechados de baixa pressão que se formam na alta troposfera, onde o centro desta circulação é mais frio em relação a sua periferia (GAN e KOUSKY, 1982).

Palmén (1949) observou vórtices que se originaram quando extensos cavados de ar superior associados a bolsões de ar frios se desprendiam de sua região fonte, permanecendo confinados no lado equatorial da corrente média dos ventos de oeste.

Características similares foram encontradas por Palmer (1951) na região tropical, quando analisava campos de linhas de corrente em duas situações de tempo (junho de 1946 e março de 1949). Perturbações na forma de onda se estenderam ao sul de 10°N formando circulações ciclônicas fechadas na troposfera superior dos trópicos, que em algumas vezes, permaneceram estacionárias por até duas semanas. Estes sistemas foram denominados de “VCAN de origem tropical” (PALMER, 1951).

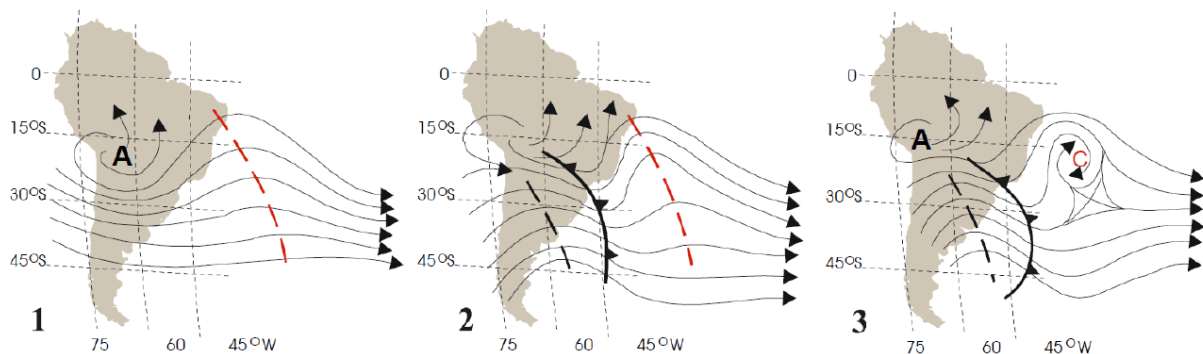


Tomando como base os resultados obtidos por Palmén (1949) e Palmer (1951), Frank (1970) denominou os VCAN conforme a região de formação: os VCAN que se formam nos subtropicais são tipo Palmén e aqueles cuja origem se dá na região tropical são do tipo Palmer.

Os VCAN barotrópicos que penetram no NEB formam-se no oceano Atlântico, principalmente entre os meses de novembro à março, e sua trajetória normalmente é de leste para oeste, com maior frequência entre os meses de janeiro e fevereiro, conforme demonstrado por Gan e Kousky (1982).

De acordo com o mecanismo de formação dos VCAN proposto por Kousky e Gan (1981), os vórtices se formam devido à amplificação de uma crista. Essa amplificação ocorre devido a uma forte advecção de ar quente em baixos níveis provocada pela entrada de um sistema frontal nos subtropicais. A convecção organizada pelo sistema frontal contribui para a liberação de calor latente, conseqüentemente amplificando o cavado a leste da crista (KOUSKY e GAN, 1981). Os mecanismos de estágio de desenvolvimento podem ser vistos na Figura 3.

**Figura 3 – Sequência esquemática da formação dos vórtices ciclônicos em 200hPa no Atlântico Sul.**



Fonte: Adaptado de Varejão-Silva (2006).

### 2.2.3 Ventos Alísios

Os centros de alta pressão subtropicais induzem fortes fluxos de ventos que se deslocam de seus centros em direção ao Equador, com forte componente de leste em baixos níveis. Esses ventos são denominados Ventos Alísios. Em escala planetária, caracterizam o ramo inferior da Célula de Hadley, as quais advectam calor sensível e latente da superfície oceânica para a região equatorial (VAZ, 2011).

Segundo Neiuwolt (1978), a camada de inversão dos alísios, no equador, possui uma espessura entre 2.000 e 3.000 m, o que diminui conforme se aproxima de latitudes mais altas.

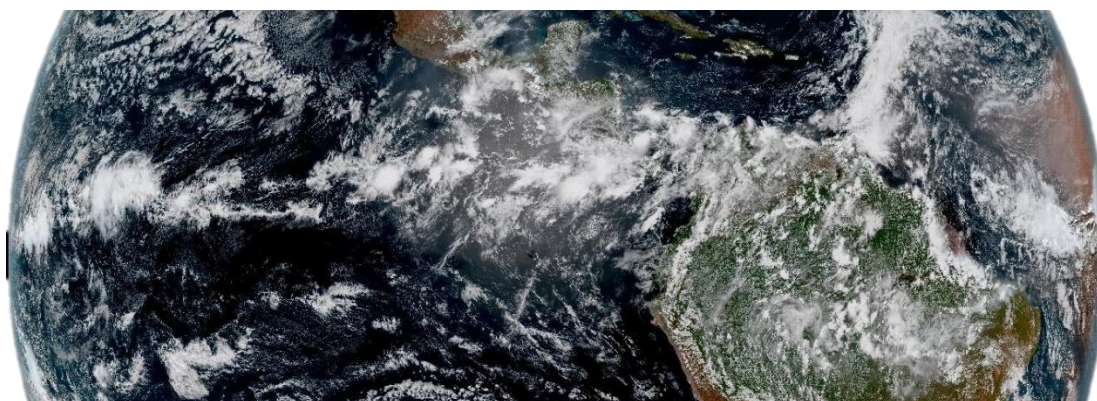
Esta camada, predominada pelo ar frio e estável, é inibida pelo desenvolvimento vertical da convecção.

Como o ar nos baixos níveis se move progressivamente sobre a TSM mais alta, o fluxo de calor latente aumenta e o fluxo de calor sensível vem a ser do oceano para a atmosfera. O aquecimento e umidificação das massas de ar resultam em uma quebra de nuvens estratos e o desenvolvimento dos Ventos Alísios em nuvens cúmulos. A convecção de cúmulos rasos mistura a umidade do ar à superfície com o ar seco sobre a inversão, resultando em uma camada limite profunda (VAZ, 2011).

#### 2.2.4 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A ZCIT é caracterizada como uma grande região de confluência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do sistema de alta pressão (Anticiclone subtropical) do HN, e dos ventos Alísios de sudeste, oriundos da Alta subtropical do HS (HASTENRATH, 1985). É caracterizada por uma banda de nebulosidade e chuvas no sentido Leste-Oeste (Figura 4). Em baixos níveis, como resultado das baixas pressões e altas temperaturas da superfície do mar, o ar quente e úmido da região ascende e provoca a formação de nuvens com intensa atividade convectiva, conseqüentemente aumentando o volume de precipitação (FERREIRA e MELLO, 2005).

**Figura 4 – Recorte da imagem do satélite GOES-16 às 18:15 UTC para o dia 12 de Maio de 2017.**



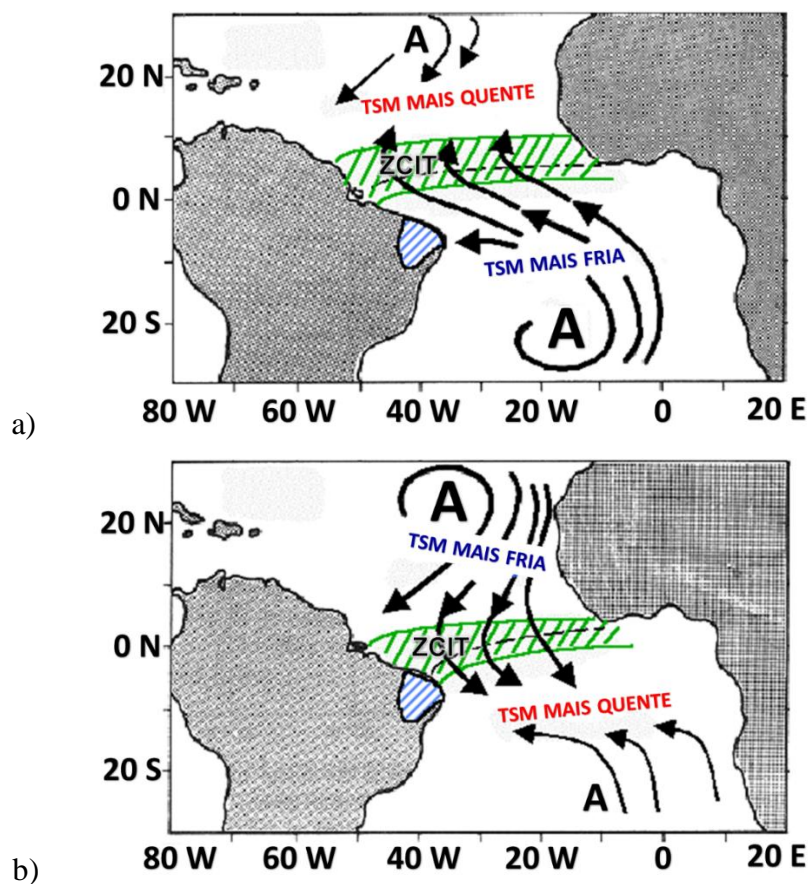
Fonte: NOAA.

Na região Nordeste, a ZCIT tem maior importância a partir de meados do verão e atinge sua maior frequência no outono (março-abril), quando alcança sua posição mais meridional. Pelas suas componentes N (norte) a NO (noroeste), as áreas a noroeste da Região Nordeste são as mais atingidas por esta corrente perturbada. Nesses deslocamentos para o sul, a ZCIT chega

a provocar chuvas até sobre os paralelos de 9° a 10° S, ou seja, nas imediações do rio São Francisco sobre a região do Raso da Catarina (NIMER, 1972).

O fenômeno oceano/atmosférico caracterizado pela mudança anômala na temperatura da superfície água do mar no Oceano Atlântico Tropical é definido por Dipolo do Atlântico. Quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes em relação às águas do Equatorial e Tropical Sul existem movimentos descendentes transportando ar frio e seco dos altos níveis da atmosfera sobre a região setentrional, central e sertão do Nordeste do Brasil, esta que é caracterizada como a fase positiva do Dipolo (Figura 5a). Por outro lado, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias (Figura 5b) ocorre a intensificação da Alta Subtropical, deslocando a ZCIT mais à Sul e consequentemente acarretando o aumento nos movimentos ascendentes sobre a região supracitada, caracterizando-se como a fase negativa do Dipolo (NÓBREGA et al., 2016 *apud* ARAGÃO, 1998). A posição média da ZCIT verifica-se mais ao norte, em 14°N nos meses de agosto a setembro e sua posição mais ao sul 2°S nos meses de março e abril (NOBRE e MOLION, 1986).

**Figura 5 - a) Dipolo do Atlântico positivo (fase quente); b) Dipolo do Atlântico negativo (fase fria).**



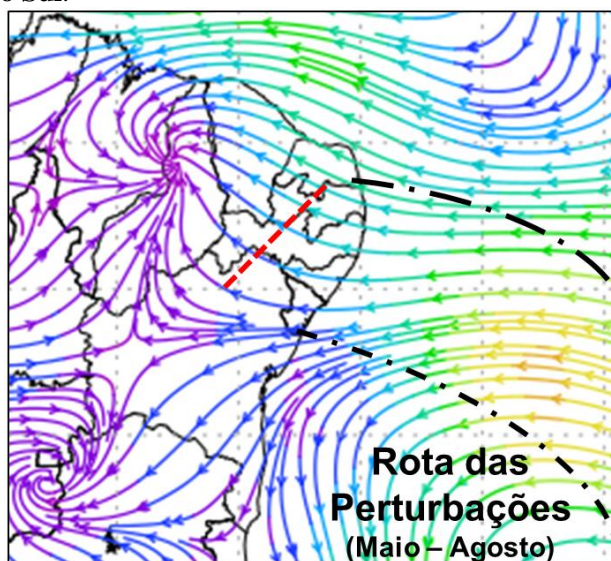
Fonte: Adaptado de Nobre e Molion (1986).

### 2.2.5 Perturbações Ondulatórias no Campo dos Alísios (POAs)

As utilizações conjuntas de diferentes fontes de estudos revelam que o campo dos ventos alísios sobre o Oceano Atlântico Sul é frequentemente perturbado pela penetração de sistemas frontais em baixas latitudes (ANJOS, 2006). Nestas situações, os mecanismos de convergência dos ventos de sul relacionados com as frentes frias e os ventos de leste, provocam as chamadas Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs).

As POAs se propagam para oeste imersas no campo dos ventos alísios (Figura 6) e possuem um período preferencial de ocorrência, entre os meses de maio a agosto, inverno no HS, pois é nesse período que as configurações de grande escala estão mais ao norte. Porém, outras condições como temperatura da superfície do mar elevada e a convergência do fluxo de umidade intensificam essas perturbações (SIQUEIRA, 2010).

**Figura 6 - Esquema da rota das perturbações ondulatórias no campo dos alísios de sudeste no Oceano Atlântico Sul.**



Fonte: Adaptado de Siqueira, 2010.

Yamazaki e Rao (1977) estudaram o comportamento dinâmico das POAs nas regiões, da costa do Brasil e tropical do Atlântico Sul. Notaram uma faixa que possuía um período característico, cerca de 4 dias, com uma propagação média de 10 m.s-1 como uma onda, cujo seu comprimento era de aproximadamente  $4 \times 10^3$  km. Observaram que esta faixa está compreendida entre 5°S e 10°S, apresentando linhas de nuvens bem definidas, deslocando-se de leste com sentido a oeste (10° Leste a 40° Oeste). Concluíram que o aumento dos totais pluviométricos ao longo da costa do Brasil nos meses de inverno no HS estaria ligado a esse fenômeno.

### 2.2.6 Centros de baixa pressão no NEB

Observando-se o campo de pressão ao nível do mar, este sistema pode ser encontrado constituído por uma ou mais isóbaras fechadas que delimitam áreas onde a pressão atmosférica é menor em qualquer ponto circunjacente (VAREJÃO-SILVA, 2006). Nas proximidades de um centro ciclônico, uma parcela de ar tende a da periferia para o centro com movimentos ascendentes, proporcionando a formação de nuvens (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Apesar da baixa ocorrência e poucos relatos de estudos sobre este sistema sobre o NEB, Rodrigues et al. (2008) observou a presença dos mesmos atuando durante todas as épocas do ano, e sem nenhum período preferencial (Verão ou Inverno astronômico, por exemplo). No mesmo estudo, observou-se que os cavados provenientes destes sistemas ocorrem com maior frequência durante o dia. Segundo o referido isso leva a crer que os mesmos têm alguma relação com o efeito térmico (instabilidade barotrópica). Rodrigues et al. (2008) notaram que 87% dos cavados atuantes sobre o Estado se originam nas correntes de ar da Alta Subtropical do Atlântico Sul. O mesmo também aponta que em 63% dos fenômenos adversos, não foram registrados cavados atuantes em Alagoas. Porém, dar-se destaque aos diferentes tipos de fenômenos adversos os quais foram associados aos cavados. Neles, foram registrados tanto fenômenos de atmosfera instável, a exemplo das trovoadas, como aqueles típicos de atmosfera estável, a exemplo de nevoeiros.

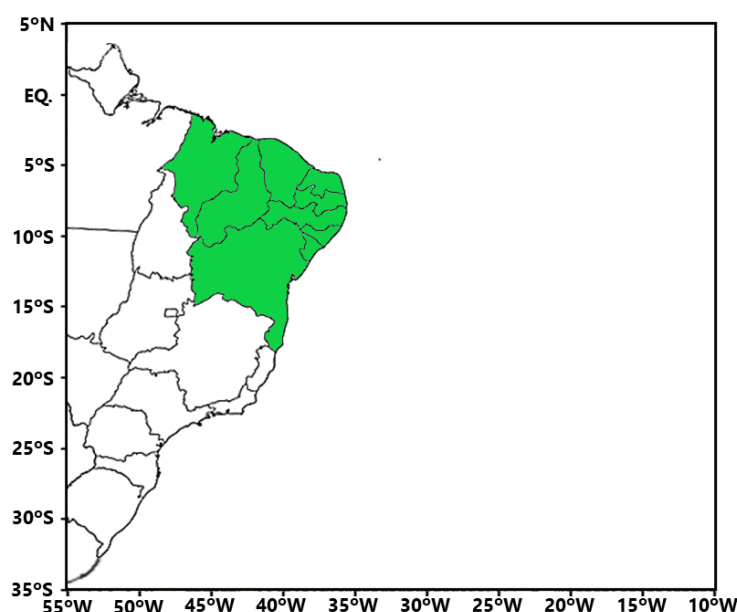


### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a região Nordeste do Brasil, situada entre 0 – 15° S e 30 – 45° O (Figura 7). Optou-se também por um recorte entre os paralelos de 5° N e 35° S de latitude e os meridianos 10° a 55° O de longitude, devido à melhor visualização da formação e desenvolvimento de sistemas sinóticos padrões da região. O estudo estendeu-se por um período de 8 anos, desde entre janeiro de 2008 à dezembro de 2015.

**Figura 7 – Mapa da região de estudo.**



Fonte: Autor, 2018.

A região Nordeste do Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE), ocupa uma área de 1.561.177,8 km<sup>2</sup>, o que equivale a 18,3% do território brasileiro. Sendo constituída pelos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Maranhão. Tal escolha foi feita devido a importância da previsão de fenômenos adversos, tão quanto pela falta de informações meteorológicas sobre a formação destes sistemas na região.

#### 3.2 Dados e produtos de satélite

Foram utilizadas imagens dos satélites METEOSAT 9 e 10 nos canais espectrais Infravermelho (IR) a Vapor d'água (WV), disponíveis de acordo com o período apresentado na

Tabela 2 em um intervalo de 15 minutos. Estas imagens foram obtidas através do banco de dados imagens no portal da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), disponíveis no endereço eletrônico (<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/>).

**Tabela 2 – Informações sobre disponibilidade de dados dos satélites METEOSAT.**

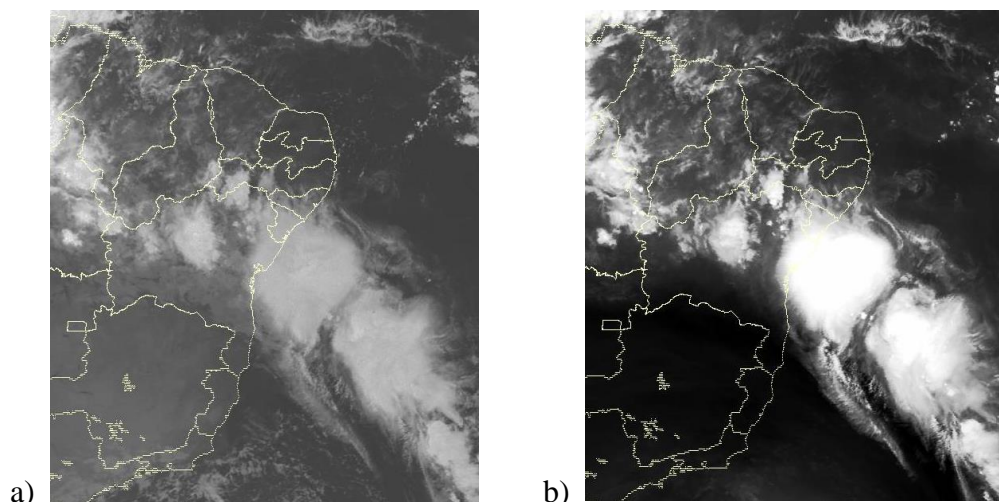
Satélite	Período de registro	Bandas disponíveis
METEOSAT-9	01/01/2008 – 04/07/2012	Visível, IR e WV
METEOSAT-10	05/07/2012 – 31/12/2015	Visível, IR e WV

Fonte: EUMETSAT.

Os dados do canal infravermelho (Figura 8a) foram obtidos através dos sensores que medem a radiação de ondas longas, emitidas por nuvens e por superfícies continentais e oceânicas. Quanto mais quente a superfície, mais radiação infravermelha é emitida. Assim, numa imagem de satélite, nuvens com topos frios e/ou com grande desenvolvimento vertical, apresentam tonalidade branca enquanto as nuvens baixas são relativamente mais quentes, e, portanto, apresentam tonalidade cinza escura.

