

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

**THAISE GOMES DA SILVA**

**FORMAÇÃO DOS VÓRTICES CICLÔNICOS DE MÉDIOS NÍVEIS**

**MACEIÓ  
2017**

**THAISE GOMES DA SILVA**

**FORMAÇÃO DOS VÓRTICES CICLÔNICOS DE MÉDIOS NÍVEIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientador (a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natalia Fedorova.

Coorientador: Prof. Dr. Vladimir Levit

**MACEIÓ**

**2017**

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

Bibliotecária responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

S586f Silva, Thaise Gomes da.  
Formação dos vórtices ciclônicos de médios níveis / Thaise Gomes da Silva.  
– 2017.  
70 f. : il. tabs. e gráfs.

Orientadora: Natalia Federova.  
Coorientador: Vladimir Levit.  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.  
Instituto de Ciências Atmosféricas, Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 65-70.

1. Meteorologia. 2. Vórtices ciclônicos de médios níveis - Formação.  
3. Previsão do tempo. I. Título.

CDU: 551.515



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

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-147.

“FORMAÇÃO DOS VÓRTICES CICLÔNICOS DE MÉDIOS NÍVEIS.”

*Thaise Gomes da Silva*

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. Dra. Natalia Fedorova  
(Orientadora)

Prof. Dr. Vladimir Levit  
(Coorientador)

Prof. Dra. Maria Luciene Dias de Melo  
(Membro Interno)

Prof. Dra. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti  
(Membro Externo)

Julho /2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

À minha mãe Maria Tributina, que tanto amo, pela sua dedicação e incentivo.

Aos meus professores Dr.<sup>a</sup> Natalia Fedorova e Dr. Vladimir Levit, pela confiança, oportunidade e paciência na orientação de mais um trabalho.

À Dr.<sup>a</sup> Maria Luciene de Melo e à Dr.<sup>a</sup> Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti por aceitarem fazer parte da banca examinadora.

A todos os professores do Instituto de Ciências Atmosféricas da UFAL que contribuíram no meu aprendizado.

Aos meus amigos do Laboratório de Sinótica e Física – UFAL, por me ajudarem nos momentos de dúvidas, em especial ao Eliseu Afonso e à Nídia Maria.

Aos meus colegas de Pós-Graduação pelos conhecimentos compartilhados e descontrações.

Aos meus familiares e amigos de longas datas, em especial ao Wagner Cabral, á Ana Carolina e ao Antonio Thomás por todo companheirismo e incentivo.

## RESUMO

A previsão do tempo de curto prazo se baseia nas análises dos sistemas atmosféricos, com isso o trabalho teve como principal objetivo analisar e determinar os processos de formação dos Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMNs). Foram utilizados dados de reanálise do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts para elaboração dos campos meteorológicos, usando para identificação dos VCMNs, determinação dos processos de formação, avaliação da estrutura e dos movimentos verticais. Imagens do Satélite Goes12+Meteosat9 do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos foram utilizadas para verificação de nebulosidade na região do vórtice. Dados de precipitações da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas foram usados para avaliar a influência do VCMN no tempo de Alagoas. Foram identificados e analisados 62 casos da ocorrência do vórtice durante o ano de 2010. Detectou-se 19 casos com duração entre 12-24 horas e 15 casos de VCMN com duração de 30-42 horas. O VCMN se formou no nível 700 hPa em cerca de 55% (34 casos) de todos os vórtices. A camada mais frequente de atuação dos vórtices foi entre 700-600 hPa em 29% (18 casos) dos casos e 19% (12 casos) dos VCMNs foram localizados apenas no nível de 700 hPa durante seu tempo de vida. Os VCMNs foram formados no cavado na Corrente de Leste (Tipo I), na Corrente de Oeste (Tipo II) e nas correntes dos dois hemisférios e na meridional (Tipo III). Foram definidos dez subtipos dentro desses três tipos de processos de formação dos VCMNs. Foram determinados dois subtipos mais frequentes: o primeiro subtipo (Cavado na Corrente de Leste com eixo de noroeste para sudeste) do Tipo I apresentou 17 casos e o segundo subtipo (Cavado na Corrente de Oeste com eixo de sudeste para noroeste) do Tipo II com 13 casos observados. Os valores mais frequentes de vorticidade foram  $-3 \times 10^{-5}$  e  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Foram detectados valores de divergência e convergência fracos para todos os casos, mas 16 casos apresentaram apenas convergência. Observou-se que 32 casos apresentaram movimentos descendentes na pré-formação e que 35 casos apresentaram movimentos descendentes e ascendentes durante a formação do centro do vórtice. No estudo de caso foram observadas nuvens de baixos níveis e uma precipitação máxima de 11,4 mm/ 24 h no município de Atalaia. Com isso, foi possível enfatizar a relevância desses resultados para a previsão do tempo de curto prazo e a necessidade de mais estudos sobre os VCMNs.

**Palavras-chave:** Processos de formação. VCMN. Previsão do Tempo.

## ABSTRACT

Short-term weather forecasting is based on the analyses of the atmospheric systems and so the main aim of the study was determination and analyses of the processes of the Middle Tropospheric Cyclonic Vortex (MTCV) formation. Data of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts were used for the meteorological fields elaboration, using for MTCVs identification, determination of the formation processes and evaluation of the structure and vertical movements. Satellite images Goes12+Meteosat9 from the Center for Weather Forecasting and Climate Studies were used to verify cloudiness in the vortex region. Rainfall data of the Secretariat of the Alagoas State for the Environment and Water Resources were used to evaluate the influence of the MTCV in the Alagoas weather. Sixty two cases of the vortex occurrence during 2010 were identified and analyzed in the study. There were detected 19 cases lasting 12-24 hours and 15 cases of MTCV lasting 30-42 hours. MTCV can be formed at the level 700 hPa in around 55% (34 cases) of all vortexes. The most frequent layer of performance was between 700-600 hPa in 29% (18 cases) of cases and 19% (12 cases) of MTCVs were located only at the level 700 hPa during their lifetime. The MTCVs were formed in the trough on the Eastern Stream (Type I), Western Stream (Type II) and formed in the currents of the two hemispheres and in southern current (Type III). Ten subtypes were determined within these three types of the VCMN formation processes. Two more frequent subtypes were determined: first subtype (Trough on the East Current with the northwest to southeast axis) of Type I presented 17 cases and the second subtype (Trough on the Western Stream with southeast to northwest axis) of Type II presented 13 cases. The values of more frequent vorticity were  $-3 \times 10^{-5}$  and  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Weak values of divergence and convergence were detected in all cases, but 16 cases presented only convergence. It was observed that 32 cases presented sinking before the formation of the vortex center and 35 cases presented sinking and lifting during the formation of the vortex center. Low level clouds and a maximum precipitation of 11 mm/24 h in the Atalaia municipality were observed in the study case. It was able to emphasize the relevance of these results for short-term weather forecasting and the necessity of more studies of MTCVs.

**Keywords:** Processes of formation. MTCV. Weather Forecast.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
2.1 Ciclone extratropical baroclínico com zonas frontais.....	11
2.2 Ciclone barotrópico ou Baixa do Chaco.....	13
2.3 Alta subtropical.....	14
2.4 Zona de Convergência Intertropical.....	15
2.5 Complexos Convectivos de Mesoescala.....	16
2.6 Corrente de Jato Subtropical e Corrente de Jato Polar.....	17
2.7 Alta da Bolívia.....	19
2.8 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis.....	21
2.9 Distúrbios Ondulatórios de Leste.....	25
2.10 Vórtice Ciclônico de Médios Níveis.....	28
<b>3 DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1 Área de estudo.....	30
3.2 Dados.....	30
3.2.1 Reanálise do ECMWF.....	30
3.2.2 Satélite.....	31
3.2.3 Precipitações.....	31
3.3 Metodologia.....	31
3.3.1 Método de análise da identificação, estrutura e movimentos verticais do VCMN.....	31
3.3.2 Identificação da influência do VCMN na nebulosidade e precipitação.....	33
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>35</b>
4.1 Informações gerais sobre os VCMNs.....	35
4.2 Duração dos VCMNs.....	36
4.3 Camadas da formação e atuação dos VCMNs.....	37
4.4 Tipos de processos de formação dos VCMNs.....	38
4.5 Frequência dos processos de formação dos VCMNs.....	41
4.6 Variação sazonal de processos de formação dos VCMNs.....	42
4.7 Exemplos dos subtipos de processos de formação.....	43
4.8 Estrutura e movimentos verticais nos processos de formação dos VCMNs.....	48
4.9 Exemplos da estrutura e dos movimentos verticais de um subtipo de cada Tipo.....	53

4.10 Estrutura e movimentos verticais do subtipo I (CL a).....	57
4.11 Estudo de casos.....	58
4.11.1 Pré/Formação do caso 40 e Pré-formação do caso 41.....	59
4.11.2 Intensificação/dissipação do caso 40 e Formação do caso 41.....	60
4.11.3 Intensificação/dissipação, nebulosidade e precipitações do caso 41.....	61
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A previsão de tempo de curto prazo se baseia no estudo de análises de diversos campos meteorológicos para uma compreensão e determinação de sistemas de escala sinótica. O Vórtice Ciclônico de Médios Níveis (VCMN) foi observado, primeiramente, nas análises de uma banda frontal que influenciou o Nordeste Brasileiro (FEDOROVA et al., 2006). Quando se analisou a situação sinótica, durante quatro anos, associada a intensas precipitações em Alagoas, verificou-se a ocorrência de um vórtice em médios níveis em 7 casos (2%) (PONTES DA SILVA, 2008 E PONTES DA SILVA et al., 2011).

No estudo dos VCMNs durante três anos, foram identificados 696 vórtices localizados predominantemente sobre o Oceano na faixa entre 6°-18°S, a partir daí, foi realizada análise da frequência, duração, distribuição espacial e sazonal do sistema (SANTOS, 2012; FEDOROVA et al., 2016). Quanto à distribuição da duração dos casos de VCMNs, foram registrados 492 casos com duração entre 6-12 horas e 40 casos com duração igual ou superior a 42 horas (SANTOS, 2012). Foram realizados também estudos de casos desse sistema, onde se avaliou a estrutura tridimensional, os fenômenos adversos e os Complexos Convectivos de Mesoescala associados aos VCMNs que influenciaram no tempo do Estado de Alagoas (SILVA et al., 2014; SILVA, 2015).

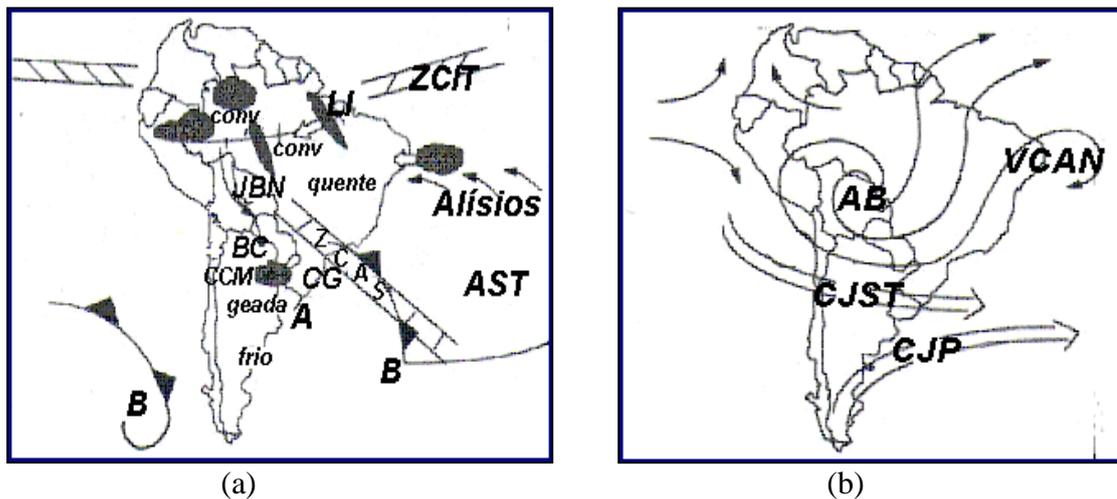
Diante do exposto, o trabalho tem como principal objetivo determinar os processos de formação dos VCMNs, seguido da duração, as camadas preferenciais de atuação e a análise da estrutura e dos movimentos verticais no momento da pré-formação e da formação do vórtice. Destacando que esses estudos foram feitos para fins de obter uma melhoria na qualidade da previsão do tempo de curto prazo da região.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram apresentados alguns dos principais sistemas que atuam sobre a América do Sul e oceanos adjacentes, tanto em baixos como em altos níveis. Além disso, foram expostos trabalhos realizados sobre os VCMNs.

Na Figura 1 foi observada a localização aproximada dos sistemas em baixos (Figura 1 (a)) e altos níveis (Figura 1(b)) que atuam sobre a América do Sul, estudados em diversos trabalhos e livros (RIEHL, 1979; SATYAMURTY et al., 1998; VIANELLO; ALVES, 2000; FEDOROVA, 2008).

**Figura 1** - Principais sistemas atuantes na América do Sul e oceanos adjacentes: (a) em baixos níveis e (b) em altos níveis.



*B* – Ciclone extratropical baroclínico com zonas frontais

*BC* - Ciclone barotrópico ou Baixa do Chaco

*A* – Anticiclone extratropical

*AST* – Alta Subtropical

*CG* – Ciclogênese

*ZCAS* - Zona de Convergência do Atlântico Sul

*JBN* – Jato de Baixos Níveis

*CCM* – Complexos Convectivos de Mesoescala

*LI* - Linha de Instabilidade

*CONV* – Atividade convectiva

*ZCIT* – Zona de Convergência Intertropical

*CJST* – Corrente de Jato Subtropical

*CJP* – Corrente de Jato Polar

*AB* - Alta da Bolívia

*VCAN* – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

**Fonte:** Adaptada de Satyamurty et al. (1998).

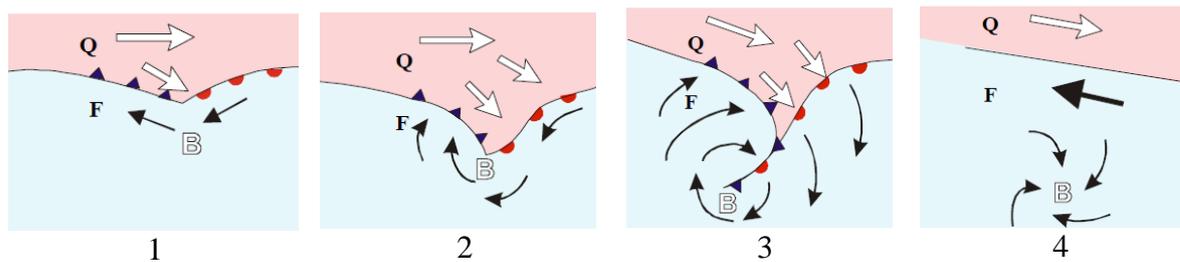
### 2.1 Ciclone extratropical baroclínico com zonas frontais

De acordo com Tubelis e Nascimento (1980) “ciclones frontais são núcleos em que o ar apresenta circulação ciclônica e que são formadas nas superfícies de discontinuidades

frontais. Apresentam estrutura em constante evolução e possuem vida de alguns dias apenas”. Esse tipo de ciclone apresenta alguns estágios de desenvolvimento.

Na Figura 2 foram vistos esses estágios de forma simples, onde no primeiro estágio o ar frio é deslocado na direção equatorial e o ar quente na direção polar, nele é apresentado a frente quente e fria, e também uma isóbara fechada, inicialmente. No ciclone jovem o campo térmico e bórico ficam mais definidos e a pressão começa a baixar no centro, além de apresentar gradientes elevados de geopotencial e de temperatura. No estágio de desenvolvimento máximo, o ciclone se apresenta mais profundo e com as três frentes, sendo elas a quente, fria e oclusa. O ciclone no último estágio é frio e se localiza em toda atmosfera, como as isoípsas e isotermas estão quase paralelas há mudança de pressão e da temperatura, assim como o enfraquecimento dos movimentos ascendentes e se tornando barotrópico (FEDOROVA, 2001).

**Figura 2** - Esquema da evolução de um ciclone extratropical (B). Indicando: o ar frio (F) e quente (Q).



**Fonte:** Adaptada de Varejão-Silva (2005).

As frentes frias, quentes e oclusas nem sempre foram fáceis de serem identificadas. Alguns dos principais métodos identificam frentes através das informações sumárias obtidas pelos dados de satélite e de diferentes campos, como pressão, linhas de corrente, temperatura, espessura, laplaciano da pressão, umidade e outros (FEDOROVA; CARVALHO, 2000). Outra forma de identificação foi quando avaliaram as passagens frontais, considerando a queda de temperatura em 925 hPa, mudança na componente meridional do vento em 925 hPa e aumento da pressão ao nível médio do mar, no intervalo de dois dias. (ANDRADE; CAVALCANTI, 2004).

Uma frente foi identificada através de imagens de satélites, dos campos horizontais de temperatura potencial equivalente e advecção de temperatura potencial equivalente, indicando que o posicionamento da frente é encontrado entre as áreas de advecção negativa e positiva, apresentando forte gradiente de temperatura potencial equivalente (DA CRUZ et al., 2008). Em outro trabalho foi identificado os fatores que favorecem o deslocamento dos sistemas

frontais sobre a América do Sul (AS) e suas influências sobre o Estado de Alagoas (AL), onde foi constatado que as ondas frontais que organizaram atividades convectivas sobre AL levaram, em média, 9 dias para se deslocar do sul da AS até as baixas latitudes e que de novembro a março, as frentes que organizaram atividades convectivas sobre AL estiveram associadas à interação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (DA CRUZ, 2008).

Foram estudados 18 casos de sistemas frontais que influenciaram as condições de tempo no Estado de Alagoas, analisando o deslocamento da frente desde o Sul do Brasil até a região no NEB, onde foi possível constatar que a temperatura potencial equivalente foi a única variável que apresentou a superfície frontal em médios e altos níveis, além de fortes precipitações que atingiram até 190,2 mm/ 24 h no Baixo São Francisco-AL (SINHORI, 2015).

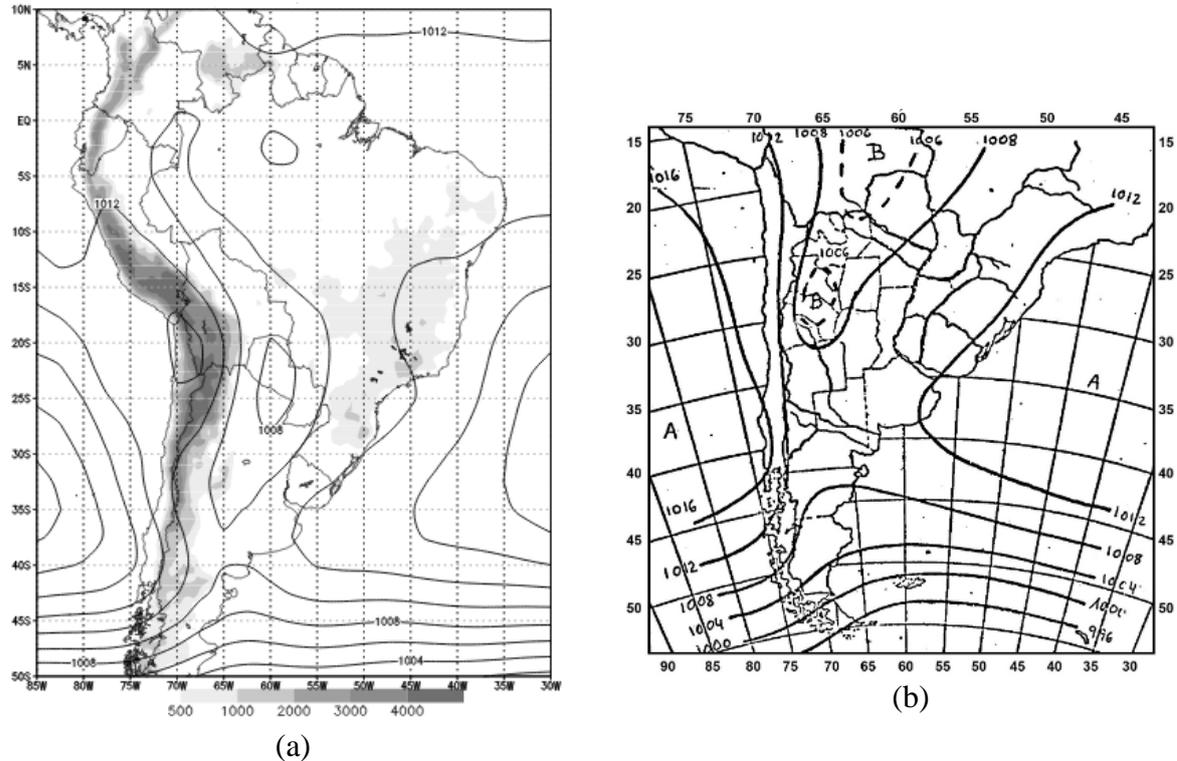
## **2.2 Ciclone barotrópico ou Baixa do Chaco**

De acordo com Fedorova (2001) “uma baixa, ao nível do mar, com núcleo quente irá enfraquecer com a altura, podendo passar a ser uma alta nos níveis superiores. Estes ciclones formam-se principalmente no verão sobre a superfície”. Já as baixas de núcleo frio tem um comportamento diferente, pois se intensificam com a altura. Sobre a superfície fria os ciclones são observados até altos níveis (VASQUEZ, 2000; FEDOROVA, 2001).

A Baixa do Chaco tem um papel importante na circulação em baixos níveis, na região do Paraguai e Bolívia, sendo bem definida durante o verão (LICHTENSTEIN, 1989), devido ao saldo positivo de radiação solar (SELUCHI; MARENGO, 2000).

Esse sistema foi observado facilmente nos campos médios de pressão reduzida ao nível do mar, como se exemplifica na Figura 3 (a), com seu centro localizado em torno de 23°S e 60°W (SELUCHI; SAULO, 2012). No entanto, nos mapas climatológicos realizados manualmente a partir de um grande número de estações meteorológicas de superfície mostraram a existência de dois centros separados (Figura 3 (b)): um localizado mais ao sul, em torno dos 29°S, conhecido como Baixa Termo-Orográfica ou Baixa do Noroeste Argentino, e outro posicionado mais para o norte na região do Chaco Paraguaio-Boliviano, conhecido como Baixa do Chaco (SELUCHI; SAULO, 2012 apud LICHTENSTEIN, 1980).

**Figura 3** – Campo médio da pressão ao nível do mar (hPa) obtida das Reanálises do NCEP (1979-1995) (a) para o período de Dezembro a Fevereiro. Os tons de cinza representam a altura da topografia (m). Campo médio da pressão ao nível do mar (hPa) (b) para o mês de Janeiro obtida a partir de dados em estações de superfície (1927-1956).



**Fonte:** Seluchi; Saulo (2012). Adaptada de Lichtenstein (1980).

Quando foram observadas as diferenças entre as duas baixas, a Baixa do Noroeste Argentino (BNOA) e a Baixa do Chaco (BCH), notou-se que a BNOA atua dentro de uma massa de ar mais típica das latitudes médias, estando mais influenciada pela atividade transiente, sendo este fato coerente com a proximidade do jato subtropical e com a maior variabilidade diária de algumas variáveis. Já a BCH se desenvolve numa atmosfera mais instável do ponto de vista termodinâmico comparado com BNOA que mostrou uma atmosfera menos instável na região que se desenvolve. Sendo assim, a BCH se relaciona com precipitações mais abundantes, dentro de uma massa de ar mais típica das latitudes tropicais (SELUCHI; SAULO, 2012).

No estudo da interação entre a extremidade frontal e o ciclone térmico, verificou-se que a passagem da extremidade frontal no Sul do Brasil pode ser intensificada pela presença do ciclone térmico (SIGNORINI, 2001).

### 2.3 Alta subtropical

Altas subtropicais (AST) são sistemas de alta pressão que estão localizados em torno de 20° de latitude nos oceanos. Observou-se que no Hemisfério Norte são encontrados os

anticiclones subtropicais do Atlântico e do Pacífico Norte, enquanto no Hemisfério Sul, verificam-se os anticiclones do Atlântico, Pacífico Sul e do sul do Oceano Índico (HASTENRATH, 1984).

Observou-se que os centros de alta pressão se modificaram do inverno para o verão, causando as diferenças de temperatura do ar de uma estação para outra. E também que durante o inverno, as temperaturas são menores sobre os continentes, em consequência os centros de alta pressão migram para o continente. No verão as temperaturas sobre os continentes são maiores, e os centros de alta pressão localizam-se sobre os oceanos e são mais determinados (VIANELLO; ALVES, 2000).

Outro trabalho apresentou também que a Alta Subtropical da América do Sul (ASAS), no inverno, causa impactos em grandes centros urbanos principalmente nas proximidades do litoral da região sudeste, por conta do continente estar mais frio que o oceano, a ASAS tende a migrar para o continente, onde o vento encontra-se consideravelmente fraco na região Sul/Sudeste (BASTOS; FERREIRA, 2000).

