



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

GOMES ANTONIO MUANZA

**PADRÕES DE CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICO ASSOCIADOS Á LIGAÇÃO DA  
EXTREMIDADE FRONTAL COM A ZCIT.**

MACEIÓ, AL

2018

GOMES ANTONIO MUANZA

**PADRÕES DE CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICO ASSOCIADOS Á LIGAÇÃO DA  
EXTREMIDADE FRONTAL COM A ZCIT.**

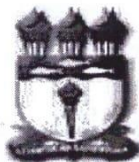
Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia no Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Natalia Fedorova

Coorientador: Prof. Dr. Vladimir Levit

MACEIÓ, AL

2018



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

**CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO**

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-158.

*“PADRÕES DE CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICO ASSOCIADOS À LIGAÇÃO DA  
EXTREMIDADE FRONTAL COM A ZCIT.”*

**GOMES ANTONIO MUANZA**

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. Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim  
(Membro Interno)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sandro Correia de Holanda  
(Membro Externo)

**Dezembro /2018**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais: Antonio Muanza e Isabel Nkumba Moni. A toda minha família, em especial aos meus irmãos. Também aos meus professores e orientadores: Natalia Fedorova e Vladimir Levit.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade que me concede a cada dia da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Antonio Muanza e Isabel Nkumba Moni, aos meus irmãos e a toda família que com muito carinho e apoio não mediram esforços e depositaram confiança para que eu chegasse até a esta etapa da minha vida.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INAMET), pela oportunidade e apoio durante a formação.

A professora Natalia Fedorova e ao professor Vladimir Levit, pela paciência na orientação e incentivo no geral, que tornaram possível o término deste trabalho.

Ao colega João Maria de Sousa Afonso pela ajuda na aquisição de dados, pelo apoio técnico e sugestões.

Aos colegas Isidro Metódio Tuleni e Randy Quindai João, pelo incentivo e sugestões.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela viabilização deste trabalho, na colaboração.

## RESUMO

Esta pesquisa trata de aspectos meteorológicos produtores de precipitações intensas na região do Nordeste do Brasil (NEB), mas especificamente sobre entradas de frentes frias para o norte do NEB entre 2008 a 2017. O objetivo da pesquisa é 1) a identificação da estrutura de sistemas frontais que possuem ligação com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no NEB, 2) elaboração de um padrão de circulação atmosférica e 3) análise de fenômenos associados. O uso das imagens de satélite em conjunto com os campos da advecção de temperatura potencial equivalente e a vorticidade relativa contribuíram para a identificação de sistemas frontais no NEB. Foram registradas 27 frentes frias na base de dados do climanálise e por bandas de nebulosidade ao longo de 10 anos (2008-2017). 5 casos mostraram ligação com a ZCIT. A análise sinótica da estrutura da troposfera mostrou diferenças entre casos de frente com ligação com a ZCIT e casos sem essa ligação. Nos casos com ligação foi observada em altos níveis (200 hPa) uma circulação anticiclônica na região do NEB e a posição da corrente de jato subtropical ao sul da América do Sul (entre 16°S a 25°S ). Nos casos sem ligação foi observada uma circulação ciclônica em altos níveis (200 hPa) na região do NEB e influência da corrente de jato subtropical na região do NEB. A análise de fenômenos adversos na região do NEB registrou a ocorrência de nevoa úmida e chuva forte em todos os casos com ligação. O caso ocorrido entre os dias 20 a 28/05/2017 registrou deslizamentos de terra, causando 4 mortos em Maceió. Bens materiais foram destruídos pelas inundações e deslizamentos de terra, segundo a defesa civil do estado de Alagoas. Padrões de troposfera foram desenvolvidos para determinar se a zona frontal está associada ou não à ITCZ. Este *União ocorre* quando; a) posição da corrente de jato subtropical aproximadamente no sudoeste do Brasil, sem influência na região do NEB; b) Circulação anticiclônica em altos níveis (200 hPa) no NEB, contribuindo no deslocamento da Corrente de jato subtropical no sudoeste do Brasil, permitindo o deslocamento das frentes frias para o norte do NEB. *A ligação não acontece quando*; a) Posição da corrente de jato subtropical no NEB, com influência na região; b) Circulação ciclônica em altos níveis (200 hPa) na região do NEB, contribuindo no deslocamento da corrente de jato para a região do NEB, bloqueando a entrada de sistemas frontais para o norte do NEB.

**Palavras chave:** Frente fria, ZCIT, região do Nordeste, análise sinótica.

## ABSTRACT

This research deals with meteorological aspects of the rainfall intense in the Northeast Brazil (NEB) and specifically about cold fronts arrivals to the north of the NEB from 2008 to 2017. The purpose of this study is 1) identification of the frontal systems structure connected with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) in the NEB, 2) development of the Atmospheric circulation pattern and 3) associated phenomena analyses. Satellite images together with the fields of the advection of the equivalent potential temperature and relative vorticity were used for the frontal systems identification in the NEB. Twenty-seven cold fronts were recorded by the climate-analyses database and by the cloudiness band analyses during 10 years (2008-2017). 5 cases appear to be connected with the ITCZs. Troposphere synoptic analysis showed the differences between the structure of the fronts connected with ITCZ and fronts without such connection. In the cases with connection some anticyclonic circulation was observed at the high levels (200 hPa) in the NEB and the position of the subtropical jet stream was to the south of South America (between 16 ° to 25 ° S). In the cases without connection cyclonic circulation at the high levels (200 hPa) and the influence of the subtropical jet stream was observed in the NEB. Adverse phenomena analysis in the NEB region recorded the occurrence of the wet fog and strong rain in all cases with connection. Case occurred between 20 and 28/05/2017 provoked landslides, resulting in the death of 4 people in Maceio. According to the civil defence of the Alagoas state landslides have led to large material losses. Troposphere standards have been developed to determine whether the frontal zone is associated with ITCZ or not. This association can be detected when: a) the position of the subtropical jet stream is located approximately in the southwestern Brazil, without an influence on the NEB region; b) anticyclonic circulation at the high levels (200 hPa) on the NEB, contributing in the displacement of the subtropical jet stream on the southwestern Brazil, allowing displacement of the cold front toward the northern NEB. The connection does not happen when: a) Position of the subtropical jet stream is located in the NEB, with the influence in this region; b) Cyclonic circulation at the high levels (200 hPa) of the NEB region contributing in the displacement of jet stream to the NEB region, blocking the entrance of the frontal systems to the northern NEB.

**Key words:** Cold front, ITCZ, northeastern region, synoptic analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul.....	17
Figura 2 - Interação da ITCZ com a TSM na estação chuvosa (a) e seca (b) no NNE.....	18
Figura 3 - Representação esquemática da onda frontal.....	20
Figura 4 - Seções estação versus tempo dos sistemas frontais que penetraram no Brasil em MAIO/2014. O acompanhamento das frentes é feito nos horários das 00:00 TMG (linha contínua) e 12:00 TMG (linha pontilhada). Os pontos mostram que a frente esteve posicionada na estação no dia e hora indicados.....	25
Figura 5 - Sequência esquemática da formação de vórtices ciclônicos em 200 hPa no Atlântico Sul a) mostra o padrão de circulação no verão em 200 hPa, b) adiciona em (a) os efeitos de uma frente fria em superfície, c) mostra a formação do vórtice ciclônico de altos níveis.....	26
Figura 6 - Ilustração esquemática da estrutura vertical de um VCAN do tipo Palmer. Fonte: Kousky e Gan, 1981.....	27
Figura 7 - Representação esquemática do eixo da corrente de jato.....	28
Figura 8 - Caracterização da região de estudo.....	30
Figura 9 - Ilustração da ligação da extremidade frontal com a ZCIT pelo recorte da imagem de satélite no canal IR, seta vermelha indica região de ligação.....	32
Figura 10 - Identificação da ZCIT e FF no campo da vorticidade relativa e posição dos centros de baixa pressão no campo de PNM.....	33
Figura 11 - a) Campo de advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) e b) linhas de corrente no nível 1000 hPa respectivamente, circulo-região de interesse.....	33
Figura 12 - Imagem do satélite do GOES 12 no canal infravermelho (a, c, e, g, i, k,) e PNM (hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 29 de Abril a 03 de Maio, e 18Z do dia 04 de Maio de 2015.....	38
Figura 13 - Campos de linhas de corrente em baixos níveis (1000 hPa) (a, c, e, g, i, k,) e altos níveis (200 hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 29 de Abril a 03 de	