O canal do vapor de água (Figura 8b) permite mapear a distribuição de umidade na média troposfera. Como o conteúdo de vapor d'água decresce com a altura, a maior contribuição para a radiância medida pelo satélite é proveniente dos níveis médios e altos da troposfera. Ou seja, regiões com maior intensidade de brilho apresentam umidade elevada na alta troposfera, e regiões escuras apresentam a alta troposfera seca.

**Figura 8 – a) Exemplo de imagem do canal infravermelho; b) Exemplo de imagem do canal de vapor d'água, ambas realçadas e disponíveis para o dia 08 de abril de 2010 às 09 UTC.**



Fonte: EUMETSAT; CPTEC/INPE.

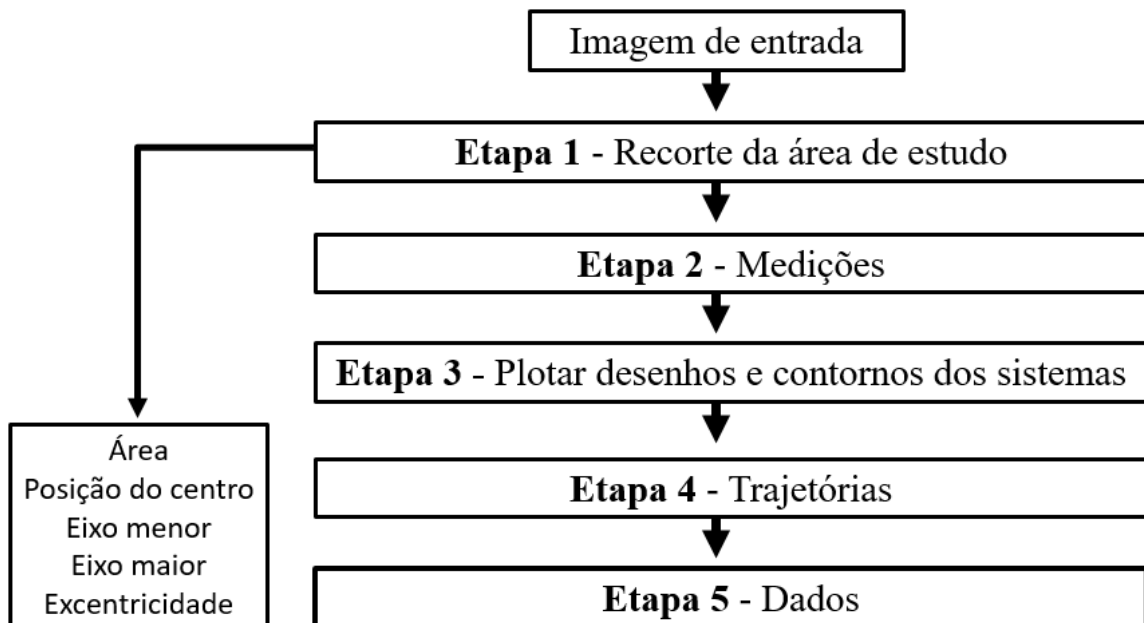
### 3.3 Identificação dos casos

A metodologia utilizada para a identificação dos eventos foi baseada na caracterização definida por Maddox (1980), aplicada às imagens de satélite obtidas entre 2008 e 2015. Na temperatura de brilho do topo das nuvens, no qual o estágio inicial é identificado quando a área de cobertura das nuvens é  $\geq 100.000\text{km}^2$ . A excentricidade (eixo menor/eixo maior)  $\geq 0,7$  e o tempo de duração de no mínimo 6 horas. O término é caracterizado quando o tamanho e a temperatura do topo ( $\leq -32^\circ\text{C}$ ) já não estiverem entre os limiares definidos em seu início.

### 3.4 Algoritmo de análise automática

Para auxílio no estudo dos CCM, utilizou-se o algoritmo de análise automática desenvolvido por Milhahn Júnior (2016) a partir da linguagem GNU Octave, o qual é disponibilizado de forma gratuita e foi processada através do sistema operacional Ubuntu 16.04. Esta ferramenta permite não só identificar os sistemas de Mesoescala, como também calcular área, excentricidade, duração, trajetória e velocidade média dos mesmos. O algoritmo utiliza a decodificação de pixel das imagens do satélite METEOSAT como dado de entrada, e segue passos específicos que são apresentados no esquema abaixo (Figura 9).

**Figura 9 – Esquema das etapas de processamento do algoritmo.**



Fonte: Adaptado de Milhahn Júnior, 2016.

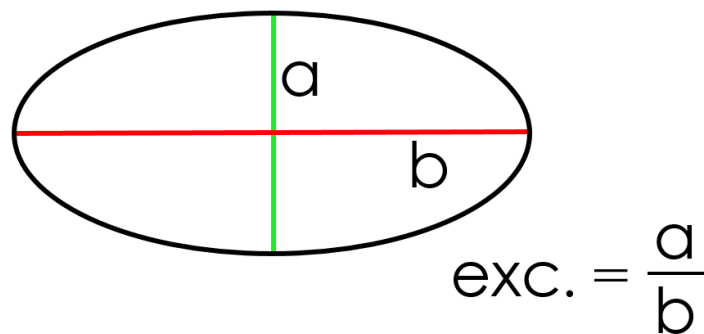


A primeira etapa do algoritmo consiste em processar e filtrar as imagens de satélite realçadas. A partir deste ponto, é realizado o recorte da área de estudo (0° a 15° Sul e 30° a 50° Oeste). Posteriormente, é aplicado um filtro à imagem recortada para identificação dos possíveis sistemas que estejam na imagem, esse filtro separa os pixels correspondentes aos intervalos de cores (variação de azul, rosa e branco) das áreas com temperatura menor que -50°C. Após a aplicação do filtro, a imagem se torna uma matriz binária, onde os elementos com valor nulo são os pixels que não passaram pelo filtro com o intervalo de cor definido anteriormente. Os pixels que tinham as cores dentro do intervalo ficaram com valor 1, os quais correspondem aos dados processados nas etapas seguintes do algoritmo.

### 3.5 Cálculo das características físicas

Algumas informações relativas aos eventos em estudo, tais como excentricidade, área e tempo de duração foram calculadas através do algoritmo processado no GNU Octave. A excentricidade calculada (Figura 10) é a mesma proposta por Maddox (1980), sendo a razão entre o eixo menor e o eixo maior, devendo assumir um valor igual ou superior a 0,7 no momento de máxima extensão.

**Figura 10 – Cálculo da excentricidade de um CCM. Linha verde (a): eixo menor, linha vermelha (b): eixo maior.**

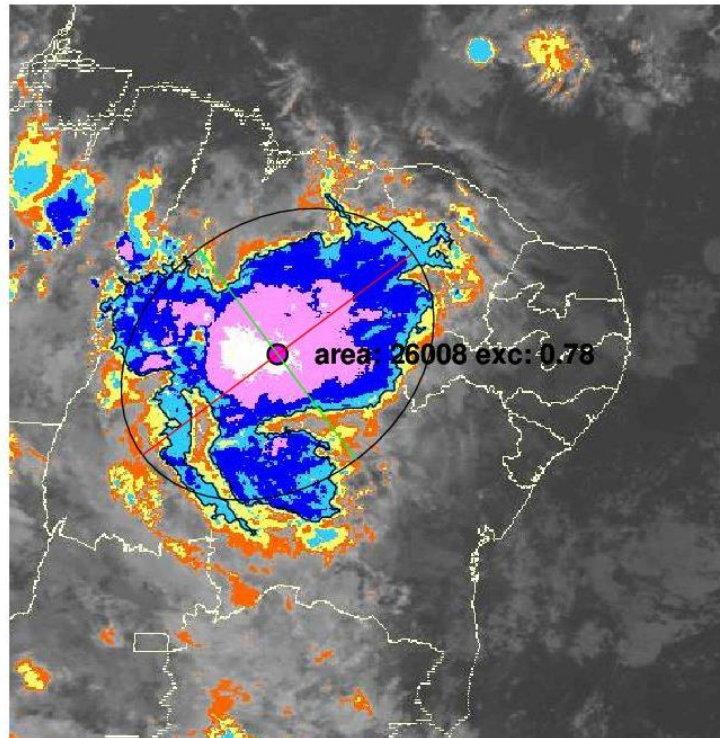


Fonte: Maddox, 1980.

O algoritmo considera o valor equivalente a área de um pixel como aproximadamente 19,71 km<sup>2</sup>. Assim, para o cálculo da área total foram utilizadas as imagens de satélite como forma de entrada, onde são plotadas linhas de contorno dos sistemas encontrados com área maior que 2536 pixels (50.000km<sup>2</sup>), um círculo no centro desses sistemas com os valores da área e excentricidade e desenhadas as elipses sobre os mesmos (Figura 11), mostrando os eixos

maiores e menores. Todas essas informações são adicionadas dentro de todos os intervalos de tempos nas quais as imagens de entrada foram inseridas.

**Figura 11 – Imagem do satélite METEOSAT no canal IR para o dia 15/01/2013 após a plotagem dos contornos calculados com auxílio do algoritmo.**



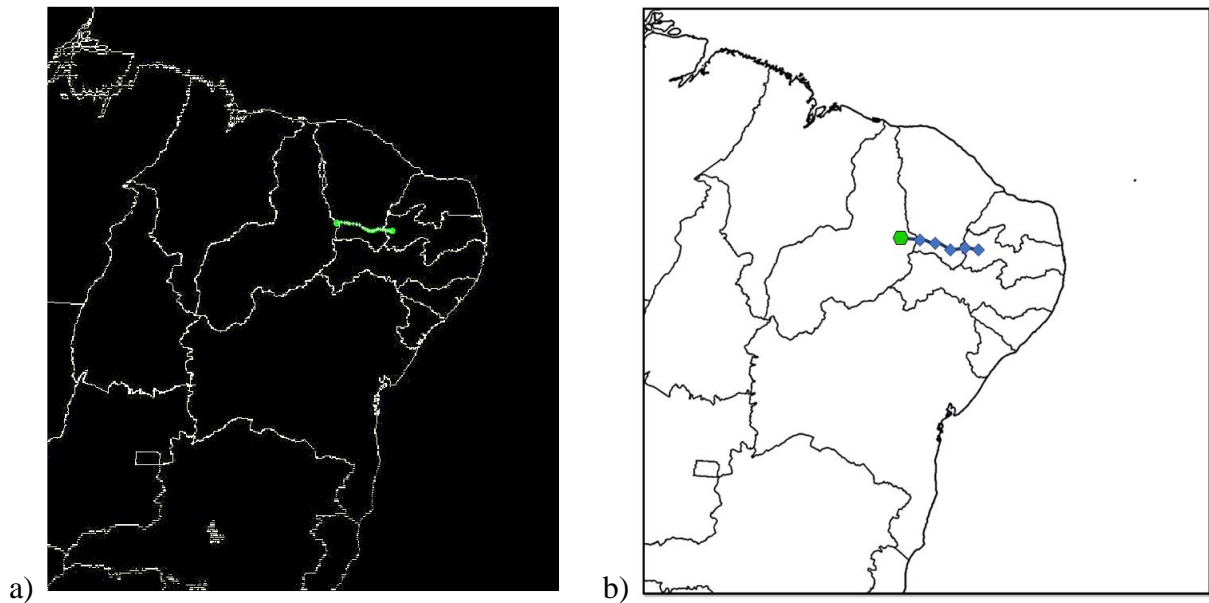
Fonte: Autor, 2018.

Para o cálculo de tempo de duração, levou-se em consideração o horário inicial em que os CCM apresentaram área e excentricidade definidas conforme as normas citadas acima. Sendo também calculados horários de extensão máxima e duração dos ciclos de vida para todos os casos analisados.

### **3.6 Análise de direção e trajetórias**

Para o cálculo das trajetórias dos sistemas foi feito utilizando o algoritmo de análise automática a partir da posição do núcleo dos CCM referentes à cada horário (do primeiro ao último de cada imagem durante o tempo de duração) em que cada sistema foi detectado. As coordenadas referentes ao posicionamento do núcleo durante o período de extensão foram marcadas pelo algoritmo para cada intervalo de tempo das imagens de entrada. Desta forma, foram obtidos os dados da direção do deslocamento (Figura 12a) para todos os casos identificados, e após esta etapa as imagens foram tratadas no software QGIS para melhor detalhamento (Figura 12b).

**Figura 12 – a) Imagem da saída final da trajetória de um CCM ao longo do ciclo de vida, calculada através do algoritmo; b) Imagem configurada no QGIS para melhor detalhamento.**



Fonte: Autor, 2018.

### 3.7 Dados de Reanálise

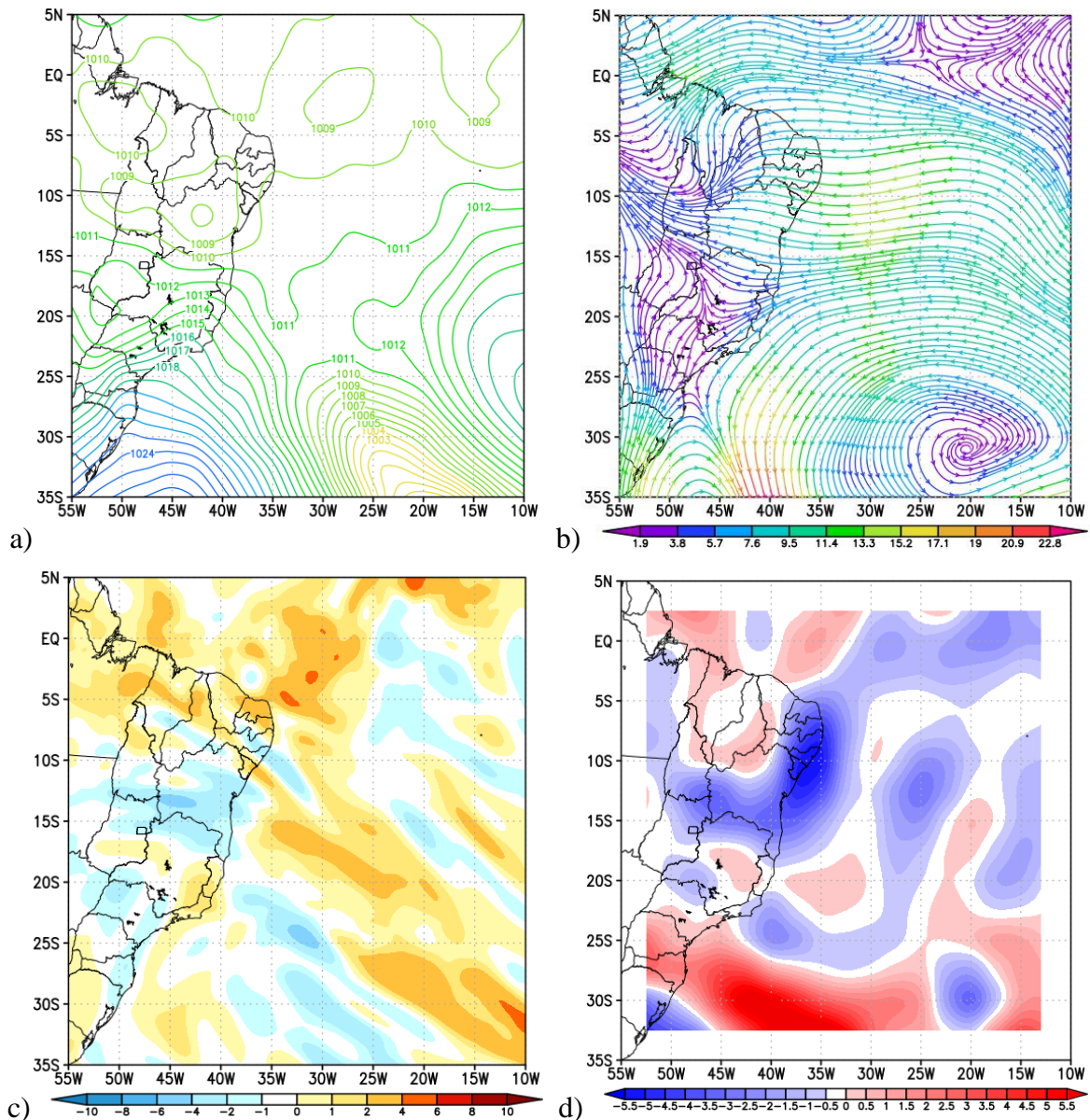
O Projeto Reanálise NCEP/NCAR é um projeto conjunto entre o National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e do National Center for Atmospheric Research (NCAR). Os dados de reanálise II do NCEP-DO consistem em uma versão melhorada do modelo NCEP/NCAR, corrigindo erros e parametrizações atualizadas de processos físicos. O NCEP utiliza um sistema de análise e previsão a qual realiza a assimilação de dados processando informações desde 1979 até o presente, que estão disponíveis através do link: (<http://www.esrl.noaa.gov>). Estes dados possuem resolução de 2,5° de latitude por 2,5° de longitude (correspondendo a uma distância de grade de aproximadamente 275km) e são fornecidos quatro vezes ao dia em formato diário nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.

### 3.8 Campos sinóticos horizontais

Através do software Grid Analysis and Display System (GrADS), os dados de reanálise II foram utilizados para confeccionar campos horizontais de diferentes variáveis meteorológicas para um estudo mais detalhado dos CCM e dos processos sinóticos locais (Figura 13). Os campos horizontais de linhas de corrente ( $m \cdot s^{-1}$ ) para os níveis de 925, 850, 700, 500, 400, 300hPa, Advecção de temperatura (K/dia) em 925hPa, Divergência ( $s^{-1}$ ) em 200hPa e Pressão à nível do mar (hPa) foram plotados entre as latitudes 5° Norte e 35° Sul e longitudes 10° a 55°

Oeste. Estas coordenadas foram definidas devido ao fato de abranger toda região de estudo, incluindo parte do Oceano Atlântico e o Sul do Brasil, e possibilitou verificar a influência de sistemas de grande escala provenientes destas regiões.

**Figura 13 – a) Campo de pressão à nível do mar para o dia 10/05/2014; b) Linhas de corrente em 925hPa para o dia 04/11/2013; c) Divergência em 200hPa para o dia 12/05/2014; d) Advecção de temperatura em 925hPa para o dia 02/03/2015.**



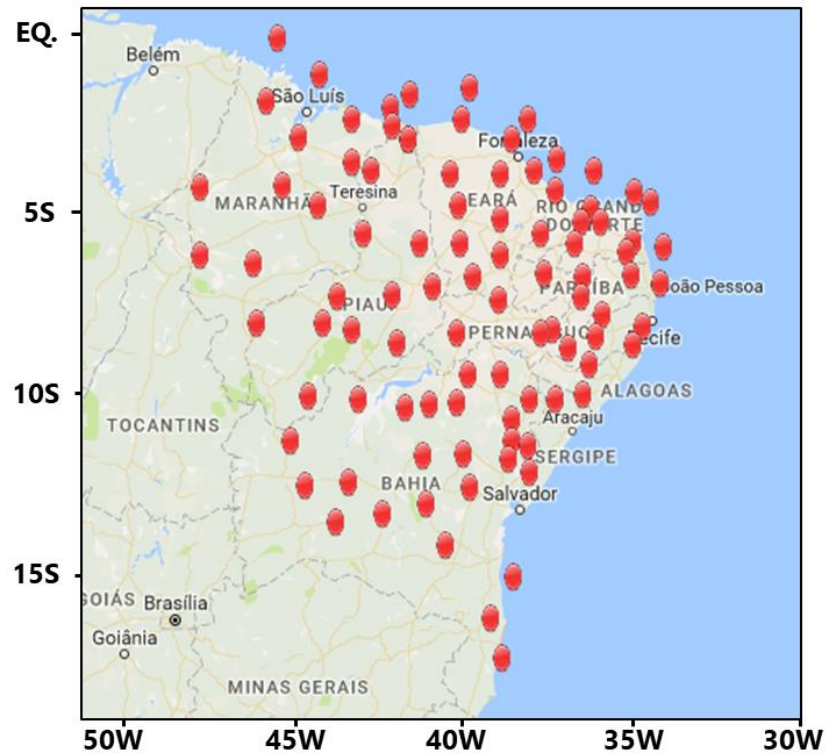
Fonte: NCEP; Autor, 2018.

### 3.9 Análise de precipitação

Foram utilizados dados diários de precipitação de estações automáticas e convencionais disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) da rede de

estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram gerados para cada dia de ocorrência dos CCM nas estações que se encontravam sob a área de influência dos sistemas. As estações disponíveis para coleta destes dados são apresentadas na Figura 14.