Com isso, observou-se que esses fatores são propícios à formações de nevoeiros de radiação, inversões térmicas e geadas, se o ar for úmido, onde podem prejudicar a agricultura e a população (BASTOS; FERREIRA, 2000). De acordo com Bastos e Ferreira (2000) “A inversão térmica é muito comum no inverno, caracterizada pela anomalia da temperatura que aumenta com a altitude. As regiões que mais sofrem influência da ASAS são as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil”.

Já no período do verão, os ventos de superfície associados a ASAS enfraquecem a medida que se aproximam do continente, verificou-se que esta característica diminui o transporte de vapor de água na costa do Nordeste (NE) e que ao longo do litoral das regiões Sudeste os ventos predominantes são de NE favorecendo o transporte de umidade do Oceano Atlântico equatorial para o ramo oceânico da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Assim, comparando as situações de inverno e verão, em relação a circulação, observou-se que a ASAS desloca-se ligeiramente para sudoeste e estava melhor configurada no verão (BASTOS; FERREIRA, 2000).

## **2.4 Zona de Convergência Intertropical**

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o encontro dos ventos procedentes do Hemisfério Norte (alísios de nordeste) com os de sudeste (vindos do Hemisfério Sul). O desenvolvimento de intensas correntes ascendentes é favorecido pela instabilidade atmosférica que formam grandes nuvens convectivas e por consequência, precipitações

intensas (VAREJÃO-SILVA, 2005). De acordo com Melo et al. (2002) “A ZCIT apresenta um comportamento mais zonal entre julho e setembro sobre o Oceano Atlântico Tropical Norte, quando atinge sua posição mais ao norte. Em novembro e dezembro, a ZCIT inicia seu deslocamento para o Hemisfério Sul”.

Um estudo verificou que a máxima precipitação no norte e no centro do Nordeste do Brasil (NEB) nos meses de janeiro a fevereiro deve-se a influência da ZCIT, onde nesse período está na sua posição mais ao sul (4°S), sendo assim o principal mecanismo dinâmico responsável pela precipitação na estação chuvosa da região (CAVALCANTI et al., 2009). Notou-se também que em alguns casos, a ZCIT consegue influenciar o tempo em Alagoas, muitas vezes indiretamente, isto é, via “pulsos” de nebulosidade que se desprendem de sua área de maior atuação e se dirigem para sul, atingindo o Estado (FERREIRA, 1996; XAVIER et al., 2000; COELHO-ZANOTTI et al., 2004).

Quando foi realizada a análise da estrutura dos sistemas meteorológicos associados às precipitações intensas em Alagoas entre 2003 e 2006, verificou-se que a ZCIT ou “pulsos” da ZCIT correspondeu a um percentual de 11% do total dos casos avaliados (PONTES DA SILVA et al., 2011).

## **2.5 Complexos Convectivos de Mesoescala**

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) são definidos como um conjunto de cumulonimbus (Cb), nuvens de forte desenvolvimento vertical produtoras de precipitações intensas, sendo cobertos por densa camada de cirrus que podem ser facilmente identificados em imagens de satélite como sendo sistemas aproximadamente circulares e com crescimento explosivo num intervalo de tempo de 6 a 12 horas (MADDOX, 1980; SILVA DIAS, 1987). Esse sistema possui características físicas bem definidas que podem ser vistas na Tabela 1:

**Tabela 1** – Características físicas dos CCM.

<b>Tamanho</b>	<b>A</b> – Cobertura de nuvens com temperaturas $\leq -32^{\circ}\text{C}$ observadas no IR e com área $\geq 100000 \text{ km}^2$ <b>B</b> – Região interna da cobertura de nuvens com temperaturas $\leq -52^{\circ}\text{C}$ observadas no IR e com área $\geq 50000 \text{ km}^2$
<b>Início</b>	Caso as definições de tamanho A e B sejam satisfeitas
<b>Duração</b>	As definições de tamanho A e B deverão persistir num período $\geq 6\text{h}$
<b>Extensão máxima</b>	Quando a definição do tamanho A ( $-32^{\circ}\text{C}$ ) alcançar seu maior tamanho
<b>Forma</b>	Excentricidade $\geq 0,7$ no momento de máxima extensão
<b>Término</b>	Quando as definições de tamanho A e B já não são satisfeitas

**Fonte:** Adaptada de Maddox (1980).

Em geral, os CCM 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; FRITSCH, 1987).

Um estudo fez a análise de um caso de CCM que atingiu o leste de Alagoas, provocando precipitações intensas em Maceió, capital do Estado (FEDOROVA et al., 2004). Em outro estudo se procurou analisar os fatores que deram origem a um intenso CCM sobre o oeste de Alagoas, resultando em precipitações consideráveis, fortes descargas elétricas e até queda de granizo (PONTES DA SILVA et al., 2008).

Quando analisados 80 eventos de CCM no NEB, notou-se que eles apresentaram maior frequência durante o verão e outono, além disso, foram verificados valores de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) atingindo até  $31^{\circ}\text{C}$  (ALBUQUERQUE, 2011).

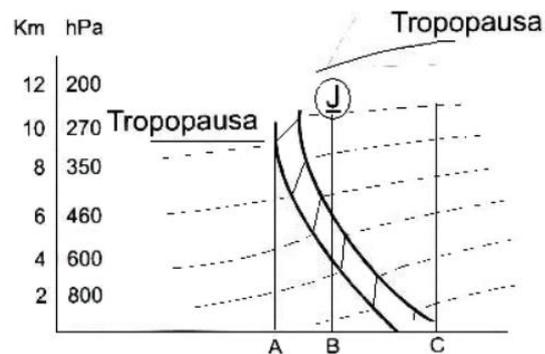
Foram estudados os CCM que atuaram no NEB durante o período de 11 anos, onde puderam ser associados aos seguintes sistemas sinóticos: VCAN, extremidade frontal, ZCIT e Alísios. Também foram detectados 58 eventos de CCM no NEB acompanhados de corrente de jato (CJ) (MILHAHN JÚNIOR, 2013).

## 2.6 Corrente de Jato Subtropical e Corrente de Jato Polar

Corrente de jato é um escoamento do ar na alta troposfera ou estratosfera, que apresenta velocidades maiores que  $30 \text{ m/s}$ , ocorre próximo a tropopausa, entre 9 a 13 km de altura, limitando-se a poucos milhares de metros de profundidade e a dezenas de quilômetros

horizontalmente (FEDOROVA, 1999). A posição da Corrente de Jato com referência à posição da tropopausa e da zona baroclínica intensa é mostrada no esquema da seção vertical da atmosfera na Figura 4 (PALMÉN; NEWTON, 1969).

**Figura 4** - Seção vertical, mostrando a zona de forte baroclinia na troposfera (entre A e C); zona frontal e corrente de jato (J), situada sobre a vertical B.

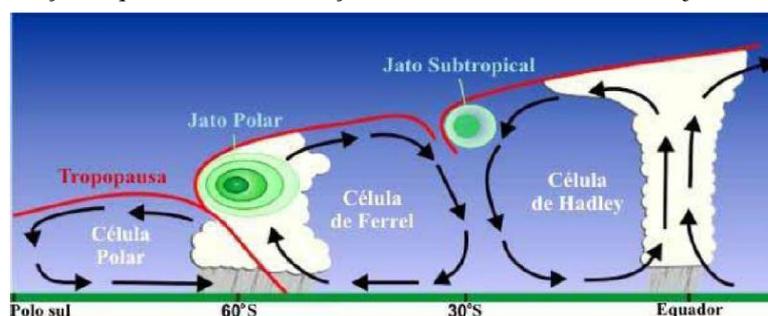


**Fonte:** Palmén e Newton (1969).

Há dois tipos de corrente de jato, ambas localizadas na tropopausa, onde há mistura do ar troposférico e estratosférico, onde se verifica que a corrente de ventos mais próxima dos pólos é chamada de Corrente de Jato Polar (CJP), e aquela mais próxima da região subtropical de Corrente de Jato Subtropical (CJS) (AHRENS, 2000).

A CJP forma-se na fronteira entre a circulação polar e a célula de Ferrel; encontra-se geralmente entre as latitudes de 35°S a 70°S com aproximadamente 13 km de altura ou em nível de pressão (~200 hPa). A sua posição é mais próxima ao equador durante o inverno do que no verão. A corrente de jato Subtropical forma-se onde as células de Ferrel e Hadley se encontram. A CJS está associada à circulação da Célula de Hadley e geralmente fica localizada no limite polar dessa célula, entre as latitudes de 20°S a 35°S, conforme Figura 5 (AHRENS, 2000).

**Figura 5** - Representação esquemática da circulação meridional e as correntes de jato associadas.



**Fonte:** Costa (2010). Adaptada de NWS/NOAA.

A CJS tem aspecto de uma banda longa e estreita de cirrus. Esse jato é mais desenvolvido na estação de inverno onde a circulação média meridional é mais intensa (HASTENRATH, 1991).

Na entrada da Corrente de Jato, há uma aceleração ageostrófica da parcela de ar, pois a mesma se move para o centro do jato implicando numa componente ageostrófica do vento negativa, sendo direcionada para direção do polo, já na região de saída do jato ocorre desaceleração ageostrófica, a parcela de ar recebe uma componente ageostrófica positiva direcionada para o equador (SECHRIST; WHITAKER, 1979).

Sendo assim, a circulação na entrada do jato é termicamente direta com movimento ascendente de ar quente no lado equatorial, onde há convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, e movimento descendente de ar frio no lado polar, observada divergência em baixos níveis e convergência em altos níveis. A circulação térmica na saída do jato é indireta, movimento descendente de ar quente no lado equatorial, havendo divergência em baixos níveis e convergência em altos níveis, e movimento ascendente de ar frio no lado polar, havendo convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis (SECHRIST; WHITAKER, 1979).

## **2.7 Alta da Bolívia**

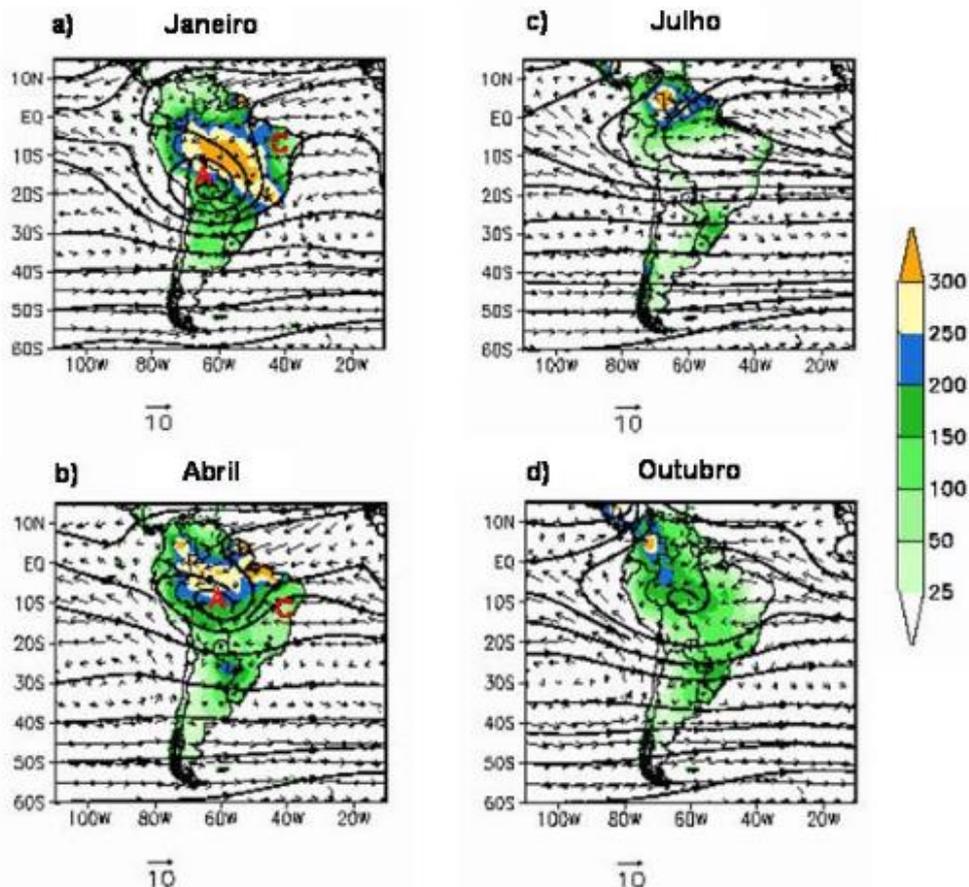
A Alta da Bolívia (AB) tem sua origem por conta do aquecimento de superfície e a manutenção da AB está ligada com a liberação de calor latente (FIGUEROA et al., 1995). Essa alta em níveis superiores está associada ao ciclone barotrópico em superfície, observa-se que no período da primavera, verão e outono, existe o surgimento dessa circulação anticiclônica em altos níveis (SIGNORINI, 2001; SELUCHI et al., 2003). A intensa atividade convectiva na região Amazônica é um fator importante para o desenvolvimento de um anticiclone em altos níveis, que é conhecido como Alta da Bolívia (DE MARIA, 1985; FIGUEROA et al., 1995).

De uma forma geral, a formação da AB acontece devido ao prévio aquecimento do continente e, por consequência, também da troposfera, provocando a queda da pressão local, com isso, aparecem os movimentos convectivos em função da instabilidade atmosférica, favorecendo a formação de nuvens, as quais liberam calor latente, gerando aquecimento e expansão do ar (GAN, 1993). Em outro estudo foi observado que a AB estava ligada a processos térmicos e dinâmicos como: forte aquecimento da superfície, convergência de umidade vinda da Amazônia (em baixos níveis), movimentos verticais ascendentes, formação de nuvens convectivas e precipitação (FERREIRA, 1995).

Quando foi pesquisada uma possível conexão entre a circulação em altos níveis e a AB, foi verificado que existe uma conexão direta entre a intensidade da AB e o cavado em seu flanco nordeste. Notou-se que quando esse cavado é intensificado, forma-se um vórtice ciclônico de altos níveis e que a intensidade da convecção está diretamente relacionada a AB (CARVALHO, 1989).

Como visto na Figura 6, a variabilidade sazonal da AB, tanto em intensidade quanto em posição, está diretamente relacionada com a distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia amazônica (LENTERS; COOK, 1997). Na Figura 6 (a) foi observado que no verão a AB atinge seu maior desenvolvimento, em seguida no outono (Figura 6 (b)), como os máximos de precipitação migram para o norte, também há migração desse sistema (REBOITA, 2010). No inverno (Figura 6 (c)), a atividade convectiva na Amazônia diminui e a alta enfraquece, já na primavera (Figura 6 (d)), com a volta da intensificação da convecção, a AB começa a ganhar intensidade. Deve-se destacar que na Figura 6 foi notado que a AB está sempre a sudoeste dos máximos de precipitação (REBOITA, 2010).

**Figura 6** - Precipitação média (mm; cores), vetor vento ( $m s^{-1}$ ) em 925 hPa e linhas de corrente (linhas contínuas) em 200 hPa nos meses de janeiro (a), abril (b), julho (c) e outubro (d). A letra A (vermelho): centro da AB. A letra C (vermelho): o cavado do nordeste do Brasil.



Fonte: Reboita (2010) apud Shi et al. (2000).

## 2.8 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) tropicais consistem em sistemas de baixa pressão de escala sinótica que são formados na alta troposfera e apresentam circulação ciclônica fechada com o centro mais frio que sua periferia (GAN, 1982). A existência dos VCANs foi demonstrada, para a América do Sul, através de estudos das características da circulação troposférica, onde os seus primeiros estudos foram realizados sobre o Atlântico sul tropical (DEAN, 1971; ARAGÃO, 1975). Algumas pesquisas utilizaram dados meteorológicos, análises de modelos de previsão de tempo e imagens de satélite para definir diversos aspectos relacionados à origem, formação e deslocamento dos VCANs (KOUSKY; GAN, 1981; GAN, 1982).

O VCAN é um dos principais sistemas meteorológicos que provoca alterações no tempo na região do NEB (GAN; KOUSKY, 1986). No geral, as características principais dos VCANs que penetram sobre o Nordeste são: vórtices de origem tropical; originam-se no Oceano Atlântico; surgem nos meses da primavera, verão e outono; originam-se acima de 9000 m, em baixas latitudes; podem permanecer na região tropical por longos períodos (semanas); durante a passagem para latitudes mais altas, geralmente crescem e se intensificam; e possuem movimento irregular, movendo-se tanto para leste como para oeste (KOUSKY; GAN, 1981; GAN, 1982).

Em outras observações dos VCANs, notaram que eles podem perdurar em média 7,1 dias (RAMIREZ, 1996). No entanto, foi observada a sua climatologia de 28 anos (1979-2006), onde se notou que 75,3% dos 886 vórtices observados perduraram de 2 a 4 dias ou ainda se estenderem por até semanas durante o verão (COUTINHO, 2008).

A maioria dos VCANs está confinada nos altos níveis (acima de 5000 m de altura), pois cerca de 60% não atingem o nível de 700 hPa e em torno de 10% atingem a superfície (FRANK, 1966). Em uma avaliação mais recente dos dados de previsão numérica do modelo ETA durante três anos, observou-se que a profundidade dos sistemas estavam na camada de 200-300 hPa, 200-250 hPa e o nível de 300 hPa apresentaram maior frequência de casos, verificou-se também que no estágio de intensidade máxima, 3% dos casos se estenderam até 700 hPa ou 850 hPa, e que apenas um caso foi encontrado com extensão vertical até 1000 hPa (SANTOS, 2015).

Na Tabela 2 foi possível fazer uma comparação percentual do número de vórtices em cada estação do ano com relação ao total anual, embora existam diferenças entre os períodos avaliados e as fontes de dados utilizadas, existe uma coerência entre os resultados dos autores,

porque a estação de verão compreende a porcentagem com maior atividade de VCANs, em destaque no mês de janeiro (MORAIS, 2016).

**Tabela 2** – Climatologia do número de vórtices (%) por estação do ano.

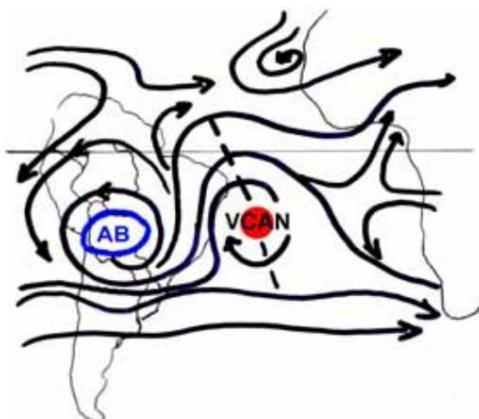
<b>Autores</b>	<b>Período</b>	<b>Dados</b>	<b>DJF</b>	<b>MAM</b>	<b>JJA</b>	<b>SON</b>
<b>Kousky e Gan (1981)</b>	1975-1979	Análises do NMC e imagens NOAA	61,4	18,6	0	20
<b>Ramirez et al. (1999)</b>	1980-1989	Análises ECMWF	45,3	27	1,7	26
<b>Coutinho (2008)</b>	1979-2006	Reanálises do NCEP/NCAR	57	20,4	2,6	20
<b>Santos (2015)</b>	2008-2011	Análises do ETA para 00 UTC	42,5	24	7,5	26

**Fonte:** Adaptada de Morais (2016).

Quanto aos processos de formação, os VCANs possuem quatro tipos de formação (Clássica, Africana I, Africana II e Alta) (PAIXÃO; GANDU, 2000), que serão descritos abaixo:

- Clássica - A formação ocorre pela associação da intensificação da crista da AB em altos níveis e o deslocamento de frentes frias para latitudes baixas. A AB intensifica (Figura 7) formando sua crista mais intensa, com isso, influência na intensificação do cavado até a formação do vórtice fechado. Esse vórtice encontra-se mais próximo ao Nordeste e influenciando no tempo da região, com duração média de média 7,1 dias (KOUSKY, GAN, 1981).

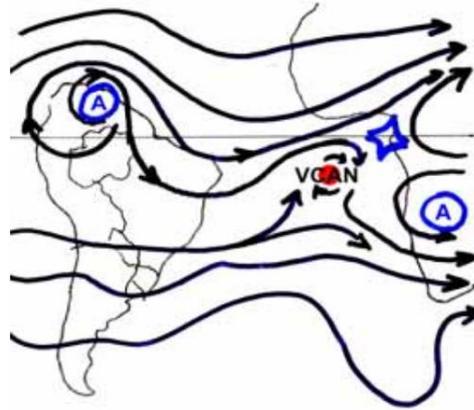
**Figura 7** - Processo de formação do VCAN (Clássica).



**Fonte:** Fedorova (2008).

- Africana I – este tipo de gênese está ligado à convecção sobre o continente africano no que ao intensificar faz surgir um par de anticiclones sobre a África e em altos níveis (Figura 8), que induzem o aprofundamento do cavado a oeste dos mesmos e que, por consequência, desenvolve-se em um VCAN, possui curta duração de 2,5 - 3 dias (PAIXÃO; GANDU, 2000).

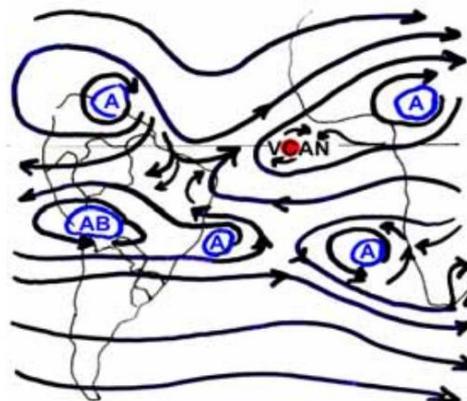
**Figura 8** - Processo de formação do VCAN (Africana I).



**Fonte:** Fedorova (2008).

- Africana II – essa formação ocorre devido à intensificação do Anticiclone na África no HN (Figura 9), onde os VCANs se formam nas cristas dos Anticiclones de altos níveis do HN; as faixas dos anticiclones nas latitudes 20°-30° nos HN e HS ajudam na formação da circulação fechada do VCAN e tem duração de 3 - 7 dias (PAIXÃO; GANDU, 2000).

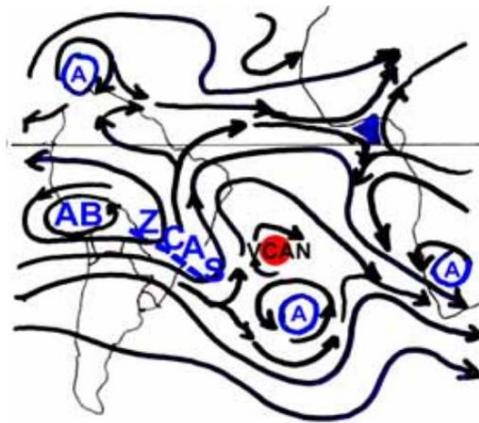
**Figura 9** - Processo de formação do VCAN (Africana II).



**Fonte:** Fedorova (2008).

- Alta – A intensificação da convecção na região da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) através da liberação de calor latente forçaria o surgimento da Alta do Atlântico Sul de Ar Superior (ASAS) que, por sua vez, formaria um cavado a norte/noroeste. O fechamento desse cavado resultaria no VCAN que apresenta duração de 2,5 - 5 dias (RAMIREZ et al., 1999). Outro fator é que a AB se encontra mais ao oeste, com isso observa-se a corrente com escoamento mais zonal no HN (FEDOROVA, 2008).

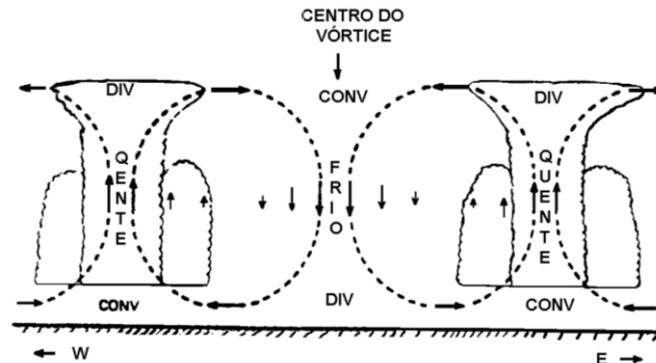
**Figura 10** - Processo de formação do VCAN (Alta).



**Fonte:** Fedorova (2008).

Quando observados os movimentos verticais em um VCAN, conforme exibido na Figura 11, a convergência em altos níveis induz a descendência do ar mais frio e denso no centro, a qual por conservação de massa deve ocorrer divergência em baixos níveis com movimento ascendente do ar mais quente e úmido nos setores oeste e leste da região periférica, onde ocorre desenvolvimento de convecção e geração de precipitação (KOUSKY; GAN, 1981). Sendo assim, o VCAN constitui uma célula com circulação termicamente direta (KOUSKY; GAN, 1981; GAN, 1982).

**Figura 11** - Ilustração do movimento vertical observado em um VCAN tropical.



Fonte: Kousky e Gan (1981).