Maio, e 18Z do dia 04 de Maio de 2015. A estrela preta na figura 13 l mostra a posição do VCAN.....	40
Figura 14 - Campos de Advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 29/04 (a), 00Z de 30/04 (b), 00Z de 01/05 (c), 00Z de 02/05 (d), 00Z de 03/05 (e) e 18Z de 04/05 (f) do ano de 2015, círculo região de interesse.....	43
Figura 15 - Campos de da vorticidade relativa ( $S^{-1}$ ) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 29/04 (a), 00Z de 30/04 (b), 00Z de 01/05 (c), 00Z de 02/05 (d), 00Z de 03/05 (e) e 18Z de 04/05 (f) do ano de 2015, círculo branco região da formação do ciclone preto região de interesse.....	44
Figura 16 - Imagem do satélite do GOES 12 no canal infravermelho (a, c, e, g, i, k,) e PNM (hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 12, 13, 14, 16, 17 18Z do dia 15 de Maio de 2015.....	46
Figura 17 – Análise de linhas de corrente em baixos níveis (1000 hPa) (a, c, e, g, i, k,) e altos níveis (200 hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 12, 13 14, 16 e 17 de Maio e 8Z do dia 15 de Maio de 2015.....	48
Figura 18 - Análise da Advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 12/05 (a), 00Z de 13/05 (b), 00Z de 14/05 (c), 18Z de 15/05 (d), 00Z de 16/05 (e) e 00Z de 17/05 (f) do ano de 2015, seta vermelha mostra extremidade frontal onde extraído o valor da advecção fria.....	50
Figura 19 - Análise da vorticidade relativa ( $S^{-1}$ ) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 12/05 (a), 00Z de 13/05 (b), 00Z de 14/05 (c), 18Z de 15/05 (d), 00Z de 16/05 (e) e 00Z de 17/05 (f) do ano de 2015.....	52
Figura 20 – Modelo conceitual da estrutura da Atmosfera em vários níveis dos casos com ligação da extremidade da FF com ZCIT. Linhas: azul escuro – circulação em altos níveis; azul claro – corrente de jato em altos níveis; preta descontínua pontilhada – posição da zona de convergência intertropical; estrela centro do ciclone.....	53
Figura 21 – Modelo conceitual da estrutura atmosférica dos casos que ocorreram nos dias 04 (com ligação) (a) e 15 (sem ligação) (b) de Maio de 2015. Linhas: azul escuro – circulação em altos níveis; azul claro – corrente de jato em altos níveis; preta	

descontínua pontilhada – posição da zona de convergência intertropical; estrela centro do ciclone.....	54
Figura 22 - Precipitação acumulada nos dias 9 e 10 de abril de 2010.....	57
Figura 23 - Precipitação acumulada nos dias 6 e 7 de junho de 2011.....	58
Figura 24 - Precipitação acumulada nos dias 11 e 12 de Maio de 2014.....	59
Figura 25 - Precipitação acumulada nos dias 3 e 4 de Maio de 2015.....	60
Figura 26 - Precipitação acumulada nos dias 15 e 16 de Maio de 2015.....	61
Figura 27 - Precipitação acumula (mm) a cada 3 dias entre os dias 15 a 28 de Maio de 2017.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Zonas frontais que atingiram a região do NEB durante 10 anos (2008-2017), duração das frentes frias e ligação com ZCIT. N- não, S – sim.....	35
Tabela 2 - Número de casos ocorridos em cada estação do ano durante o período de 2008 a 2017. Número em vermelho (com ligação), número em preto (sem ligação).....	36
Tabela 3 - As características dos casos de FF com ligação com ZCIT.....	55
Tabela 4 - Fenômenos adversos associados aos eventos com ligação da frente fria com ZCIT: +RA - chuva forte; BR - Névoa Úmida.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>A</b>	Alta Pressão
<b>ANE</b>	Ventos Alísios de Nordeste
<b>ASAS</b>	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
<b>ASE</b>	Ventos Alísios de Sudeste
<b>ASPS</b>	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
<b>B</b>	Baixa Pressão
<b>BC</b>	Baixa do Chaco - Região de Baixas Térmicas
<b>BNE</b>	Região de Baixas Térmicas no Noroeste Argentino
<b>CCM</b>	Complexo Convectivo de Mesoescala
<b>CJS</b>	Corrente de Jato Subtropical
<b>ECMWF</b>	European Center of Medium Range Weather Forecast
<b>FF</b>	Frente Fria
<b>FQ</b>	Frente Quente
<b>JBN</b>	Jato de Baixos Níveis a Leste dos Andes
<b>NCEP</b>	National Centers for Environmental Prediction
<b>NEB</b>	Nordeste do Brasil
<b>RC</b>	Regiões Ciclogénicas
<b>VCAN</b>	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis Tropicais.
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergência do Atlântico Sul
<b>ZCIT</b>	Zona de Convergência Intertropical
<b>ZFs</b>	Zonas Frontais

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Geral.....	16
2.2 Específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil. ....	17
3.2 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) .....	18
3.3 Sistemas Frontais.....	19
3.3.1 Climatologia das frentes na AS.....	19
3.3.2 Formação e dissipação de frentes frias na América do Sul (AS).....	21
3.3.3 Identificação de zonas frontais na América do Sul.....	23
3.3.4 Importância de estudo de frentes atmosféricos .....	24
3.4 Vórtices Ciclônico de Altos Níveis (VCAN).....	25
3.4.1 Características Físicas .....	25
3.4.2 Estrutura vertical do VCAN do tipo Palmer .....	27
3.5 Correntes de Jato .....	27
3.5.1 Definição de Corrente de Jato.....	27
3.5.2 Corrente de Jato Subtropical (CJS).....	29
3.5.3 Influência da CJS sobre a América do Sul.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
4.1 Região de estudo .....	30
4.2 Dados usados para identificação de frentes frias e ZCIT.....	30
4.3 Métodos usados para identificação das frentes frias .....	31
4.3.1 Identificação frontal por análise operacional .....	31
4.3.2 Identificação frontal usando temperatura potencial equivalente.....	31

4.4	Ligações da extremidade frontal com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ...	32
4.5	Análise dos fenômenos adversos associados.....	34
4.5.1	Análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoadas.....	34
4.5.2	Análise de precipitação .....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1	Análise da frente fria com ligação com ZCIT ocorrido nos dias de 29/04 a 04/05/2015.....	37
5.1.1	Análise do processo de desenvolvimento da frente fria com ligação com ZCIT.....	37
5.1.2	Análise da estrutura da frente fria com ligação com ZCIT .....	40
5.2	Análise da frente fria sem ligação com ZCIT ocorrido nos dias 12 a 17/05/2015.....	45
5.2.1	Análise do processo de desenvolvimento da frente fria com ligação com ZCIT.....	45
5.2.2	Análise da estrutura da frente fria com ligação com ZCIT .....	47
5.3	Comparação dos eventos com ligação da zona frontal com ZCIT e sem esta ligação...	53
5.3.1	Semelhanças entre os casos com ligação da extremidade frontal com ZCIT. ....	53
5.3.2	Diferenças entre os casos com ligação da FF com ZCIT e sem ligação .....	54
5.4	Análise dos eventos com ligação da zona frontal com ZCIT.....	54
5.5	Condições da união ou não da zona frontal com Zona de Convergência Intertropical – ZCIT. ....	55
5.6	Análise dos fenômenos adversos associados nos casos com ligação da frente fria com ZCIT. ....	56
5.6.1	Análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoadas.....	56
5.6.2	Análise espacial-temporalmente da precipitação pluviométrica associada a frente fria e a ZCIT.....	57
6.	CONCLUSÕES .....	63
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
	ANEXO .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