**Figura 14 – Postos pluviométricos da série histórica de dados do INMET na região de estudo.**



Fonte: INMET.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ocorrências de CCM no NEB

De acordo com a análise das imagens do satélite METEOSAT e informações de estudos anteriores realizados por Lyra (2016), foram constatados 57 casos de CCM na região de estudo entre 2008 e 2015, conforme apresentado na Tabela 3.

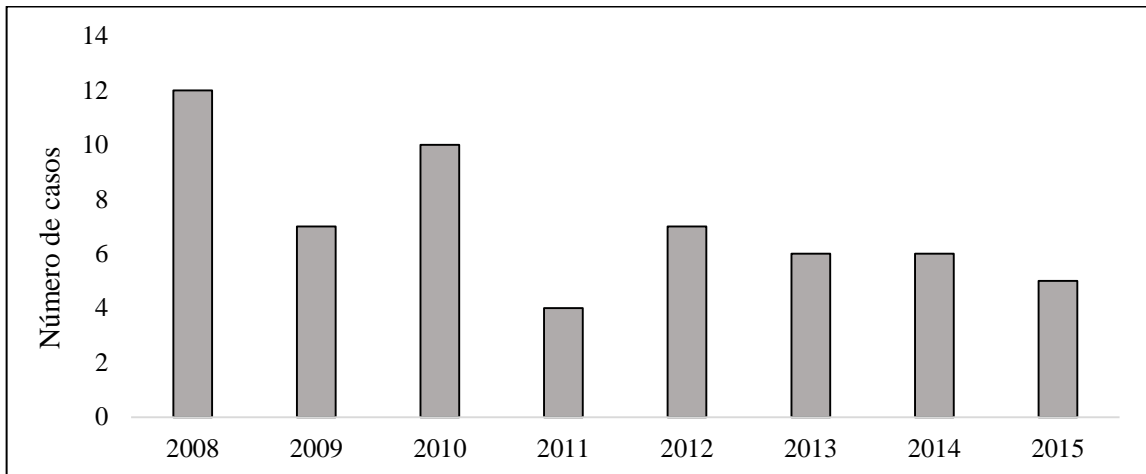
**Tabela 3 – Datas de ocorrência dos CCM no Nordeste brasileiro entre 2008 e 2015.**

Evento	Data	Evento	Data	Evento	Data
1	18/01/2008	20	24/01/2010	39	01/11/2012
2	29/02/2008	21	01/02/2010	40	30/11/2012
3	15/03/2008	22	07/03/2010	41	15/01/2013
4	18/03/2008	23	22/03/2010	42	19/01/2013
5	19/03/2008	24	25/03/2010	43	20/04/2013
6	25/03/2008	25	08/04/2010	44	03/11/2013
7	26/03/2008	26	08/05/2010	45	11/11/2013
8	29/03/2008	27	28/11/2010	46	27/11/2013
9	30/03/2008	28	09/12/2010	47	23/02/2014
10	06/05/2008	29	15/12/2010	48	14/03/2014
11	09/05/2008	30	08/01/2011	49	28/03/2014
12	02/12/2008	31	24/01/2011	50	31/03/2014
13	22/02/2009	32	24/02/2011	51	02/04/2014
14	02/04/2009	33	24/04/2011	52	12/05/2014
15	14/04/2009	34	24/01/2012	53	02/03/2015
16	29/04/2009	35	15/02/2012	54	21/03/2015
17	10/05/2009	36	17/02/2012	55	23/03/2015
18	11/05/2009	37	18/02/2012	56	24/03/2015
19	21/05/2009	38	17/04/2012	57	24/04/2015

Fonte: Autor, 2018.

Neste período, o maior número de ocorrências de CCM foi registrado em 2008, destacando-se 12 casos, o que corresponde à cerca de 21% do total somente neste ano. Nos anos seguintes este número apresentou uma pequena queda, principalmente em 2011 onde apenas 4 casos foram identificados. De 2012 em diante a frequência de formação permaneceu mais estável, com um pequeno desvio padrão. Conforme descrito por Lyra et. al (2017), esta variação no número de ocorrências possui ligação com El Niño Oscilação Sul, e suas configurações positivas e negativas. A distribuição anual dos CCM dentro do período de estudo pode ser melhor observada na Figura 15.

**Figura 15 – Distribuição anual dos CCM entre 2008 e 2015 na região de estudo.**

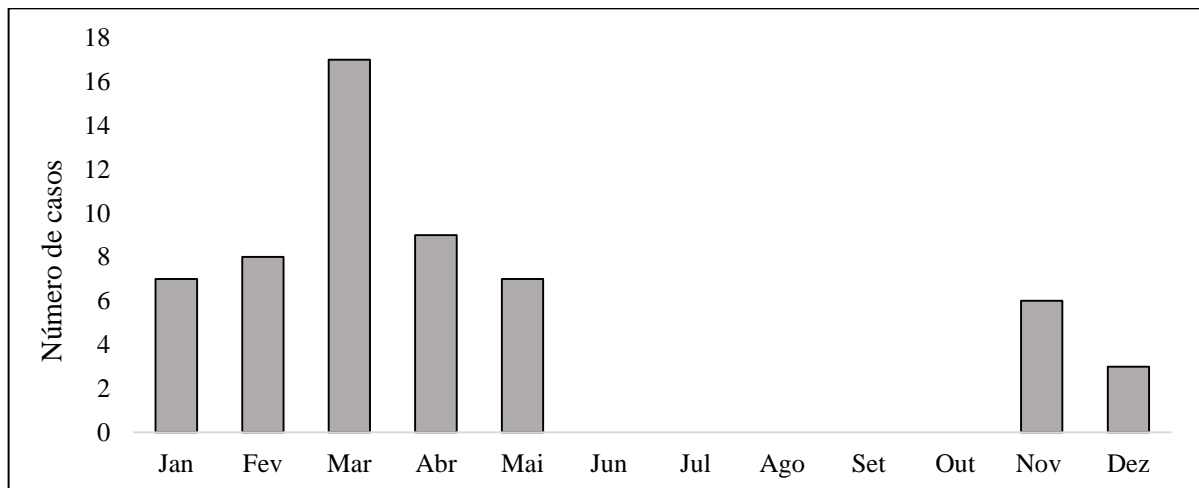


Fonte: Autor, 2018.

## 4.2 Sazonalidade

Para uma análise mais detalhada, a distribuição de ocorrências dos sistemas foi dividida de forma sazonal. Esta divisão busca comparar e entender os diferentes processos de formação durante o ano, sendo dividida de forma mensal e pelas diferentes estações do ano. A frequência mensal é ilustrada na Figura 16.

**Figura 16 – Distribuição mensal dos CCM entre 2008 e 2015 na região de estudo.**



Fonte: Autor, 2018.

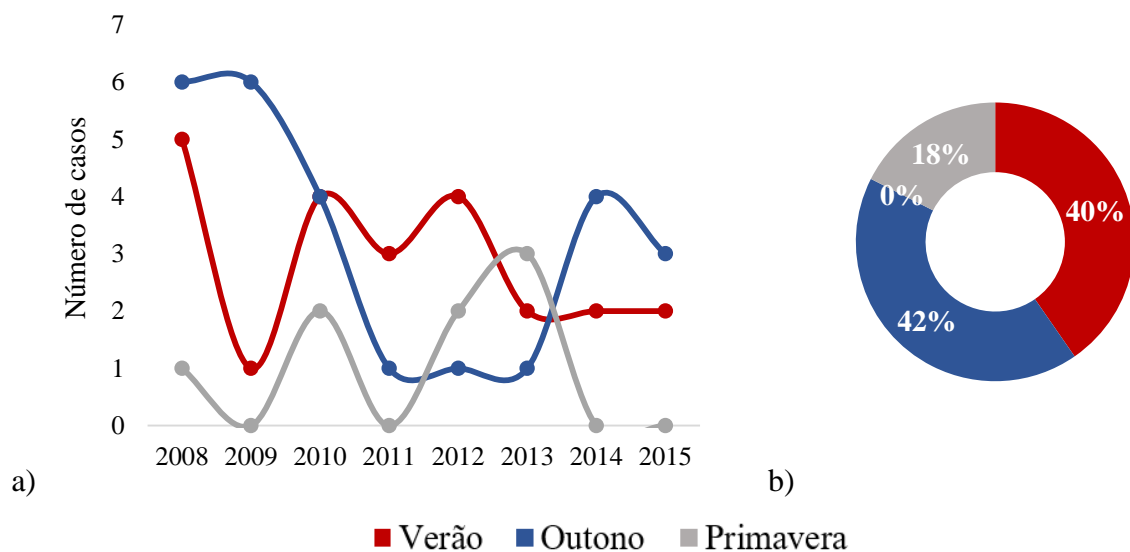
Os casos analisados desenvolveram-se com maior frequência principalmente no mês de março, com 29,8% do total de casos, seguido dos meses de abril e fevereiro, com 15,7% e 14% respectivamente. Já entre os meses de junho e outubro, nenhum sistema foi identificado. A

predominância nestes meses que constituem as estações do Verão e Outono, deve-se à presença dos sistemas sinóticos que atuam com maior frequência na região durante este período.

O potencial convectivo da ZCIT na região foi bastante característico quando posicionada mais a Sul, assim como a presença dos ventos alísios e do VCAN, que em conjunto com outros sistemas aumentam o transporte de umidade, assim como o aumento da temperatura de superfície, o qual provoca maior instabilidade, favorecendo os movimentos convectivos. Já outros sistemas presentes durante o Inverno como as Ondas de Leste, apesar de influenciarem diretamente o regime pluviométrico da costa leste da região, não possuíram influência na formação destes eventos extremos, o que corrobora os resultados de Silva et. al (2011).

Levando em consideração as estações do ano, a Figura 17 mostra que houve maior frequência de ocorrências principalmente durante o outono e verão com 42% e 40%, respectivamente. Durante a primavera apenas 18% dos eventos ocorridos foram identificados, enquanto no inverno nenhum caso foi verificado durante o período de estudo.

**Figura 17 – Distribuição dos CCM de acordo com as estações do ano a) Anualmente; b) Percentualmente por estação.**



Fonte: Autor, 2018.

### 4.3 Características físicas

Dados importantes dos CCM como duração, medidas de diâmetros e áreas calculadas através do algoritmo no GNU Octave são apresentadas nesta seção. Estas informações encontram-se agrupadas na Tabela 4 e apresentadas com mais detalhes nos subcapítulos a seguir.



Tabela 4 – Características físicas dos CCM identificados durante os oito anos de estudo.

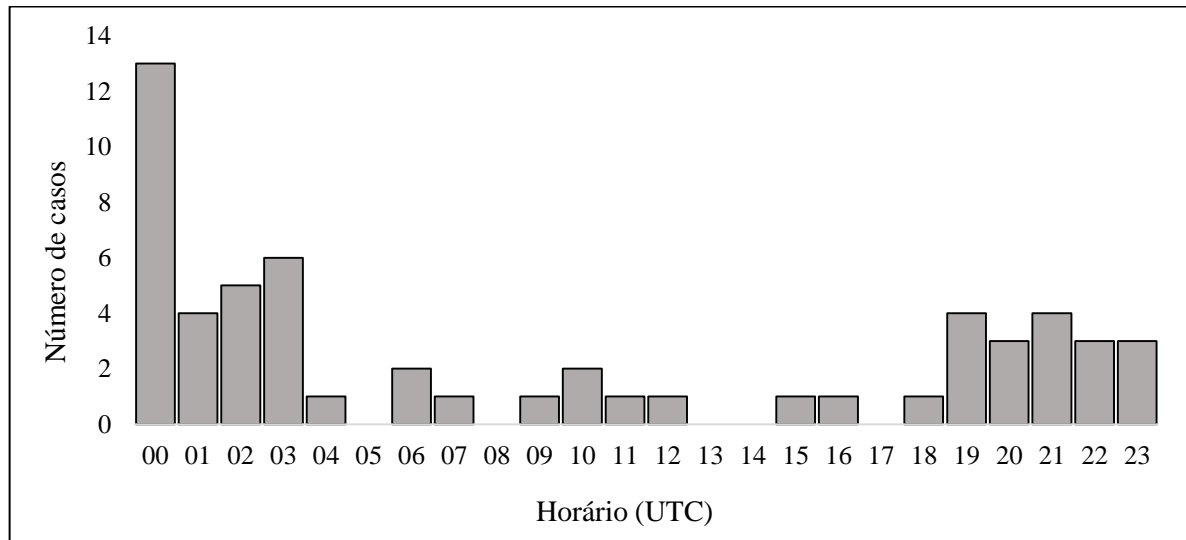
<b>Casos</b>	<b>Horário (Início)</b>	<b>Horário (Término)</b>	<b>Duração (Horas)</b>	<b>Hora do tamanho máximo</b>	<b>Excentricidade</b>	<b>Tamanho máximo (Km<sup>2</sup>)</b>
18/01/2008	02Z	11Z	09	05Z	0,70	142.207,86
29/02/2008	01Z	08Z	07	03Z	0,92	92.136,29
15/03/2008	00Z	13Z	13	04Z	0,73	132.419,58
18/03/2008	20Z	02Z	06	23Z	0,77	133.607,20
19/03/2008	22Z	06Z	08	03Z	0,80	133.722,13
25/03/2008	00Z	08Z	08	02Z	0,70	50.512,14
26/03/2008	19Z	03Z	08	21Z	0,93	81.026,30
29/03/2008	21Z	03Z	06	23Z	0,92	55.339,24
30/03/2008	19Z	02Z	07	00Z	0,74	76.103,42
06/05/2008	01Z	08Z	07	04Z	0,72	56.660,94
09/05/2008	21Z	04Z	07	01Z	0,73	51.259,19
02/12/2008	16Z	03Z	11	00Z	0,88	233.405,56
22/02/2009	09Z	16Z	07	13Z	0,93	144.602,26
02/04/2009	21Z	03Z	07	23Z	0,71	143.491,26
14/04/2009	03Z	10Z	07	05Z	0,71	84.953,11
29/04/2009	19Z	04Z	09	00Z	0,80	50.263,12
10/05/2009	10Z	18Z	08	15Z	0,72	124.278,64
11/05/2009	00Z	10Z	10	05Z	0,74	163.336,04
21/05/2009	01Z	07Z	06	03Z	0,73	76.026,80
24/01/2010	02Z	08Z	06	04Z	0,71	212.698,83
01/02/2010	07Z	13Z	06	11Z	0,76	61.315,65
07/03/2010	21Z	06Z	09	03Z	0,92	112.938,79
22/03/2010	04Z	11Z	07	07Z	0,82	51.584,83
25/03/2010	20Z	09Z	13	23Z	0,70	130.427,44
08/04/2010	00Z	15Z	15	05Z	0,79	262.368,15
08/05/2010	00Z	08Z	08	04Z	0,72	150.502,05
28/11/2010	10Z	18Z	08	15Z	0,74	112.019,34
09/12/2010	23Z	06Z	07	00Z	0,72	149.659,22
15/12/2010	00Z	14Z	14	09Z	0,72	101.752,18
08/01/2011	00Z	10Z	10	05Z	0,75	206.588,34
24/01/2011	18Z	02Z	06	00Z	0,82	50.052,41
24/02/2011	03Z	12Z	09	07Z	0,86	114.375,42
24/04/2011	22Z	10Z	12	06Z	0,83	104.491,36
24/01/2012	00Z	10Z	10	04Z	0,72	133.722,13
15/02/2012	20Z	03Z	07	23Z	0,77	163.719,10

17/02/2012	01Z	11Z	10	04Z	0,85	122.382,28
18/02/2012	19Z	03Z	08	21Z	0,75	123.320,88
17/04/2012	00Z	11Z	11	02Z	0,88	53.998,38
01/11/2012	11Z	21Z	10	18Z	0,80	108.858,74
30/11/2012	00Z	07Z	07	03Z	0,90	210.476,83
15/01/2013	03Z	14Z	11	10Z	0,70	427.926,15
19/01/2013	23Z	06Z	07	00Z	0,94	55.243,46
20/04/2013	00Z	09Z	09	05Z	0,71	160.941,60
03/11/2013	15Z	21Z	06	18Z	0,90	125.983,45
11/11/2013	03Z	13Z	10	06Z	0,73	158.374,81
27/11/2013	00Z	06Z	06	02Z	0,90	79.493,89
23/02/2014	12Z	18Z	06	14Z	0,88	53.308,79
14/03/2014	02Z	13Z	11	06Z	0,73	138.491,76
28/03/2014	03Z	09Z	06	06Z	0,80	52.810,76
31/03/2014	23Z	06Z	07	04Z	0,87	95.201,11
02/04/2014	22Z	05Z	07	01Z	0,71	186.437,12
12/05/2014	06Z	14Z	08	08Z	0,80	56.795,03
02/03/2015	03Z	11Z	08	07Z	0,95	110.142,13
21/03/2015	02Z	08Z	06	06Z	0,83	121.980,02
23/03/2015	06Z	13Z	07	12Z	0,78	109.069,45
24/03/2015	02Z	10Z	08	06Z	0,96	109.184,38
24/04/2015	00Z	06Z	06	04Z	0,81	57.465,46
<b>Médias</b>	---	---	<b>08</b>	---	<b>0,79</b>	<b>120.215,07</b>

Fonte: Autor, 2018.

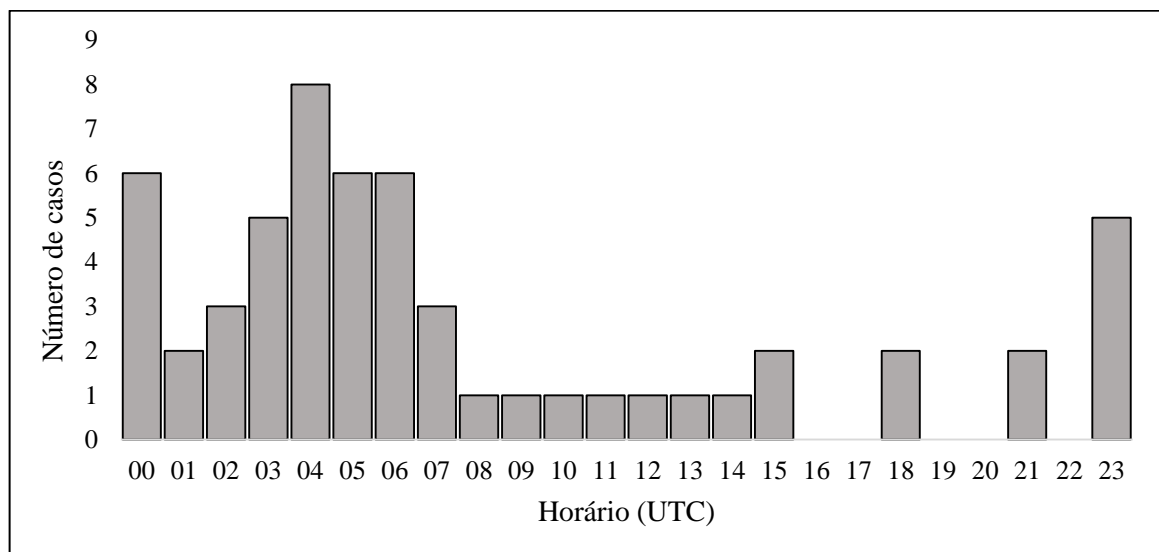
#### 4.3.1 Horários de formação e extensão máxima dos CCM

A Figura 18 exibe detalhadamente os horários onde os CCM apresentaram suas primeiras características de formação, em seu estágio de gênese. É possível observar que na região tropical estas primeiras explosões não ocorrem exclusivamente durante a noite, conforme os sistemas extratropicais. Apesar disso, foi notório o número de casos formados durante este período, principalmente entre 00 - 03 UTC, correspondendo no horário local do NEB, por 21 - 00 horas. Os CCM formados neste intervalo de tempo equivalem a 49,1% do total observado, sendo o maior pico de formação às 00UTC. Outra grande parte dos casos começaram a se desenvolver após as 19UTC, mantendo uma média entre 3 a 4 casos durante cada hora até as 23UTC. Outros 11 sistemas (19,2%) iniciaram-se entre as 04 e 18 UTC, havendo um pequeno pico entre o fim da madrugada e início da manhã.

**Figura 18 – Horários de início da formação dos CCM analisados.**

Fonte: Autor, 2018.