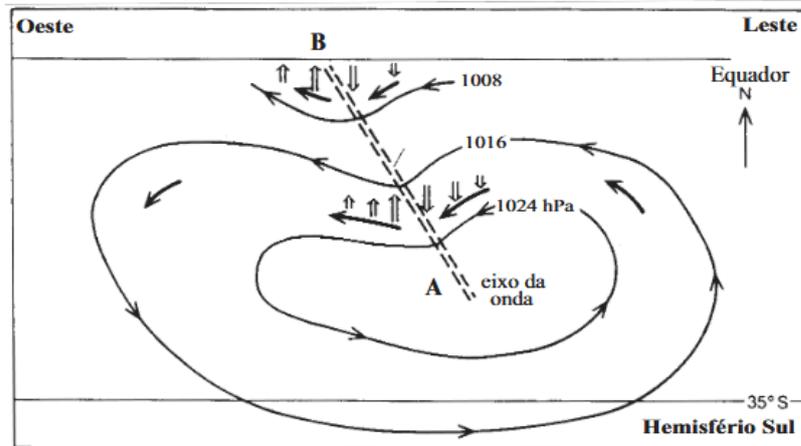
Esse sistema tem um papel importante no regime de precipitação na região dos trópicos, além de contribuir nas trocas de energia entre ambas as regiões (RAMIREZ, 1996). Observou-se que mesmo o VCAN sendo considerado o principal sistema sinótico atuante na pré-estação chuvosa no NEB, não necessariamente existirá chuva associada na região, já que devido ao seu movimento vertical, o sistema também é inibidor no que diz respeito à precipitação, sendo assim, depende diretamente da parte do vórtice que vai influenciar na região (KOUSKY; GAN, 1981; PAIXÃO; GANDU, 2000).

## 2.9 Distúrbios Ondulatórios de Leste

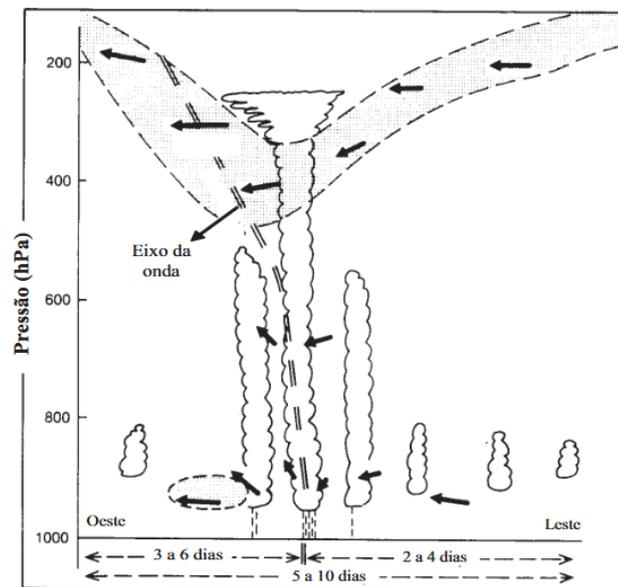
Os primeiros estudos sobre a descrição tridimensional detalhada dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) foi desenvolvida para a região do Caribe, onde se mostrou que a oscilação no campo de vento e pressão foi apresentada em fase na superfície, a partir disso, desenvolveu-se um modelo para estes distúrbios que apresentam velocidade de fase de  $6^\circ$  de longitude por dia, período de 3 a 4 dias e comprimento horizontal de 2000 e 3000 km (RIEHL, 1945 apud GOMES, 2012).

Um distúrbio (Figura 12 (a)) do Hemisfério Sul foi observado por meio da sua estrutura horizontal, viu-se que antes do eixo da onda, a componente meridional do vento era positiva (sul-norte) e que, após a passagem do mesmo, esta se torna negativa (norte-sul). No Hemisfério Sul ela se desloca para oeste e no Hemisfério Norte para leste, devendo-se isto ao sistema de ventos nesta região. Através da Figura 12 (b), verifica-se que a maior atividade convectiva é encontrada exatamente sobre o eixo da onda (HALL, 1989 apud COUTINHO; FISCH, 2007).

**Figura 12** - Estrutura horizontal, em baixos níveis (a), e estrutura vertical (b) de um DOL no HS.



(a)



(b)

**Fonte:** Coutinho e Fisch (2007). Adaptado de Hall (1989).

Alguns autores puderam observar que há uma lacuna, especialmente no que se diz respeito aos DOLs que se propagam sobre o oceano Atlântico Tropical Sul. Ainda, assim, em relação à gênese destes distúrbios, propõe-se que essas ondas se desenvolvem devido:

- 1) à confluência dos ventos alísios dos dois hemisférios (de nordeste com os de sudeste) ou a confluência do vento em seu próprio escoamento;
- 2) ao aprofundamento para baixos níveis de uma baixa fria ou VCAN na alta troposfera, propagando-se para oeste ou;
- 3) ao prolongamento para o equador de um cavado de latitudes médias (cavados frontais que se desprenderiam das suas frentes, seguindo para oeste junto aos alísios) ou

extensão para os polos de um cavado de latitudes tropicais (podendo estar associado ao cavado equatorial) (YAMAZAKI; RAO, 1977; ESPINOZA, 1996; FEDOROVA, 2008).

Nota-se que apesar dos DOLs serem observados em toda a região tropical do globo, em ambos os hemisférios, são mais frequentes no Hemisfério Norte, sendo assim, a maior concentração de trabalhos se encontra sobre as regiões do Oceano Pacífico Oeste, Mar do Caribe, oeste da África e Oceano Atlântico Leste (ASNANI, 1993 apud GOMES, 2012).

Em relação às maiores dificuldades no estudo dos DOLs, verificou que se devem a:

- intensidade relativamente fraca: os DOLs são pouco amplos se comparados aos cavados e cristas semi-estacionários das latitudes tropicais, não podendo ser identificados em cartas sinóticas comuns;
- falta de uma estrutura homogênea: os DOLs estão na corrente zonal, e essa corrente exhibe características diferentes em cada região do planeta, que por sua vez mostram diferentes estruturas a cada estação. Se o escoamento de leste é raso (apenas baixos níveis), são esperados DOLs rasos, mas numa corrente de leste mais profunda (até altos níveis), são esperadas ondas mais profundas;
- poucos dados nos trópicos: grande parte da região tropical é coberta por oceanos, onde é difícil estabelecer observatórios meteorológicos. Mesmo nos continentes, a densidade de estações meteorológicas é limitada (ASNANI, 1993 apud PONTES DA SILVA, 2011).

Durante os meses de junho a agosto de 1967 foi estudada a composição temporal de faixas de imagens obtidas por satélites no oceano Atlântico Tropical, onde puderam ser observados aglomerados de nebulosidade propagando-se de leste para oeste, notaram ainda que estes aglomerados apresentavam velocidade média de  $10 \text{ m s}^{-1}$  e comprimento de onda de 4000 km (YAMAZAKI; RAO, 1977).

Um método baseado na mudança de sinal da componente meridional do vento foi utilizado para analisar três camadas [(850-700) hPa, (850-500) hPa e (700-500) hPa]. Identificaram que na região de Alcântara – MA no período de 1988 a 1997 ocorreram 64 casos de DOLs na camada de 850 – 700 hPa, 26 eventos na camada de 700-500 hPa e na camada de 850 – 500 hPa ocorreram a maior quantidade de DOLs, num total de 100 casos (COUTINHO; FISCH, 2007).

Foram investigadas as contribuições dos DOLs na precipitação observada para o período chuvoso de 2006 a 2010 da costa leste do NEB, documentou que há uma ocorrência média de 23 DOLs por ano com pequena variabilidade interanual e que cada evento de DOL

provocou chuva em torno de 16 a 20 mm entre o litoral de Pernambuco e leste do Rio Grande do Norte, notou também que a contribuição dos DOLs não foi significativa para latitudes mais ao sul, por exemplo, na região leste da Bahia (PONTES DA SILVA, 2011).

## **2.10 Vórtice Ciclônico de Médios Níveis**

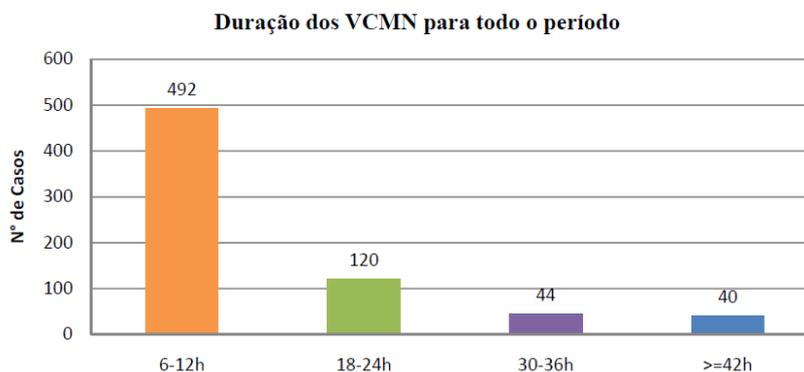
Na análise da influência da zona frontal observada próximo do NEB no período de 15 a 20 de maio de 2003, foi observado que esse sistema estava associado a um Vórtice Ciclônico de Médios Níveis (VCMN) que por definição representa uma circulação ciclônica fechada observada somente em médios níveis da atmosfera, entre 700-400 hPa (FEDOROVA et al., 2006).

A situação sinótica associada a intensas precipitações em Alagoas iguais ou superiores a 5,0 mm foi analisada diariamente durante 4 anos. Dentre todos os sistemas que estão ligados as precipitações no Estado, foram observados que 33 casos (10%) estavam associados à extremidade frontal e 7 casos (2%) ao vórtice ciclônico de médios níveis (PONTES DA SILVA, 2008 E PONTES DA SILVA et al., 2011).

Foram identificados e analisados os VCMNs para os anos de 2008, 2009 e 2010, usando os dados de reanálise do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Centers for Atmosphere Research), em 9 níveis de pressão durante os horários sinóticos. O estudo dos VCMNs se baseou nas observações quanto a frequência, duração, distribuição espacial e sazonal do sistema durante os 3 anos. Foram identificados 696 VCMNs, com média de 232 VCMNs por ano (SANTOS, 2012; FEDOROVA et al., 2016).

Quanto a frequência dos casos do vórtice, notou-se que o mês com menor frequência observada foi setembro, com 5,7% dos casos, e as maiores foram registradas em janeiro, abril e agosto com valores superiores a 10,0%. Nas observações da frequência da distribuição sazonal, notou-se que as menores frequências do sistema foram observadas na primavera e no inverno (21,3% e 25,9%, respectivamente), e que a estação com maior frequência foi no verão com 26,6%, registrando um total de 185 casos (SANTOS, 2012).

No Gráfico 1 foi observada a distribuição da duração dos casos de VCMNs, onde foram registrados os extremos de 492 casos com duração entre 6-12 horas e 40 casos com duração igual ou superior a 42 horas (SANTOS, 2012).

**Gráfico 1** - Duração dos VCMNs, por faixa, para todo o período de análise.

**Fonte:** Santos (2012).

Também foi possível contabilizar para se definir os níveis preferenciais de surgimento do VCMN, onde se verificou que, em destaque, 41% dos VCMN foram observados no nível de 700 hPa, 27% no nível de 600 hPa e 22% no nível de 500 hPa (SANTOS, 2012). Contabilizou-se que 79,8% dos casos tiveram seu tempo de vida em um dos níveis (700, 600, 500 e 400 hPa) e que apenas 0,4% do total foram observados em 4 níveis durante todo período de atuação do vórtice. (FEDOROVA et al., 2016)

Foram analisados alguns casos da estrutura tridimensional do vórtice e o tempo no Estado de Alagoas associado aos VCMNs com maior duração ( $\geq 42$  horas), usando dados do NCEP/NCAR, onde foram registradas precipitações fracas, com máxima de 39,0 mm/ 24 h (SILVA et al., 2014).

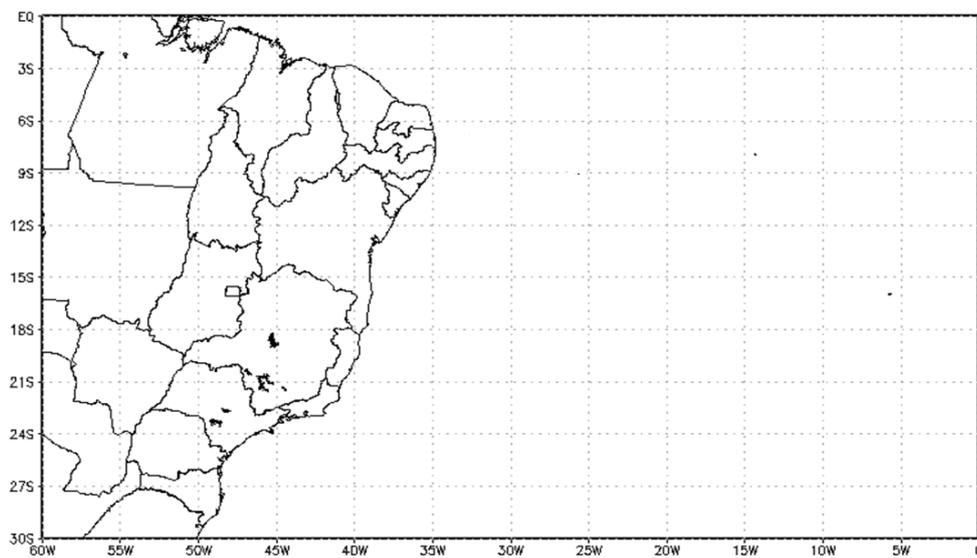
Em outro estudo foram realizadas análises de seis casos usando dados do European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF) com resolução de  $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ , onde foi observada duração do VCMN de até 96 horas. Além da influência do vórtice nas precipitações, trovoadas e na formação de um caso de CCM no Estado de Alagoas (SILVA, 2015).

### 3. DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo, que abrange de 60°-0°W e 0°-30°S (Figura 13), foi escolhida com base na localização dos sistemas de escala sinótica que influenciam o tempo no NEB (PONTES DA SILVA et al., 2011). A qual também foi a área de estudo para identificação dos VCMNs.

**Figura 13** - Domínio da grade de análise dos casos de VCMN.



**Fonte:** Autora (2017).

#### 3.2 Dados

##### 3.2.1 Reanálise do ECMWF

Dados do ERA-Interim que é uma reanálise atmosférica global a partir 1979, continuamente atualizados em tempo real pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Este conjunto de dados está disposto em ponto de grade, com diversas resoluções que vão de 3° x 3° até 0,125° x 0,125°; distribuídos em 37 níveis de pressão e nos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC). Para o estudo em questão foi utilizada a resolução de 0,25° x 0,25° em 9 níveis padrões (de 1000 hPa até 200 hPa com a variação de 100 hPa).

### 3.2.2 Satélite

Foram adquiridas imagens da composição do Satélite Goes12 e Meteosat9 no site <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goesmet15.formulario.logic> do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) no canal IR (Infravermelho) nos horários sinóticos.

### 3.2.3 Precipitações

Os dados diários de precipitação das estações de superfície para o Estado de Alagoas foram coletados no site <http://meteorologia.semarh.al.gov.br/consultas/> a partir da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL).

## 3.3 Metodologia

### 3.3.1 Método de análise da identificação, estrutura e movimentos verticais do VCMN

Com os dados do ano de 2010 de Santos (2012), onde a mesma utilizou dados de reanálise do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Centers for Atmosphere Research) com resolução de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , foi possível fazer a reavaliação dos casos de VCMN identificados nesse período. Ressaltando-se que foram usados os dados do ECMWF com a resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  para essa reavaliação, onde se pretendeu analisar os casos com duração maior ou igual a 12 horas e podendo identificar outros casos por conta da utilização de uma melhor resolução.

As variáveis utilizadas para a reavaliação dos VCMNs foram: componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, e também velocidade vertical (w) com os dados de reanálise do ECMWF nos níveis de 1000-200 hPa nos horários sinóticos. A partir dessas variáveis foram elaborados os seguintes campos meteorológicos: 1) linhas de corrente; 2) vorticidade relativa; 3) divergência; e 4) velocidade vertical. Utilizando o pacote gráfico GRID ANALYSIS and DISPLAY System (GrADS) para visualização dos campos (DOTY, 1995).

Os critérios para a identificação do VCMN foram: 1) vorticidade relativa igual ou inferior a  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 2) centro da circulação ciclônica entre 700 e 400 hPa; 3) diâmetro da área com circulação ciclônica igual ou superior a 500 km. Ao notar que o mesmo VCMN for detectado em dois níveis consecutivos, a seguinte regra será usada: se o deslocamento do centro do vórtice durante o dia for igual ou inferior a  $5^\circ$  de latitude ou longitude e se as correntes principais forem as mesmas, com isso, é considerado o mesmo vórtice (FEDOROVA et al., 2016).

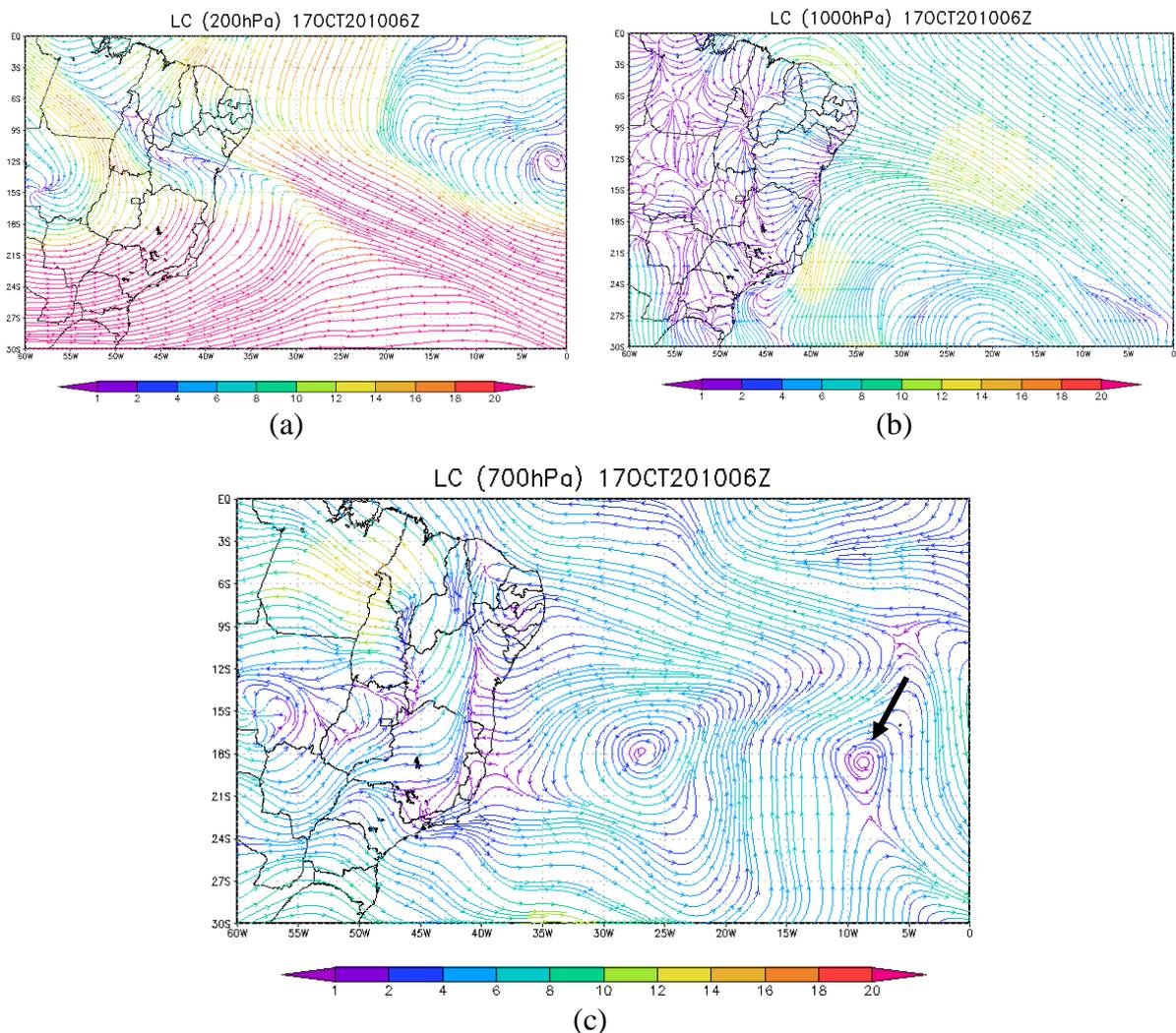
Em seguida, são listadas as equações e funções de avaliações nesse trabalho:

- Linhas de Corrente: representam uma situação instantânea do campo de velocidade do vento em um determinado instante de tempo (HOLTON, 1992). As linhas de corrente são determinadas pela integração da Equação (1), com relação à  $x$ , num intervalo de tempo  $t_0$ .

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v(x, y, t_0)}{u(x, y, t_0)} \quad (1)$$

Esse campo foi utilizado para identificação e verificação de que o VCMN estava presente apenas em médios níveis. Por exemplo, na Figura 14 (c) o VCMN foi identificado no nível de 700 hPa com o centro em 19S-9W e não foi visto nos campos de altos (Figura 14 (a)) e baixos (Figura 14 (b)) níveis. Além disso, foi possível avaliar e determinar os seus processos de formação.

**Figura 14** - Identificação do VCMN pelo campo composto de escoamento e magnitude do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). Dia 17 de outubro de 2010 às 06 UTC para os níveis de 200 hPa (a), 1000 hPa (b) e 700 hPa (c). Setas: VCMN.



- Vorticidade relativa: é a medida pontual da rotação de um escoamento no plano xy, com unidade de  $s^{-1}$ . A vorticidade relativa do escoamento atmosférico em latitudes médias tem a ordem de magnitude de  $10^{-5} s^{-1}$  (SATYAMURTY, 2004), e sendo dada pela Equação (2):

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

O campo de vorticidade relativa foi usado para verificar a circulação ciclônica e a percepção dos seus valores no VCMN.

- Divergência: é uma característica do escoamento em três dimensões em que um elemento material do fluido tende a se expandir ou aumentar seu volume. Em um escoamento de duas dimensões um elemento material do fluido tende a aumentar a sua área (SATYAMURTY, 2004), é dada pela Equação (3):

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

No campo de divergência foi verificada a convergência e divergência na região de atuação do vórtice.

- Velocidade Vertical: em coordenadas isobáricas (SATYAMURTY, 2004), designada  $\omega$  com unidade de  $Pa s^{-1}$ , sendo dada Equação (4):

$$\omega = \frac{Dp}{Dt} \approx -\rho g w \quad (4)$$

Onde  $g$  é a aceleração de gravidade e  $\rho$  é a densidade.

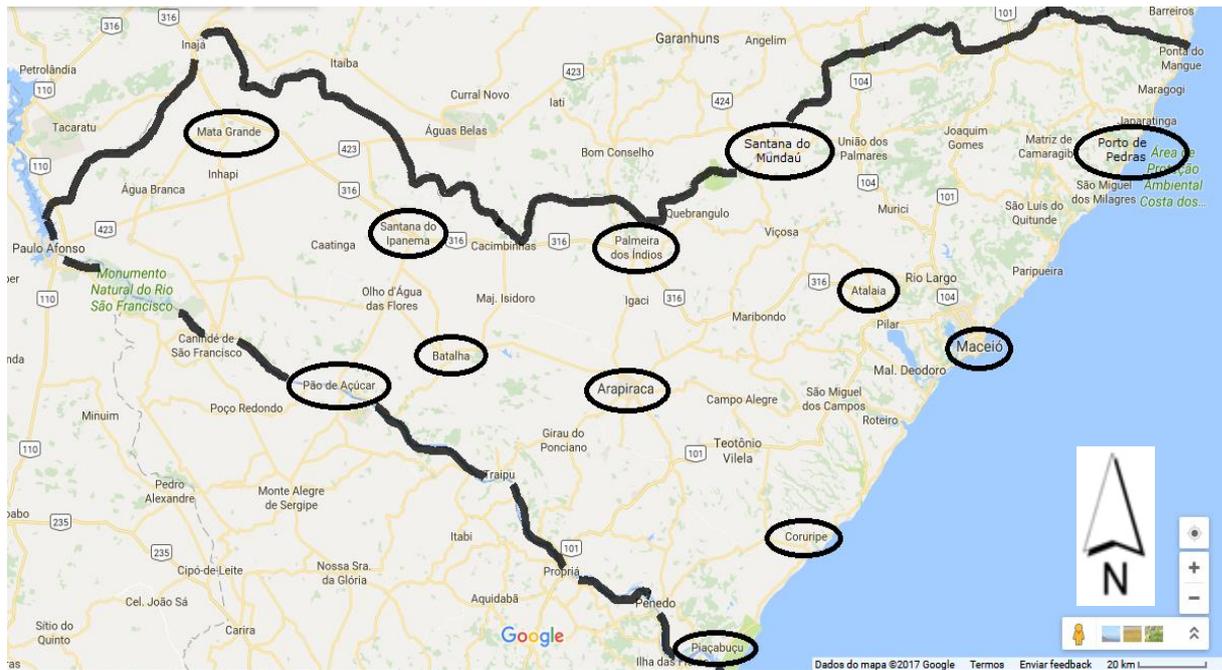
Esse último campo foi usado para verificar os movimentos verticais na horizontal no nível do VCMN. Outra forma observada foi a partir de um corte latitudinal passando pelo centro do vórtice, onde foi analisada a estrutura da seção vertical na região do VCMN e sobre o Estado de Alagoas (avaliação feita no estudo de caso).