Nordeste do Brasil tem como base econômica a agricultura e pecuária, a Indústria e o Turismo. Boa parte destes é intensamente afetada pelas condições de tempo e clima, dependendo delas para a tomada de decisões. Assim, o estudo da frequência e da intensidade das precipitações é de elevada importância, em especial o estudo das precipitações intensas, pois tanto no meio urbano, como nas áreas rurais, acarretam transtornos. Estes transtornos são responsáveis por destruições de bens materiais e de perdas humanas (MARQUES, 2010), principalmente em função de inundações e deslizamentos de terra. Uma maneira prática de se amenizar o efeito desse problema é ter ciência dos sistemas produtores de precipitações intensas e, a partir daí, desenvolver métodos que possam prognosticar a formação dos processos que dão origem àqueles sistemas. O que não é tarefa fácil, pois a região nordeste do Brasil, que inclui Alagoas, situa-se numa área em que os processos tropicais interagem com os processos das latitudes médias, dificultando a identificação dos sistemas, os quais combinados podem gerar precipitações intensas.

Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no NEB podem ser classificados em mecanismos de grande escala, responsáveis por cerca de 30% a 80% da precipitação observada dependendo do local (MOLION & BERNARDO, 2002) e mecanismos de meso e micro escala, que completam os totais observados. Dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se as Zonas frontais (ZFs) (KOUSKY, 1979; FEDOROVA et al., 2016), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (KOUSKY e GAN, 1981; GAN e KOUSKY, 1986). Perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios, complexos convectivos e brisas marítima e terrestre, fazem parte da mesoescala, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas constituem-se fenômenos da microescala (PONTES DA SILVA et al., 2011).

Zonas frontais (ZFs) são sistemas de escala sinótica muito importante na América do Sul. Frentes frias, quentes, oclusas e estacionárias foram observadas com maior frequência ao sul de 30°S (SATYAMURTY e MATTOS 1989; CAVALCANTI e KOUSKY 2009; FEDOROVA et al, 2016). Segundo Fedorova et al, (2016) as frentes frias são pouco estudadas sobre a região do Nordeste do Brasil (NEB), mas os estudos anteriores mostram que estas frentes cuja suas extremidades atingem o NEB influenciam o tempo da região.

Fedorova et al, (2016) nos seus estudos concluíram que o uso de uma distribuição horizontal da temperatura potencial equivalente e a sua advecção é o novo aspecto em identificação de zonas frontais e vai apoiar a previsão na prática operacional diária. No mesmo estudo os autores identificaram seis (6) frentes na região do NEB em mais de 3 anos analisados usando método da prática operacional e vinte (20) frentes foram registradas por bandas de nuvens em conjunto com a temperatura potencial equivalente e seus mapas de advecção. Entre as frentes identificadas, uma frente fria separada do centro do ciclone afetou o tempo na região do NEB.

Uma engrenagem importante de produção de chuva para o sul do Nordeste (SNE) e para Este do Nordeste (ENE) é a penetração de sistemas frontais, ou seus restos, entre as latitudes 5°S e 18°S (MOLION & BERNARDO, 2002). A penetração até latitudes equatoriais ocorre mais frequentemente no inverno do Hemisfério Sul (HS), pois o posicionamento médio da ZCIT, o equador meteorológico, é em torno de 10°N a 14°N nessa época (MOLION & BERNARDO, 2002).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma faixa que corresponde à convergência dos ventos tropicais (alísios) dos hemisférios norte e sul, os quais sopram em média das direções nordeste e sudoeste, respectivamente. Trata-se de uma zona de alta instabilidade, pois os ventos que convergem na região ascendem às camadas superiores da atmosfera, dando origem a um cinturão de nuvens identificáveis através das imagens de satélite. A posição da ZCIT ao longo dos doze meses do ano flutua de um lado e do outro da linha do equador. No Atlântico, ela incursiona bem mais ao norte do equador (entre junho e dezembro) do que ao sul dessa linha (entre janeiro e maio) (XAVIER et al., 2000).

O período principal de chuvas da costa leste do Nordeste concentra-se entre os meses de maio e agosto, sendo as extremidades de sistemas frontais um dos principais sistemas meteorológicos atuante durante nesta época do ano (PONTES DA SILVA et al., 2011). Algumas vezes, a ZCIT tende a se deslocar um pouco mais ao sul ou mais ao norte de sua posição climatológica, como observado em anos de El Niño (La Niña), onde a banda convectiva, associada, tende a se deslocar um pouco mais para norte (sul) (COELHO et al., 2004). Moura e Shukla (1981) sugeriram que Temperaturas da Superfície do Mar (TSM) positivas (negativas) no Oceano Atlântica Sul (OAS) e TSM negativas (positivas) no Atlântico Norte favorecem o deslocamento da ZCIT para sul (norte), contribuindo para anos chuvosos (secos) no NEB, o chamado dipolo do Atlântico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Geral

**IDENTIFICAR** sistemas frontais que possuem ligação com Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na região Nordeste do Brasil e analisar fenômenos associados.

### 2.2 Específicos

1. **ESTUDAR** sistemas frontais que possuem ligação com ZCIT na região do Nordeste brasileiro no período de 2008-2017;
2. **DETERMINAR** estrutura da troposfera nos eventos de ligação da frente fria com ZCIT;
3. **ELABORAR** um padrão de circulação atmosférica em vários níveis nos casos que possuem ligação da frente fria com ZCIT.
4. **ANALISAR** fenômenos associados nos casos que possuem ligação da frente fria com ZCIT.

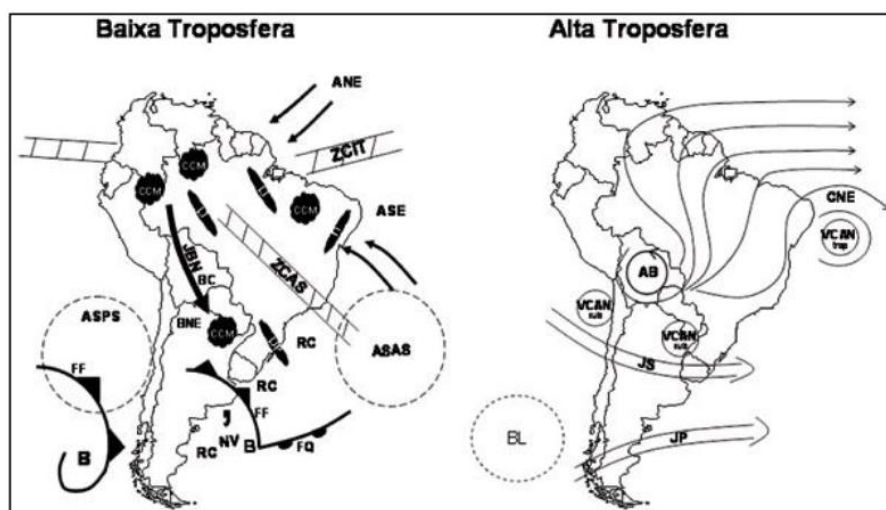


### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil.

Em geral, segundo Uvo e Berndtsson (1996), cinco mecanismos governam o regime de chuva da região do NEB: 1) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico, 2) Frentes Frias, e 3) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), 4) Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); 5) Temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico, Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM). Além desses mecanismos podemos destacar também a atuação das linhas de Instabilidade (LI), dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e do efeito das brisas marítima e terrestre na precipitação (RAMOS et al, 1994) citado por Ferreira et al (2004). Esses mecanismos são descritos a seguir.