Com relação aos horários de extensão máxima dos CCM (Figura 19), estes valores possuíram maior distribuição comparando-se com o momento de início da formação. Os sistemas formaram-se com maior frequência entre 00 e 03 UTC, como visto acima, e atingem sua extensão máxima ainda durante o final da noite e início da manhã, entre as 23 e 07 UTC, principalmente às 04 UTC. E poucos casos atingiram o valor máximo de área entre o início e fim do período da tarde. Em média, os CCM em estudo demoraram cerca de 4 horas para elevarem-se da gênese até o tamanho máximo, registrando-se casos com crescimento explosivo de apenas 1 hora, e outros com intervalo de 9 horas.

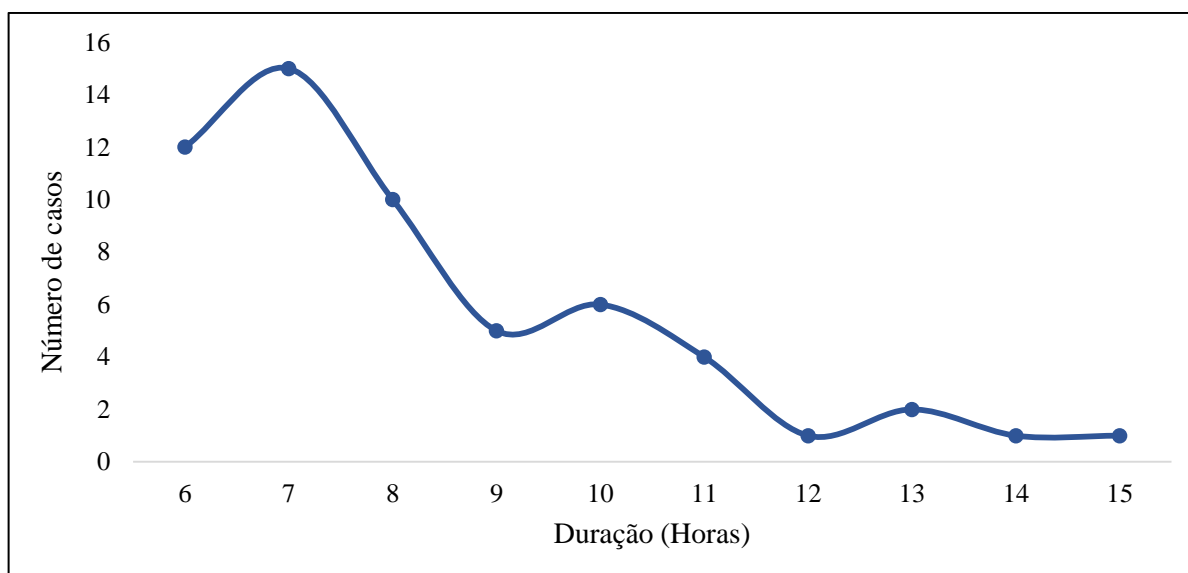
**Figura 19 - Horários em que os CCM alcançaram a área de extensão máxima.**

Fonte: Autor, 2018.

### 4.3.2 Tempo de duração

Foi possível observar que grande parte dos CCM (mais de 50%) apresentaram duração entre 6 e 8 horas (Figura 20), havendo registro de casos com até 15 horas de duração. Estes que atingiram tempo de duração mais elevados (os quais ultrapassam das 10 horas) não possuem um período específico de formação, e variaram entre os meses de dezembro e abril. Em média, estes casos possuem cerca de 8 horas de duração, valor um pouco mais reduzido em comparação aos sistemas da América do Norte, estes que possuem 12 horas de duração aproximadamente, conforme Maddox (1980).

**Figura 20 – Tempo de duração do ciclo de vida total dos CCM.**



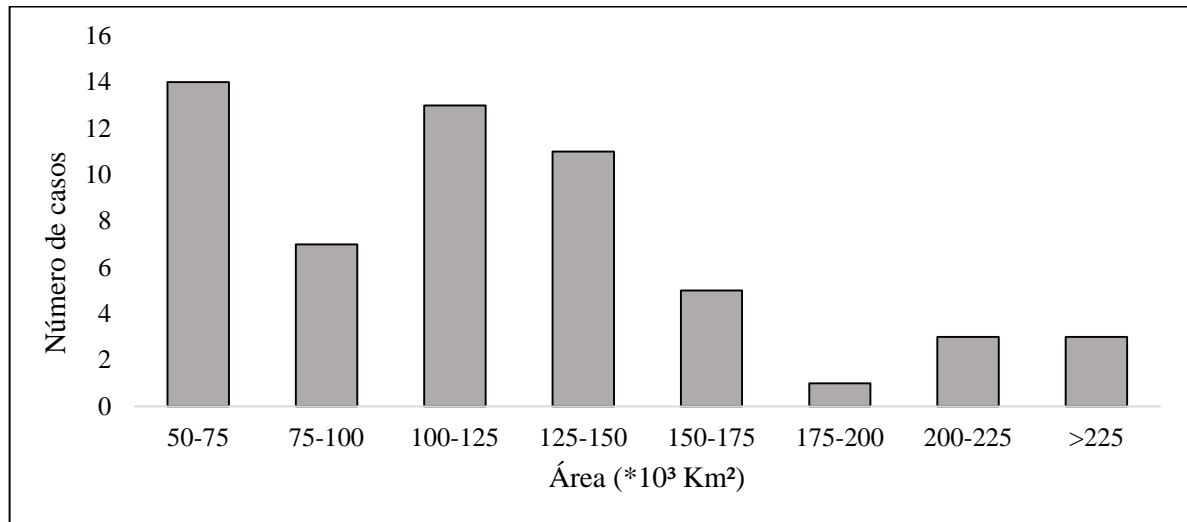
Fonte: Autor, 2018.

### 4.3.3 Áreas

Para melhor compreensão, os dados de área dos CCM (sétima coluna da Tabela 3) foram agrupados e são apresentados abaixo na Figura 21.

Os eventos analisados possuem em média cerca de 120.000km<sup>2</sup>, com maiores ocorrências principalmente entre 50.000 e 150.000km<sup>2</sup>, sem um período do ano em destaque. Ou seja, esses casos com áreas de extensão mais elevadas não possuem meses específicos para ocorrer, podendo variar entre todos os meses em que há ocorrência de CCM na região.

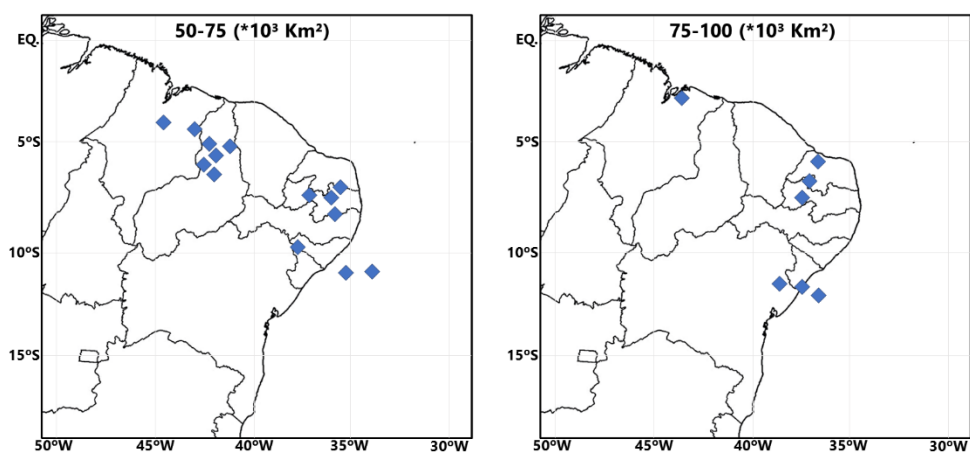
**Figura 21 – Áreas de extensão máxima dos CCM em análise**

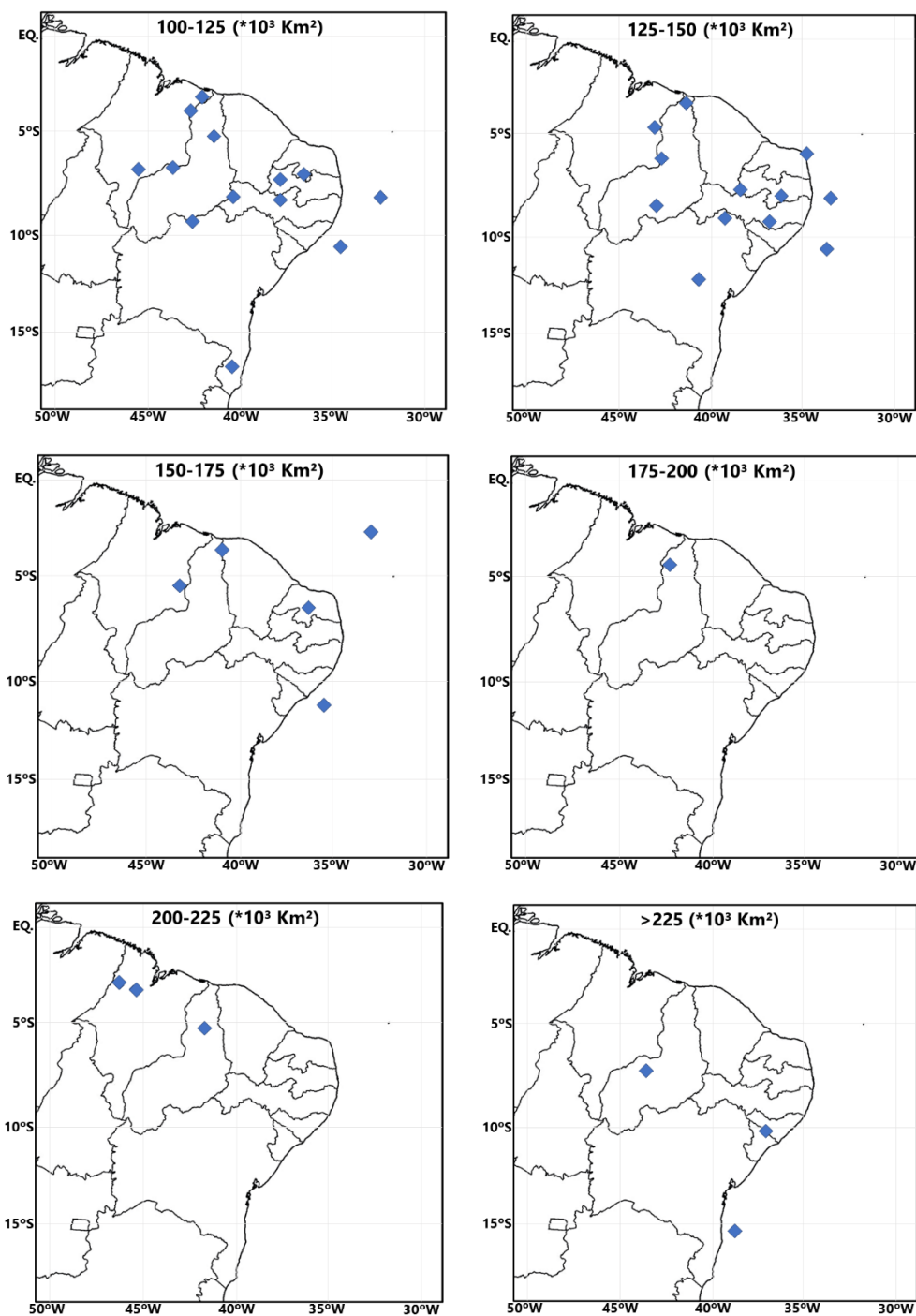


Fonte: Autor, 2018.

Entre os 57 CCM identificados, 47 formaram-se sobre o continente, enquanto o restante dos casos desenvolveu-se sobre o oceano. Esta distribuição é similar a descrita por Velasco e Fritsch (1987) em seu estudo na América do Sul e Laing e Fritsch (1997) na região do continente africano. Sobre o oceano 70% dos casos apresentaram área maior que 100.000km<sup>2</sup>, entre eles destacou-se o fenômeno que atingiu um valor aproximado de 262.300km<sup>2</sup>, o qual foi o segundo maior registrado entre esses anos. As localizações dos núcleos de cada CCM ao atingir a área de extensão máxima divididas a cada 25.000km<sup>2</sup> são apresentadas na Figura 22.

**Figura 22 – Localizações dos centros dos CCM conforme suas áreas de extensão máxima**





Fonte: Autor, 2018.

## 4.4 Sistemas sinóticos associados à formação dos CCM

### 4.4.1 Ocorrências

Através da análise em conjunto entre os campos de linhas de corrente, pressão a nível do mar e imagens de satélite, foi possível identificar e estudar os sistemas de escalas sinótica que influenciaram durante todo o processo de formação dos CCM. Ao todo, foram obtidos seis

padrões de formação, corroborando ao estudo realizado por Milhahn et al. (2012) na região. Os seguintes sistemas foram observados: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Extremidade Frontal (EF), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Alísios, centros de circulações ciclônicas em baixos níveis, classificado como Circulação Ciclônica (C. Cicl.) e Perturbações Ondulatórias dos ventos Alísios (POAs), conforme observado na Tabela 5.

**Tabela 5 – Principais sistemas sinóticos associados a formação dos CCM.**

Data	Sistema	Data	Sistema	Data	Sistema
18/01/2008	ZCIT	24/01/2010	VCAN	01/11/2012	C. Cicl.
29/02/2008	EF	01/02/2010	VCAN	30/11/2012	VCAN
15/03/2008	EF	07/03/2010	EF	15/01/2013	ZCIT
18/03/2008	ZCIT	22/03/2010	ZCIT	19/01/2013	VCAN
19/03/2008	ZCIT	25/03/2010	VCAN	20/04/2013	ZCIT
25/03/2008	ZCIT	08/04/2010	EF	03/11/2013	VCAN
26/03/2008	ZCIT	08/05/2010	EF	11/11/2013	C. Cicl.
29/03/2008	EF	28/11/2010	Alísios	27/11/2013	C. Cicl.
30/03/2008	EF	09/12/2010	EF	23/02/2014	VCAN
06/05/2008	ZCIT	15/12/2010	VCAN	14/03/2014	VCAN
09/05/2008	Alísios	08/01/2011	ZCIT	28/03/2014	ZCIT
02/12/2008	EF	24/01/2011	ZCIT	31/03/2014	ZCIT
22/02/2009	VCAN	24/02/2011	C. Cicl.	02/04/2014	ZCIT
02/04/2009	EF	24/04/2011	POAs	12/05/2014	ZCIT
14/04/2009	ZCIT	24/01/2012	Alísios	02/03/2015	ZCIT
29/04/2009	ZCIT	15/02/2012	VCAN	21/03/2015	ZCIT
10/05/2009	Alísios	17/02/2012	POAs	23/03/2015	POAs
11/05/2009	Alísios	18/02/2012	ZCIT	24/03/2015	ZCIT
21/05/2009	EF	17/04/2012	C. Cicl.	24/04/2015	ZCIT

Fonte: Autor, 2018.

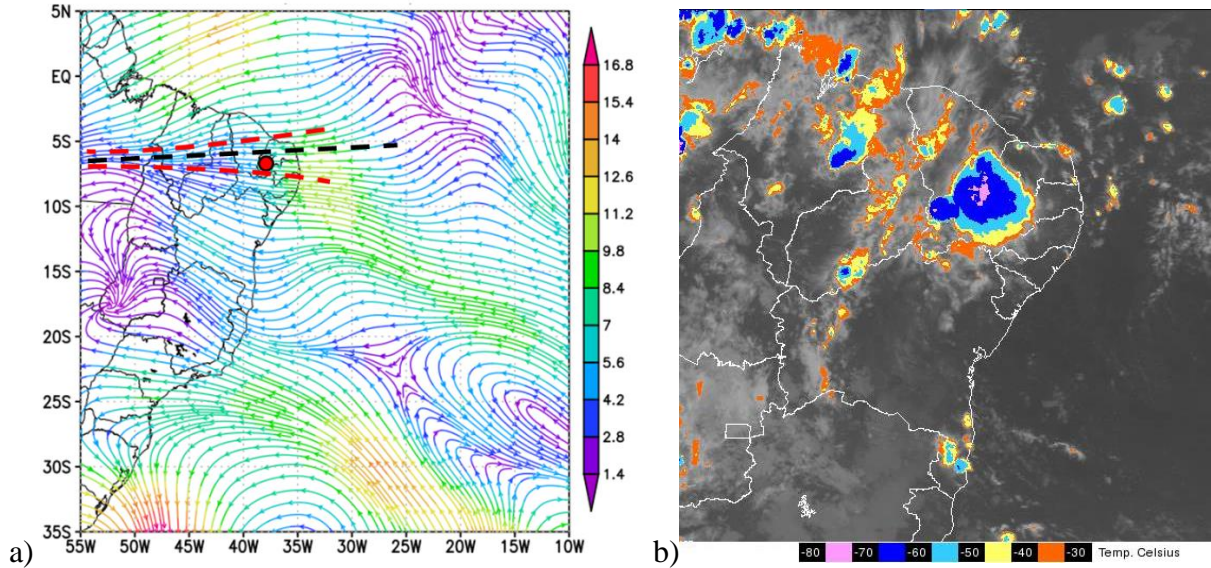
Abaixo são representados os parâmetros de observação de cada sistema através dos dados de reanálise e imagens de satélite. Os círculos destacados em vermelho nas imagens das linhas de corrente representam o núcleo dos CCM.

O padrão para os CCM ligados à ZCIT consiste na localização relativa do seu núcleo quando se posicionaram no centro ou próximo à confluência dos ventos alísios de ambos os



hemisférios (Figura 23). A linha pontilhada em vermelho aponta a zona onde há a convergência no campo das linhas de corrente.

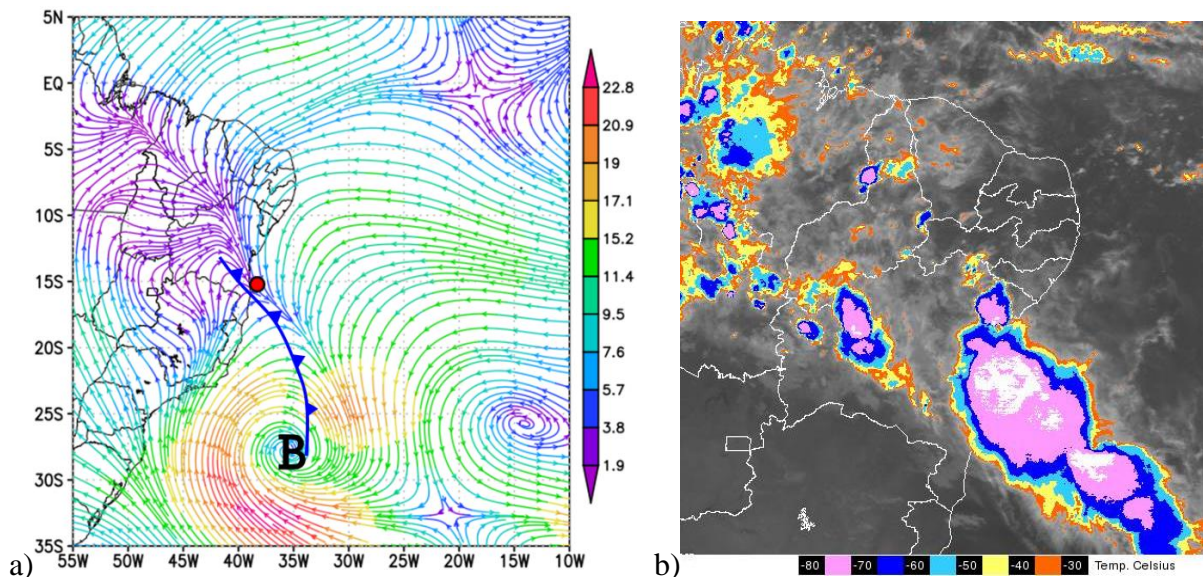
**Figura 23 – a) Campo de linhas de corrente em 1000hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 02/03/2015 às 05UTC.**



Fonte: Autor, 2018.

A influência das periferias frontais foi estabelecida a partir da posição do eixo do cavado do ciclone baroclínico e a convecção que se desloca ao longo do mesmo. Como exemplo tem-se a Figura 24a que apresenta o eixo de um cavado frontal no Sul da Bahia.