### 3.3.2 Identificação da influência do VCMN na nebulosidade e precipitação

Com as imagens de Satélite no canal IR foi possível avaliar a nebulosidade relacionada à região de atuação do VCMN e sobre o Estado de Alagoas.

Procurou-se selecionar estações de superfície para avaliação da influência do VCMN nas precipitações, disponíveis no SEMARH/AL, em vários pontos do Estado de Alagoas (avaliação feita no estudo de caso). Com isso, foram selecionadas 12 estações (Figura 15) distribuídas da forma a seguir:

**Figura 15** – Mapa do estado de Alagoas com as localizações das estações de superfície.



**Fonte:** Adaptada do Google Maps (2017).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Informações gerais sobre os VCMNs

A partir da reavaliação dos dados do ano de 2010 (Santos, 2012) foram identificados 62 casos da ocorrência do VCMN. Por conta da diferença no modelo e na resolução, nessa reavaliação foram identificados alguns casos que já foram encontrados de VCMNs, casos novos, diferentes durações, e localizações quanto a altura e espaço. Na Tabela 3 foram observadas as datas do início da formação do centro do vórtice até a sua dissipação, seguido da duração dos eventos, os níveis da sua formação e a camada de atuação do vórtice durante o seu tempo de vida.

Na Tabela 3 se pôde observar a latitude e longitude do centro do VCMN no momento da sua formação, onde nas análises foram verificados os casos que se formaram sobre o Oceano Atlântico com total de 35 casos (56,5%), os que se formaram ou atingiriam o continente com total de 27 casos (43,5%). Sendo que dentro deste último percentual, 25,8% foram casos que estiveram próximos do Estado de Alagoas, ou seja, 16 casos.

**Tabela 3** – Dados dos casos de VCMN.

<b>Caso</b>	<b>Data e Hora (Z)</b>	<b>Duração (horas)</b>	<b>Nível de formação (hPa)</b>	<b>Níveis de atuação (hPa)</b>	<b>Lat&amp;Lon do centro do VCMN</b>
<b>1</b>	18-06Z – 19/01-00Z	18	700	700	13S-15W
<b>2</b>	07-06Z – 09/02-06Z	48	700	700-600	14S-35W
<b>3</b>	19-00Z – 20/02-06Z	30	700	700-600	15S-10W
<b>4</b>	23-18Z – 26/02-06Z	60	500	700-500	17S-5W
<b>5</b>	07/03-06Z – 18Z	12	600	600	20S-06W
<b>6</b>	09-00Z – 11/03-00Z	48	700	800-500	12S-10W
<b>7</b>	11-06Z – 12/03-12Z	30	600	800-500	13S-10W
<b>8</b>	18-18Z – 20/03-00Z	30	700	700-600	17S-21W
<b>9</b>	26-18Z – 29/03-12Z	66	600	700-500	21S-9W
<b>10</b>	27/03-18Z – 04/04-18Z	192	700	700-500	18S-20W
<b>11</b>	02-12Z – 04/04-06Z	42	400	500-400	12S-20W
<b>12</b>	09-18Z – 12/04-00Z	54	600	700-600	13S-15W
<b>13</b>	13-06Z – 14/04-00Z	18	600	600	21S-47W
<b>14</b>	14-00Z – 15/04-18Z	42	600	700-600	17S-22W
<b>15</b>	14-12Z – 16/04-12Z	48	600	700-600	19S-51W
<b>16</b>	21-06Z – 24/04-00Z	66	600	800-400	17S-28W
<b>17</b>	27-06Z – 30/04-12Z	78	600	800-500	14S-20W
<b>18</b>	29-06Z – 30/04-00Z	18	500	500	6S-43W
<b>19</b>	29-12Z – 30/04-06Z	18	700	700	14S-34W

Tabela 3 – Continuação.

20	02-12Z – 03/05-12Z	24	500	500	16S-11W
21	02-18Z – 05/05-18Z	72	400	700-400	11S-43W
22	17-18Z – 20/05-06Z	60	600	800-500	8S-21W
23	18-06Z – 20/05-06Z	48	700	700-600	15S-12W
24	20-06Z – 23/05-00Z	66	700	800-600	9S-30W
25	22-12Z – 25/05-06Z	66	700	800-600	12S-20W
26	28-06Z – 29/05-00Z	18	700	700-600	13S-48W
27	08-00Z – 10/06-06Z	54	700	700-600	6S-6W
28	12-06Z – 13/06-00Z	18	700	800-700	9S-30W
29	12/06-06Z – 18Z	12	700	700	13S-22W
30	23-18Z – 25/06-00Z	30	700	800-700	12S-23W
31	28-12Z – 29/06-00Z	12	700	700	11S-14W
32	28-18Z – 30/06-06Z	12	700	700	8S-27W
33	29-18Z – 04/07-00Z	102	500	600-400	12S-37W
34	30/06-00Z – 12Z	12	700	700	11S-20W
35	03-06Z – 06/07-12Z	78	600	700-500	11S-19W
36	28-18Z – 30/07-00Z	30	700	700	10S-15W
37	02-18Z – 03/08-18Z	24	700	700	6S-21W
38	04-12Z – 05/08-00Z	12	600	700-600	20S-21W
39	04-12Z – 05/08-18Z	30	700	700-600	8S-26W
40	20-12Z – 21/08-06Z	18	700	700	10S-35W
41	20-18Z – 22/08-00Z	30	700	700-600	11S-28W
42	23-06Z – 24/08-18Z	36	500	600-500	14S-36W
43	03-06Z – 06/09-18Z	84	700	800-600	11S-20W
44	21-18Z – 24/09-00Z	54	500	600-500	18S-42W
45	22-12Z – 24/09-18Z	54	600	700-600	11S-47W
46	26-00Z – 28/09-12Z	60	400	500-400	12S-12W
47	26-00Z – 27/09-18Z	42	600	800-600	13S-42W
48	26/09-06Z – 01/10-06Z	120	600	800-600	10S-21W
49	27/09-06Z – 18Z	12	600	700-600	10S-36W
50	10-18Z – 14/10-00Z	78	500	500	9S-8W
51	15-06Z – 16/10-06Z	24	700	700	21S-32W
52	17-06Z – 20/10-06Z	72	700	800-600	19S-9W
53	20-12Z – 22/10-18Z	54	700	800-700	16S-14W
54	22-00Z – 23/10-18Z	42	700	700	22S-21W
55	25-00Z – 26/10-12Z	36	700	700-600	21S-10W
56	13-00Z – 16/11-18Z	90	600	800-500	13S-10W
57	22-12Z – 24/11-00Z	42	600	700-600	6S-23W
58	24-06Z – 25/11-06Z	24	700	700	9S-35W
59	26-06Z – 27/11-12Z	30	700	700-500	13S-25W
60	04-06Z – 07/12-12Z	78	700	800-600	14S-37W
61	09-00Z – 11/12-00Z	48	700	700-600	12S-33W
62	18-12Z – 19/12-00Z	12	700	700-600	17S-23W

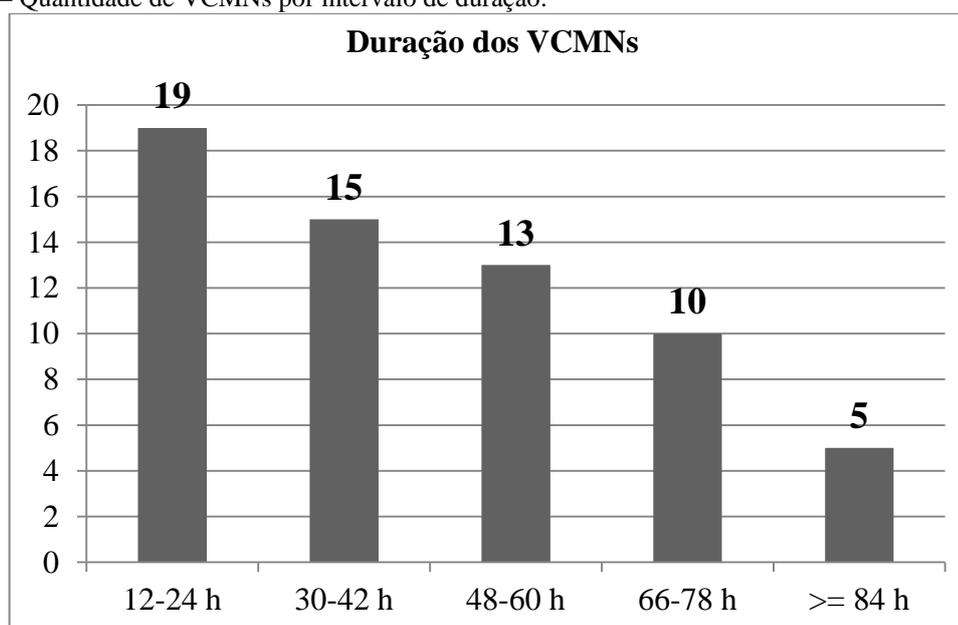
Fonte: Autora (2017).

#### 4.2 Duração dos VCMNs

No Gráfico 2 foi apresentada a distribuição da quantidade de casos de VCMN por duração. Foram verificadas durações entre 12 horas e até 192 horas, sendo que este último foi

identificado em apenas 1 caso (27 de março às 18 UTC até 04 de abril de 2010 às 18 UTC). Observou-se uma distribuição bem linear dos casos em relação ao intervalo de durações. Em destaque, verificaram-se 19 casos com duração entre 12-24 horas, em seguida 15 casos durando entre 30-42 horas. Com duração entre 48-60 horas foram contabilizados 13 casos, entre 66-78 horas corresponderam a 10 casos, e por fim, 5 casos com duração igual ou superior a 84 horas.

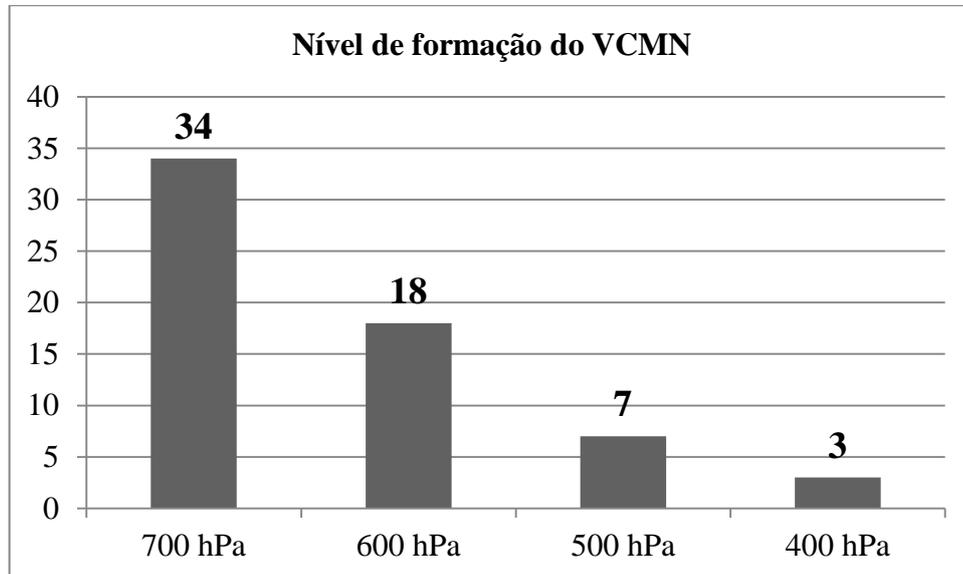
**Gráfico 2** – Quantidade de VCMNs por intervalo de duração.



**Fonte:** Autora (2017).

### 4.3 Camadas da formação e atuação dos VCMNs

Pôde-se observar no Gráfico 3 a quantidade de casos relativos ao nível do VCMN no momento da formação do centro do vórtice e destacando assim os níveis preferenciais. Observou-se um número marcante de casos de VCMN formados no nível de 700 hPa, correspondendo a 34 casos (54,8%), em seguida, destaca-se 18 casos (29%) com surgimento dos vórtices em 600 hPa. Verificou-se também que quando foram formados em 500 e 400 hPa corresponderam a 7 casos (11,3%) e 3 casos (4,8%), respectivamente.

**Gráfico 3** – Quantidade de VCMNs por nível de formação.

Fonte: Autora (2017).

Quanto à camada de atuação do vórtice durante seu tempo de atuação, notou-se que 16 casos (25,8%) atingiram o nível de 800 hPa. Na Tabela 4 foi observado o número de casos e a porcentagem correspondente, verificou-se que 18 casos (29%) atuaram na camada de 700-600 hPa e que 12 casos (19%) estavam em 700 hPa durante seu tempo de vida. Já quanto as camadas menos frequentes, observou-se 1 caso (2%) correspondendo a cada camada de 800-400 hPa, 700-400 hPa e 500-400 hPa.

**Tabela 4** – Camada (hPa) da atuação dos VCMN: número (N) de casos e porcentagem (%).

Camada (hPa)	800-700	800-600	800-500	800-400	700-600	700-500	700-400	600-500	600-400	500-400	700	600	500
N	3	7	5	1	18	5	1	2	2	1	12	2	3
%	5%	11%	8%	2%	29%	8%	2%	3%	3%	2%	19%	3%	5%

Fonte: Autora (2017).

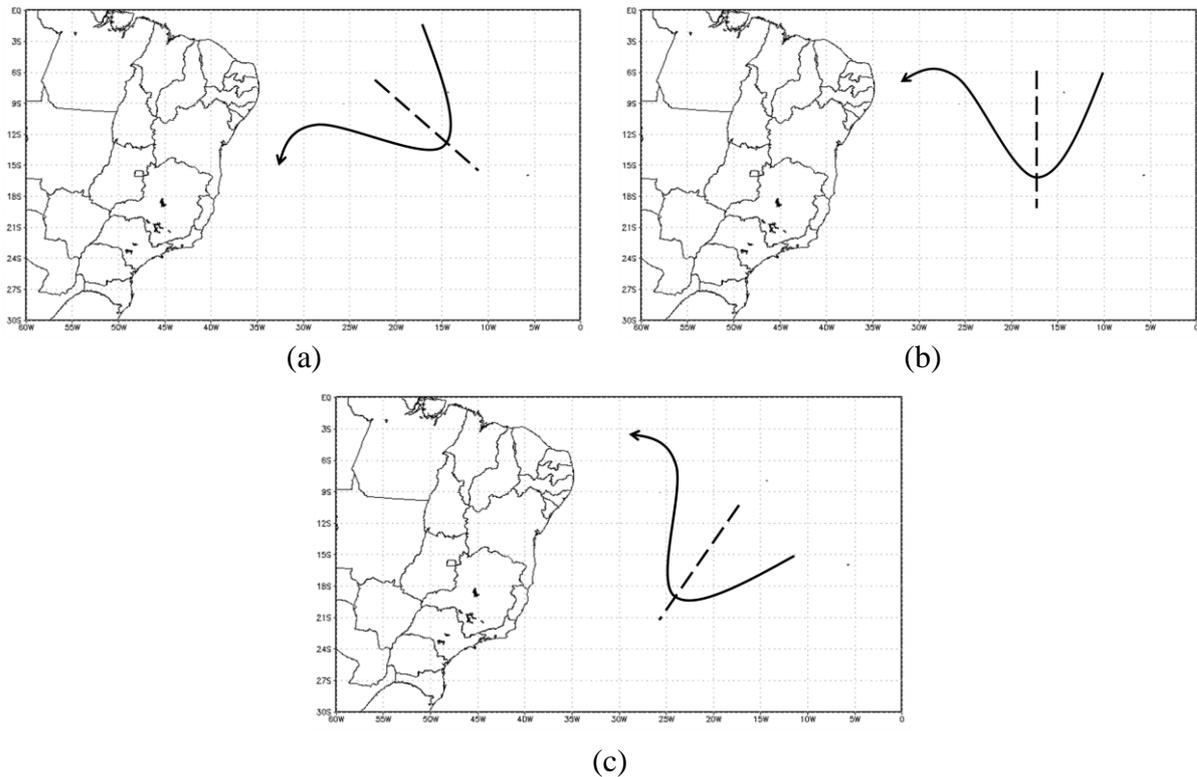
#### 4.4 Tipos de processos de formação dos VCMNs

Com as análises de todos os casos de VCMN em 2010, foi possível observar a formação dos vórtices e em seguida, estabelecer os tipos de processos de formação. Foram estabelecidos três tipos de processos de formação.

O primeiro (Tipo I) foi identificado por conta da formação do cavado na Corrente de Leste (CL), onde se observou algumas inclinações desse cavado. Depois disso, foram

separados alguns subtipos da formação do VCMN, como visto na Figura 16, sendo o primeiro subtipo identificado pela formação do cavado definido pela inclinação do seu eixo de noroeste para sudeste (CL a) (Figura 16 (a)). O segundo subtipo foi estabelecido pelo eixo do cavado de norte para sul (CL b) (Figura 16 (b)), e o terceiro apresentou o cavado com eixo de nordeste para sudoeste (CL c) (Figura 16 (c)).

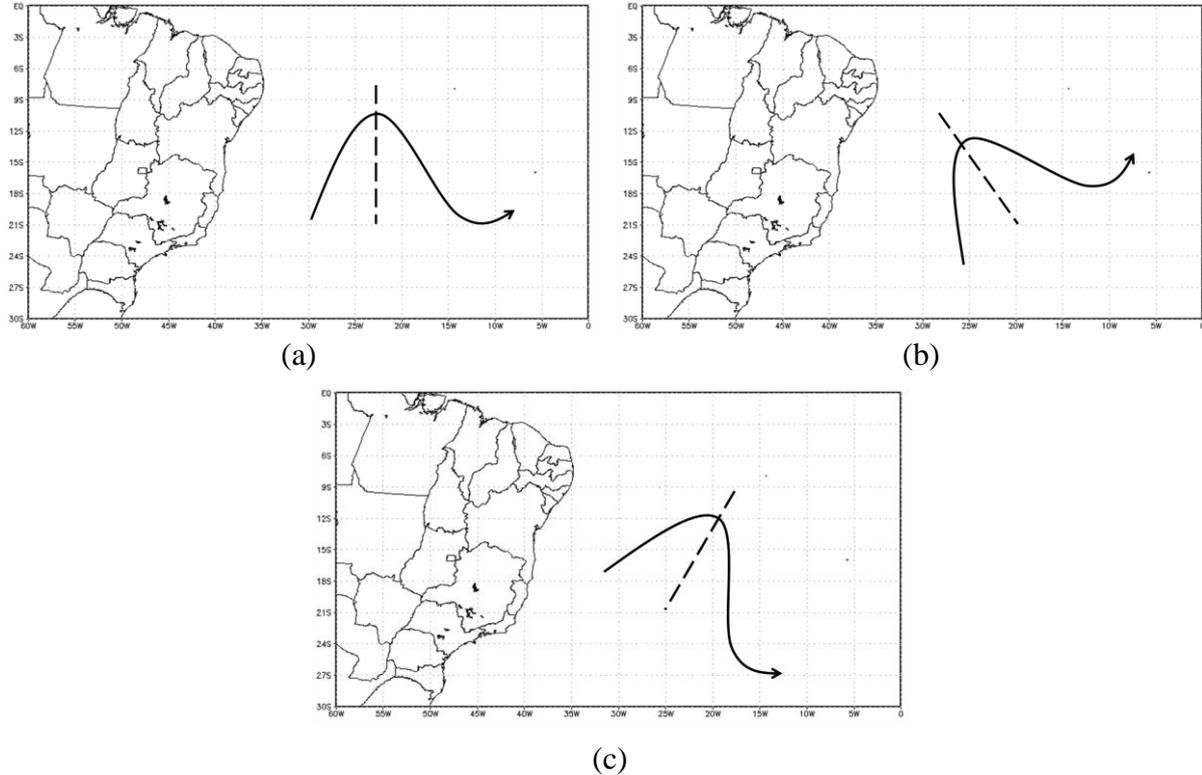
**Figura 16** – Padrões dos cavados nos processos de formação do VCMN na corrente de leste. Tipo I: cavados com o eixo de noroeste para sudeste (a), de norte para sul (b) e de nordeste para sudoeste (c). Linha tracejada: eixo do cavado.



**Fonte:** Autora (2017).

Identificou-se um segundo tipo (Tipo II) do processo de formação dos VCMNs, onde foi estabelecido por conta da formação do cavado na Corrente de Oeste (CO), como visto na Figura 17. Neste tipo também foram verificadas algumas inclinações do cavado. Separou-se em três subtipos, sendo o primeiro subtipo (Figura 17 (a)) definido pela direção do eixo do cavado de sul para norte (CO a). No segundo subtipo, visto na Figura 17 (b), a inclinação estava de sudeste para noroeste (CO b). Já no terceiro subtipo (Figura 17 (c)) foi observado que o eixo do cavado estava de sudoeste para nordeste (CO c).

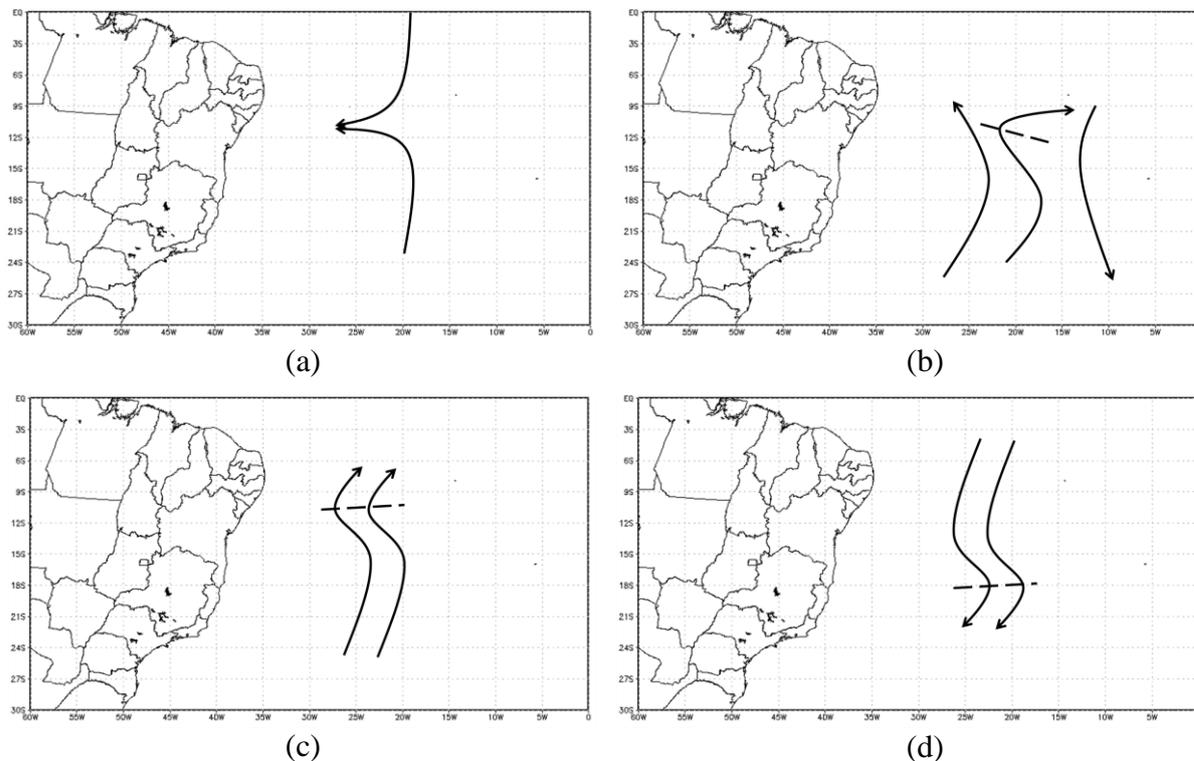
**Figura 17** – Padrões dos cavados nos processos de formação do VCMN na corrente de oeste. Tipo II: cavados com o eixo de sul para norte (a), de sudeste para noroeste (b) e sudoeste para nordeste (c). Linha tracejada: eixo do cavado.



**Fonte:** Autora (2017).

O terceiro tipo (Tipo III) de processos de formação foi separado por conta da sua variação nos processos e pela formação do vórtice através das correntes dos dois hemisférios e da meridional (Figura 18). O primeiro subtipo, Figura 18 (a), foi identificado pela sua formação a partir do Encontro das Correntes do Hemisfério Norte e Sul (Encontro COR HN e HS). Na Figura 18 (b) foi observado que no segundo subtipo o VCMN se formou no cavado Entre Correntes do Hemisfério Sul (Entre COR HS). Os últimos processos do Tipo III foram identificados pela formação do cavado na Corrente Meridional de Sul (COR M S) (Figura 18 (c)) e do cavado na Corrente Meridional de Norte (COR M N) (Figura 18 (d)).