Figura 1 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul.



**ASE**- ventos alísios de sudeste,

**ASAS** - anticiclone subtropical do Atlântico Sul,

**B** - Ciclone,

**AB** - alta da Bolívia,

**BC** - baixa do Chaco – região de baixas térmicas,

**CCM** - complexo convectivo de mesoescala,

**RC** - regiões ciclogênicas,

**ZCAS** - zona de convergência do Atlântico Sul e  
**ZCIT** - zona de convergência intertropical.

**FF**- frente fria,

**FQ** - frente quente,

**BL** - região de bloqueios atmosféricos,

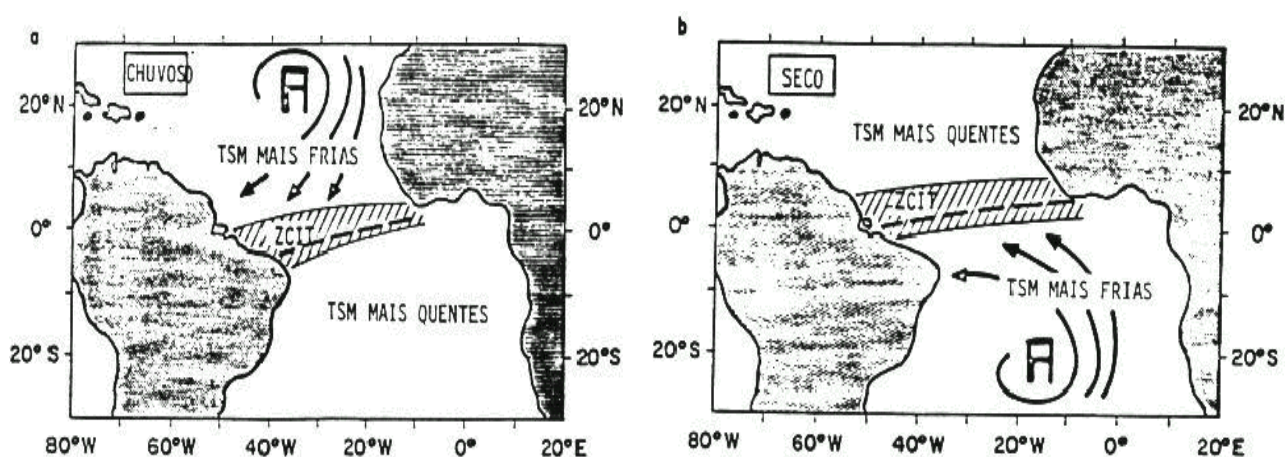
Fonte: Ramos et al, 1994.

### 3.2 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), no Oceano Atlântico Equatorial, é de extrema importância na determinação da qualidade do período chuvoso da região semiárida do Nordeste. Trabalhos anteriores mostraram o efeito das condições oceânicas e atmosféricas que modulam a variabilidade sazonal da ZCIT e sua relação com a pluviometria sobre o norte do Nordeste do Brasil (HASTENRATH e HELLER, 1977; HASTENRATH, 1984; e XAVIER et al., 2000). A principal característica deste sistema é se posicionar sobre as áreas oceânicas com anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) positivas e anomalias de Pressão ao Nível do Mar (PNM) negativas (HASTENRATH, 1991).

A interação terra-mar é de grande importância para se entender o posicionamento da ZCIT ao norte e ao sul do equador. Diversas variáveis físicas são utilizadas para localizar as flutuações no posicionamento médio da ZCIT. As figuras 2(a) e 2(b) mostram o posicionamento médio da ZCIT para os meses de janeiro (verão – HS) e julho (inverno – HS), retiradas do Atlas Geográfico Mundial. Numa primeira análise as Figuras 2(a) e 2(b) apresentam uma certa extrapolação no posicionamento médio da ZCIT (MOURA E SHUKLA, 1981).

**Figura 2 - Interação da ITCZ com a TSM na estação chuvosa (a) e seca (b) no NNE.**



Fonte: Nobre e Molion (1986).

De maneira geral, em anos secos no norte do Nordeste do Brasil, as águas estão mais aquecidas e a alta subtropical menos intensa no Atlântico Subtropical Norte,

simultaneamente com águas mais fria, e alta subtropical mais intensa no Atlântico Subtropical Sul. Situação inversa pode ser observada em anos chuvosos. Certamente que outros padrões de escala global podem acentuar condições de seca ou de chuva acima da média sobre o Nordeste do Brasil, Nobre e Molion (1986).

Sobre o Oceano Atlântico, considerando a importância que a posição da ZCIT tem na determinação de anos secos ou chuvosos, tanto na Região Norte e Nordeste do Brasil como em áreas no norte da África, vários estudos têm abordado o aspecto climatológico da ZCIT. O principal parâmetro utilizado tem sido estimativas de sistemas convectivos a partir de imagens de satélite (UVO, 1989). Outros estudos de estimativa da posição da ZCIT foram elaborados utilizando a informação da refletância das nuvens (WALISER e GAUTIER, 1993) e outras variáveis como: a estimativa de precipitação por microondas e a temperatura da superfície do mar (PHILANDER, 1996) e a componente meridional do vento à superfície (XAVIER et al., 1998).

Dentro de um trabalho elaborado por Nobre e Uvo (1989), eles relatam a importância de identificar o quanto tempo a ZCIT ficará posicionada mais ao sul de sua posição normal. Segundo os autores, o principal sistema gerador de precipitação na região norte do Nordeste (NNE) é a proximidade da ZCIT. Tal fato é observado quando se considera que o pico de precipitação sobre o NNE (março e abril) ocorre exatamente na época em que a ZCIT atinge suas posições mais ao sul.

### **3.3 Sistemas Frontais**

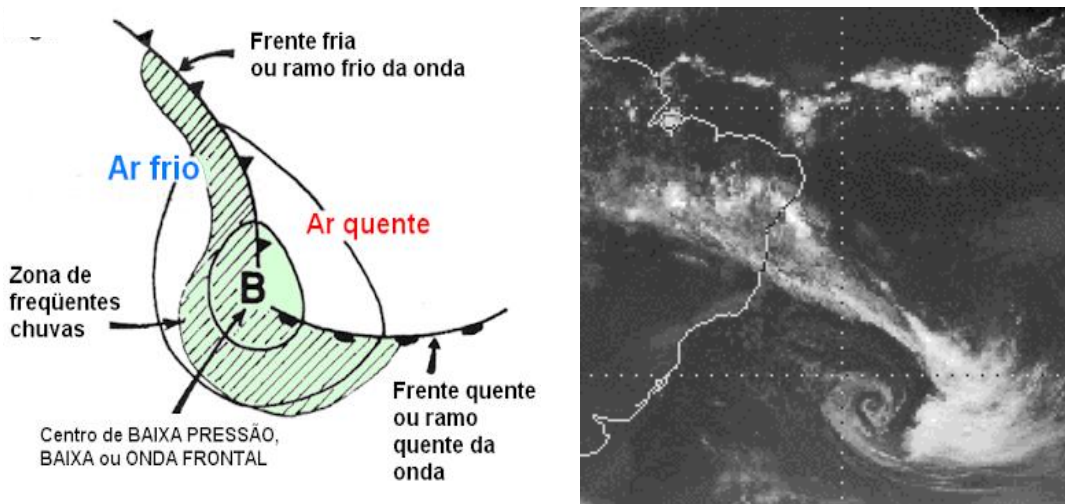
#### **3.3.1 Climatologia das frentes na AS**