**Figura 24 – a) Campo de linhas de corrente em 925hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 08/04/2010 às 04UTC.**

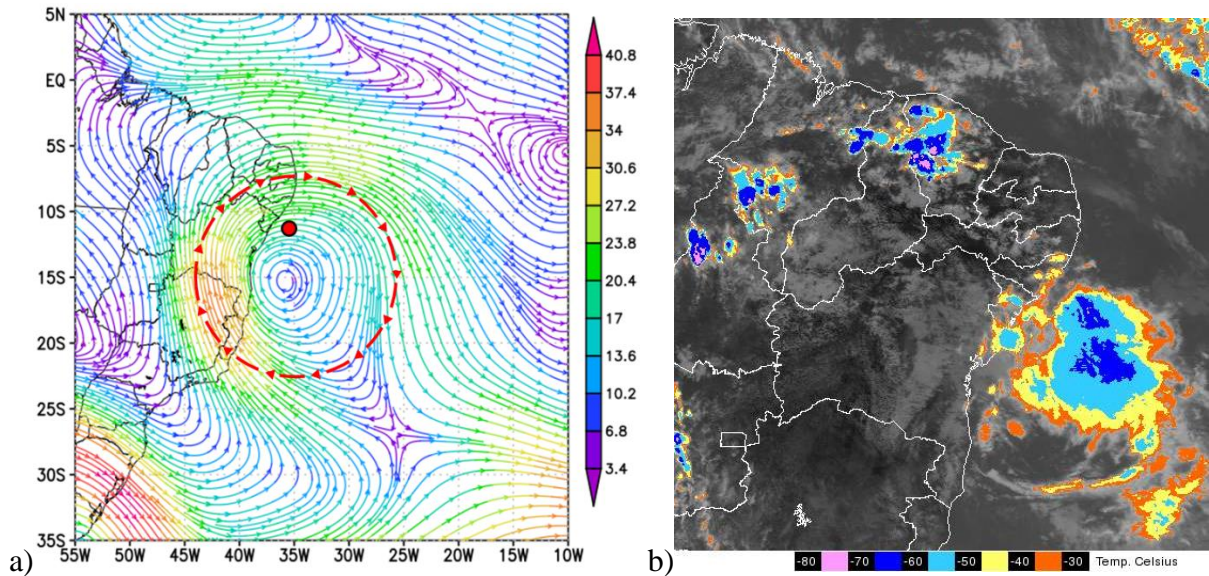


Fonte: Autor, 2018.



O padrão do VCAN (Figura 25) foi definido nas ocorrências em que os CCM se localizavam na periferia do vórtice, que é responsável pela ascendência do ar.

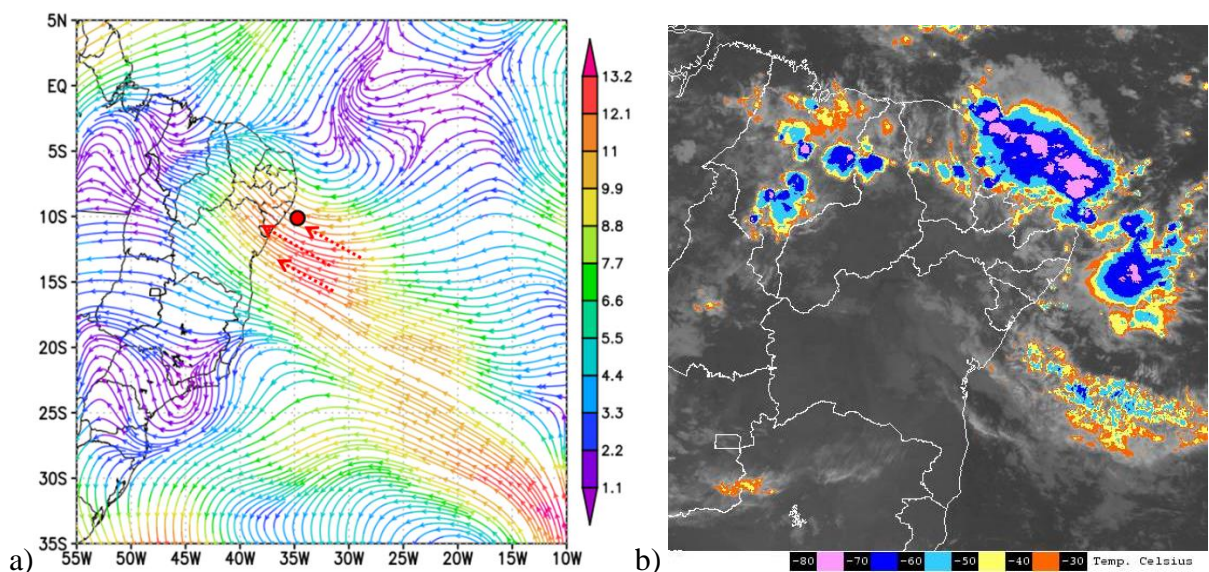
**Figura 25 - a) Campo de linhas de corrente em 300hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 03/11/2013 às 17UTC.**



Fonte: Autor, 2018.

A ligação da formação dos CCM com os ventos alísios aconteceu exclusivamente na costa leste do NEB (Figura 26), devido ao aumento de umidade e fortalecimento dos ventos por conta da alta subtropical.

**Figura 26 - a) Campo de linhas de corrente em 925hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 11/05/2009 às 00UTC.**

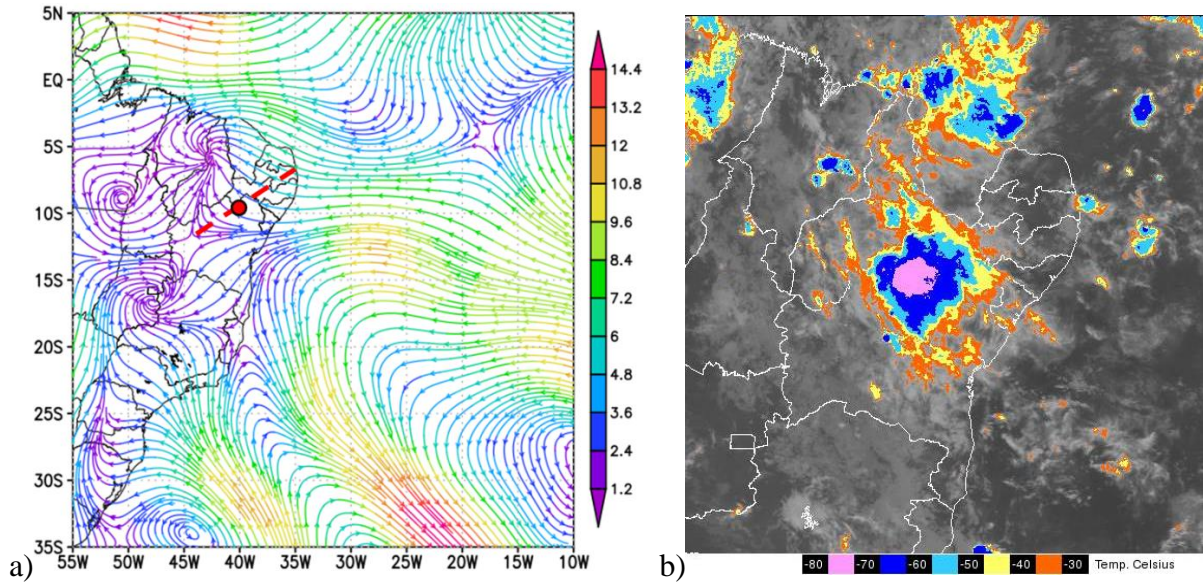


Fonte: Autor, 2018.



A conexão das POAs foi determinada pela presença de um cavado nos ventos alísios e que provoca movimentos ascendentes ao longo do seu eixo (Figura 27).

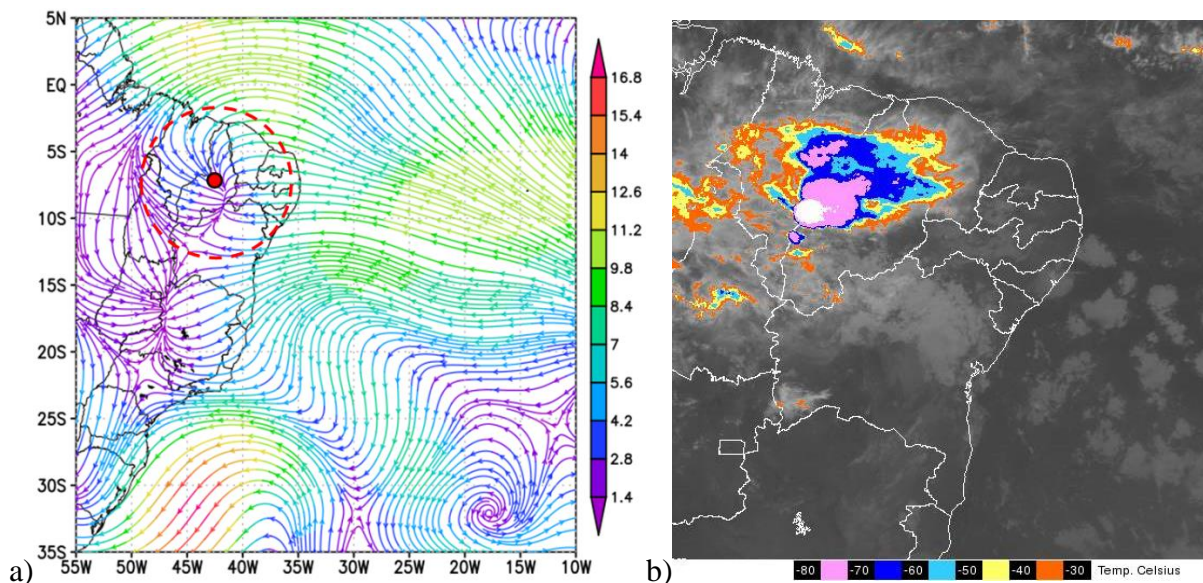
**Figura 27 - a) Campo de linhas de corrente em 850hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 23/03/2013 às 10UTC.**



Fonte: Autor, 2018.

Este padrão foi determinado devido os CCM posicionarem-se sobre centros de baixa pressão vistos no campo de PNM. Nas linhas de corrente (Figura 28) a forte convergência nesse setor era bastante característica.

**Figura 28 - a) Campo de linhas de corrente em 1000hPa; b) Imagem do satélite METEOSAT no canal Infravermelho Realçado, ambas para o dia 11/11/2013 às 08UTC.**

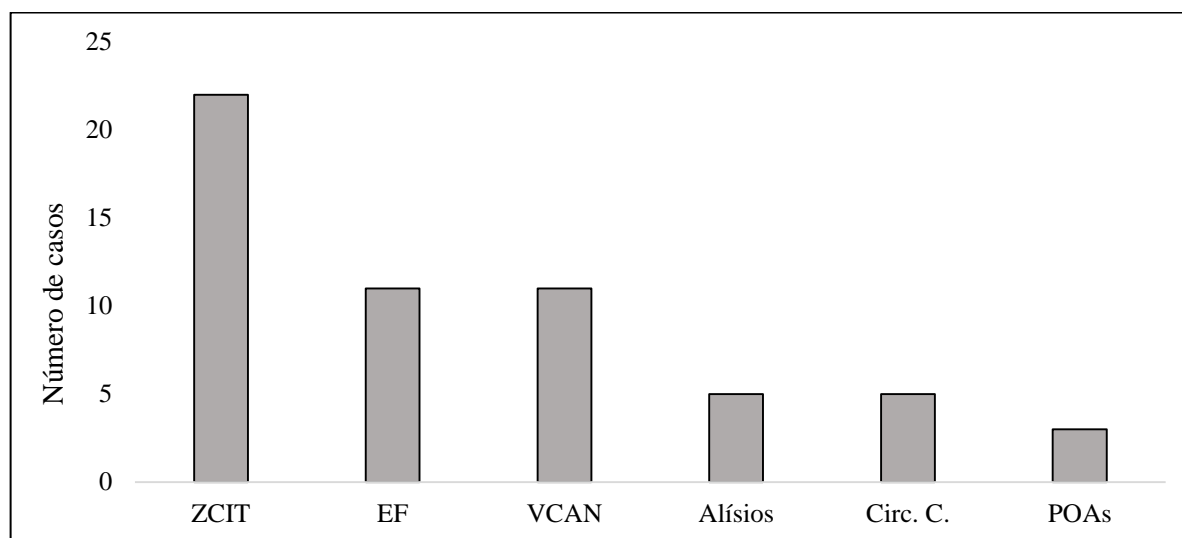


Fonte: Autor, 2018.

#### 4.4.2 Frequências

A distribuição de frequência percentual de ocorrência dos sistemas associados à formação dos CCM é apresentada na Figura 29.

**Figura 29 – Frequência dos sistemas sinóticos associados à formação dos CCM em estudo.**



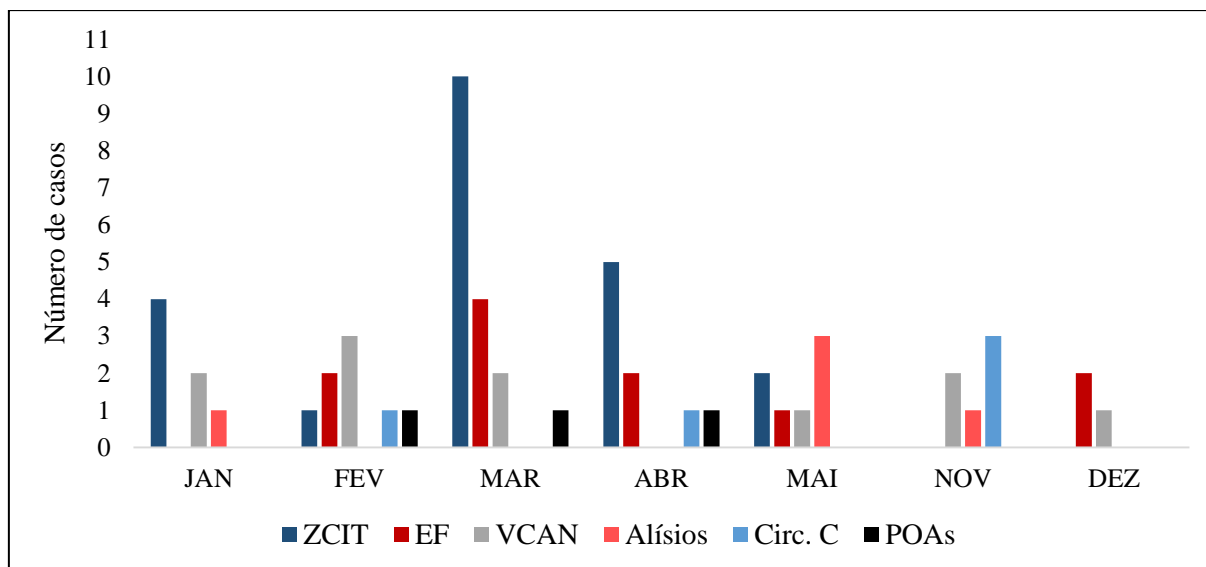
Fonte: Autor, 2018.

Observa-se majoritariamente a presença da ZCIT, com maior percentual de ocorrência, identificada em 38,5% dos casos. Extremidade frontal e VCAN apresentaram mesmo valor de ocorrência, com 19,3%. Assim como os Alísios e Circulação Ciclônica, com 8,8% cada, e as POAs, com menor presença, 5,3%.

#### 4.4.3 Sazonalidade dos sistemas

Para melhor compreensão do período de atuação destes sistemas sobre os CCM, estes dados foram divididos conforme sua distribuição mensal de ocorrência. Na Figura 30 são apresentados os sistemas sinóticos para os meses de ocorrência dos eventos, havendo ausência entre junho e outubro, meses em que nenhum CCM foi identificado.

**Figura 30 – Distribuição mensal dos sistemas sinóticos ligados ao desenvolvimento dos CCM entre 2008 e 2015.**



Fonte: Autor, 2018.

Conforme citado no capítulo 2, entre janeiro e abril a ZCIT posiciona-se mais ao Sul da linha do Equador, podendo atingir 4°S de latitude (MOLION e BERNARDO, 2002). Esta migração está diretamente ligada à sua associação com a formação dos CCM, principalmente nos meses de março e abril, que correspondem a cerca de 68% dos casos relacionados a mesma. Os meses de janeiro, fevereiro e maio, mesmo não apresentando frequência elevada, pode-se observar pouca atuação deste sistema. Enquanto para os outros meses do ano, nenhum caso associado a ZCIT foi identificado.

Apesar da maior elevação dos gradientes de temperatura durante o inverno da região, nenhuma Extremidade Frontal associada foi localizada. Sua maior concentração ocorreu nos primeiros meses do ano (fevereiro a abril) e em dezembro. A maior incidência foi observada em março com 36,4% do total deste sistema.

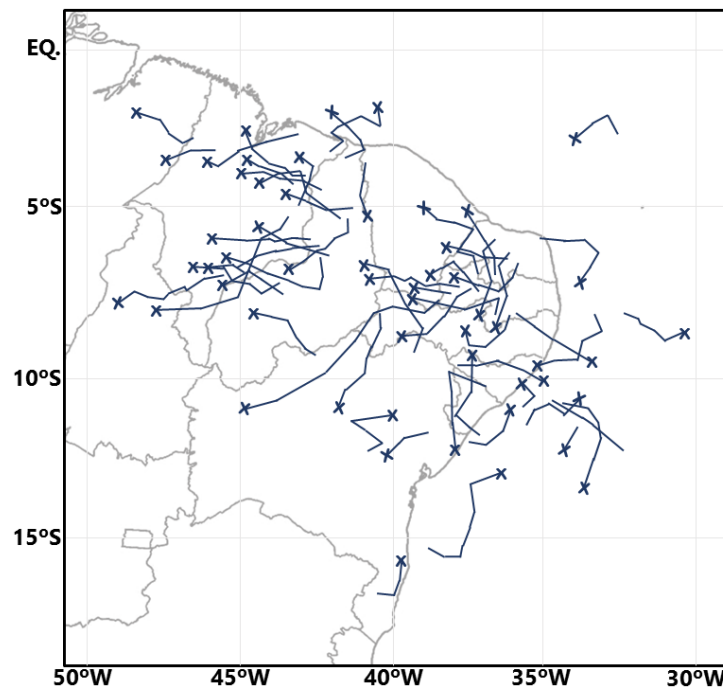
A presença do VCAN foi confirmada para todos os meses em que foram registrados casos de CCM, com exceção de abril. O maior destaque do sistema ocorreu entre novembro e março, principalmente em fevereiro (27,3%), onde os quais adentram o NEB com maior frequência, conforme descrito por Gan e Kousky (1986).

A ocorrência das POAs foi de um caso por mês, entre fevereiro e abril. Já o padrão Alísios e a Circulação Ciclônica apresentaram maior variação mensal, se estendendo de janeiro a novembro, mostrando que não há um padrão de ocorrência em relação aos sistemas anteriores.

#### 4.5 Trajetórias

Em alguns locais ao redor do mundo onde há a ocorrência de CCM, existem padrões de deslocamento influenciados por um determinado sistema local. Assim como no Sul da América do Sul, onde a atuação da corrente de jato subtropical tem ligação direta às trajetórias (FIGUEIREDO e SCOLAR, 1996). E também no sul do continente africano, com a presença de fortes ventos de Oeste de médios níveis (BLAMEY e REASON, 2011). Apesar da menor frequência em relação às localizações citadas acima, os CCM formados no Nordeste brasileiro (Figura 31) possuem uma maior complexidade quanto suas trajetórias de deslocamento. Os pontos marcados em “X” entre as imagens 31 e 40 correspondem à posição final do núcleo dos CCM durante seus respectivos períodos de extensão.