**Figura 18** – Padrões dos processos de formação do VCMN do Tipo III: Encontro das Correntes do Hemisfério Norte e Sul (a), cavado Entre as Correntes (b), cavado na Corrente Meridional de Sul (c) e na Corrente Meridional de Norte (d). Linha tracejada: eixo do cavado.



Fonte: Autora (2017).

#### 4.5 Frequência dos processos de formação dos VCMNs

Com os tipos de processos de formação definidos foi possível identificar a frequência dos subtipos dos eventos de VCMNs (Tabela 5). O Tipo I se definiu por conta da formação do cavado na Corrente de Leste e foram estabelecidos três subtipos, onde 17 eventos (CL a) ocorreram no cavado com inclinação do seu eixo de noroeste para sudeste. No segundo subtipo (CL b) o VCMN se formou no cavado com eixo de norte para sul com a ocorrência de 8 eventos. Já no terceiro subtipo (CL c) foram observados 4 eventos com a formação do vórtice pelo cavado com sua inclinação de nordeste para sudoeste.

O Tipo II foi definido pela formação do cavado do VCMN na Corrente de Oeste e foram observados três subtipos, onde foram encontrados 4 eventos (CO a) no primeiro subtipo com a inclinação do eixo do cavado de sul para norte. O segundo subtipo (CO b) apresentou 13 eventos da formação do cavado com eixo de sudeste para noroeste. Quando foi observada a formação do cavado com eixo de sudoeste para nordeste, ocorreram 2 eventos (CO c) desse processo.

Já o último tipo (Tipo III) foi definido pela maior variação nos processos de formação, assim, o primeiro subtipo apresentou 5 eventos estabelecidos pela formação do VCMN pelo Encontro das Correntes do Hemisfério Norte e Sul (Encontro COR HN e HS). O segundo

subtipo apresentou 2 eventos da formação do cavado Entre Correntes do Hemisfério Sul (Entre COR HS). Os dois últimos processos foram a partir da formação do Cavado na Corrente Meridional de Sul e de Norte, onde o primeiro processo apresentou 5 eventos (COR M S) e o segundo 2 eventos (COR M N) da ocorrência do vórtice.

Logo, foram identificados 29 eventos de VCMN, como visto na Tabela 5, relacionados ao processo de formação do Tipo I. Em seguida, verificaram-se 21 eventos do Tipo II e 14 eventos de ocorrência do sistema do Tipo III.

**Tabela 5** – Tipos e subtipos de processos de formação dos VCMNs e quantidade de eventos.

<b>TIPO</b>	<b>EVENTOS</b>	<b><math>\Sigma</math></b>
<b>Tipo I</b>		
CL a (Tipo Ia)	17	
CL b (Tipo Ib)	8	<b>29</b>
CL c (Tipo Ic)	4	
<b>Tipo II</b>		
CO a (Tipo IIa)	4	
CO b (Tipo IIb)	13	<b>21</b>
CO c (Tipo IIc)	2	
<b>Tipo III</b>		
Encontro COR HN e HS (Tipo IIIa)	5	
Entre COR HS (Tipo IIIb)	2	<b>14</b>
COR M S (Tipo IIIc)	5	
COR M N (Tipo IIId)	2	

Fonte: Autora (2017).

#### 4.6 Variação sazonal de processos de formação dos VCMNs

Quando foram observados todos os eventos, como visto na Tabela 6, notou-se que o mês que apresentou menor ocorrência dos vórtices foi em janeiro (1 evento) e a maior em abril (9 eventos). Verificou-se que o período de abril a junho apresentou o maior número de eventos de VCMN e que no período de dezembro a fevereiro constatou o menor número de ocorrência do sistema.

Na Tabela 6 se pôde observar também a distribuição dos eventos de VCMN durante os meses do ano de 2010 pelos tipos e subtipos dos processos de formação. Os eventos de VCMN se mostraram bem distribuídos na relação subtipos e meses. Verificou-se que o mês de abril tanto apresentou o maior número de eventos como também a maior distribuição da ocorrência de VCMN entre os subtipos. Notou-se que o primeiro subtipo (Encontro COR HN e HS) do Tipo III apresentou os casos registrados no intervalo de maio a setembro. Outro fato observado foi que o primeiro subtipo do Tipo I apresentou a maior distribuição entre os meses

do ano de 2010, presente em 9 meses. Já o segundo subtipo do Tipo III apresentou a menor distribuição, presente apenas no mês de abril.

**Tabela 6** – Distribuição dos eventos de VCMN durante os meses do ano de 2010 pelos tipos e subtipos dos processos de formação.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III				$\Sigma$
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	d	
<b>Jan</b>	1										<b>1</b>
<b>Fev</b>	2		1								<b>3</b>
<b>Mar</b>	2		2		2						<b>6</b>
<b>Abr</b>		1		1	3	1		2		1	<b>9</b>
<b>Mai</b>					2		1		3	1	<b>7</b>
<b>Jun</b>	3	2	1		1		1				<b>8</b>
<b>Jul</b>							1		1		<b>2</b>
<b>Ago</b>	3	1					1		1		<b>6</b>
<b>Set</b>	3			1	2		1				<b>7</b>
<b>Out</b>	1			1	3	1					<b>6</b>
<b>Nov</b>	2	2									<b>4</b>
<b>Dez</b>		2		1							<b>3</b>
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>17</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>62</b>

Fonte: Autora (2017).

#### 4.7 Exemplos dos subtipos de processos de formação

Foram selecionados eventos que melhor representassem os subtipos dos processos de formação dos VCMNs relacionados aos seus respectivos tipos. Nessa parte inicial foram observados os primeiros exemplos dos processos de formação do VCMN do Tipo I, cujo cavado se deu pelas correntes de leste (CL) (Figura 19).

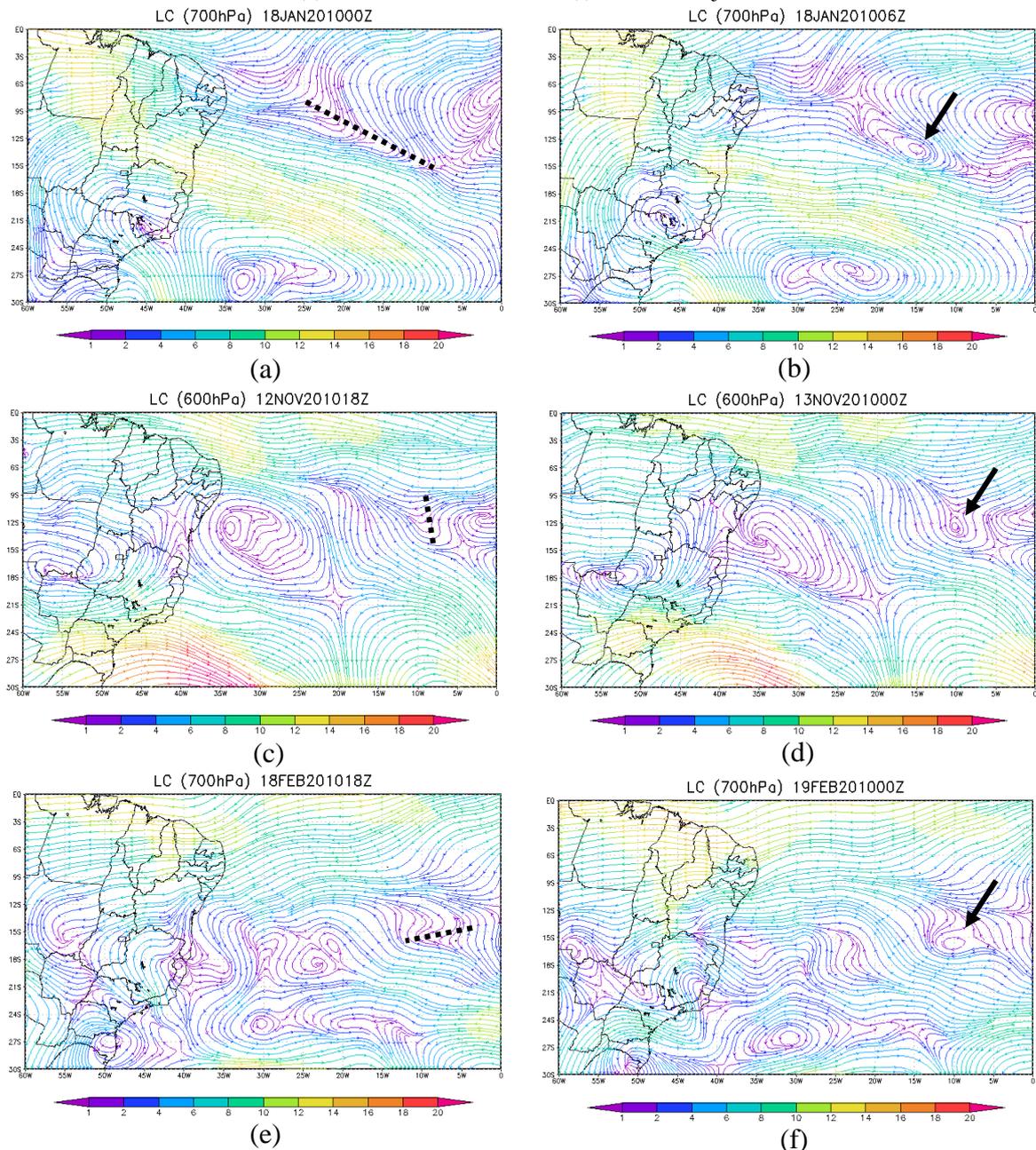
Na Figura 19 (a) foi identificada a formação do cavado no dia 18 de janeiro de 2010 às 00 UTC com a inclinação de seu eixo de noroeste para sudeste (CL a) e 6 horas depois a formação do VCMN em 700 hPa com centro em 13S-15W, observou-se também que esse caso teve uma duração de 18 horas e permaneceu no mesmo nível de atuação até sua dissipação.

Às 18 UTC do dia 12 de novembro de 2010 (Figura 19 (c)) foi identificado o cavado com inclinação do eixo de norte para sul (CL b), e após 6 horas foi observada a formação do centro do VCMN (Figura 19 (d)). Esse caso foi identificado no nível de 600 hPa com centro em 13S-10W durando 90 horas e permanecendo entre 800-500 hPa no período de atuação.

No exemplo do terceiro subtipo do Tipo I, visto na Figura 19 (e), observou-se o cavado com inclinação do eixo de nordeste para sudoeste (CL c). Às 18 UTC do dia 18 de

fevereiro de 2010 foi visto o sistema formado em 700 hPa com centro em 15S-10W (Figura 19 (f)) atingindo até 600 hPa e com duração de 30 horas.

**Figura 19** – Campos compostos de escoamento e magnitude do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 700 e 600 hPa mostrando exemplos dos processos de formação do Tipo I: Tipo Ia (a, b), Tipo Ib (c, d), Tipo Ic (e, f). Evento do dia 18/01/2010 às 00 UTC (a) e 06 UTC (b). Evento do dia 12/11 às 18 UTC (c) e 13/11/2010 às 00 UTC (d). Evento do dia 18/02 às 18 UTC (e) e 19/02/2010 às 00 UTC (f). Linha tracejada: cavado. Setas: VCMN.



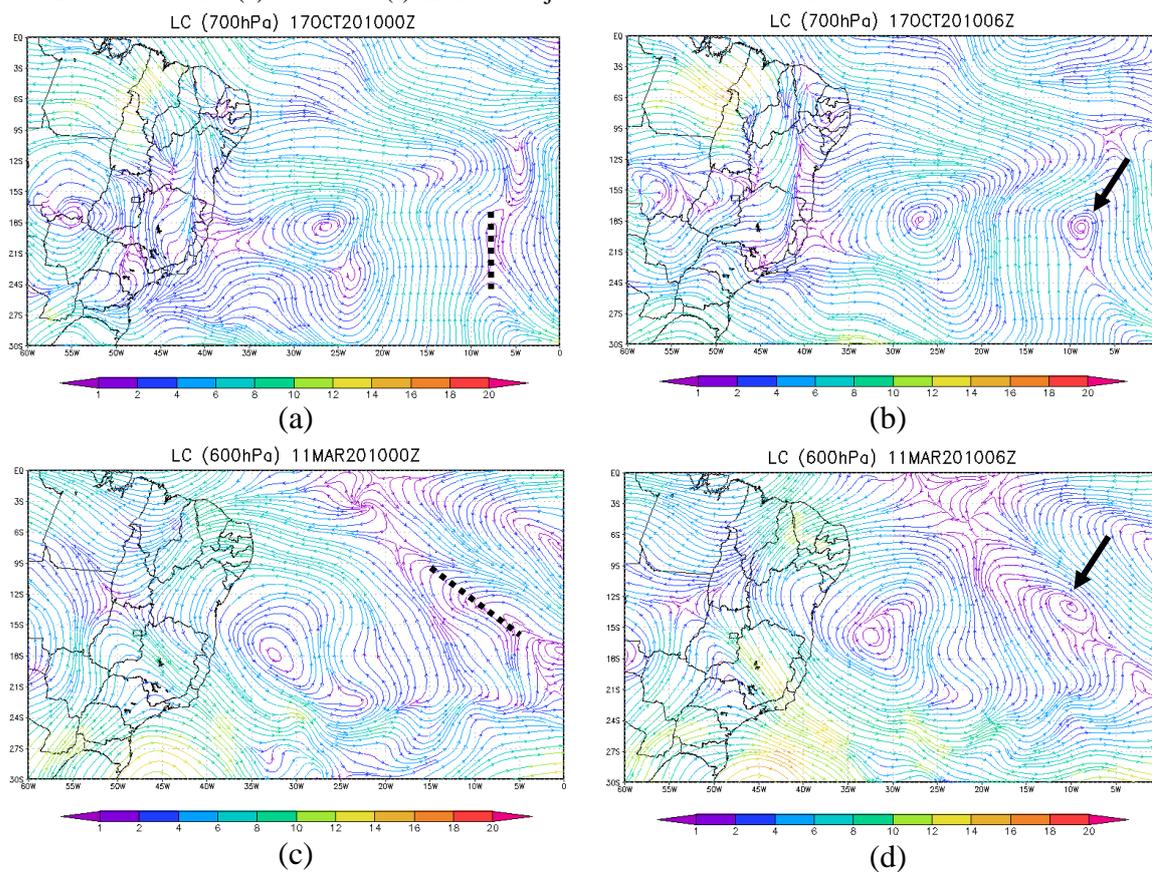
Fonte: Autora (2017).

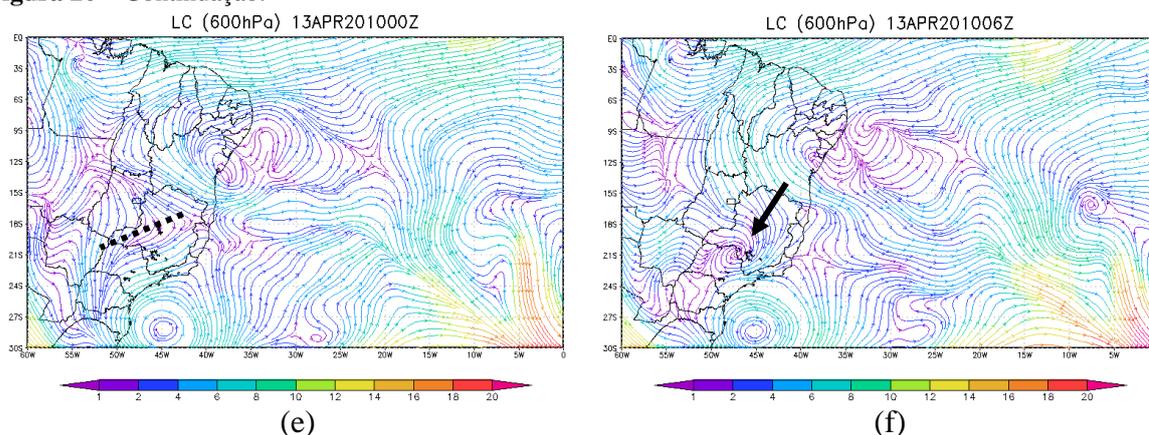
Posteriormente, foram observados os exemplos de subtipos do Tipo II, onde o cavado se formou pela Corrente de Oeste (CO) (Figura 20). Às 00 UTC do dia 17 de outubro de 2010 (Figura 20 (a)) foi identificado o cavado com eixo de sul para norte (CO a) e 6 horas depois a

formação do centro do VCMN no nível de 700 hPa em 19S-9W (Figura 20 (b)) com duração de 72 horas, com atuação entre os níveis de 800-600 hPa. Na Figura 20 (c) foi verificado o cavado com a inclinação do eixo de sudeste para noroeste (CO b) no dia 11 de março de 2010 às 00 UTC, exemplo do segundo subtipo do Tipo II. Às 06 UTC do mesmo dia foi identificado o centro do sistema em 13S-10W (Figura 20 (d)) no nível de 600 hPa com duração de 30 horas e atuando entre 800-500 hPa.

Para o exemplo do terceiro subtipo do Tipo II foi utilizado o dia 13 de abril de 2010 às 00 UTC (Figura 20 (e)), onde foi verificado o cavado com eixo de sudoeste para nordeste (CO c). Às 06 UTC do mesmo dia foi identificado o centro do sistema no nível de 600 hPa em 21S-47W (Figura 20 (f)) com duração de 18 horas e permanecendo no mesmo nível até sua dissipação.

**Figura 20** – Campos compostos de escoamento e magnitude do vento ( $m s^{-1}$ ) em 700 e 600 hPa mostrando exemplos dos processos de formação do Tipo II: Tipo IIa (a, b), Tipo IIb (c, d) e Tipo IIc (e, f). Evento do dia 17/10/2010 às 00 UTC (a) e 06 UTC (b). Evento do dia 11/03/2010 às 00 UTC (c) e 06 UTC (d). Evento do dia 13/04/2010 às 00 UTC (e) e 06 UTC (f). Linha tracejada: cavado. Setas: VCMN.



**Figura 20** – Continuação.

Fonte: Autora (2017).

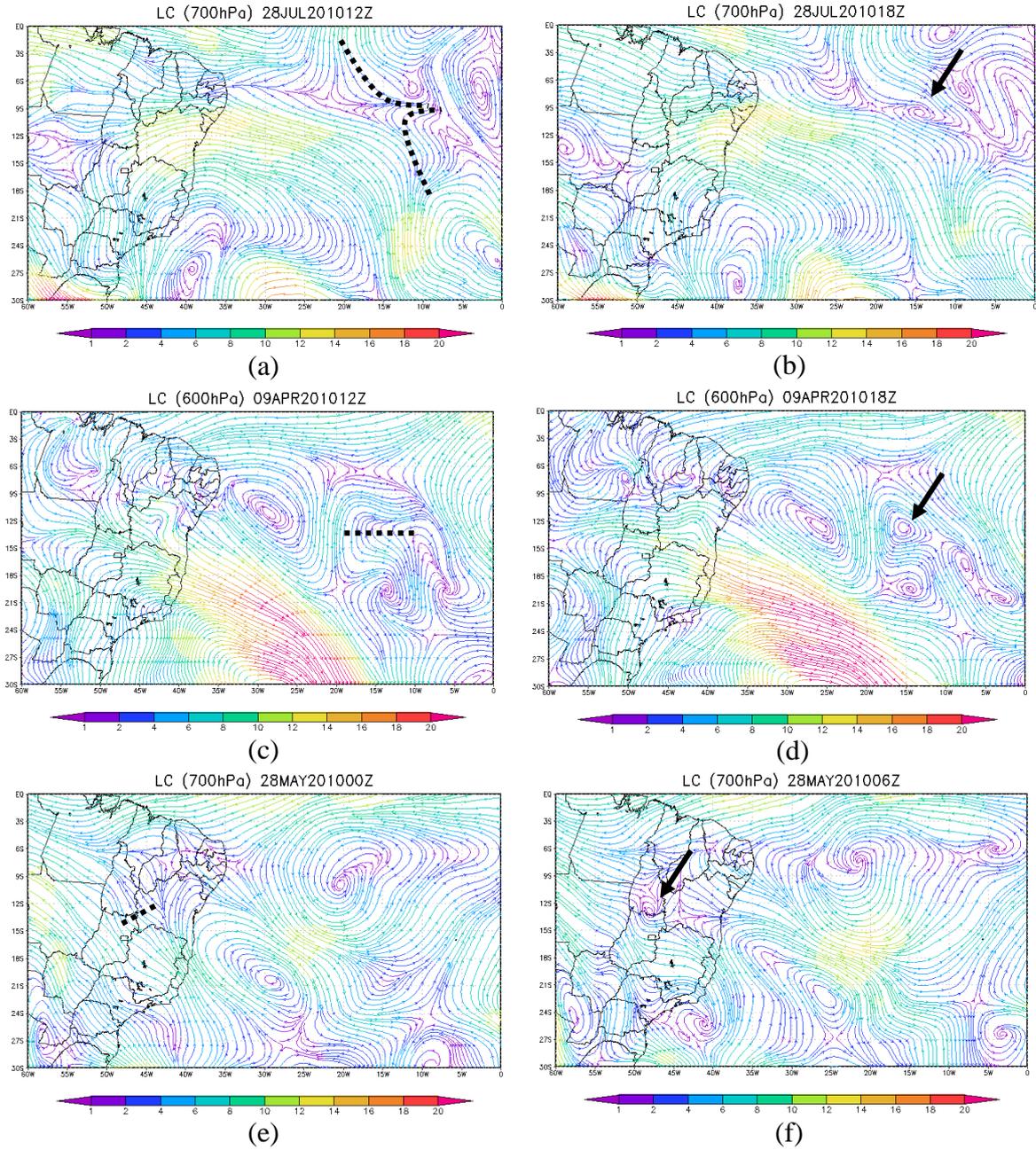
O Tipo III apresentou diferentes subtipos de processos de formação (Figura 21), como visto anteriormente. O exemplo do primeiro subtipo ocorreu no dia 28 de julho de 2010 às 12 UTC no nível de 700 hPa (Figura 21 (a)), sendo assim identificado a partir do Encontro das Correntes do Hemisfério Norte e Sul (Encontro COR HN e HS). Às 18 UTC foi verificado o centro do sistema em 10S-15W (Figura 21 (b)) com duração de 30 horas e no mesmo nível de atuação até sua dissipação.

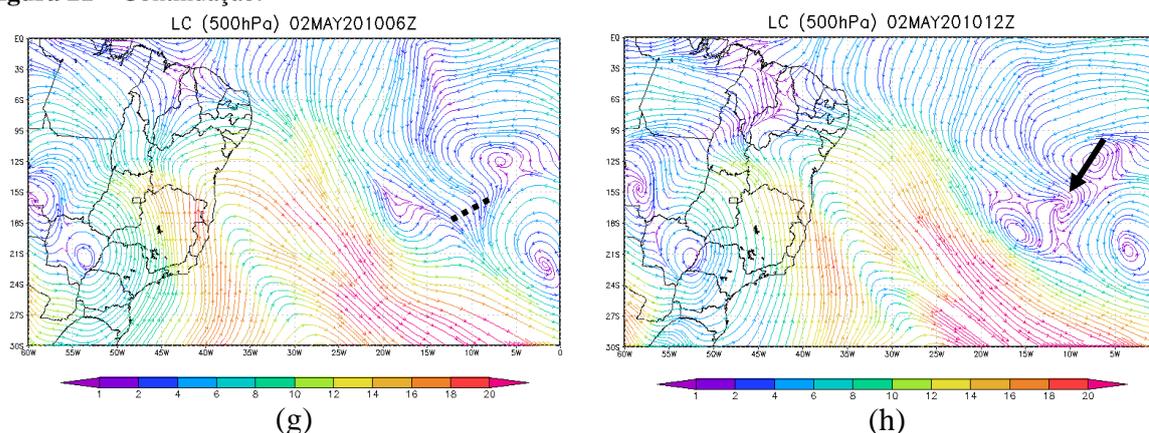
Na Figura 21 foi observada a formação do VCMN no cavado Entre Correntes do Hemisfério Sul (Entre COR HS) no dia 09 de abril de 2010 às 12 UTC (Figura 21 (c)) e 6 horas depois identificou-se o centro do sistema em 13S-15W (Figura 21 (d)) no nível de 600 hPa durando 54 horas e atingindo até 700 hPa.

Para o terceiro subtipo foi usado o evento do dia 28 de maio de 2010 às 00 UTC (Figura 21 (e)), onde o VCMN se formou no cavado na Corrente Meridional de Sul (COR M S) no nível de 700 hPa. Após 6 horas seu centro foi observado em 13S-48W (Figura 21 (f)) atingindo até 600 hPa durante o seu período de atuação (18 horas).

Às 06 UTC do dia 02 de maio de 2010 (Figura 21 (g)) no nível de 500 hPa foi identificado o quarto subtipo do Tipo II, estabelecido pela formação do cavado na Corrente Meridional de Norte (COR M N). Após 6 horas, pôde-se observar o centro do VCMN em 16S-11W (Figura 21 (h)) com sua duração de 24 horas e permanência no mesmo nível de atuação até sua dissipação.