Um dos primeiros estudos que avaliaram globalmente as regiões frontogenéticas foi o de Satyamurty e Mattos (1989). Considerando a AS, esses autores verificaram que a área mais frontogenética ocorre no sul da Argentina durante o verão e que essa área se desloca para o norte, no inverno, ocupando o nordeste da Argentina e vizinhança. Resultados similares foram obtidos por Simmonds et al. (2012), que determinaram uma climatologia de FFs no Hemisfério Sul entre 1989 e 2009 usando um método objetivo para a identificação de tais sistemas. Os autores observaram que nos meses de verão (dezembro a fevereiro) as maiores frequências de FFs estão entre as latitudes de 40°S e 60°S. Dentro dessa faixa há uma maior ocorrência nas regiões oceânicas a leste da Patagônia, sudeste da África do Sul e sudoeste da Austrália. No inverno (junho a agosto), esse cinturão de maiores frequências de sistemas frontais frios sofre um sutil

deslocamento para norte e apresenta uma série de assimetrias zonais nas regiões oceânicas citadas. Os autores também relataram que as frentes mais intensas são as que ocorrem a oeste do oceano Índico e essa intensidade tende a ser maior no inverno do que no verão. Já Catto et al. (2012) avaliaram, no período entre 1997 a 2008, a relação da precipitação com a ocorrência média anual de FFs em termos globais. Foi verificado que nas latitudes médias do Hemisfério Sul, mais de 50% da precipitação anual está associada com a ocorrência de FFs.

Vianello et al, (1991), destacam a extrema importância da transição de sistemas frontais sobre a região sul e sudeste do Brasil pelo fato de ser um dos sistemas meteorológicos mais frequentes nessa região, sendo responsável por grandes alterações nos elementos que modulam o clima. Os sistemas frontais, ou conjunto de frentes, são definidos como uma zona de transição entre duas massas de ar com propriedades termodinâmicas distintas assim como, diferentes densidades, temperaturas, pressões e umidades, que tendem a se manter individualizadas, conservando suas particularidades (VIANELLO et al, 1991). Segundo Kousky (1979), as frentes frias afetam a climatologia da América do Sul durante o ano todo.

**Figura 3 – Representação esquemática da onda frontal.**



Fonte: Celemín, 2009.

Entretanto, vários autores têm mostrado interesse no estudo dos sistemas frontais no Brasil, dentre eles (RODRIGUES; FRANCO; SUGAHARA, 2004), que elaboraram uma climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. Com respeito aos estudos de Lemos e Calbete (1996), mostraram que os sistemas frontais atuam durante todo o ano no

Brasil, com frequências maiores nas latitudes mais altas durante o período de inverno. Já o estudo de Andrade e Cavalcanti (2003) mostra que a menor frequência ocorre no verão. Segundo Ferreira et al., (2009) as frentes frias ocorrem em maior número assim como durante todo o ano entre 25°S e 30°S e são mais frequentes durante os meses de maio e outubro, esporadicamente em 20°S durante os meses de dezembro a fevereiro. Segundo o mesmo autor, frentes frias na região Sudeste que induzem a convecção tropical e subtropical que alimentam a ZCAS, estas nem sempre satisfazem os critérios para a identificação que leva em conta a queda de temperatura, aumento da pressão e mudança na direção do vento. Segundo Andrade (2005), entre as latitudes de 35°S e 40°S alguns sistemas frontais ganham trajetória mais meridional e atingem as baixas latitudes, enquanto outras seguem zonalmente.

De acordo com Kousky (1979) há uma maior frequência de sistemas frontais no Sul da Bahia entre os meses de dezembro e março para o período de 1961 a 1970. O menor número de sistemas frontais que atingem a região tropical durante os meses de verão pode ser devido à ocorrência da ZCAS que, persistente sobre as Regiões Sudeste e Centro-Oeste, fazendo com que as frentes frias se desloquem apenas até essas áreas (ANDRADE et al., 2005). No entanto esses autores observaram alguns padrões e características das 25 variáveis atmosféricas relevantes no deslocamento dos sistemas frontais, assim como a intensidade no campo de pressão, intensidade e posição do cavado de níveis de 500 hPa associado ao sistema, pressão ao nível médio do mar (PNM), e advecção de vorticidade na média troposfera.

Na região do litoral do Sudeste do Brasil, Oliveira (1986) e Justi da Silva e Silva Dias (2000) identificaram um número relativamente maior de episódios de sistemas frontais no inverno se comparado ao verão próximo de 45°S (litoral da Argentina) para 35°S (próximo ao Uruguai). Essas regiões possuem baroclinia onde são altamente ciclogênica (GAN e RAO, 1991; REBOITA ET AL., 2005). De acordo com Satyamurty e Mattos, (1989) a climatologia da frontogênese para o mês de julho nos níveis baixos da atmosfera (850 hPa), mostra que o Centro-Leste da América do Sul é uma região favorável no processo de formação e intensificação de frente.

### **3.3.2 Formação e dissipação de frentes frias na América do Sul (AS)**

Bergeron em 1928, citada por Scheuer, (2017) propôs uma teoria relacionada à formação e dissipação de frentes que explica o aspecto cinematicamente através de massas

de ar de grande escala, onde teve a conclusão que as frentes se formam devido à dinâmica do movimento confluyente entre massas de ar com propriedades distintas. Entretanto Pettesen et al., (1956), foram os pesquisadores que introduziram os termo de frontogênese para o processo de formação e intensificação de uma frente e frontólise para o processo de dissipação de uma frente. Segundo Orlanski et al., (1985) concluíram que o campo de deformação horizontal é a principal fonte frontogenético em baixos níveis (850hPa). Frentes frias em altitude são consideradas como zonas de fortes gradientes de vorticidade potencial isentrópica de Ertel (P) (BLUESTEIN et al.,1993) e frontogênese é a reação da escala lateral de gradiente de (P) próximo da tropopausa (DAVIES E ROSSA, 1998).

Kousky (1979) mostrou a grande importância da frontogênese na região Sudeste, ao manter a frente ativa em seu lento deslocamento para norte e nordeste. Segundo Mattos et al., (2003), uma frontogênese ocorre na dianteira e frontólise na retaguarda de uma frente em deslocamento. Frontogênese devido aos efeitos de deformação horizontal e processos relacionados à convergência na baixa troposfera são um fenômeno físico que produz ou intensifica a conduta das isotermas ao longo do eixo de dilatação entre dois anticiclones subtropicais e anticiclone extratropical migratório (MATTOS, 2003). Segundo este mesmo autor, durante os meses de inverno, quando o comportamento das isotermas resulta de um transporte de ar frio, a queda acentuada na temperatura produzida por essa incursão de ar frio é chamada de friagem.

Normalmente os sistemas frontais que transitam a Região Sudeste do Brasil, possuem uma trajetória de sudoeste para nordeste onde em superfície há uma variação da velocidade e direção do vento dos quadrantes sul e norte, antes e após a transição do sistema, assim como variações na temperatura, umidade e pressão atmosférica. Dependendo da intensidade do sistema, em alguns casos uma frente fria, pode se propagar até latitudes baixas, atingindo as proximidades da Amazônia, provocando o fenômeno conhecido como friagem descrita em (MARENGO et al.,1997) descrito anteriormente também por Mattos (2003).

Segundo Fortune e Kousky (1983) mostraram que alguns sistemas frontais considerados mais intensos (em torno de 25°) podem afetar até a Região Norte do país com queda de temperatura e atividade convectiva Comumente, os sistemas frontais se propagam até 20°S, onde se inicia o processo de dissipação, denominado frontólise (OLIVEIRA; 1986; CAVALCANTI E KOUSKY; 1996).