**Figura 31 – Localizações dos 57 casos de CCM identificados no NEB durante o período de estudo e suas respectivas trajetórias.**



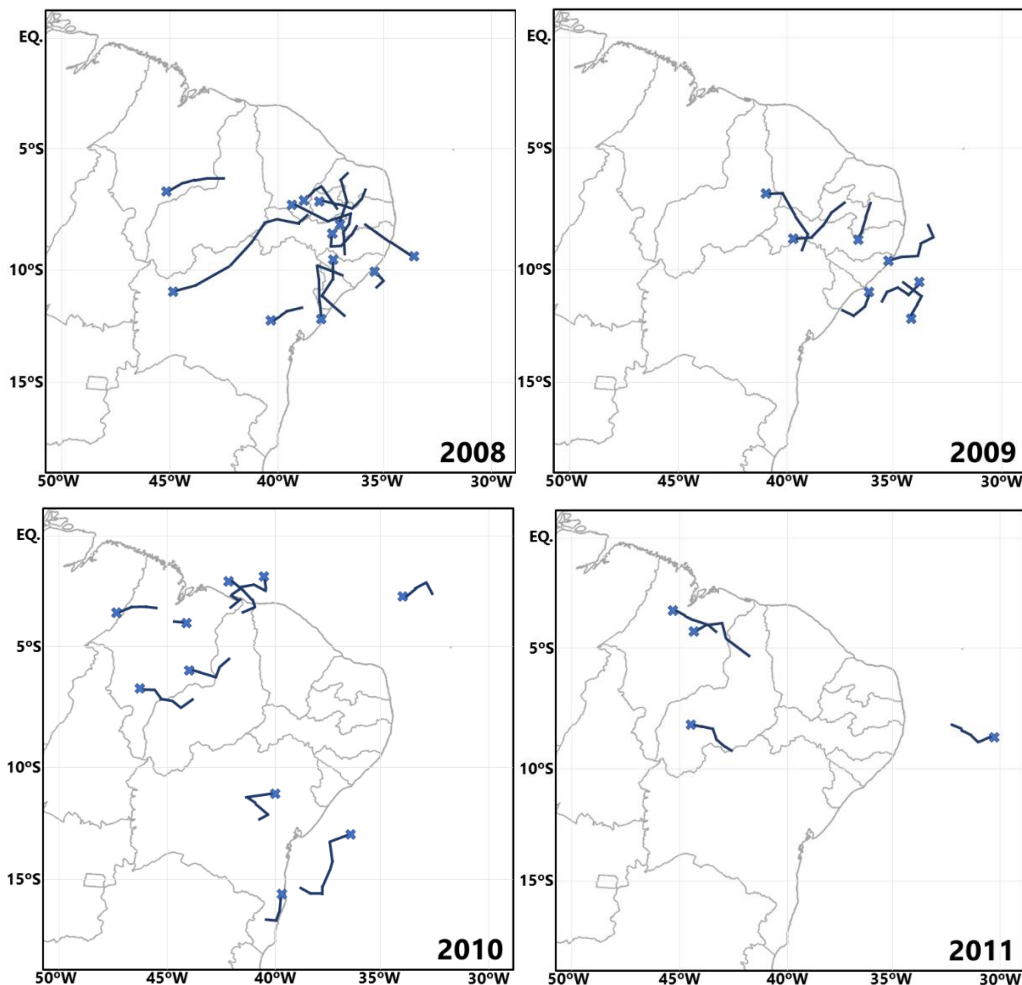
Fonte: Autor, 2018.

Abaixo, a análise das trajetórias dos sistemas foi dividida em subseções, com local de início de formação dos CCM e para onde se deslocaram ao longo do ciclo. Esta divisão compreende o detalhamento dos casos de forma anual, mensal, em três diferentes sub-regiões do Nordeste as quais os núcleos começaram a se desenvolver levando em consideração o relevo e pelos sistemas sinóticos associados à formação.

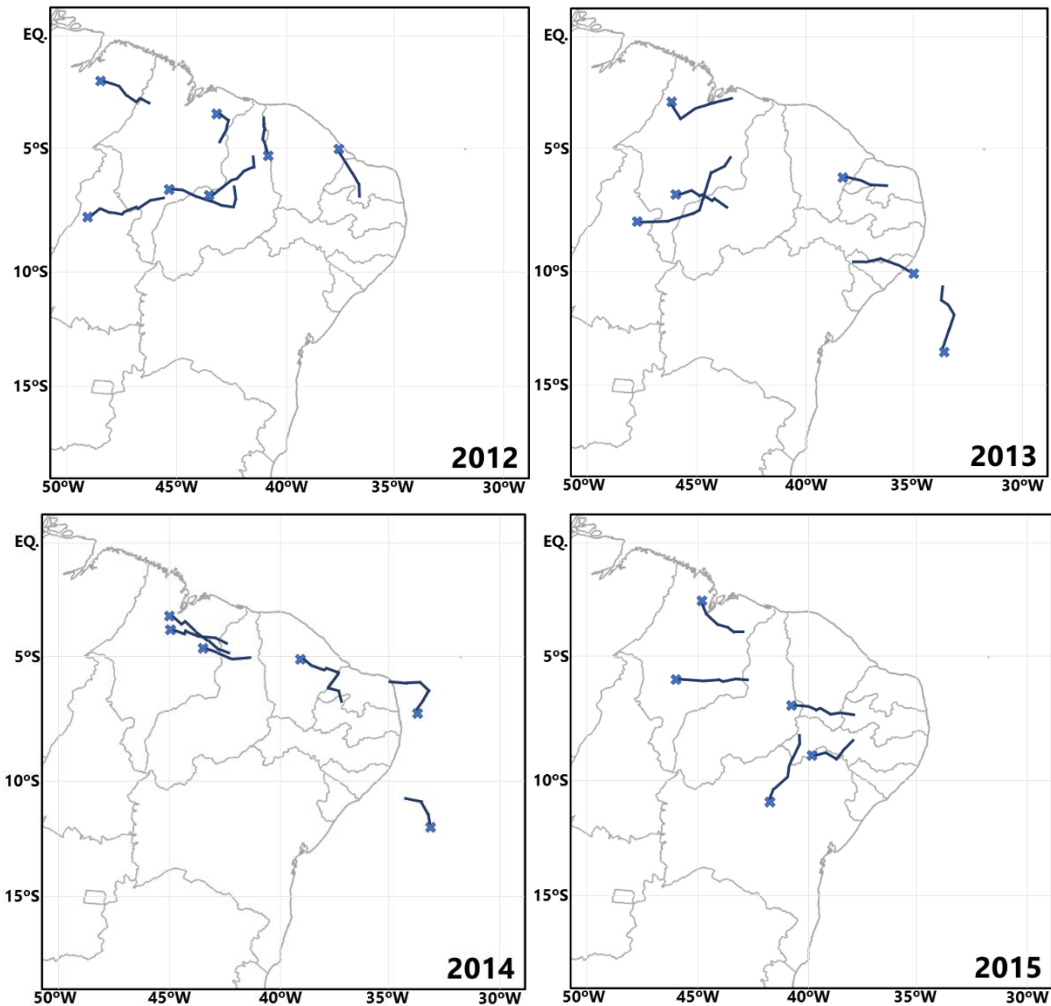
#### 4.5.1 Divisão Anual

Entre os oito anos analisados, notou-se a diversidade da distribuição de localidades onde os CCM se desenvolveram e espalharam-se (Figura 32). Estas variações interanuais estão relacionadas aos movimentos de escala sinótica na região, que por sua vez podem ter influência de fenômenos de escalas maiores como as fases distintas do ENOS e o Dipolo do Atlântico. Assim como a variação gravitacional lunar e o efeito das marés, para os CCM mais próximos à costa litorânea. Tem-se como exemplo os eventos que se formaram no setor Sul do NEB, os quais só são observados com maior frequência durante os três primeiros anos de análise. Já os casos desenvolvidos após o ano de 2010 concentram-se principalmente no setor Norte. Com relação as trajetórias, não se constatou um padrão de deslocamento para cada um dos anos, havendo espalhamento distintos para direções variadas e praticamente opostas. Apenas nos anos de 2012 e 2015 são vistas dispersões para Leste e pontos adjacentes, como Noroeste e Sudeste.

**Figura 32 – Localizações e trajetórias dos CCM divididas anualmente entre 2008 e 2015.**





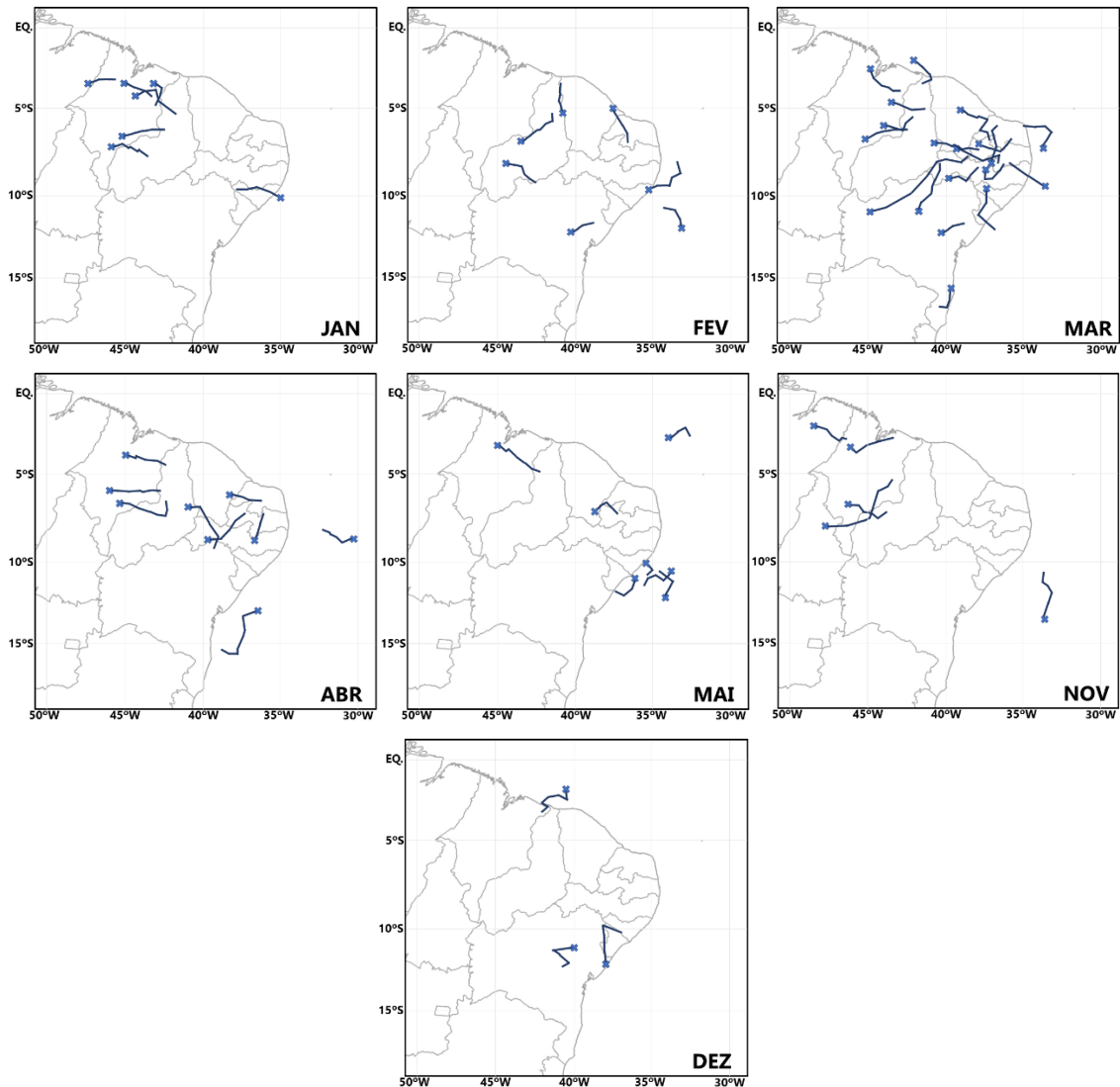


Fonte: Autor, 2018.

#### 4.5.2 Divisão mensal

Mensalmente, as distribuições dos pontos de formação e das trajetórias foram melhores definidas em comparação à classificação interanual (Figura 33). Conforme citado anteriormente, no mês de março foi registrado o maior número de ocorrências dentro do período em análise, e apesar disto, o fator de espalhamento distinto dos CCM não é tão característico. Grande parte dos casos deslocaram-se para Oeste em setores mais próximos principalmente na região central do NEB, enquanto outros dois apresentaram trajetória Oeste, Norte e Sul cada. Geograficamente, os eventos foram bem distribuídos em todos os meses, apenas destacou-se a ausência de casos no Maranhão nos meses de fevereiro, maio e dezembro.

**Figura 33 – Localizações e trajetórias divididas entre todos os meses de ocorrência.**



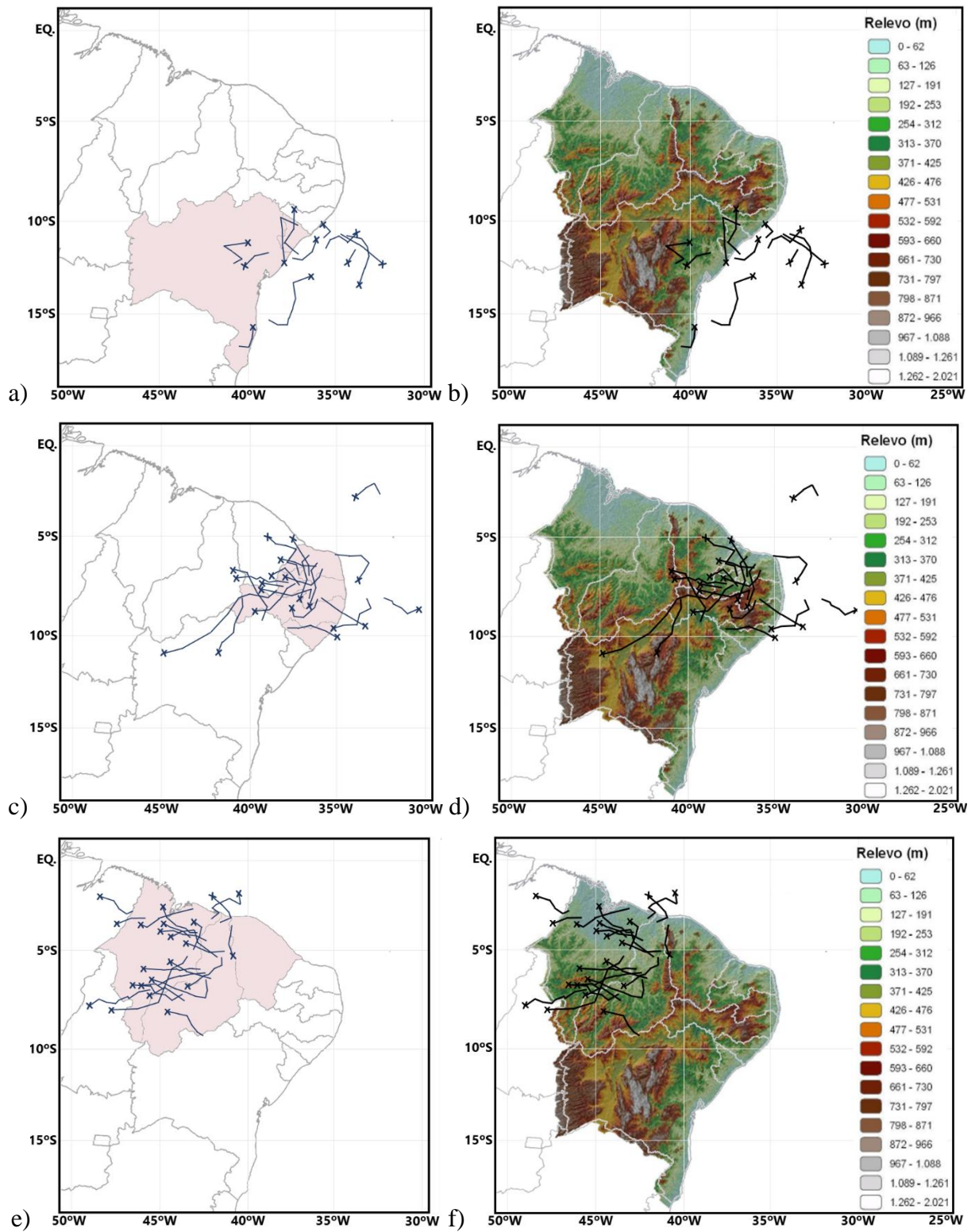
Fonte: Autor, 2018.

#### 4.5.3 Divisão entre diferentes regiões

Além da elevada quantidade de sistemas atuantes sobre a região, o NEB possui uma vasta área de extensão territorial. Desta forma, os sistemas sinóticos atuaram preferencialmente em diferentes setores, conseqüentemente diversificando o escoamento de ar e moldando características distintas no deslocamento dos CCM. Estes setores foram divididos como: Região N1, compreendida por Bahia e Sergipe (Figuras 34a e 34b); Região N2, com estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte (Figuras 34c e 34d); e Região N3, constituída por Ceará, Piauí e Maranhão (Figuras 34e e 34f).



Figura 34 – Mapas relativos aos deslocamentos em N1 a), N2 c) e N3 e); Mapas topográficos e trajetórias dos CCM formados em N1 b), N2 d) e N3 f).



Fonte: Autor, 2018.

Na região N1 não houve um padrão na direção das trajetórias, porém pôde-se destacar a elevada quantidade de casos formados sobre o oceano. Também é importante frisar que os

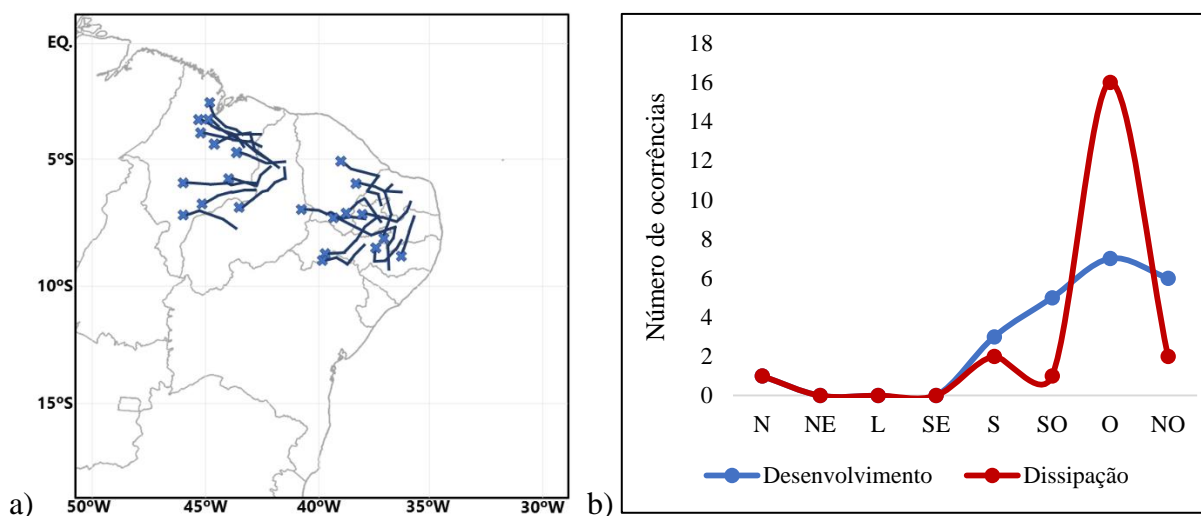
CCM formados sobre a Bahia desenvolveram-se relativamente próximos à costa, e que não atravessaram a região montanhosa da chapada diamantina. O mesmo se refere à região N2, em que os CCM que se desenvolveram próximo à costa se dissipam em trajetória contrária aos que se formaram no Sertão nordestino, principalmente em 40° Oeste. Já na região N3 a grande influência orográfica devido ao efeito do relevo na região da Serra Grande no estado do Piauí que eleva a convecção, e também conseqüentemente determina um padrão nas trajetórias deste setor. Além da influência topográfica, houve a ação do fluxo de vento principalmente nos primeiros meses do ano.

#### 4.5.4 Sistemas

Abaixo, as figuras à esquerda representam o deslocamento dos CCM que se formaram a partir dos respectivos sistemas sinóticos. À direita são apresentadas suas direções de deslocamento durante os estágios de desenvolvimento e dissipação.

Os CCM ligados à ZCIT concentram-se principalmente na faixa que se estende entre 9° - 2° Sul. Foram observadas duas regiões longitudinais onde os sistemas se desenvolvem, na região semiárida entre os estados do Rio Grande do Norte e Pernambuco, e no estado do Piauí. As trajetórias apresentadas na Figura 35 mostram a atuação da ZCIT não só durante a formação, mas também no desenvolvimento, com o escoamento característico de Leste para Oeste tanto nas horas iniciais quanto finais.