**Figura 21** – Campos compostos de escoamento e magnitude do vento ( $m s^{-1}$ ) em 700, 600 e 500 hPa mostrando exemplos dos processos de formação do Tipo III: Tipo IIIa (a, b), Tipo IIIb (c, d), Tipo IIIc (e, f) e Tipo III d (g, h). Evento do dia 28/07/2010 às 12 UTC (a) e 18 UTC (b). Evento do dia 09/04/2010 às 12 UTC (c) e 18 UTC (d). Evento do dia 28/05/2010 às 00 UTC (e) e 06 UTC (f). Evento do dia 02/05/2010 às 06 UTC (g) e 12 UTC (h). Linha tracejada: encontro das correntes e cavado. Seta: VCMN.



**Figura 21** – Continuação.

Fonte: Autora (2017).

#### 4.8 Estrutura e movimentos verticais nos processos de formação dos VCMNs

Nesta parte procurou-se analisar a estrutura e os movimentos verticais tanto na fase inicial (chamada de pré-formação) da formação do VCMN, ou seja, no momento antes da formação do centro do sistema, como também quando ele já estava formado. Estabeleceu-se que a área que delimita a circulação ciclônica foi a base para a região de atuação do vórtice e por isso, para as análises das outras variáveis.

A Tabela 7 mostrou os valores das variáveis na pré-formação do VCMN para todos os casos analisados, onde foram separados pelos subtipos dos processos de formação de cada Tipo. Nesse primeiro momento ainda não foi possível identificar um padrão nos valores das variáveis para todos os subtipos de processos de formação.

No entanto, ainda foi possível verificar alguns resultados significativos quanto às análises em geral de todos os casos. Quanto à vorticidade foi observado que apresentou o intervalo de circulação ciclônica de  $-1 \times 10^{-5}$  até  $< -5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , mas se deve notar que a frequência desses valores extremos foi mais rara e estava presente em 1 caso ( $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e 3 casos ( $< -5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Sendo assim, foi visto que os valores de vorticidade mais frequentes foram  $-3 \times 10^{-5}$  e  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  presentes em 31 e 14 casos, respectivamente.

Observou-se que todos os casos apresentaram divergência e convergência fraca (Tabela 7 e 8). Na pré-formação tiveram um intervalo de  $2 \times 10^{-5}$  (divergência) até  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (convergência) (Tabela 7), mas se constatou que os valores limites corresponderam a 7 casos ( $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e 3 casos ( $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Deste modo, procurou-se separar os valores máximos de divergência mais frequentes, notando-se que estavam no intervalo de  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  até 0, onde foram equivalentes a 14 casos o valor de  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e 25 casos o valor de  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Os valores mais frequentes de convergência (mínimos de divergência) foram identificados entre  $-2 \times 10^{-5}$  e  $-0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , assim correspondendo a 19 casos o valor de  $-2 \times 10^{-5}$

$s^{-1}$ , 25 casos a  $-1 \times 10^{-5} s^{-1}$  e 13 casos a  $-0,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ . Com isso, foi verificado que 16 casos apresentaram apenas convergência e 2 casos com divergência na região da pré- formação.

Observaram-se movimentos ascendentes e descendentes fracos nos casos analisados (Tabela 7 e 8). Os movimentos verticais apresentaram um intervalo entre 0,3 (movimentos descendentes) até  $-0,2 Pa s^{-1}$  (movimentos ascendentes) (Tabela 7), mas esses valores extremos também foram vistos em poucos casos, sendo assim, identificado em 1 caso o valor de  $0,3 Pa s^{-1}$  e 4 casos correspondendo a  $-0,2 Pa s^{-1}$ . Os valores máximos de velocidade vertical (movimentos descendentes) mais frequentes foram  $0,1 Pa s^{-1}$  e  $0,2 Pa s^{-1}$ , correspondendo a 42 e 18 casos, respectivamente. Já os valores mínimos (movimentos ascendentes) foram encontrados em 26 casos e corresponderam a  $-0,1 Pa s^{-1}$ . Com isso, foi possível verificar que 32 casos apresentaram movimentos descendentes e 1 caso movimentos ascendentes na pré- formação.

**Tabela 7** – Vorticidade, divergência e velocidade vertical na pré- formação dos VCMNs.

Tipo	Evento	Lat&Lon	Vorticidade ( $\times 10^{-5} s^{-1}$ )		Divergência ( $\times 10^{-5} s^{-1}$ )		Vel. Vertical $Pa s^{-1}$	
			Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	
<b>Ia</b>	1	13S-15W	-5	0,5	-1	0,1	-0,1	
	2	14S-35W	-3	0,5	-2	0,1	0	
	4	17S-5W	-5	1	-1	0,1	-0,1	
	8	17S-21W	-3	1	-1	0,2	0	
	10	18S-20W	-4	0,5	-0,5	0,1	0	
	30	12S-23W	-3	0,5	-0,5	0,1	0	
	33	12S-37W	<-5	1	-2	0,2	0	
	34	11S-20W	-3	0,5	-1	0,1	-0,1	
	38	20S-21W	-3	1	-0,5	0,1	-0,1	
	39	8S-26W	-3	0	-2	0,1	-0,1	
	41	11S-28W	-4	1	-2	0,2	0	
	45	11S-47W	-3	2	-2	0,1	-0,1	
	48	10S-21W	-3	0,5	-1	0,1	-0,1	
	49	10S-36W	-2	0	-1	0,1	-0,1	
	50	9S-8W	-3	0,5	-1	0,1	0	
	57	6S-23W	-3	0,5	-1	0,2	0	
	59	13S-25W	-3	0	-1	0,1	-0,1	
	<b>Ib</b>	18	6S-43W	-3	2	0	0,1	0
28		9S-30W	-2	0,5	-1	0,1	-0,1	
29		13S-22W	-3	0,5	-1	0,1	-0,1	
42		14S-36W	-2	0,5	-1	0,1	-0,1	
56		13S-10W	-3	0,5	-0,5	0,1	0	
58		9S-35W	-4	0,5	-0,5	0	-0,1	
60		14S-37W	-5	0	-1	0,1	-0,1	
62		17S-23W	-3	0,5	-1	0,1	-0,1	

Tabela 7 – Continuação.

	3	15S-10W	-3	0,5	-0,5	0,2	0
<b>Ic</b>	5	20S-06W	-3	1	0	0,2	-0,1
	6	12S-10W	-3	0,5	-0,5	0,1	-0,1
	27	6S-6W	-3	0,5	-0,5	0,1	0
<b>IIa</b>	15	19S-51W	-2	0	-1	0,1	-0,1
	47	13S-42W	-4	1	-1	0,1	0
	52	19S-9W	-3	0,5	-1	0,2	0
	61	12S-33W	-4	1	-0,5	0,3	0
	7	13S-10W	-3	1	-1	0,1	-0,1
	9	21S-9W	-4	0,5	-2	0,1	-0,1
	14	17S-22W	-3	2	-2	0,1	-0,2
	16	17S-28W	-4	2	-1	0,1	-0,2
	17	14S-20W	-3	0	-2	0,1	0
<b>IIb</b>	21	11S-43W	<-5	0	-2	0,2	-0,2
	25	12S-20W	-4	0,5	-1	0,1	0
	31	11S-14W	-3	0,5	-0,5	0,1	0
	44	18S-42W	-5	1	-1	0,2	0
	46	12S-12W	-5	2	-2	0,1	-0,1
	51	21S-32W	-5	0,5	-3	0,2	0
	53	16S-14W	-5	0,5	-1	0,2	0
	55	21S-10W	-4	1	-2	0,2	0
<b>IIc</b>	13	21S-47W	-3	0,5	-0,5	0,2	0
	54	22S-21W	-4	2	-1	0,2	-0,1
	24	9S-30W	-3	0	-3	0,1	-0,1
<b>IIIa</b>	32	8S-27W	-3	0	-2	0,2	0
	36	10S-15W	-4	0,5	-0,5	0,1	-0,1
	37	6S-21W	-3	0	-2	0,1	-0,2
	43	11S-20W	-1	0	-2	0,1	-0,1
<b>IIIb</b>	12	13S-15W	-4	0	-2	0,2	0
	19	14S-34W	-5	2	-1	0,1	0
	22	8S-21W	-4	1	-0,5	0,2	0
<b>IIIc</b>	23	15S-12W	<-5	0	-3	0,1	0
	26	13S-48W	-3	0	-2	0,1	-0,1
	35	11S-19W	-4	1	-2	0,1	0
	40	10S-35W	-3	1	-1	0,2	0
<b>IIId</b>	11	12S-20W	-3	0	-2	0,1	0
	20	16S-11W	-2	0	-2	0,1	0

Fonte: Autora (2017).

Em seguida, observou-se a estrutura e os movimentos verticais no momento da formação do centro do vórtice (Tabela 8), ou seja, 6 horas depois da sua pré-formação. Onde foram verificados também alguns resultados quanto as análises dos casos de forma geral.

Os valores de vorticidade, observados na Tabela 8, apresentaram-se num intervalo de  $-2 \times 10^{-5}$  até  $< -5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (circulação ciclônica). Entretanto, esses valores limites foram identificados em poucos casos, assim, presentes em 5 casos correspondendo a  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e em 4 casos relativos a  $< -5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Logo, os valores mais frequentes de circulação ciclônica

estavam entre  $-3$  até  $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , onde foram registrados 16 casos correspondendo a  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 25 a  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e 12 casos com valor de  $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Notou-se também que na grande maioria dos casos, houve diminuição de  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  na circulação ciclônica ou os valores se mantiveram os mesmos do momento da pré-formação até a definição do centro do vórtice.

Quanto à divergência, no geral, foi observado um intervalo de  $3 \times 10^{-5}$  (divergência) até  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (convergência), sendo que esses limites se apresentaram em apenas 1 caso. Com isso, separaram-se os valores máximos de divergência mais frequentes que foram  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  representados em 18 casos e  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  em 20 casos. Quanto aos valores mais frequentes de convergência (mínimos de divergência) foram identificados no intervalo de  $-2 \times 10^{-5}$  até  $-0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , sendo representados por 25 casos o valor de  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 18 casos correspondendo a  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e 15 casos a  $-0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Outro fato observado foi que 16 casos apresentaram apenas convergência e 3 casos divergência na região de atuação do VCMN.

Foram identificados movimentos descendentes e ascendentes fracos no intervalo entre  $0,2$  (movimentos descendentes) até  $-0,3 \text{ Pa s}^{-1}$  (movimentos ascendentes) para todos os casos em geral, no entanto, o valor extremo de  $-0,3 \text{ Pa s}^{-1}$  foi observado apenas em 1 caso. Os valores máximos (movimentos descendentes) mais frequentes de velocidade vertical foram  $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$  e  $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ , representados por 45 e 16 casos, respectivamente. Quando observado o valor mínimo (movimentos ascendentes) mais frequente, puderam ser identificados em 34 casos e corresponderam a  $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ . Logo, notou-se que 26 casos apresentaram apenas movimentos descendentes e 1 caso movimentos ascendentes no momento da formação do centro do vórtice.

**Tabela 8** – Vorticidade, divergência e velocidade vertical na formação dos VCMNs.

Tipo	Evento	Lat&Lon	Vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )		Divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )		Vel. Vertical $\text{Pa s}^{-1}$	
			Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Ia	1	13S-15W	-5	1	-1	0,1	0	
	2	14S-35W	-4	0,5	-0,5	0,1	-0,1	
	4	17S-5W	-4	1	0	0,1	0	
	8	17S-21W	-4	1	0	0,1	-0,1	
	10	18S-20W	-4	1	-0,5	0,1	-0,1	
	30	12S-23W	-3	0	-1	0,2	0	
	33	12S-37W	<-5	0,5	-2	0,1	0	
	34	11S-20W	-4	0,5	-1	0,1	-0,1	
	38	20S-21W	-2	1	-0,5	0,1	0	
	39	8S-26W	-4	0,5	-2	0,1	-0,1	
	41	11S-28W	-3	0,5	-0,5	0,2	0	
	45	11S-47W	-3	1	0	0,1	-0,1	
	48	10S-21W	-3	0,5	-1	0,1	-0,1	

Tabela 8 – Continuação.

	49	10S-36W	-2	0	-1	0,1	0
	50	9S-8W	-4	0	-1	0,1	0
	57	6S-23W	-3	0,5	-2	0,1	-0,1
	59	13S-25W	-4	0	-1	0,1	0
<b>Ib</b>	18	6S-43W	-3	0	-2	0,2	-0,1
	28	9S-30W	-3	0	-1	0,1	0
	29	13S-22W	-4	1	-2	0,1	0
	42	14S-36W	-2	0,5	-0,5	0,1	-0,1
	56	13S-10W	-3	0,5	-0,5	0,1	0
	58	9S-35W	-5	0	-2	0,2	0
	60	14S-37W	<-5	0,5	-2	0,1	-0,2
	62	17S-23W	-3	1	-1	0,1	-0,1
<b>Ic</b>	3	15S-10W	-4	0,5	-0,5	0,1	-0,1
	5	20S-06W	-4	1	-1	0,2	0
	6	12S-10W	-4	0,5	-0,5	0,1	0
	27	6S-6W	-3	1	-1	0,1	0
<b>IIa</b>	15	19S-51W	-4	0	-2	0,1	-0,1
	47	13S-42W	-2	2	-2	0,2	-0,1
	52	19S-9W	-4	0,5	-2	0,2	-0,1
	61	12S-33W	-4	0	-2	0,1	-0,1
<b>IIb</b>	7	13S-10W	-3	1	-1	0,1	0
	9	21S-9W	-5	1	-1	0,1	-0,1
	14	17S-22W	-3	1	-2	0	-0,3
	16	17S-28W	-5	0,5	-2	0,2	-0,1
	17	14S-20W	-5	1	-2	0,2	-0,1
	21	11S-43W	<-5	2	-1	0,2	-0,1
	25	12S-20W	-3	1	-0,5	0,1	0
	31	11S-14W	-3	0	-2	0,1	-0,1
	44	18S-42W	-4	2	-0,5	0,1	0
	46	12S-12W	-5	2	-0,5	0,1	-0,1
	51	21S-32W	-5	1	-1	0,1	-0,1
	53	16S-14W	-5	1	-1	0,2	-0,1
	55	21S-10W	-4	1	-0,5	0,1	-0,1
	<b>IIc</b>	13	21S-47W	-4	0	-2	0,2
54		22S-21W	-5	2	-2	0,2	-0,1
24		9S-30W	-5	0	-2	0,2	0
<b>IIIa</b>	32	8S-27W	-4	3	-3	0,1	-0,1
	36	10S-15W	-4	0	-1	0,1	-0,1
	37	6S-21W	-4	2	-1	0,1	-0,1
	43	11S-20W	-2	0	-2	0,1	-0,1
<b>IIIb</b>	12	13S-15W	-5	0,5	-1	0,1	-0,1
	19	14S-34W	-4	2	-2	0,1	0
<b>IIIc</b>	22	8S-21W	-4	0,5	-0,5	0,1	-0,1
	23	15S-12W	<-5	0,5	-2	0,2	0
	26	13S-48W	-5	0	-2	0,2	0
	35	11S-19W	-4	0,5	-0,5	0,1	-0,1
	40	10S-35W	-4	0,5	-2	0,1	0
<b>IIIId</b>	11	12S-20W	-3	0,5	-2	0,1	-0,1
	20	16S-11W	-3	0	-2	0,1	0

#### 4.9 Exemplos da estrutura e dos movimentos verticais de um subtipo de cada Tipo

Apresentou-se um exemplo de um subtipo de cada Tipo, selecionado por conta da sua maior quantidade de ocorrência entre os seus subtipos e pela melhor representatividade quanto a estrutura e os movimentos verticais dentro do seu subtipo em questão. Seguindo que a área que delimita a circulação ciclônica foi a base para a região de atuação do vórtice e por isso, para as análises das outras variáveis.

A Figura 22 apresentou o primeiro subtipo (CL a) do Tipo I para o dia 29 de junho às 18 UTC e 30 de junho de 2010 às 00 UTC. Na pré-formação (Figura 22 (a)) foi identificado um cavado em 700 hPa com a circulação ciclônica atingindo até  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e 6 horas depois a formação do centro do VCMN em 11S-20W (Figura 22 (b)) e uma leve intensificação da vorticidade próximo ao seu centro, esse caso teve uma duração de 12 horas e permaneceu no nível de formação até sua dissipação.

Na Figura 22 (c) foi observada convergência ( $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) em grande parte do cavado e divergência ( $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) em pontos isolados da sua extremidade, já quando o centro estava formado foi observada divergência na região central do vórtice e continuando com convergência (Figura 22 (d)) também. Quando observados os movimentos verticais, foram identificados movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) na região do cavado (Figura 22 (e)), no dia seguinte com a formação do centro do vórtice foi visto que a área com movimentos ascendentes diminuiu e havia presença de movimentos descendentes em grande parte do sistema (Figura 22 (f)).

**Figura 22** – Exemplos dos campos meteorológicos para os processos de formação do Tipo Ia: vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a, b), divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (c, d), velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) (e, f), e escoamento em 700 hPa para o dia 29/06 às 18 UTC e 30/06/2010 às 00 UTC. Coluna esquerda: pré-formação; coluna direita: VCMN formado. Linha tracejada: cavado. Seta: VCMN.

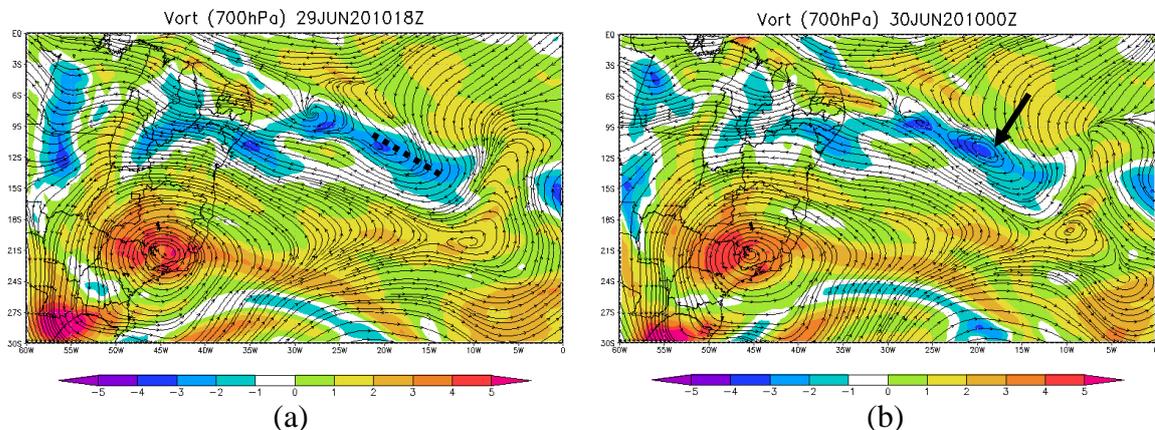
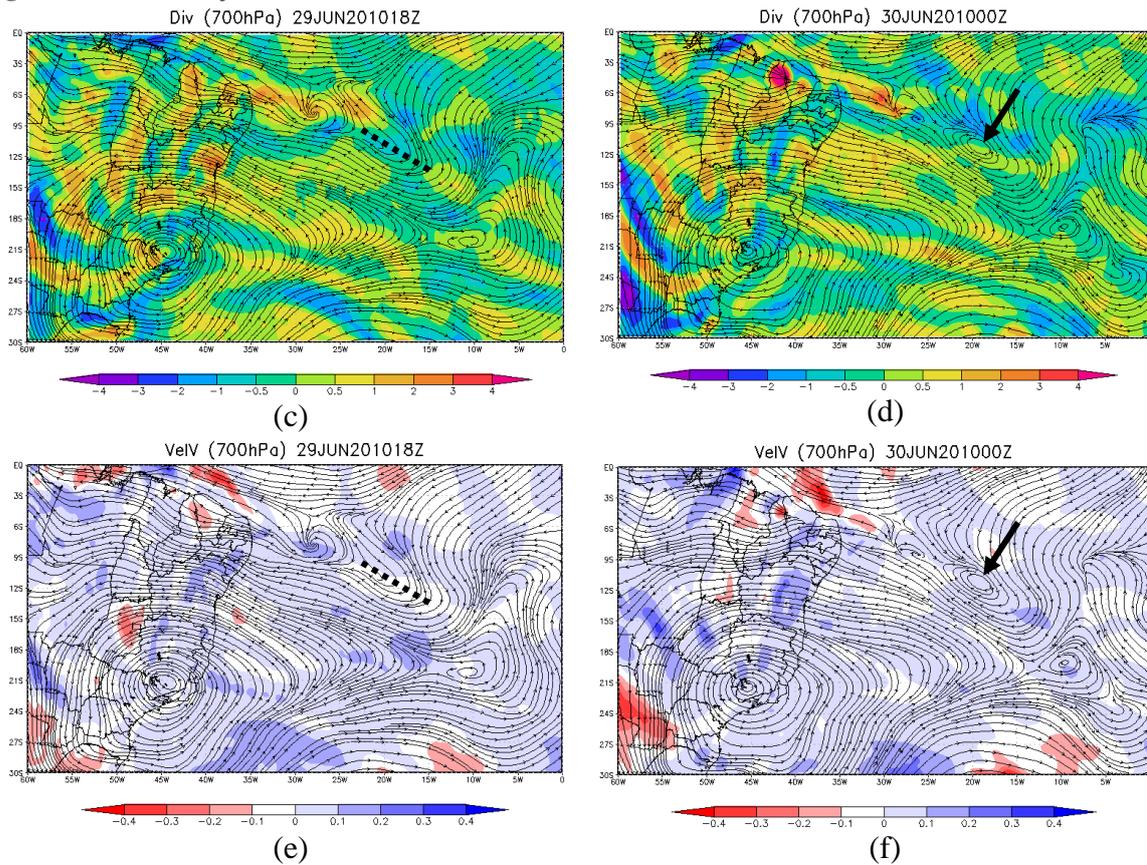


Figura 22 – Continuação.

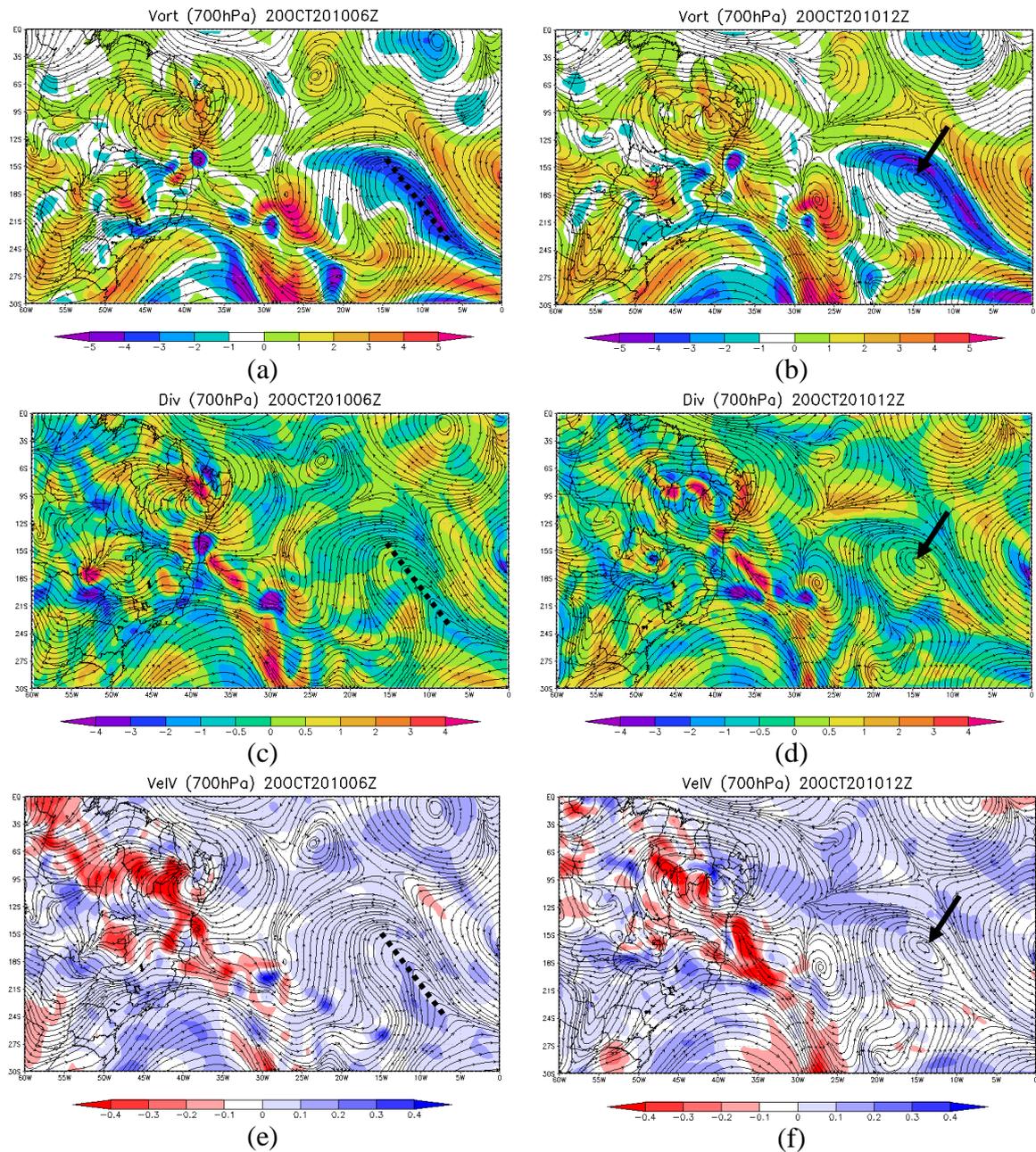


Fonte: Autora (2017).