De acordo com Mattos (2003), uma característica importante em uma frente fria sobre as Regiões Sul e Sudeste do Brasil, que é muito observada durante os meses de outono e inverno, é um cavado com uma orientação zonal na retaguarda da frente fria principal, atingindo o litoral da Região Sul e as Serras Gaúchas e Catarinenses. Segundo Andrade (2005), as ondas baroclínicas ao atravessar a cordilheira dos Andes se modificam e interagem com a circulação atmosférica da América do Sul. Com isso os sistemas frontais que se deslocam de oeste para leste sobre o oceano Pacífico, ganham uma nova componente na direção das baixas latitudes, tendo um deslocamento de sudoeste para nordeste ao longo do continente Sul Americano, chegando a atingir os trópicos.

### **3.3.3 Identificação de zonas frontais na América do Sul**

As frentes frias podem ser identificadas através de imagens de satélite junto com modelos atmosféricos operacionais, levando em conta o giro do vento para direção sul, persistência do vento de sul por pelo menos um dia, e uma queda de temperatura do ar simultânea ao giro do vento ou até dois dias depois (RODRIGUES et al., 2004). Durante a passagem de uma frente fria, há um aumento de pressão, uma brusca queda na temperatura, aumento na força do vento, variação na sua direção. Além da frente fria, um ciclone baroclínico possui a frente quente e a frente oclusa nos estágios jovem e de desenvolvimento máximo. Define-se uma frente quente, quando o ar quente está avançando e substituindo o ar frio. Já a frente oclusa é quando uma frente fria ultrapassa a frente quente, e com o aumento da região de oclusão o sistema frontal atinge seu estado terminal. Um dos sistemas sinóticos mais importantes sobre a América do Sul é a frente fria (ANDRADE et al., 2005).

A necessidade da identificação de zona frontal está associada com a ocorrência de precipitação a esta zona frontal. Processos de formação de precipitação no NEB foram resumidos por Molion e Bernardo (2002), onde os autores apresentam evidência de ocorrência de precipitação intensa nas zonas frontais. Uma associação dos sistemas sinóticos e em mesoescala com precipitação intensiva foi estudada por Pontes da Silva et al. (2011). Zonas frontais foram detectadas entre os sistemas mais importantes, o que produziu precipitação. Dito isto, a identificação da zona frontal na região tropical é difícil na prática operacional. Uma estrutura frontal nesta região é diferente do que na região extratropical e, por conseguinte, um tradicional método de identificação frontal não é preciso. Fedorova et al, 2016 avaliaram novos métodos práticos de identificação frontal no NEB através de campos de temperatura potencial equivalente e sua advecção.

### 3.3.4 Importância de estudo de frentes atmosféricas

Frentes atmosféricas são extremamente importantes para o tempo do dia-a-dia nas latitudes médias, muitas vezes trazendo fortes ventos e chuva pesada que podem ter grandes impactos socioeconômicos. Por exemplo, a inundação severa durante o verão britânico de 2007, que causou perdas seguradas de cerca de 3 mil milhões de libras (Pitt, 2008) foi associada com a passagem de uma frente. Dez dos maiores eventos de inundação no inverno no Reino Unido foram recentemente mostrado pode ter sido associada com “rios atmosféricos”, os fluxos de ar húmido a partir de regiões subtropicais em sistemas de latitudes médias frontais (LAVERS et al., 2011). Recentemente, tem havido um esforço considerável para produzir climatologias de grande escala de frentes objetivamente identificadas a partir de dados de reanálise (BERRY et al., 2011a; SIMMONDS et al., 2011).

Dada importância das frentes de tempo local em muitas regiões, é possível que algumas das tendências observadas nos parâmetros meteorológicos em todo o mundo, em particular chuvas, pode ser associado com a frequência de ocorrência de frentes. Por exemplo, uma redução no número de frentes tem sido sugerida como uma possível razão para a diminuição da precipitação sobre a South West Austrália Ocidental, no entanto Berry et al. (2011b) mostram que sobre esta região, a frequência da frente tem realmente vindo a aumentar ao longo dos últimos 50 anos. Isto sugere que talvez tenha havido mudanças na quantidade de precipitação que cada frente produz. De modo a investigar mais aprofundadamente esta sugestão, a quantidade de precipitação associada com frentes deve em primeiro lugar ser quantificada.

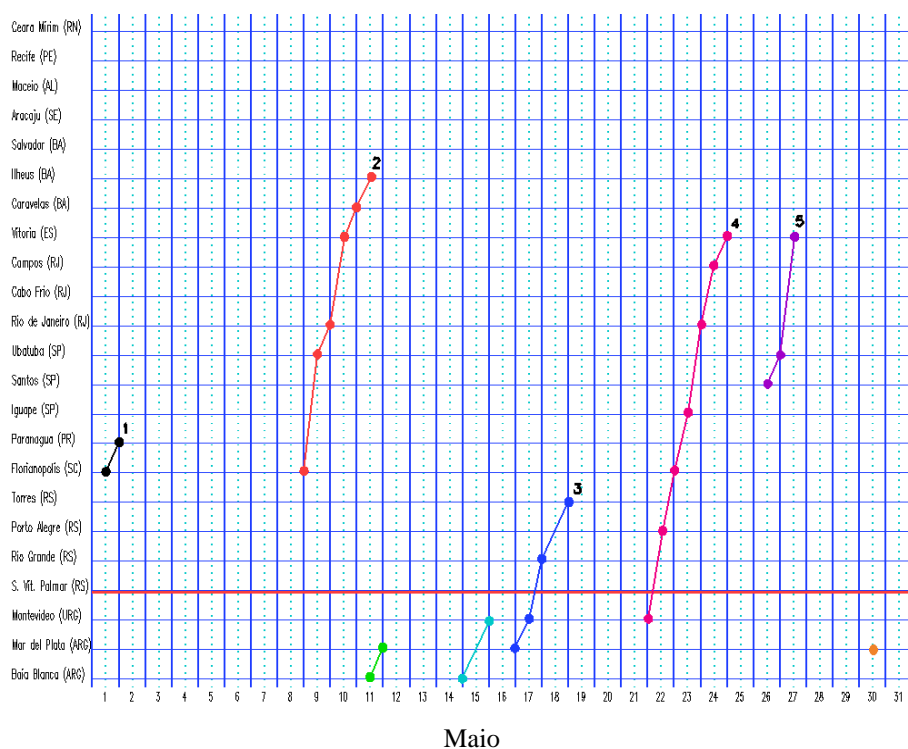
Zonas frontais no Brasil são analisadas regularmente no trabalho operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC) e estes resultados foram publicados pela Revista Climanalise (Tradução: Jornal Climanalise)

[http://climanalise.cptec.inpe.br/\\*rclimanl/boletim](http://climanalise.cptec.inpe.br/*rclimanl/boletim) (Acessado em maio 2017). Esta página tem informações de cada mês sobre todos os processos sinóticos no Brasil por descrição verbal. A secção sobre as zonas frontais apresenta uma descrição dos dias e locais geográficos das zonas frontais usando nomes de cidades. Além disso, esta secção tem figuras com a localização das zonas frontais: " número de dias " (eixo X) e os nomes das cidades (eixo Y). O número de dias " apresenta uma zona frontal, que passou através da



estação de entre 09:00 hora local do dia anterior e 09:00 hora local do dia mostrado, como ilustrado na Figura 4.

**Figura 4 - Secção estação versus tempo dos sistemas frontais que penetraram no Brasil em MAIO/2014. O acompanhamento das frentes é feito nos horários das 00:00 TMG (linha contínua) e 12:00 TMG (linha pontilhada). Os pontos mostram que a frente esteve posicionada na estação no dia e hora indicados.**



FONTE: Análises diárias do CPTEC 2017.