**Figura 35 - a) Trajetórias dos CCM associados à ZCIT; b) Direções de deslocamento.**

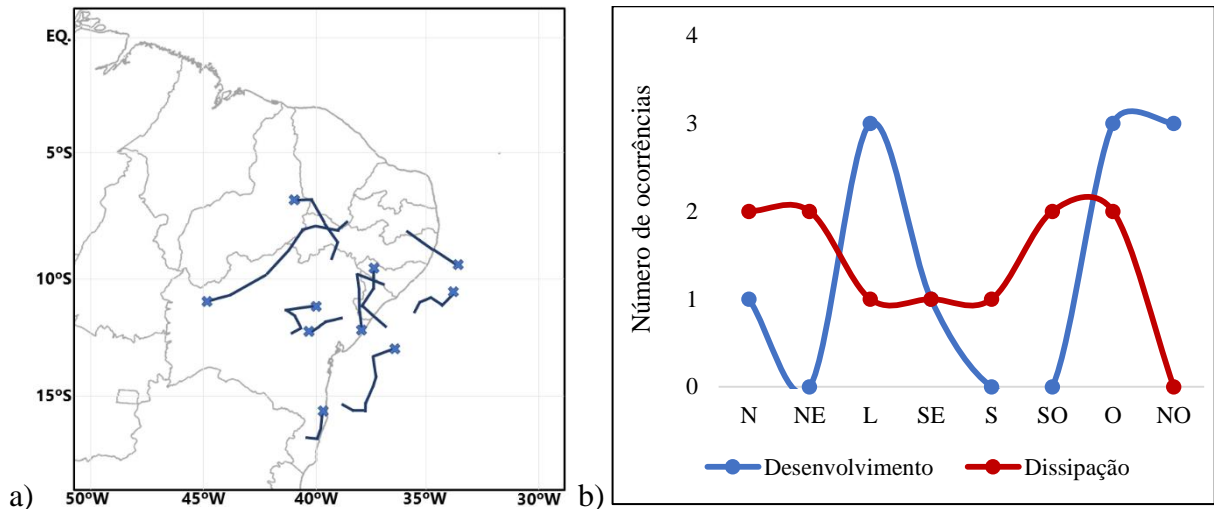


Fonte: Autor, 2018.

Em relação à periferia frontal (Figura 36), apenas dois casos formados no Sul da Bahia e outros dois próximos à Alagoas apresentaram deslocamentos que seguem o escoamento do

sistema de escala sinótica. Sendo este o que mais apresentou variação nas trajetórias dos CCM interligados, variando principalmente dos primeiros aos últimos estágios.

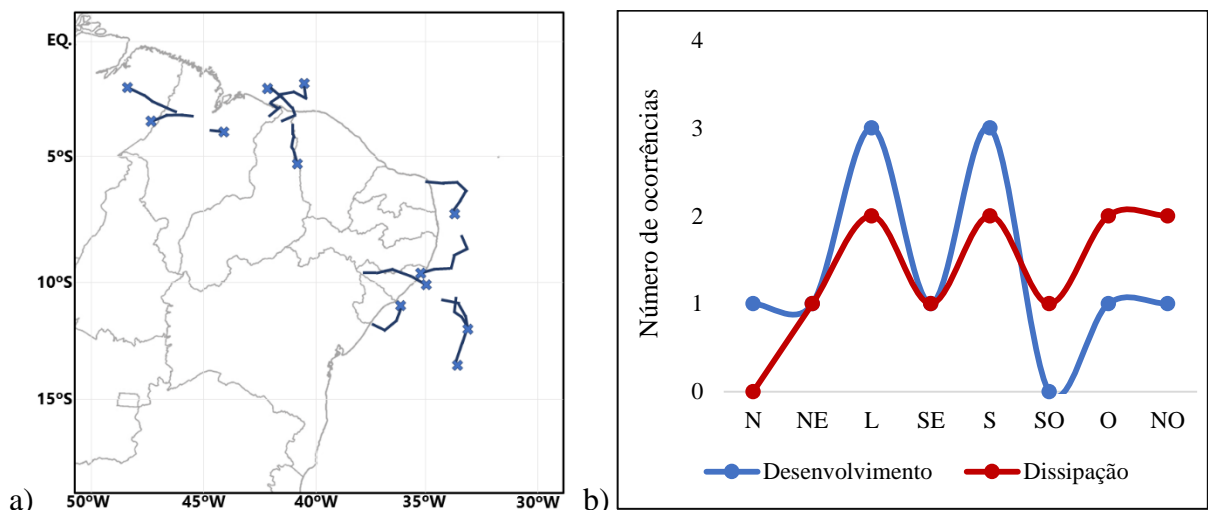
**Figura 36 - a) Trajetórias dos CCM associados à EF; b) Direções de deslocamento.**



Fonte: Autor, 2018.

As trajetórias dos CCM ligados ao VCAN (Figura 37) apresentaram a maior variação entre todos os sistemas estudados. Isto ocorre por conta destes vórtices subtropicais não apresentarem deslocamento padrão. Os casos formados entre o Piauí e Maranhão configuraram-se no VCAN clássico, onde somente dois deles deslocaram-se paralelos ao escoamento horário do vórtice. Já os casos formados na costa leste do NEB sofreram influência do VCAN formado mais à leste, este que segundo Fedorova (2008) ocorre devido a intensificação da ZCAS e da Alta da Bolívia.

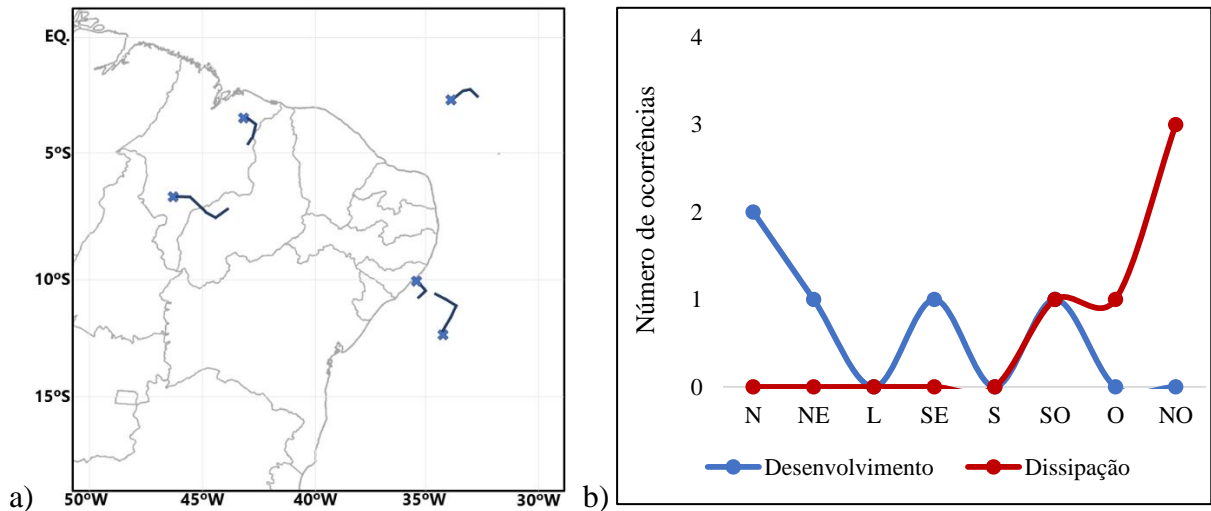
**Figura 37 - a) Trajetórias dos CCM associados ao VCAN; b) Direções de deslocamento.**



Fonte: Autor, 2018.

Quatro dos cinco eventos com formação influenciada pelos ventos alísios (Figura 38) apresentaram deslocamento para Oeste durante as últimas horas, enquanto nas primeiras horas houveram espalhamentos distintos. Apenas um caso, este formado sobre o Oceano, mostrou características completamente opostas ao demais, com trajetórias variando para Leste e Sul.

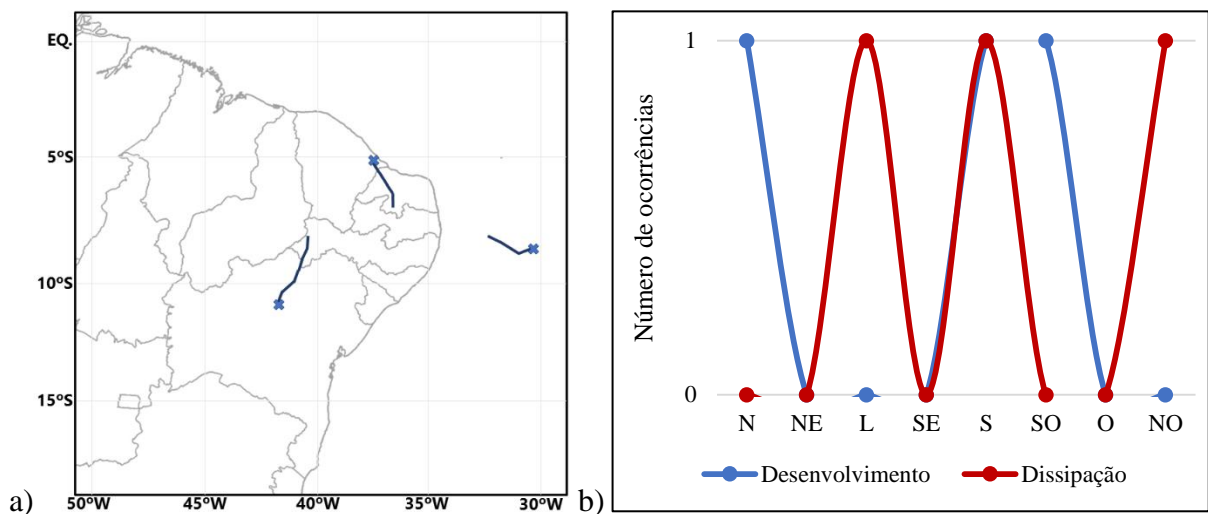
**Figura 38 - a) Trajetórias dos CCM associados aos Alísios; b) Direções de deslocamento.**



Fonte: Autor, 2018.

Cada um dos três eventos associados às POAs (Figura 39) se dissiparam com características completamente opostas e em setores distintos do NEB. Apontando uma maior complexidade na previsão do curso destes CCM.

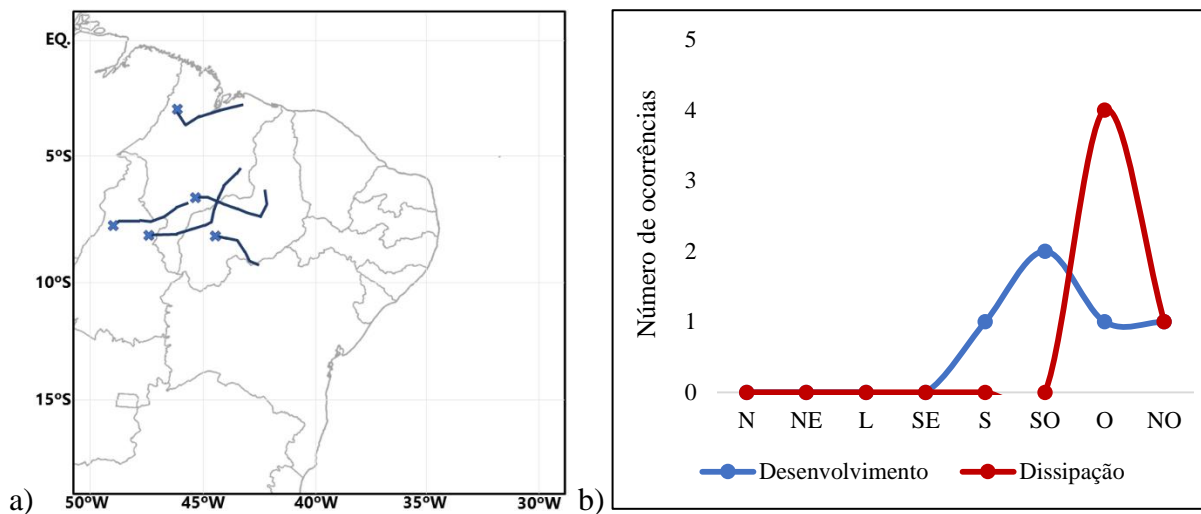
**Figura 39 - a) Trajetórias dos CCM associados às POAs; b) Direções de deslocamento.**



Fonte: Autor, 2018.

Similar às trajetórias dos CCM impulsionados pela ZCIT, os que sofreram influência da circulação ciclônica (Figura 40) também se deslocaram para Oeste, principalmente durante o estágio de dissipação. Nas primeiras horas houve variações de Sul a Noroeste. Também vale ressaltar a distância percorrida de todos os cinco casos, o que não ocorreu percentualmente nos outros sistemas sinóticos.

**Figura 40 - a) Trajetórias dos CCM associados à circulação ciclônica; b) Direções de deslocamento.**



Fonte: Autor, 2018.

#### 4.6 Trajetórias em relação às linhas de corrente

As trajetórias de deslocamento dos CCM obtidas através do algoritmo GNU Octave foram comparadas às direções dos campos de linhas de corrente de baixos à altos níveis da atmosfera, buscando analisar o comportamento dos sistemas de escala sinótica presentes durante a formação. Esta análise foi feita para dois instantes, o primeiro nas horas iniciais do ciclo de vida, e a segunda para os momentos finais, onde os CCM começaram a perder sua força.

##### 4.6.1 Desenvolvimento

Durante esta seção da análise, os primeiros instantes da formação dos CCM foram denominados como “Desenvolvimento”, este que integra a transição entre as fases de gênese e desenvolvimento máximo. Abaixo, na Tabela 6, os dados das linhas de corrente para todos os seis níveis predeterminados e do deslocamento real do CCM são apresentados detalhadamente.

**Tabela 6 - Trajetórias reais e comportamento das linhas de corrente nas horas iniciais do desenvolvimento dos CCM.**

Ocorrências (Desenvolvimento)		Direção						
		Linhas de Corrente						
Data	Sistema	CCM	925hPa	850hPa	700hPa	500hPa	400hPa	300hPa
18/01/2008	ZCIT	O	O	O	O	S	SE	L
18/03/2008	ZCIT	SO	O	O	O	SO	S	S
19/03/2008	ZCIT	N	O	NO	NO	O	NO	O
25/03/2008	ZCIT	SO	O	O	NO	O	O	NO
26/03/2008	ZCIT	S	O	NO	NO	SO	S	O
06/05/2008	ZCIT	NO	NO	NO	O	NO	O	N
14/04/2009	ZCIT	SO	O	O	O	SO	O	O
29/04/2009	ZCIT	S	N	N	O	O	SO	S
22/03/2010	ZCIT	SO	SO	O	SO	NO	N	N
08/01/2011	ZCIT	NO	SO	O	O	S	O	S
24/01/2011	ZCIT	NO	O	O	NO	NO	S	S
18/02/2012	ZCIT	S	O	O	O	SO	S	S
15/01/2013	ZCIT	NO	NO	N	SO	L	L	NE
20/04/2013	ZCIT	O	O	O	NO	NO	O	NO
28/03/2014	ZCIT	O	S	NO	NO	NO	O	O
31/03/2014	ZCIT	NO	NO	NO	NO	L	O	NO
02/04/2014	ZCIT	O	SO	O	O	SO	O	NO
12/05/2014	ZCIT	NO	O	NO	NO	NO	O	NO
02/03/2015	ZCIT	O	O	O	NO	SO	SO	S
21/03/2015	ZCIT	SO	O	O	SO	O	N	L
24/03/2015	ZCIT	O	SO	O	O	O	O	O
24/04/2015	ZCIT	O	O	O	O	O	O	O
29/02/2008	EF	O	O	L	L	S	NE	NE
15/03/2008	EF	O	S	SE	O	O	O	O
29/03/2008	EF	SE	O	O	O	S	S	L
30/03/2008	EF	NO	O	O	O	S	SE	SE
02/12/2008	EF	O	S	L	L	L	S	NE
02/04/2009	EF	NO	S	S	O	O	O	NO

21/05/2009	EF	L	NO	N	O	NE	S	SE
07/03/2010	EF	L	S	S	SE	SE	SE	SE
08/04/2010	EF	L	NE	L	L	L	L	L
08/05/2010	EF	N	NO	NO	NO	O	O	SO
09/12/2010	EF	NO	S	SE	L	L	NE	N
22/02/2009	VCAN	S	O	O	N	N	N	NE
24/01/2010	VCAN	O	SO	O	NO	NE	NE	N
01/02/2010	VCAN	L	SO	O	O	SE	SE	SE
25/03/2010	VCAN	NE	O	NO	NO	O	L	NE
15/12/2010	VCAN	N	O	NO	N	N	N	NE
15/02/2012	VCAN	S	O	O	O	S	NE	NE
30/11/2012	VCAN	NO	SO	SO	NO	NO	O	N
19/01/2013	VCAN	L	SO	SO	SO	NE	NE	NE
03/11/2013	VCAN	S	NO	O	O	NE	NE	NE
23/02/2014	VCAN	SE	NO	NO	NO	O	S	SE
14/03/2014	VCAN	L	NO	O	NO	NO	O	SO
09/05/2008	Alísios	NE	NO	O	NO	NO	N	NE
10/05/2009	Alísios	SE	NO	O	O	O	O	SO
11/05/2009	Alísios	O	O	O	O	SO	O	O
28/11/2010	Alísios	SO	S	S	O	NO	O	NO
24/01/2012	Alísios	N	O	O	O	L	L	L
24/02/2011	C. Ciclônica	NO	SO	SO	O	NO	N	N
17/04/2012	C. Ciclônica	S	O	O	O	SO	S	SO
01/11/2012	C. Ciclônica	SO	SE	S	NO	O	O	O
11/11/2013	C. Ciclônica	SO	S	SO	NO	NO	NE	L
27/11/2013	C. Ciclônica	O	S	SO	O	N	N	NO
24/04/2011	POAs	SE	NO	NO	N	SO	S	SE
17/02/2012	POAs	N	O	NO	O	S	S	NE
23/03/2015	POAs	S	E	L	L	SO	S	SE

Fonte: Autor, 2018.

Para os eventos associados à ZCIT, 14 dos 22 casos influenciados pelo sistema apresentaram deslocamento semelhante às linhas de corrente em 925 e 850hPa, onde constatou-

se claramente maior ação dos fluxos de vento em baixos níveis, correspondendo por 63,6%. Já para outros 4 casos, as direções das linhas de corrente em médios níveis (700 e 500hPa) aproximaram-se do real, assim como em altos níveis, em que foram encontrados na mesma proporção, 18,2% cada.

Nos eventos associados ao VCAN, as linhas de corrente nos níveis de 400 e 300hPa apresentaram maior relação com as trajetórias calculadas pelo algoritmo, com 63,6%. Outros 16,6% foram observados em médios níveis e 8,3% em baixos níveis. Enquanto no caso do dia 15/12/2010, valores semelhantes em altos e médios níveis foram registrados. Em relação aos Alísios, trajetórias semelhantes foram encontradas entre 925 e 850hPa em 80% dos casos. Enquanto a direção dos CCM associados às POAs, houve maior similaridade entre 400 e 300hPa, com frequência de 66,6%.

Em relação a Extremidade Frontal, não houveram níveis com destaque absoluto, mostrando que não há influência direta como os sistemas citados acima, embora os fluxos entre 400 e 300hPa apresentaram trajetória semelhante à dos CCM em 45,5% dos eventos e 36,4% em baixos níveis, enquanto outros 18,1% foram registrados entre médios e altos níveis. Assim como os casos associados à Circulação ciclônica, que entre a média e alta atmosfera, observou-se 40% em cada e outros 20% nos níveis mais próximos à superfície.

#### 4.6.2 Dissipação

A segunda parte da análise concentra-se nas horas finais do período de vida dos CCM, que se estende da extensão do tamanho máximo à dissipação (Tabela 7).