Apresentou-se na Figura 23 o segundo subtipo (CO b) do Tipo II para o dia 20 de outubro de 2010 às 06 UTC e 12 UTC. Foi identificado um cavado em 700 hPa com a circulação ciclônica atingindo até  $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 23 (a)) e se mantendo até a formação do centro do VCMN em 16S-14W às 12 UTC (Figura 23 (b)). Esse caso apresentou uma duração de 54 horas e atingiu até 800 hPa.

O cavado apresentou convergência ( $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na maior parte da sua região de atuação e alguns pontos de divergência ( $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na sua retaguarda (Figura 23 (c)), 6 horas depois foi observado que havia divergência em uma área maior no vórtice, atingindo até  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e ainda com convergência (Figura 23 (d)). Os movimentos descendentes estavam em toda a região de atuação do cavado atingindo até  $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$  (Figura 23 (e)), às 12 UTC com o centro do vórtice formado foram observados movimentos ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) nas extremidades leste e oeste e descendentes ( $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) no restante de sua região de atuação (Figura 23 (f)).

**Figura 23** – Exemplos dos campos meteorológicos para os processos de formação do Tipo IIb: vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a, b), divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (c, d), velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) (e, f), e escoamento em 700 hPa para o dia 20/10/2010 às 06 UTC e 12 UTC. Coluna esquerda: pré-formação; coluna direita: VCMN formado. Linha tracejada: cavado. Setas: VCMN.

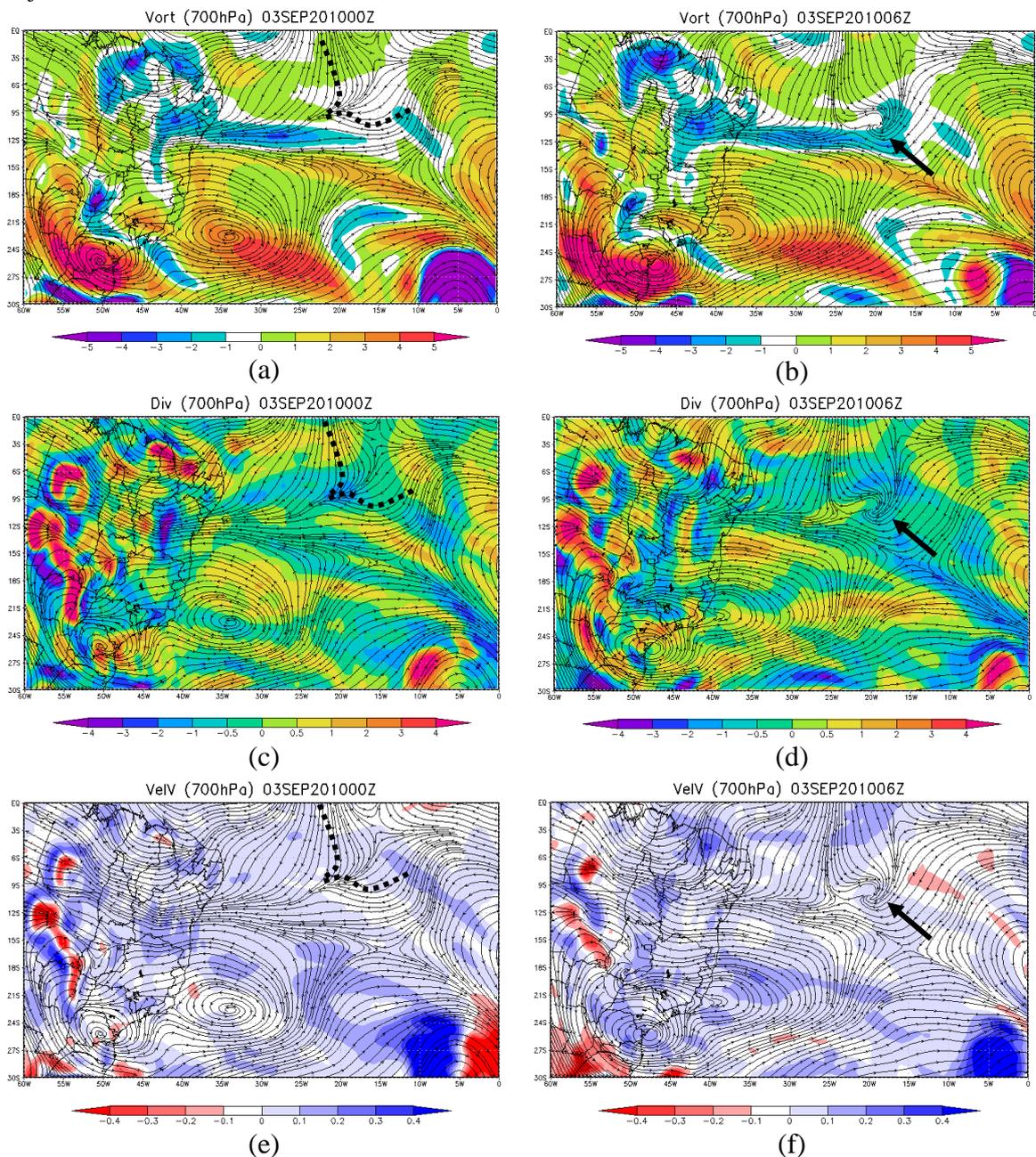


Fonte: Autora (2017).

O primeiro subtipo (Encontro COR HN e HS) do Tipo III foi analisado para o dia 03 de setembro de 2010 às 00 UTC e 06 UTC (Figura 24). Identificou-se o encontro das correntes no nível de 700 hPa, onde apresentou circulação ciclônica de  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 24 (a)). Após 6 horas foi identificada a formação do centro do VCMN em 11S-20W (Figura 24 (b)) com vorticidade até  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . O vórtice teve duração de 84 horas e atuou na camada de 800-600 hPa até sua dissipação.

Na Figura 24 (c) foi observada convergência ( $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região de encontro das correntes e também convergência mais fraca nas suas proximidades, no horário seguinte às 06 UTC (Figura 24 (d)), com o centro do vórtice formado, observou-se que continuava com o mesmo valor máximo de convergência na sua região de atuação. Na Figura 24 (e) foram observados movimentos ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) no local de encontro das correntes e 6 horas depois com centro formado, notou-se os mesmos valores de movimentos verticais, mas com ascendentes (Figura 24 (f)) na parte periférica do vórtice.

**Figura 24** – Exemplos dos campos meteorológicos para os processos de formação do Tipo IIIa: vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a, b), divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (c, d), velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) (e, f), e escoamento em 700 hPa para o dia 03/09/2010 às 00 UTC e 06 UTC. Coluna esquerda: pré-formação; coluna direita: VCMN formado. Linha tracejada: encontro das correntes. Seta: VCMN.



Fonte: Autora (2017).

#### 4.10 Estrutura e movimentos verticais do subtipo I (CL a)

Nessa parte se pretendeu encontrar os padrões das variáveis estudadas para o primeiro subtipo (CL a) do Tipo I, escolhido por apresentar o maior número de casos e algumas repetições significativas nas variáveis, onde as variáveis foram analisadas em cada caso isoladamente (diferente do item 4.8). Esse conteúdo também foi pretendido, principalmente, para auxiliar em trabalhos futuros para quando se pretender analisar um número maior de casos e padrões bem definidos.

Quanto à vorticidade (Tabela 9) foram identificados 11 casos com circulação ciclônica atingindo até  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  no momento da pré-formação do VCMN, já na formação do centro do vórtice foram observados 8 casos com  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e 5 casos com até  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Notou-se também que apenas 1 caso (na pré-formação e formação) apresentou vorticidade atingindo valores menores a  $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

**Tabela 9** – Quantificação da vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) correspondente a cada caso na pré-formação e formação do VCMN do Tipo Ia.

<b>Pré-formação</b>					
<b>Vorticidade</b>	-2	-3	-4	-5	< -5
<b>Nº de casos</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Formação</b>					
<b>Vorticidade</b>	-2	-3	-4	-5	< -5
<b>Nº de casos</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Fonte: Autora (2017).

Na Tabela 10 foram observados fracos valores de divergência, sendo assim 5 casos apresentando divergência até  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e convergência até  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  na região da pré-formação do vórtice. Foram identificados 3 casos com convergência atingindo até  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  na região de atuação do vórtice. Na formação foram verificados em destaque 4 casos apresentando convergência ( $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), em seguida, 3 casos com divergência até  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e convergência até  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , e por fim, 3 casos apresentando divergência ( $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região de atuação do VCMN.

**Tabela 10** – Quantificação da divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) correspondente a cada caso na pré-formação e formação do VCMN do Tipo Ia.

<b>Pré-formação</b>									
<b>Divergência</b>	2	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0	0
	-2	-2	-1	-0,5	-2	-1	-0,5	-2	-1
<b>Nº de casos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Formação</b>									
<b>Divergência</b>	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0		
	0	-1	-0,5	-2	-1	-0,5	-1		
<b>Nº de casos</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>		

Fonte: Autora (2017).

Quanto aos movimentos verticais (Tabela 11) foram identificados 9 casos com movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) na pré-formação, e também movimentos descendentes atingindo até  $0,1$  e  $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$  com 4 casos cada. No momento da formação do centro do VCMN, foram verificados 8 casos com movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ), e também movimentos descendentes atingindo até  $0,1$  e  $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$  em 7 e 2 casos, respectivamente.

**Tabela 11** – Quantificação da velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) correspondente a cada caso na pré-formação e formação do VCMN do Tipo Ia.

<b>Pré-formação</b>			
<b>Velocidade Vertical</b>	0,2	0,1	0,1
	0	0	-0,1
<b>Nº de casos</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>9</b>
<b>Formação</b>			
<b>Velocidade Vertical</b>	0,2	0,1	0,1
	0	0	-0,1
<b>Nº de casos</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>8</b>

Fonte: Autora (2017).

#### 4.11 Estudo de casos

Foram escolhidos dois casos da ocorrência do VCMN, onde seguiram os seguintes critérios:

1. Proximidade no Estado de Alagoas;
2. Precipitações em Alagoas;
3. Dois processos de formação diferentes.

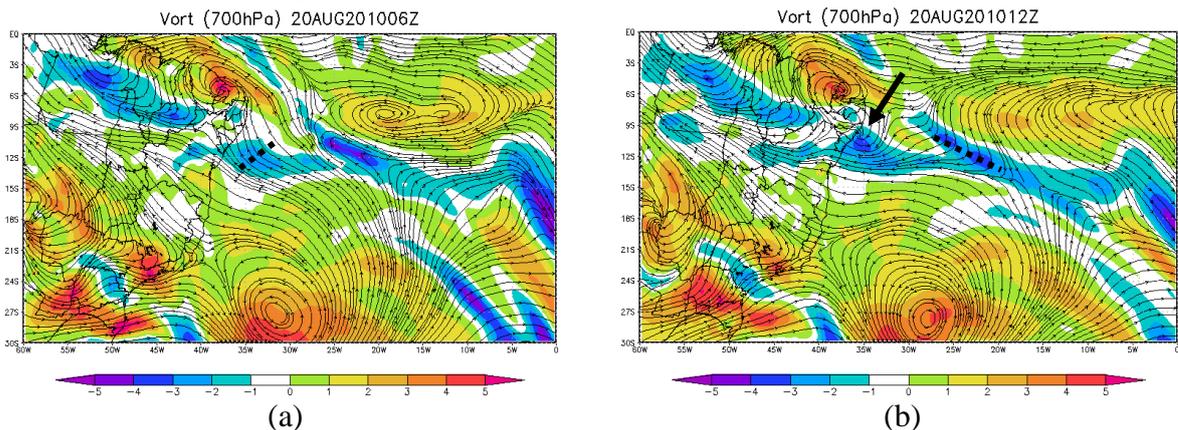
O caso 40 foi identificado no dia 20 de agosto às 12 UTC durando até o 21 de agosto de 2010 às 06 UTC e junto com ele foi observado o caso 41 que se iniciou no dia 20 de agosto às 18 UTC e foi até 22 de agosto de 2010 às 00 UTC. As observações foram divididas pela pré-formação, formação e intensificação e dissipação do vórtice.

#### 4.11.1 Pré/Formação do caso 40 e Pré-formação do caso 41

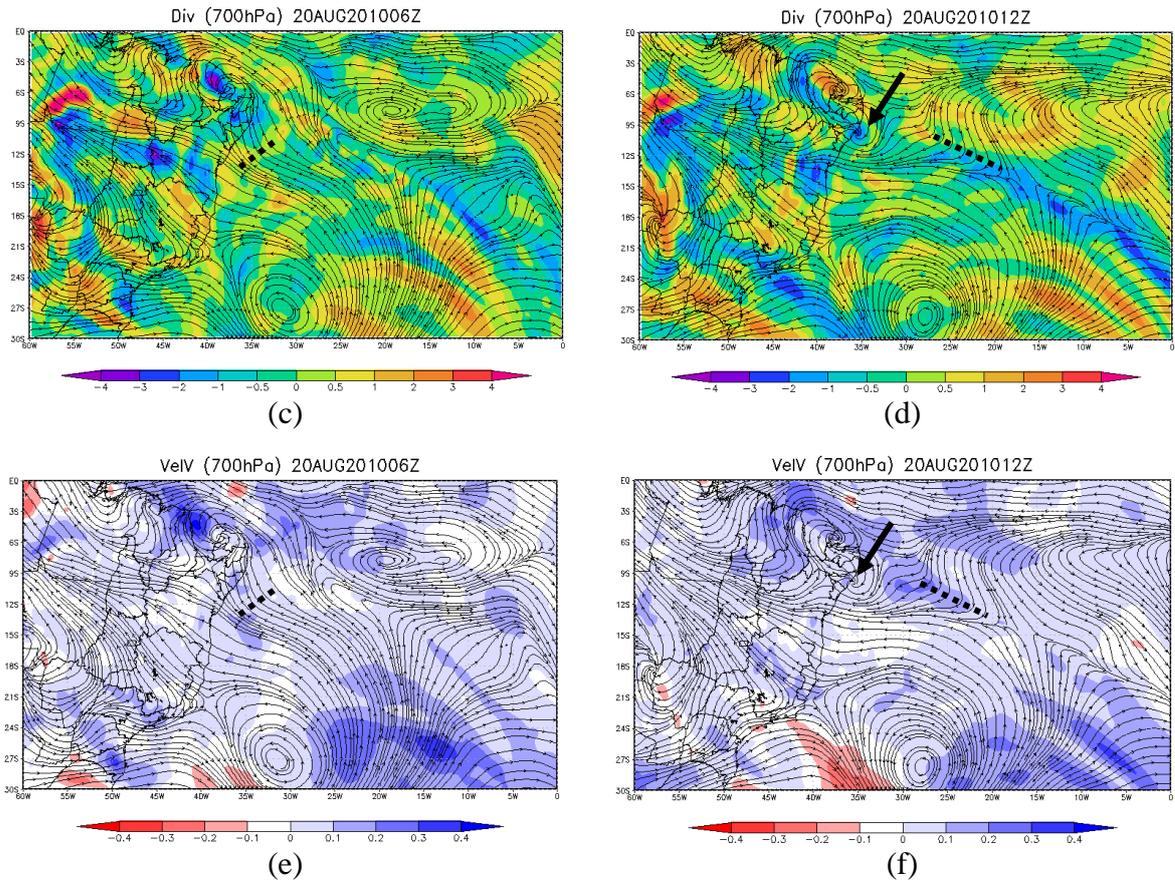
Foi observada a pré/formação do caso 40, assim como a pré-formação do caso 41 (Figura 25). Identificou-se um cavado na Corrente Meridional de Sul (COR M S) (caso 40) em 700 hPa às 06 UTC no dia 20 de agosto de 2010 (Figura 25 (a), (c) e (e)), onde apresentou circulação ciclônica atingindo  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 25 (a)). Verificou-se divergência ( $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e convergência ( $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região do cavado (Figura 25 (c)), juntamente com movimentos descendentes ( $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) (Figura 25 (e)).

Após 6 horas foi identificado o centro do vórtice em 10S-35W (Figura 25 (b), (d) e (f)). O VCMN (caso 40) apresentou circulação ciclônica de até  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 25 (b)), nesse momento também foi observada a pré-formação do vórtice do caso 41, com a presença do cavado na Corrente de Leste (CL a) e com valores de vorticidade de até  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  no seu eixo. Na Figura 25 (d) foi observada divergência ( $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região periférica do vórtice e convergência de até  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  no centro, já no cavado do caso 41 foi identificada divergência ( $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e convergência ( $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região do seu eixo. Quanto aos movimentos verticais, foram verificados movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) na região do VCMN, e também no cavado ( $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) do caso 41 (Figura 25 (f)).

**Figura 25** – Campos meteorológicos para a pré/formação (caso 40) e pré-formação (caso 41) do VCMN: vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a, b), divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (c, d), velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) (e, f), e escoamento em 700 hPa para o dia 20/08/2010 às 06 UTC e 12 UTC. Coluna esquerda: pré-formação (caso 40); coluna direita: VCMN formado (caso 40) e pré-formação (caso 41). Linha tracejada: cavado. Seta: VCMN.



**Figura 25 – Continuação.**



Fonte: Autora (2017).

#### 4.11.2 Intensificação/dissipação do caso 40 e Formação do caso 41

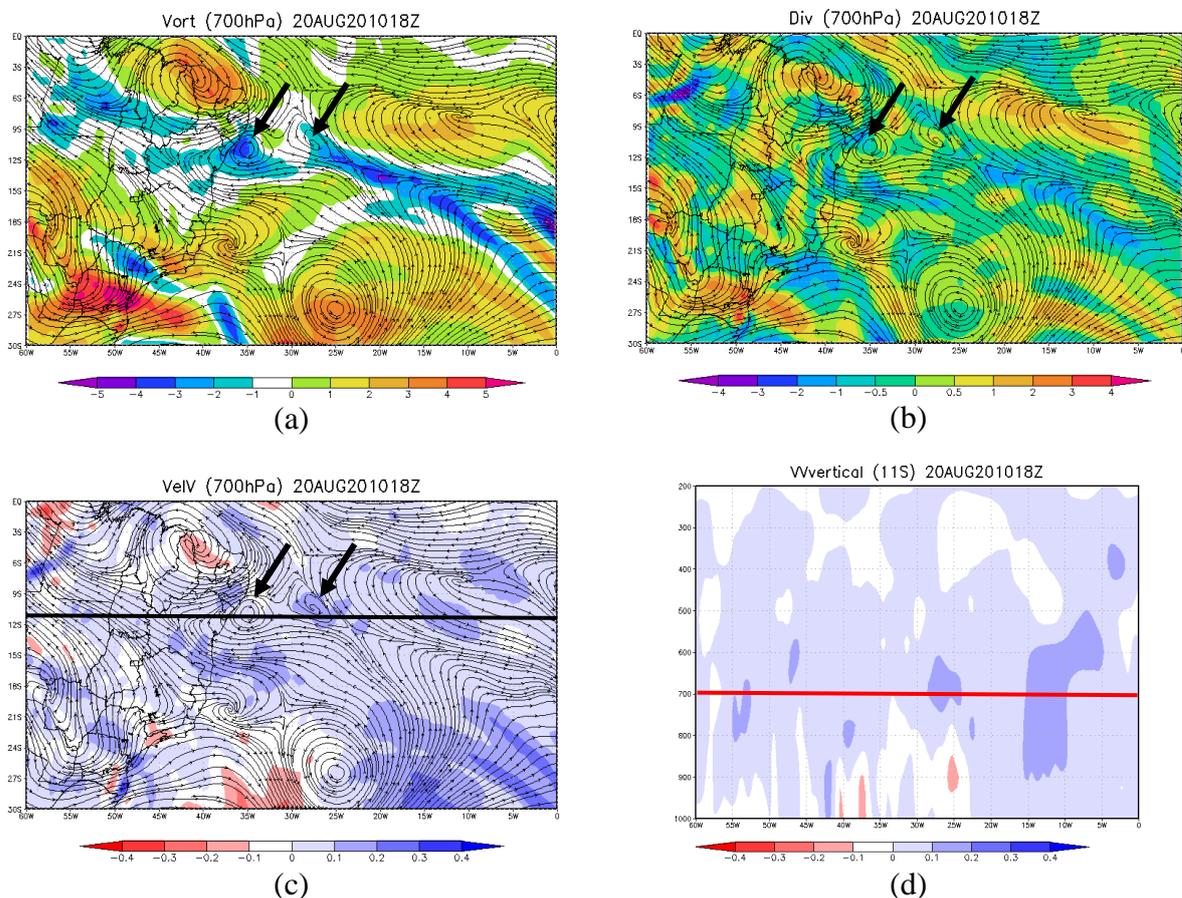
Na Figura 26 foi observada a intensificação do caso 40 e a formação do centro do VCMN do caso 41. Após 6 horas, foi visto que o centro do caso 40 ficou mais definido ( $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e a formação do centro do caso 41 apresentou circulação ciclônica de até  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 26 (a)). Verificou-se convergência ( $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região periférica do vórtice (caso 40), e também divergência ( $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e convergência ( $-0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) mais fraca próxima ao centro, assim também foi observado para o caso 41 (Figura 26 (b)).

Os movimentos verticais foram observados no nível do vórtice e a partir de um corte que incidia no centro dos VCMNs na latitude de 11S. Foram identificados movimentos descendentes (atingiu até  $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) em toda região de atuação de ambos os vórtices (11S-35W e 11S-28W) no nível de 700 hPa (Figura 26 (c)), mas notou-se que no centro do VCMN do caso 41 haviam movimentos descendentes maiores ( $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) no centro do que na periferia. Na Figura 26 (d) foram verificados movimentos descendentes na região do centro do vórtice, já abaixo dele foi visto movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) no momento de intensificação do VCMN do caso 40. Pôde-se observar também no

momento da formação do caso 41, que ele apresentou as mesmas características, mas sendo mais pronunciada, com movimentos descendentes no centro de  $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ .

O vórtice do caso 40 se dissipou no dia 21 de agosto de 2010 às 06 UTC, atuou no mesmo nível de formação durante as 18 horas de sua atuação. No momento da sua dissipação apresentou circulação ciclônica de até  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , com divergência ( $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e convergência ( $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região do cavado, e também, movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ).

**Figura 26** – Campos meteorológicos para a intensificação (caso 40) e formação (caso 41): vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a), divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (b), velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) (c), seção vertical de velocidade vertical em 11S (d) e escoamento em 700 hPa para o dia 20/08/2010 às 18 UTC. Seta: VCMN. Linha preta: seção de corte da latitude. Linha vermelha: seção do nível do VCMN.



Fonte: Autora (2017).

#### 4.11.3 Intensificação/dissipação, nebulosidade e precipitações do caso 41

Na Figura 27 foi observado o momento de intensificação do VCMN do caso 41. Às 06 UTC do dia 21 de agosto de 2010 foi verificada circulação ciclônica de até  $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 27 (a)), acompanhada de divergência ( $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e convergência ( $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (Figura 27 (b)), sendo apresentada convergência maior na parte leste do vórtice. No nível do VCMN foram

identificados movimentos descendentes ( $0,3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) no centro e em grande parte do vórtice, já a periferia leste apresentou movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) (Figura 27 (c)).

Os movimentos verticais observados na seção vertical da latitude de 8S (Figura 27 (d)) foram correspondentes ao mais próximo do centro do VCMN, em 10S (Figura 27 (e)) também foi realizado um corte que passava sobre o vórtice e o Estado de Alagoas. Observou-se que entre 27-32W (Figura 27 (d)) foi aproximadamente a localização do centro do vórtice, onde foram verificados movimentos descendentes ( $0,3 \text{ Pa s}^{-1}$ ), sendo que abaixo dele foram vistos movimentos descendentes ( $0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ).

Na seção vertical em 10S foram identificados movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) na região ao sul do centro do vórtice e atingiu até baixos níveis, já na periferia oeste (sobre o estado de Alagoas) foram observados movimentos ascendentes ( $-0,3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e na periferia leste também, mas atingiu até  $-0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ .

O vórtice do caso 41 se dissipou no dia 22 de agosto de 2010 às 00 UTC, atuou na camada de 700-600 hPa durante as 30 horas de sua atuação. Na sua dissipação apresentou circulação ciclônica de até  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , com divergência ( $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) na região do cavado, e também, movimentos descendentes ( $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ ) e ascendentes ( $-0,2 \text{ Pa s}^{-1}$ ).