### 3.4 Vórtices Ciclônico de Altos Níveis (VCAN)

#### 3.4.1 Características Físicas

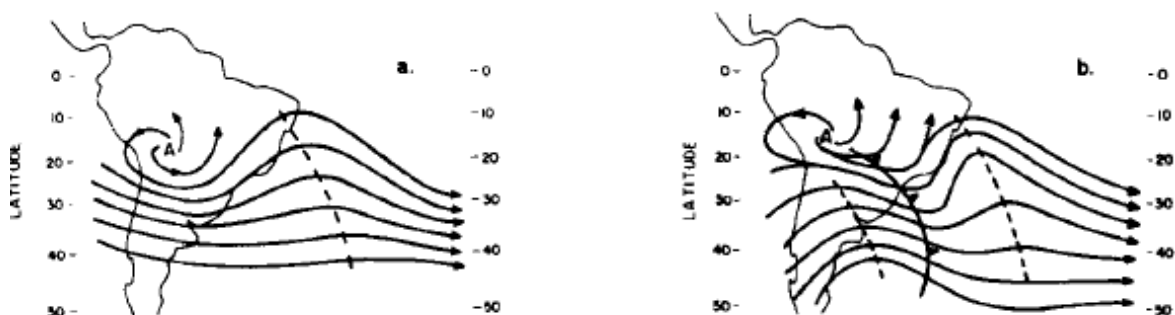
Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são definidos como sistemas fechados de baixa pressão, de escala sinótica, que se formam na alta troposfera (GAN e KOUSKY, 1986). São comumente chamados na literatura de baixas frias, pois apresentam centro mais frio que a periferia. Os vórtices ciclônicos possuem uma vida média que varia consideravelmente, uns duram apenas algumas horas, outros mais de duas semanas. Ocasionalmente, os vórtices ciclônicos intensificam-se para baixo na vertical e podem refletir no campo de pressão em superfície (GAN, 1982).

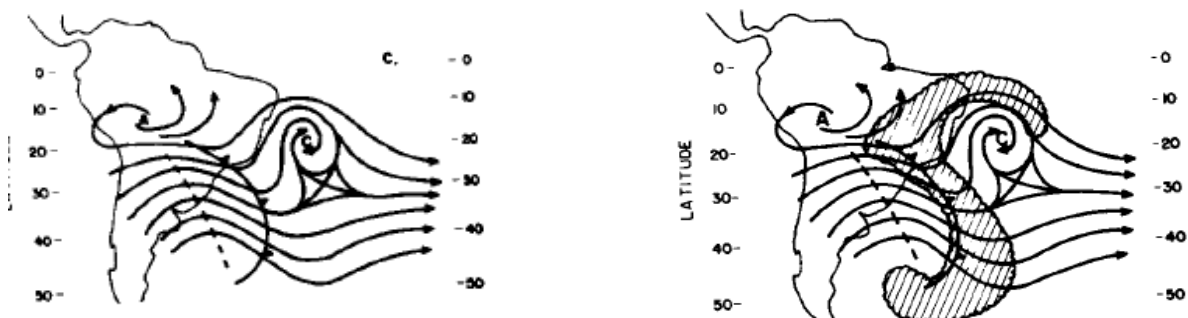
Os VCAN podem ser classificados de duas maneiras: vórtices do tipo Palmén, que se originam nas latitudes subtropicais e os vórtices do tipo Palmer, também chamados de

vórtices de origem tropical por originarem-se nesta região. Os vórtices ciclônicos de origem tropical formam-se nos meses de primavera, verão e outono e, passam a maior parte de suas atividades nos trópicos (PALMER, 1951). Segundo este autor, os vórtices ciclônicos de origem tropical apresentam as seguintes características: originam-se acima de 9000 m nas latitudes mais baixas, são persistentes, desenvolvem e intensificam-se durante sua passagem para as latitudes mais altas e, no Hemisfério Norte, deslocam-se para Nordeste ou Leste-nordeste no cinturão de 20° - 30° de latitude.

Os VCANs na vizinhança do Nordeste do Brasil formam-se devido à intensificação simultânea da crista associada à Alta da Bolívia e o cavado corrente abaixo sobre o Oceano Atlântico (KOUSKY E GAN 1981). Isto ocorre quando um sistema frontal proveniente do sul do Brasil, ao penetrar nos subtropicais, provoca forte advecção de ar quente no seu lado leste, amplificando a crista de nível superior e, por conservação de vorticidade absoluta, o cavado que está a jusante também é intensificado, formando-se o ciclone na alta troposfera. Os VCANs possuem forte influência nas alterações do tempo em várias regiões do Brasil. Utilizando dados convencionais e imagens de satélites, Kousky e Gan (1981) e Gan (1982), determinaram o comportamento dos vórtices ciclônicos sobre o Nordeste do Brasil e as possíveis causas de sua formação (Figura 5).

**Figura 5 - Esquemática da formação de vórtices ciclônicos em 200 hPa no Atlântico Sul a) mostra o padrão de circulação no verão em 200 hPa, b) adiciona em (a) os efeitos de uma frente fria em superfície, c) mostra a formação do vórtice ciclônico de altos níveis.**



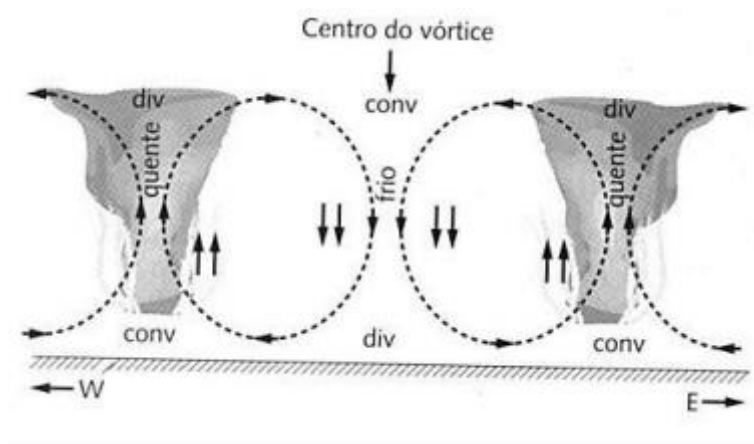


Fonte: Kousky e Gan 1981.

### 3.4.2 Estrutura vertical do VCAN do tipo Palmer

Quanto à estrutura vertical apresentada na Figura 6, observam-se na periferia movimentos ascendentes e formação de nuvens e no centro movimentos descendentes proporcionando o transporte de ar frio e seco de altos para médios níveis. Sendo caracterizado do ponto de vista termodinâmico por uma circulação direta, onde o ar quente sobe e o ar frio desce (KOUSKY e GAN, 1981).

**Figura 6 - Ilustração da estrutura vertical de um VCAN do tipo Palmer.**



Fonte: Kousky e Gan, 1981.

## 3.5 Correntes de Jato

### 3.5.1 Definição de Corrente de Jato

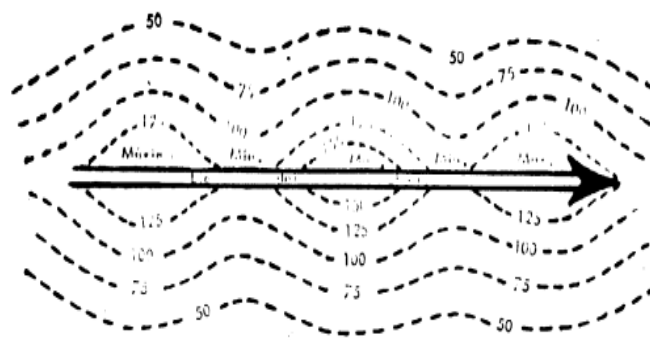
Vários trabalhos foram realizados sobre corrente de fortes ventos zonais em altos níveis. Dentre eles, um histórico sobre corrente de jato pode ser encontrado em Riehl et al.(1952), onde mostraram um modelo de circulação transversal nas vizinhanças da corrente de jato na alta troposfera. Beebe e Bates (1955) modificaram o modelo de Riehl et al., (1952), introduzindo efeitos de curvatura. Uma revisão sobre essa circulação vertical da

corrente de jato foi feita por Reiter (1969), onde ele restabelece o interesse em sistemas de tempo que se desenvolvem nas vizinhanças do jato na alta troposfera.