**Tabela 7 - Trajetórias reais e comportamento das linhas de corrente nas horas finais do desenvolvimento dos CCM.**

Ocorrências (Dissipação)		Direção						
		Linhas de Corrente						
Data	Sistema	CCM	925hPa	850hPa	700hPa	500hPa	400hPa	300hPa
18/01/2008	ZCIT	O	O	O	O	S	SE	L
18/03/2008	ZCIT	SO	O	O	O	SO	S	S
19/03/2008	ZCIT	N	O	NO	NO	O	NO	O
25/03/2008	ZCIT	SO	O	O	NO	O	O	NO
26/03/2008	ZCIT	S	O	NO	NO	SO	S	O
06/05/2008	ZCIT	NO	NO	NO	O	NO	O	N
14/04/2009	ZCIT	SO	O	O	O	SO	O	O



29/04/2009	ZCIT	S	N	N	O	O	SO	S
22/03/2010	ZCIT	SO	SO	O	SO	NO	N	N
08/01/2011	ZCIT	NO	SO	O	O	S	O	S
24/01/2011	ZCIT	NO	O	O	NO	NO	S	S
18/02/2012	ZCIT	S	O	O	O	SO	S	S
15/01/2013	ZCIT	NO	NO	N	SO	L	L	NE
20/04/2013	ZCIT	O	O	O	NO	NO	O	NO
28/03/2014	ZCIT	O	S	NO	NO	NO	O	O
31/03/2014	ZCIT	NO	NO	NO	NO	L	O	NO
02/04/2014	ZCIT	O	SO	O	O	SO	O	NO
12/05/2014	ZCIT	NO	O	NO	NO	NO	O	NO
02/03/2015	ZCIT	O	O	O	NO	SO	SO	S
21/03/2015	ZCIT	SO	O	O	SO	O	N	L
24/03/2015	ZCIT	O	SO	O	O	O	O	O
24/04/2015	ZCIT	O	O	O	O	O	O	O
29/02/2008	EF	O	O	L	L	S	NE	NE
15/03/2008	EF	O	S	SE	O	O	O	O
29/03/2008	EF	SE	O	O	O	S	S	L
30/03/2008	EF	NO	O	O	O	S	SE	SE
02/12/2008	EF	O	S	L	L	L	S	NE
02/04/2009	EF	NO	S	S	O	O	O	NO
21/05/2009	EF	L	NO	N	O	NE	S	SE
07/03/2010	EF	L	S	S	SE	SE	SE	SE
08/04/2010	EF	L	NE	L	L	L	L	L
08/05/2010	EF	N	NO	NO	NO	O	O	SO
09/12/2010	EF	NO	S	SE	L	L	NE	N
22/02/2009	VCAN	S	O	O	N	N	N	NE
24/01/2010	VCAN	O	SO	O	NO	NE	NE	N
01/02/2010	VCAN	L	SO	O	O	SE	SE	SE
25/03/2010	VCAN	NE	O	NO	NO	O	L	NE
15/12/2010	VCAN	N	O	NO	N	N	N	NE
15/02/2012	VCAN	S	O	O	O	S	NE	NE
30/11/2012	VCAN	NO	SO	SO	NO	NO	O	N

19/01/2013	VCAN	L	SO	SO	SO	NE	NE	NE
03/11/2013	VCAN	S	NO	O	O	NE	NE	NE
23/02/2014	VCAN	SE	NO	NO	NO	O	S	SE
14/03/2014	VCAN	L	NO	O	NO	NO	O	SO
09/05/2008	Alísios	NE	NO	O	NO	NO	N	NE
10/05/2009	Alísios	SE	NO	O	O	O	O	SO
11/05/2009	Alísios	O	O	O	O	SO	O	O
28/11/2010	Alísios	SO	S	S	O	NO	O	NO
24/01/2012	Alísios	N	O	O	O	L	L	L
24/02/2011	C. Ciclônica	NO	SO	SO	O	NO	N	N
17/04/2012	C. Ciclônica	S	O	O	O	SO	S	SO
01/11/2012	C. Ciclônica	SO	SE	S	NO	O	O	O
11/11/2013	C. Ciclônica	SO	S	SO	NO	NO	NE	L
27/11/2013	C. Ciclônica	O	S	SO	O	N	N	NO
24/04/2011	POAs	SE	NO	NO	N	SO	S	SE
17/02/2012	POAs	N	O	NO	O	S	S	NE
23/03/2015	POAs	S	E	L	L	SO	S	SE

Fonte: Autor, 2018.

Conforme visto anteriormente nas direções durante o desenvolvimento dos CCM, o predomínio de influência dos ventos na baixa atmosfera para os casos associados à ZCIT permaneceu. O deslocamento semelhante às linhas de corrente em 925 e 850hPa foi constatado em 73,3% dos casos, cerca de 10% maior do que nas horas iniciais do período de vida. Já em médios níveis este valor foi reduzido para 13,6%, assim como em altos níveis em que somente 9,1% dos casos seguiram movimentos semelhantes acima de 400hPa.

O mesmo aconteceu para os eventos associados ao VCAN, em que se manteve maior incidência próxima ao real entre 400 e 300hPa, porém com apenas 54%. Em baixos níveis houve um aumento em relação aos estágios iniciais, com 27,3%. Enquanto em médios níveis o valor foi reduzido de 16,6% para 8,3%. E para uma única data, assim como visto no estágio anterior, um caso com valor semelhante entre 700 e 300hPa foi registrado, porém para uma data diferente. Em relação aos Alísios, nenhum dos casos manteve deslocamento semelhante às horas iniciais. Estas trajetórias se assimilaram a níveis superiores, sendo 60% em médios e 40% em altos níveis, mostrando a baixa influência deste sistema nos instantes finais. Já para os CCM

associados às POAs, estas direções permaneceram fixas entre 400 e 300hPa, com frequência de 66,6%.

Quanto a Extremidade Frontal, os fluxos em baixos e altos níveis apresentaram a mesma proporção de deslocamento (36,4%), onde estes valores se mantiveram e decaíram em relação ao estágio anterior, respectivamente. Outros 18,2% foram registrados entre 700 e 300hPa e 9% foi acrescido à média atmosfera. E para os casos associados à Circulação ciclônica, observou-se maior deslocamento em baixos e médios níveis (40%) e outros 20% nos níveis superiores.

#### 4.7 Precipitação

O principal fenômeno adverso relacionado aos CCM do NEB consiste na precipitação, a qual é gerada devido à forte convecção proveniente desses sistemas. Os dados pluviométricos registrados pelas estações do INMET (Tabela 8) são detalhados abaixo com o valor máximo captado em 24h no dia de ocorrência de cada um dos CCM.

**Tabela 8 – Valores de precipitação acumulada em 24h de todos os CCM e suas respectivas datas de ocorrência.**

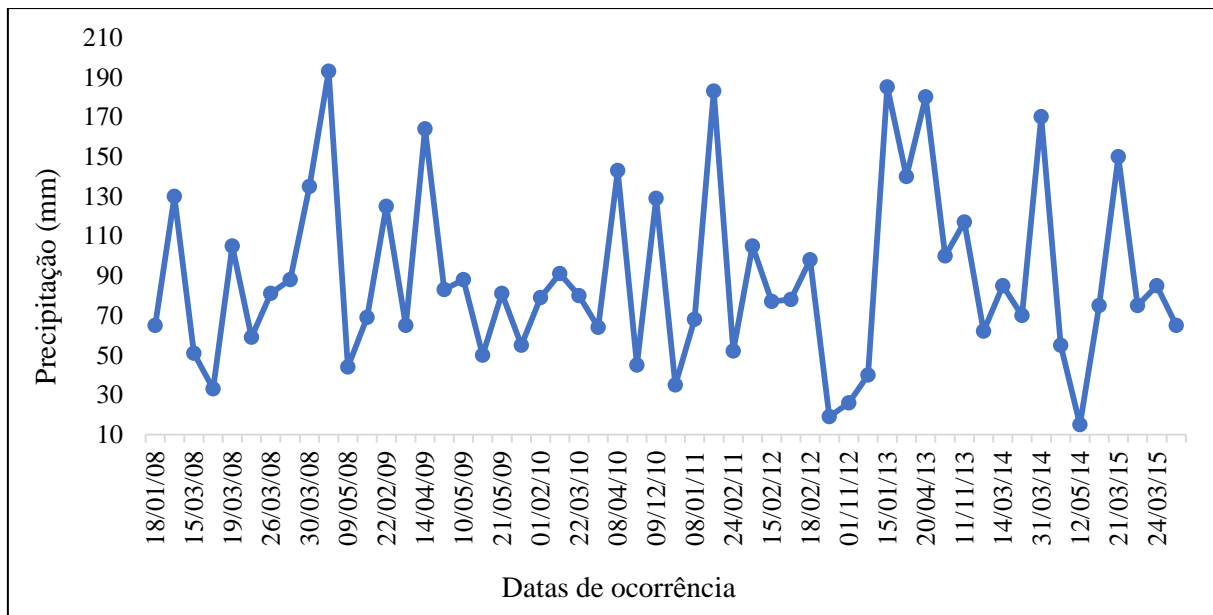
Data	P. acum. (24h)	Data	P. acum. (24h)	Data	P. acum. (24h)
18/01/2008	65mm	24/01/2010	55mm	01/11/2012	26mm
29/02/2008	130mm	01/02/2010	79mm	30/11/2012	40mm
15/03/2008	51mm	07/03/2010	91mm	15/01/2013	185mm
18/03/2008	33mm	22/03/2010	80mm	19/01/2013	140mm
19/03/2008	105mm	25/03/2010	64mm	20/04/2013	180mm
25/03/2008	59mm	08/04/2010	143mm	03/11/2013	100mm
26/03/2008	81mm	08/05/2010	---	11/11/2013	117mm
29/03/2008	88mm	28/11/2010	68mm	27/11/2013	62mm
30/03/2008	135mm	09/12/2010	183mm	23/02/2014	---
06/05/2008	<b>193mm</b>	15/12/2010	52mm	14/03/2014	85mm
09/05/2008	44mm	08/01/2011	---	28/03/2014	70mm
02/12/2008	69mm	24/01/2011	105mm	31/03/2014	170mm
22/02/2009	125mm	24/02/2011	77mm	02/04/2014	55mm
02/04/2009	65mm	24/04/2011	78mm	12/05/2014	<b>15mm</b>
14/04/2009	164mm	24/01/2012	98mm	02/03/2015	75mm

29/04/2009	83mm	15/02/2012	19mm	21/03/2015	150mm
10/05/2009	88mm	17/02/2012	68mm	23/03/2015	75mm
11/05/2009	50mm	18/02/2012	183mm	24/03/2015	85mm
21/05/2009	81mm	17/04/2012	52mm	24/04/2015	65mm

Fonte: INMET; Autor, 2018.

Dentre os 57 eventos encontrados, foi possível obter os dados pluviométricos em 54 deles. Os outros três casos com ausência de informação são justificados pelo fato da área abrangente destes CCM se concentrar exclusivamente no Oceano, incapacitando a coleta destas informações. Em média os eventos apresentaram 80mm de precipitação associada, com desvio padrão de 44,80. O volume total de chuva em 16 casos ultrapassou de 100mm/24h, e o maior valor registrado foi no dia 06/05/2008 com 193mm no município de Souza, no sertão da Paraíba. Estes valores também são apresentados na Figura 41, onde pode-se visualizar ainda melhor a amplitude de valores entre um caso e outro.

**Figura 41 – Variação dos valores relativos aos totais pluviométricos registrados para 24h dos casos de CCM.**



Fonte: Autor, 2018.

## 5 CONCLUSÕES

Através da análise das imagens de satélite com o auxílio do algoritmo de análise automática, foram identificados 57 casos de CCM sobre o NEB entre 2008 e 2015. Nestes oito anos, a frequência média anual foi de 7 casos, onde a maior ocorrência foi registrada em 2008. De forma sazonal, a maior frequência de ocorrências ocorreu durante as estações de outono e verão com 42% e 40%, respectivamente. A área de cobertura total média dos sistemas foi cerca de 120.000km<sup>2</sup>. O maior CCM identificado cobriu uma área de aproximadamente 427.926km<sup>2</sup>.

Os valores correspondentes às precipitações associadas aos CCM mostraram que houve em média 80mm/24h. Dentre os 54 casos em que as informações foram coletadas, o volume total de chuva em 16 deles ultrapassou os 100mm/24h. O maior valor detectado foi de 193mm.

Os horários de formação dos CCM tropicais não foram exclusivamente noturnos, havendo registros durante todos os períodos do dia. De forma geral, constatou-se que o pico de formação no NEB foi entre 19 UTC até 03 UTC, com maior frequência às 00 UTC. Os CCM atingiram sua área de extensão máxima, entre 23 UTC e 07 UTC, principalmente às 04 UTC, com um intervalo de aproximadamente 4 horas entre o início da gênese ao desenvolvimento máximo. O tempo de duração total concentrou-se principalmente entre 6 e 8 horas, havendo eventos que chegaram a persistir por até 15 horas.

Em setores distintos do NEB foi notória a influência da topografia nas trajetórias dos CCM. Na região entre os estados da Bahia, Sergipe e Alagoas, os CCM se desenvolveram próximos à costa e não atravessaram a região montanhosa da chapada diamantina, localizada na Bahia. Mais ao Norte, entre Pernambuco e o Rio Grande do Norte, os sistemas formados próximos à costa se dissiparam com sentido para Leste, enquanto os que se organizaram na região do semiárido deslocaram-se para Oeste. O mesmo ocorreu entre o Ceará e Maranhão, em conjunto com outro fator, através do efeito orográfico devido ao lado barlavento do relevo na região da Serra Grande no estado do Piauí.

Os CCM com formação ligada à ZCIT se desenvolveram entre 9° e 2° Sul. Parte na região semiárida entre os estados do Rio Grande do Norte e Pernambuco, e outra parte no estado do Piauí. Os casos impulsionados por este sistema, assim com os eventos associados pela circulação ciclônica, destacaram-se os escoamentos predominantes de Leste para Oeste durante o período de vida de todas as ocorrências. Os casos associados às extremidades frontais, POAs e VCAN apresentaram maior variação nas trajetórias dos CCM interligados, variando principalmente dos primeiros aos últimos estágios.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. S. M. **Desenvolvimento e Trajetórias dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Estado de Alagoas Entre os Anos de 1999 e 2009**. 2011. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

ALBUQUERQUE, C. S. M. **Estudo das trajetórias dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste brasileiro entre os anos de 1999 e 2009**. 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

ANJOS, R. J. Episódio de uma Perturbação Ondulatória dos Alísios no litoral oriental do Nordeste. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 9., 2006, Florianópolis. **Anais... CBMET**, 2006.

ARAGÃO, J. O. R. O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. **Bulletim de l'Institut Français D'études Andines**, v. 27, n. 3, p. 839-844, 1998.

BLAMEY, R. C.; REASON, C. J. C.; Mesoscale Convective Complex over Southern Africa. **Journal of Climate**. v.25, p. 753-766. 2012.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Banco de Imagens**. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/home/>>. Acesso em: 09 jan. 2018.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica**. Pelotas: Ed. Universidade Federal de Pelotas, v. 2, 242 f., 2001.

FEDOROVA, N., KRICHAK, S. O., LEVIT, V., CARVALHO, M. H., RODRIGUES, L. R. L. Verificação das trajetórias das parcelas de ar pelo modelo HYSPLIT no caso de CCM em Maceió-Alagoas. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13., 2004, Fortaleza. **Anais... CBMET**, 2004.

FEDOROVA, N. **Sistemas e processos sinóticos atuantes na América do Sul: Sinótica IV**. Maceió: EDUFAL, 192 f. 2008.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; RODRIGUES, L. R. L.; COSTA, S. B. Mesoscale Convective Complex Genesis and forecast in Alagoas State of Brazil. **Journal of the Georgian Geophysical Society**, v.12, p. 36-44, 2008.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; SILVEIRA, M. H. S.; SILVA, B. F. P.; AMIRANASHVILI, A. G. Mesoscale Convective Complexes on the Northeastern Coast of Brazil. **Journal of the Georgian Geophysical Society**, v.13, p.36-49, 2009.

FERREIRA, G. A.; MELLO, N. G. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005.

FIGUEIREDO, J. C. e SCOLAR, J. Estudo da trajetória dos Sistemas Convectivos de Mesoescala na América do Sul. In: Congreso Argentino de Meteorología e Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, 7., 1996, Buenos Aires. **Anais...CONGREGMET**, 1996.

FRANK, N. L. On the energetics of cold lows. Proceedings of the Symposium on Tropical Meteorology. **American Meteorological Society**, EIV I-EIV6, 1970.

GAN, M. A. **Um Estudo Observacional sobre as Baixas Frias da Alta Troposfera nas Latitudes Subtropicais do Atlântico Sul e Leste do Brasil**. 1982. 25 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1982.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices Ciclônicos da alta troposfera no Oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, n. 92, p. 19-28, 1986.

GARCÍA-HERRERA, R.; BARRIOPEDRO, D.; HERNÁNDEZ, E.; PAREDES, D.; CORREOSO, J. F.; PRIETO, L. The 2001 Mesoscale Convective Complex over Iberia and the Balearic Islands. **Meteorology and Atmospheric Physics**. V. 90, p. 225-243. 2005.

GNU's NOT UNIX (GNU). **About GNU Octave**. Disponível em:  
<<https://www.gnu.org/software/octave/about.html>>. Acesso em: 09 jan. 2018.

GOMES FILHO, M. F.; SOUZA, E. P.; BECKER, C. T. Sistemas convectivos de Mesoescala com Precipitação Intensa na Paraíba: um Estudo de Caso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.11, n. 1, p.36-43, 1996.

GONÇALVES, A. **Análise da influência gravitacional lunar sobre os Complexos Convectivos de Mesoescala na região Nordeste brasileira**. 2016. 99 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2016.

HASTENRATH, S. **Climate and circulation of the tropics**. Reidel, Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo. 455 f. 1985.

HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 2 ed. New York, 391 f., 1979.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E., Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, 488–498, 1980.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper Tropospheric cyclonic vortex in the subtropical South Atlantic. **Tellus**, v.3, p. 538-551. 1981.

LAU, N. C.; CRANE, M. W. A Satellite View of the Synopticscale Organization of Cloud Properties in Midlatitude and Tropical Circulation Systems. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 1984–2006, 1995.

LYRA, M. J. A. **Processos de formação e deslocamento dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). 85 f. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

LYRA, M. J. A.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; BONFIM, O. E. T; JANUÁRIO, I. R.; Influência do El Niño Oscilação Sul na formação dos Complexos Convectivos de Mesoescala sobre o Nordeste brasileiro. In: Simpósio Internacional de Climatologia, 7., 2017, Petrópolis. **Anais... SIC**, 2017.

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 61, n. 11, p. 1374-1387, 1980.

MILHAHN JÚNIOR. A. W.; FEDOROVA. N.; ALBUQUERQUE. C. S. M.; LEVIT V. Correntes de jato e sistemas sinóticos associados aos Complexos Convectivos de Mesoescala



no Nordeste brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., 2012, Gramado. **Anais...** CBMET, 2012.

MILHAHN JÚNIOR, A. W. **Correntes de jato e sistemas sinóticos associados aos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). 48 f. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

MILHAHN JÚNIOR, A. W. **Uma ferramenta para análise automática dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste do Brasil**. 2016. 43 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

NCEP-DOE Reanalysis 2: Summary. Broadway: Earth System Research Laboratory. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>>. Acesso em: 09 jan. 2018.

NIEUWOLT, S. **Tropical Climatology**. Londres, Methuen, 1974.

NIMER, E. Ensaio de um novo método de classificação climática: contribuição à climatologia intertropical e subtropical, especialmente do Brasil. **Boletim de Geografia**. v. 31, n. 277, p.141-153, 1972.

NOBRE, C. A.; MOLION, L. C. B. **Climanálise Especial. Edição Comemorativa de 10 anos**, 1986.

NÓBREGA, R. S.; SANTIGAGO, G. A. C. F.; SOARES, D. B. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, p. 276-292, 2016.

PALMÉN, E. **Origin and structure of high-level cyclones south of the maximum westerlies**. Tellus, v. 1, p. 22-31, 1949.

PALMER, C. E. On high-level cyclones originating in the tropics. **Transactions of American Geophysical Union**. v. 32, n. 5, p. 683-695, 1951.

RODRIGUES, L. R. L.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Trovoadas na costa leste do Nordeste do Brasil associadas a interação entre ondas nos ventos de leste e VCAN. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11., 2008, São Paulo. **Anais...** CBMET, 2008.

SILVA, B. F. P.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; BRITO, B. M.; SANTOS, A. G.; RAIMUNDO, C. C. Mecanismos associados às precipitações intensas observadas entre os dias 13 e 14 de janeiro de 2005 no Sertão do Estado de Alagoas. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11., 2008, São Paulo. **Anais...** CBMET, 2008.

SILVA, B. F. P.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; BRITO, B. M.; PERESETSKY, A. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 295-310. 2011.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 2. p. 133-150. 1987.

SILVEIRA, M. H. S., **Complexos Convectivos de Mesoescala do Estado de Alagoas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). 65 f. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

SINHORI, N. P. **Modificação da estrutura vertical das frentes frias durante a passagem do Sul até o Nordeste brasileiro, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2012**. 2015. 173 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2015.

SIQUEIRA, A. H. B. **Clima da América do Sul e sua relação com os oceanos adjacentes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, Brasil, 2006.

VAZ, J. C. M. **Análise das Ondas de Leste sobre a costa leste do Nordeste do Brasil para o período entre 1999-2009**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, p. 9591–9613, 20, 1987.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V. B. Tropical Cloudiness over the South Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorology Society of Japan**, v. 55, n. 2, p. 204-207, 1977.