**Figura 27** – Campos meteorológicos para a intensificação (caso 41): vorticidade ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a), divergência ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (b), velocidade vertical ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) (c), seção vertical de velocidade vertical em 8S (d) e 10S (e), e também escoamento em 700 hPa para o dia 21/08/2010 às 06 UTC. Seta: VCMN. Linha preta: seção de corte da latitude. Linha vermelha: seção do nível do VCMN.

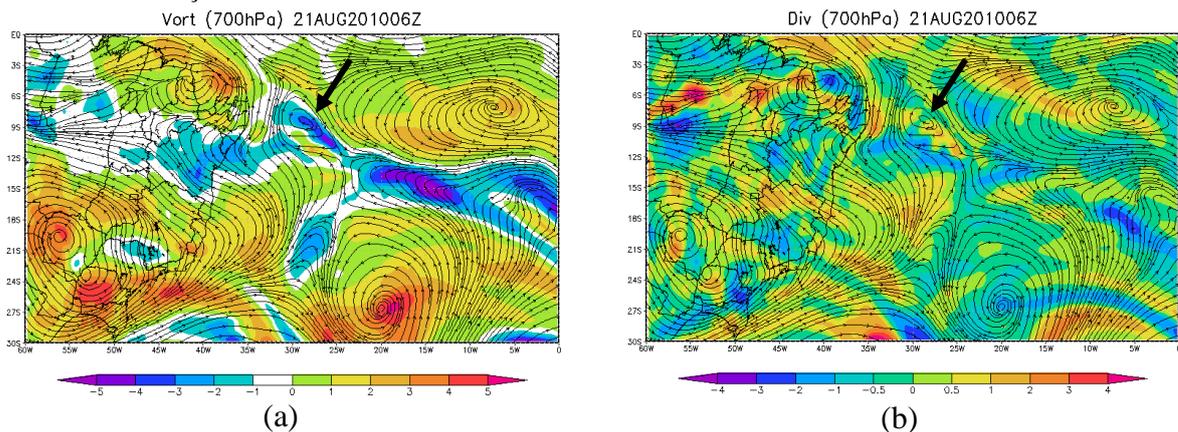
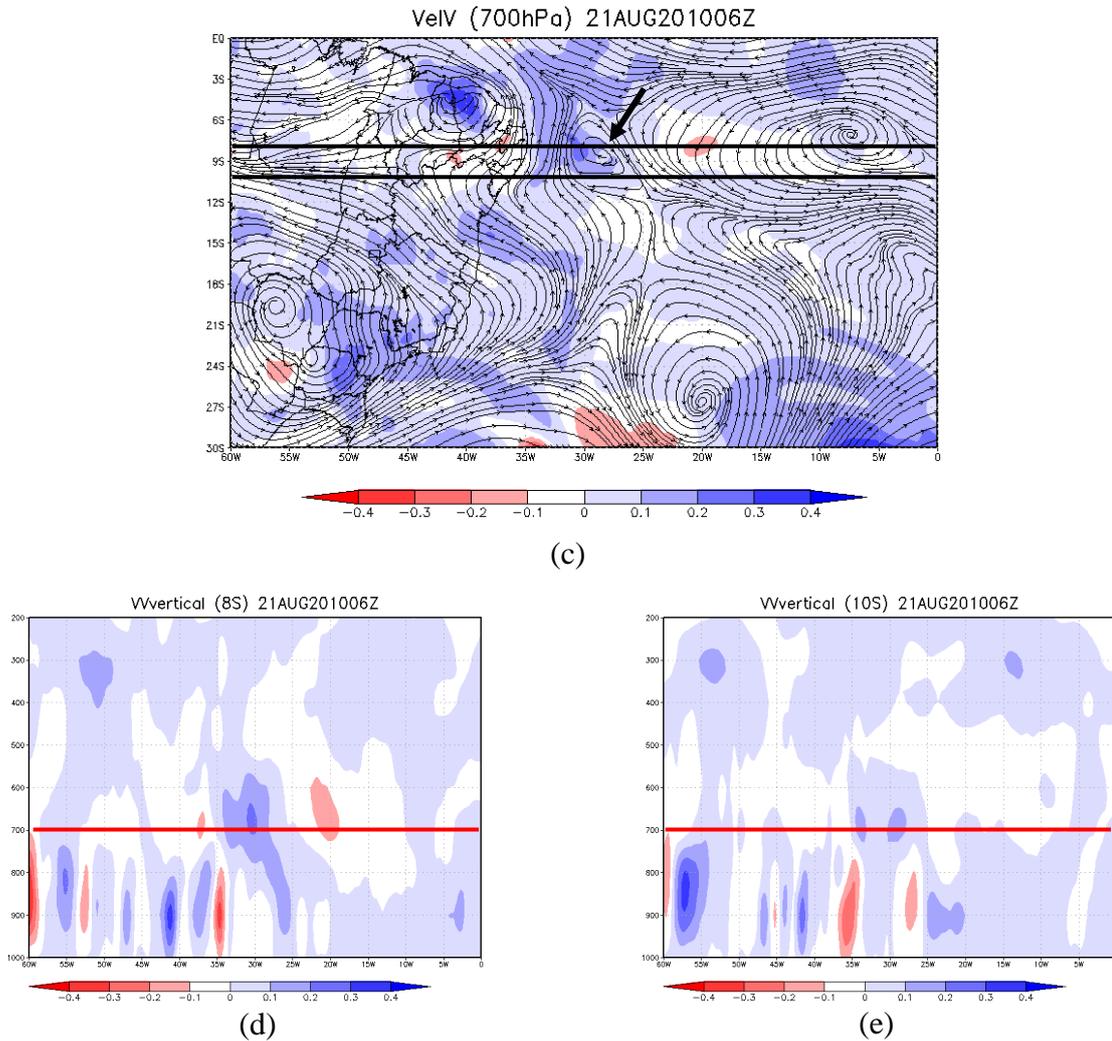


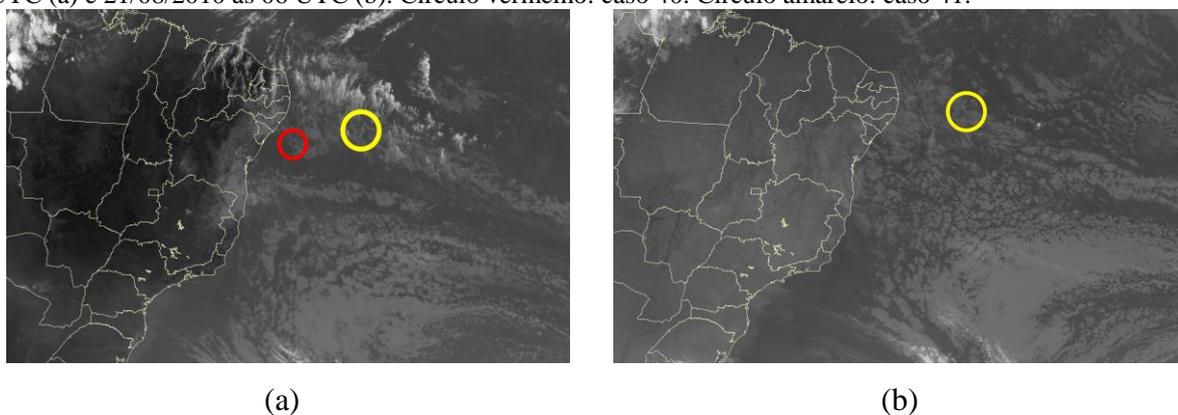
Figura 27 – Continuação.



Fonte: Autora (2017).

Quanto à nebulosidade associada ao VCMN, observou-se que às 18 UTC do dia 20 de agosto de 2010 (Figura 28 (a)) estavam os dois vórtices atuando, assim, pôde ser verificada fraca nebulosidade na sua região de atuação, com nuvens de baixos níveis e pouca nebulosidade na região do centro dos sistemas. No dia 21 de agosto de 2010 às 06 UTC (Figura 28 (b)) foi possível notar também nuvens de baixos níveis, ou seja stratocumulus, na região de atuação do VCMN (caso 41) no momento da intensificação, como certificado com os movimentos verticais visto na Figura 27 (d) e (e).

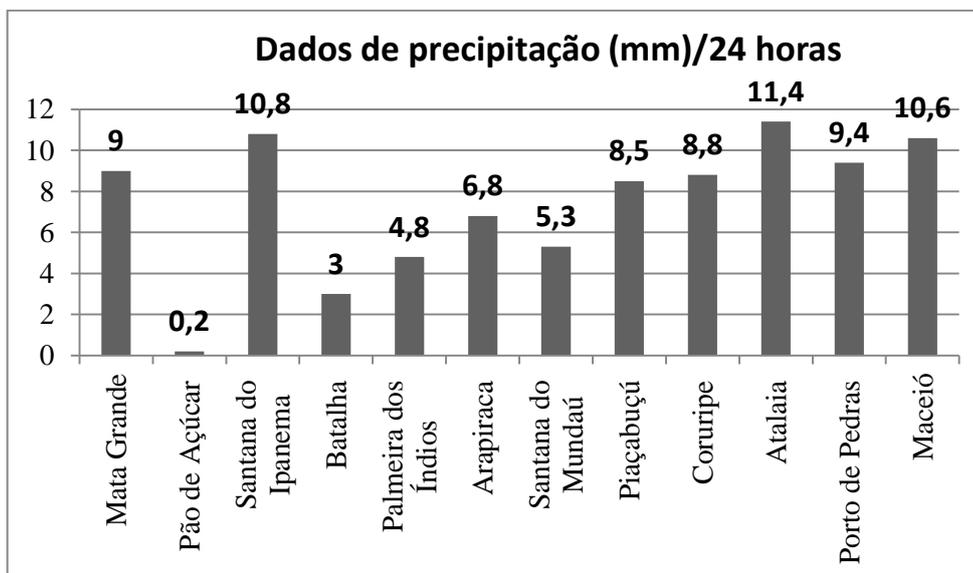
**Figura 28** – Nebulosidade, através dos Satélites Goes+Meteosat, associada ao VCMN: dia 20/08/2010 às 18 UTC (a) e 21/08/2010 às 06 UTC (b). Círculo vermelho: caso 40. Círculo amarelo: caso 41.



Fonte: CPTEC (2017).

Por fim, foram avaliadas as precipitações para os 12 postos distribuídos no Estado de Alagoas no dia 21 de agosto de 2010, notou-se no Gráfico 4 que no município de Atalaia foi registrado um máximo de 11,4 mm/ 24 h, seguido por Santana do Ipanema com 10,8 mm/ 24 h e Maceió com 10,6 mm/ 24 h. Os menores registros de precipitações foram no município de Pão de Açúcar com 0,2 mm/ 24 h e em Batalha com 3 mm/ 24 h.

**Gráfico 4** – Dados de precipitações (mm) durante 24 horas para 12 municípios de Alagoas no dia 21 de agosto de 2010.



Fonte: Autora (2017).

## 5 CONCLUSÃO

Partindo do fato de que há poucos estudos sobre a média troposfera quando se destaca, especificamente, a formação dos vórtices nessa camada, notou-se a importância que esse trabalho teve ao analisar os processos de formação do vórtice que estava presente apenas em médios níveis (700-400 hPa). Sendo assim, foram identificados e analisados 62 casos da ocorrência de VCMN durante o ano de 2010.

Fez-se possível destacar algumas considerações relevantes quanto aos VCMNs. Quanto a distribuição espacial, verificou-se que 35 casos se formaram sobre o Oceano Atlântico e que dos casos que se formaram e atingiram o continente totalizaram 27 casos, mostrando assim a relevância do sistema para ambos os locais de atuação. Três pontos (a duração, os níveis preferenciais de formação e de atuação dos VCMNs) que foram verificados com os dados do NCEP/NCAR com a resolução de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (FEDOROVA et al., 2016) puderam ser confirmados com os dados do ECMWF com a resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . A duração dos vórtices os destaca como um sistema de curto prazo para a previsão do tempo, onde foram observados 19 casos com duração entre 12-24 horas e 15 casos de VCMN para o período de 30-42 horas durante seu tempo de vida. Na estatística da preferência dos níveis de formação e atuação desse sistema, destacou-se que na formação do VCMN foi observado um percentual de 54,8% (34 casos) dos vórtices no nível de 700 hPa, já a camada de atuação mais frequente apresentou um percentual de 29% (18 casos) dos VCMNs presentes entre 700-600 hPa e um percentual de 19% atuando apenas no nível de 700 hPa (12 casos) durante seu tempo de vida.

Foram especificados três tipos de processos de formação: no cavado na Corrente de Leste (Tipo I), na Corrente de Oeste (Tipo II) e nas correntes dos dois hemisférios e na meridional (Tipo III). Foram determinados dez subtipos dentro dos três tipos de processos de formação dos VCMNs. Pôde-se destacar um subtipo mais frequente de cada tipo, onde no Tipo I se ressalta o primeiro subtipo (CL a – cavado na Corrente de leste com eixo de noroeste para sudeste) que apresentou 17 casos da sua ocorrência. Já no Tipo II, destaca-se o segundo subtipo (CO b – cavado na Corrente de Oeste com eixo de sudeste para noroeste), onde foram observados 13 casos de VCMN. No Tipo III que apresentou processos de formações através das correntes dos dois hemisférios e a meridional, evidencia-se dois subtipos com 5 casos de ocorrência do vórtice cada, sendo eles o primeiro subtipo (Encontro COR HN e HS - Encontro das Correntes do Hemisfério Norte e Sul) e o terceiro subtipo (COR M S - cavado na Corrente Meridional de Sul).

Na avaliação da estrutura e dos movimentos verticais no momento da pré-formação e da formação dos VCMNs foram observados alguns valores frequentes significativos dessas variáveis. Na pré-formação, a vorticidade apresentou valores de  $-3 \times 10^{-5}$  e  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  presentes em 31 e 14 casos, respectivamente, admitindo valores consideráveis de vorticidade para o sistema. Foram verificados valores de divergência e convergência fracos para todos os casos, ressaltando que 16 casos apresentaram apenas convergência e 2 casos com divergência nesse primeiro momento. Os movimentos verticais foram fracos em todos os casos, destacando que 32 casos apresentaram movimentos descendentes e 1 caso com movimentos ascendentes na pré-formação do vórtice.

No momento da formação do centro do VCMN, foram identificados valores mais frequentes de vorticidade de  $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  presentes em 16 casos e de  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  em 25 casos. Os valores de divergência e convergência não se alteraram tão significativamente 6 horas depois da pré-formação, observando que 20 casos apresentaram o valor de divergência de  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e 25 casos com valor de convergência de  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Foram verificados movimentos descendentes em 26 casos e ascendentes em apenas 1 caso em toda região de atuação do vórtice, sendo assim, notou-se que 35 casos apresentaram movimentos descendentes e ascendentes durante a formação do centro do vórtice.

No estudo de caso foram observados dois vórtices atuando sobre o Estado de Alagoas, onde foram identificados movimentos ascendentes abaixo do segundo vórtice estudado na região da periferia leste e oeste do VCMN no momento da intensificação. Foram observadas nuvens de baixos níveis relacionadas ao VCMN e uma precipitação máxima de 11,4 mm/ 24 h no município de Atalaia. Com isso, pôde-se acentuar a relevância desses resultados para a previsão do tempo de curto prazo e a necessidade de mais estudos sobre os VCMNs.

## REFERÊNCIAS

AHRENS, C. R. **Essentials of Meteorology – An Invitation to the Atmosphere**. 3rd ed. CA, USA: Brooks/Cole, Pacific Grove, 2000.

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

ARAGÃO, J. O. **Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1975.

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI I. F. A. Climatologia dos Sistemas Frontais e Padrões de Comportamento Para o Verão na América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza. **Anais...**, 2004.

BASTOS, C.C; FERREIRA, N. J. Análise Climatológica Da Alta Subtropical Do Atlântico Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., Rio de Janeiro, 2000. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000.

CARVALHO, A. M. G.. **Conexões entre a circulação em altitude e a convecção sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, SP, 1989.

CAVALCANTI, I. F. A. (Org.); FERREIRA, N. J. (Org.); DIAS, M. A. S. (Org.); SILVA, M. G. A. J. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 11. ed. São Paulo: Oficina de Textos. v. 1, 2009.

COELHO-ZANOTTI, M. S. S.; GAN, M. A.; CONFORTE, J. C. Estudo Da Variabilidade Da Posição E Da Nebulosidade Associada À ZCIT do Atlântico, Durante a Estação Chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, 2004. p 23-34.

COSTA, M. S. **Vórtice Ciclônico dos Altos Níveis associado à Corrente de Jato no Nordeste Brasileiro nos Anos De 1998 - 2007**. 2010. 103 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

COUTINHO, E.C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do centro de lançamento de Alcântara-MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 22, n. 2, 2007. p. 193-203.

COUTINHO, M. D. L. **Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região tropical sul: validação e climatologia**. 2008. 119 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

DA CRUZ, C. D. **Determinação sinótica dos fatores que favorecem as influências frontais sobre Estado de Alagoas**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade federal de Alagoas, Maceió. 2008.

DA CRUZ, C. D.; et al. Utilização do Campo de Advecção de Temperatura Potencial Equivalente para Análise de um Sistema Frontal na Região Tropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, São Paulo. **Anais...**, 2008.

DEAN, G. A. **Three dimensional wind structure over South America and associated rainfall over Brazil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1971.

DE MARIA, M. Linear response of a stratified tropical atmosphere to convective forcing. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 42, 1985. p. 1944–1959.

DOTY, B. **The Grid Analysis and Display System**. V1.5.1.12. Colorado, 1995. 148 p. Tradução de José Fernando Pesquero. São Paulo: CPTEC/INPE, 1999. 144 p.

ESPINOZA, E. S. **Distúrbios nos Ventos de Leste no Atlântico Tropical**. 1996. 149f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, 1996.

FEDOROVA, N. **Meteorologia sinótica**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. Editora Universitária, v.1, 1999. 259p.

FEDOROVA, N., CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas Frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 15, n.2, 2000. p. 57-72.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica**. Volume 2. 1. Ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária- UFPel, 2001. 242p.

FEDOROVA, N., et al. 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...** Fortaleza, 2004, CD-ROM.

FEDOROVA, N., et al. Frontal Zone on the North-East of Brazil. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO), 8. Foz do Iguaçu. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 1765-1768. CD-ROM.

FEDOROVA, N. **Sinótica IV: Sistemas e processos sinóticos atuantes na América do Sul. Material didático: sinopses, figuras, equações** Maceió: Ed. Universitária/ UFAL, 2008. 192p.

FEDOROVA, N., et al. Middle Tropospheric Cyclonic Vortex in Northeastern Brazil and the Tropical Atlantic. **Pure Appl. Geophys**, v. 173, 2016. p. 1-15.

FERREIRA, N. J. **Alta da Bolívia**. IV Curso de Interpretação de Imagens e Análises Meteorológica, São José dos Campos, 1995. 18p.

FERREIRA, N. S. Zona de Convergência Intertropical. Climanálise. In: Climanálise (Org). **Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Edição Especial de 10 anos**. MCT/INPE. Cachoeira Paulista, SP. 1996. 235 p.

FIGUEIROA, N. F.; SATYAMURTY, P.; SILVA DIAS, P. L. Simulations of the summer circulation over the South American region with an eta coordinate model. **J. Atmos. Sci.**, 52, 1995. p 1573-1584.

FRANK, N. L. The weather distribution with upper tropospheric cold lows in the Tropics. 1966. U. S. Weather Bureau, Southern Region. **Technical memorandum**, n. 28, 1966.

GAN, M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico sul e leste do Brasil**. 80f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 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, 1986. p. 19-28.

GAN, M. A. **In: III Curso de Interpretação de Imagens e Análise Meteorológica**. Universidade do Vale do Paraíba, Capítulo B5, 1-12, 4 a 8 de outubro 1993.

GOMES, H. B. **Distúrbios Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro: Climatologia e Modelagem Numérica**. 99f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GOOGLE MAPS, 2017. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/@-9.6134685,-36.5468326,9z>> Acesso em: 11 jan. 2017.

HASTENRATH, S. Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic. **Mon. Wea. Rev.**, 112, 1984. p 1097-1107.

HASTENRATH, S. Climate dynamics of the tropics. Updated ed. from Climate and Circulation of the Tropics. **Kluwer Academic Publishers**, 1991. 488p.

HOLTON, J. R. **Introduction to dynamic meteorology**. 3<sup>o</sup> Ed. San Diego, CA. Academic. International Geophysics series, v. 48, 1992. 511p.

KOUSKY, V. E., GAN, M. A., Upper tropospheric cyclonic vortices in the Tropical South Atlantic. **Tellus**, 33, 1981. p. 538-551.

LENTERS, J. D.; COOK, K. H. On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 54, 1997. p. 656-677.

LICHTENSTEIN, E. Some influences of Andes Cordillera on the synoptic scale circulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 3., Buenos Aires, Argentina, 1989. **Proceedings...** Buenos Aires: American Meteorology Society, 1989. p.146-148.

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

MORAIS, M. D. C. **Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam no nordeste do Brasil: estudo observacional e numérico.** 2016. Tese (Doutorado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2016.

MELO, A. B. C.; et al. A Zona de Convergência Intertropical sobre o Oceano Atlântico: Climatologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., Foz de Iguaçu-PR, 2002. **Anais...** Paraná: SBMET, 2002.

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

PAIXÃO, E. B.; GANDU, A. W. Caracterização do vórtice ciclônico de ar superior sobre o Nordeste do Brasil (Parte I). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., Rio de Janeiro, 2000. **Anais eletrônicos...** p. 3422 - 3428. 1 CD – ROM.

PALMÉN, E., NEWTON, C. W. **Atmospheric circulation systems.** New York: Academic Press, 1969. 603p.

PONTES DA SILVA, B. F.; et al. 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, 15., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008.

PONTES DA SILVA, B. F. **Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no estado de Alagoas.** 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

PONTES DA SILVA, B. F. **Contribuição dos Distúrbios Ondulatórios de Leste para a Chuva no Leste do Nordeste do Brasil: Evolução Sinótica Média e Simulações Numéricas.** 2011. 123f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PONTES DA SILVA, B. F., et al. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 26, 2011. p. 295-310.

RAMIREZ, M. C. V. **Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil.** 132p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 1996.

RAMÍREZ, M. C. V., KAYANO, M. T., FERREIRA, N. J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of Northeast Brazil during the 1980-1989. **Revista Atmosfera**, v. 12, 1999. p. 75-88.

REBOITA M. S.; et al. South Atlantic Ocean Cyclogenesis Climatology Simulated by Regional Climate Model (RegCM3). **Climate Dynamics**, 35 (7-8), 2010. p. 1331-1347.

RIEHL, H. **Climate and weather in the tropics**. London, New York, San Francisco: Academic Press, 1979. 611p.

SANTOS, D. M. B. **Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN): Uma análise de frequência e estrutura**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

SANTOS, L. A. **Acurácia do modelo regional ETA utilizado no CPTEC/INPE em detectar os vórtices ciclônicos de altos níveis atuantes no Nordeste do Brasil**. 2015. 99 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

SATYAMURTY, P. **Rudimentos de Meteorologia Dinâmica**. São José dos Campos, INPE, 2004. 143 p.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. South America, In: **Meteorology of Southern Hemisphere**. Karoly DJ, Vincent DG (ed.). Boston: American Meteorological Society, 1998. p. 119-139.

SECHRIST, F.S.; WHITTAKER, T.M. Evidence of jet stream vertical circulations. **Monthly Weather Review**, v. 107, 1979. p. 1014-1021.

SELUCHI M. E.; MARENGO, J. A. Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climatic aspects and examples of intense events. **International Journal Of Climatology**, v.20, n.10, 2000. p.1167-1190.

SELUCHI, M. E.; et al. 2003. The Northwestern Argentinean Low: A Study of Two Typical Events. **Monthly Weather Review**, v. 131, 2361-2378.

SELUCHI, M. E; SAULO, A. C. Baixa Do Noroeste Argentino e Baixa Do Chaco: Características, diferenças e semelhanças. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, 2012. p. 49 – 60.

SIGNORINI, E. , **Processos sinóticos associados com a intensificação da extremidade da frente fria no sul do Brasil**. 2001. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – UFPel, Pelotas, 2001.

SILVA, T. G.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Influências dos Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis no tempo de Alagoas. In: - Congresso Brasileiro de Meteorologia, 18, Recife, 2014. **Anais...** SBMET: Recife, 2014.

SILVA, T. G. **Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis: estrutura, processos de formação e tempo associado**. 2015. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

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

SINHORI, N. P. **Modificação da estrutura vertical das frentes frias no Nordeste Brasileiro, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2012.** 2015. 173f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: Fundamentos e Aplicações Brasileiras.** 1. ed. São Paulo: Nobel, 1980. 374p.

VAREJAO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia Versão Digital 1.** Recife, 2005. 522p.

VASQUEZ, T. **Weather Forecasting Handbook.** Garland: Weather Graphics Technologies, 2000. 98 p.

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

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e aplicações.** Viçosa: Editora UFV. Universidade Federal de Viçosa, 2000. 450p.

XAVIER, T. M. B. S; et al. A Zona de Convergência Intertropical - ZCIT e suas relações com a chuva no Ceará (1964-98). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 1, 2000. p. 27-43.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V. B. Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 55, 1977. p. 205-207.