Dois tipos de corrente de jato, ambos localizados na descontinuidade da tropopausa, onde há mistura do ar troposférico e estratosférico, têm sido largamente investigados. A corrente de jato polar (CJP) ou simplesmente jato frontal, que encontrado em latitudes médias acima de 13 km de altura, e a corrente de jato subtropical (CJS), que está geralmente confinada em latitudes de até 30° a aproximadamente 13 km de altura (200 hPa). Normalmente, as correntes de jato fluem por uma extensão de aproximadamente 1000 km, com 100 km de largura e apenas 1 km de espessura. O cisalhamento vertical do vento é da ordem de 5-10 m/s/Km e o cisalhamento lateral, de 5 m/s/100 Km. A velocidade do vento no jato não é uniforme em toda a sua extensão horizontal (BLUESTEIN 1993).

Segundo (CARLSON 1991, BLUESTEIN 1993) nos seus estudos concluíram que existem máximos e mínimos locais nas isotacas, ao longo do eixo do jato. Esses núcleos de ventos máximos (nvm) embebidos na corrente de jato são referidos como “jet streaks”(Figura 7), nos quais a velocidade do vento pode atingir ou superar 125 nós. Frequentemente, esses máximos deslocam-se ao longo do eixo, no mesmo sentido do vento (MEDINA, 1976), mas a velocidade do vento no nvm de uma corrente de jato é maior do que a velocidade com que este núcleo se move. Esses nvm encontram-se presentes nos regimes de escoamento extratropical e, devido a sua importância como precursores de ciclogênese e tempos severos, têm recebido maior atenção da comunidade sinótica.

**Figura 7 – Representação esquemática do eixo da corrente de jato.**



Fonte: Medina, 1976.

### **3.5.2 Corrente de Jato Subtropical (CJS)**

A CJS que está associada à circulação de Hadley, normalmente encontrando-se acima da porção descendente dessa célula, entre as latitudes de 20°S e 35°S. Esse jato é mais desenvolvido na estação de inverno onde a circulação média meridional é mais intensa (HASTENRATH, 1990). Segundo Palmén e Newton (1969), a circulação de Hadley é um dos principais mecanismos para a manutenção da CJS.

A CJS é semipermanente e a sua posição média desloca-se em direção ao equador no período de inverno e em direção aos polos no verão, assim como toda a circulação atmosférica, devido a posição do sol (Palmén e Newton, 1969). No hemisfério sul, há menor variação sazonal da intensidade do jato, quando comparada com hemisfério norte (PALMÉN e NEWTON, 1969).

### **3.5.3 Influência da CJS sobre a América do Sul**

A influência da CJS sobre a América do Sul foi estudado em 1983 (ano de El Niño) por Kousky e Cavalcanti (1984) utilizando cartas de superfície e de escoamento do vento em altos níveis, juntamente com imagens de satélite, para 1982-1983. Os resultados obtidos pelos autores indicam uma CJST bem pronunciado sobre a América do Sul e o Pacífico Leste. Como sugerido por Bjerknes (1966), e comprovado por Arkin (1982), essa corrente atmosférica em altos níveis é intensificada na região do Pacífico Leste durante os anos de El Niño. Além disso, Kousky e Cavalcanti (1984), observaram várias situações de bloqueios nas vizinhanças destas regiões. Esses eventos favoreceram a manutenção de sistemas frontais ativos no sul do Brasil, contribuindo para a excessiva precipitação que ocorreu na região.

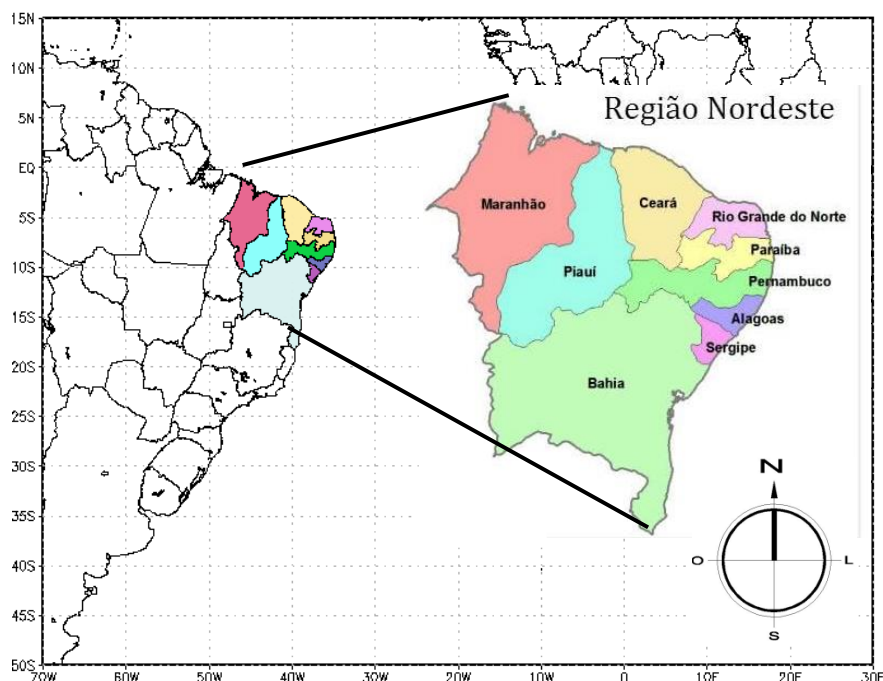
A associação do CJST com sistemas frontais, também foi estudada por Palmén (1969), segundo o autor a divergência e a convergência em altos níveis associada com ondas atmosféricas deveriam em geral ser mais pronunciada em regiões de ventos fortes. Desta forma, os distúrbios de escala sinótica (ciclones e anticiclones) são caracterizados por apresentar divergência-convergência e movimento vertical. Assim é natural esperar que esses sistemas mostrem alguma relação com a CJST.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Região de estudo

O Nordeste brasileiro é a região de interesse para o estudo, localizada entre as seguintes coordenadas geográficas: Latitude entre 17.5°S e 2°S; Longitude entre 48°W e 35°W, dado na Figura 1.

**Figura 8 - Caracterização da região Nordeste do Brasil.**



Fonte: Autor

### 4.2 Dados usados para identificação de frentes frias e ZCIT

Foi usado o banco de dados do climanálise para a identificação dos sistemas frontais que atingiram até a região sul da Bahia (os dados do climanálise estão disponíveis até 2014), hospedado no site: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>, (acessado em maio de 2017).

A análise de nebulosidade associada à zona frontal e a posição da ZCIT, também, foi feita pelas imagens do satélite geostacionário GOES e METEOSAT, no canal Infravermelho (IR); estas informações foram consultadas no banco de dados imagens no portal da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) no período de 2008 à 2017 disponibilizados pelo CPTEC/INPE, disponíveis no endereço: (<http://satelite.cptec.inpe.br>).

Foram utilizados conjunto de dados das reanálises do European Center of Medium Range Weather Forecast (ECMWF) com resolução espacial 0.125°x0.125° e temporal de

06h, obtidos através do site <http://www.ecmwf.int/>, para a obtenção dos campos meteorológicos, num domínio de 50°S - 15°N e 70°W - 30°E, para os eventos encontrados no período de estudo (2008 - 2017).

As variáveis consideradas foram Pressão ao Nível Médio do Mar (PNM), as componentes u, v (vento zonal e meridional), temperatura do ar e umidade relativa do ar, nos níveis de 1000 hPa, 500 hPa e 200 hPa. Foram gerados campos derivados, tais como PNM, vorticidade relativa, linhas de corrente e isotacas, advecção de temperatura potencial equivalente, os quais foram visualizados através do software Grid Analysis and Display System (GrADS).

### **4.3 Métodos usados para identificação das frentes frias**

#### **4.3.1 Identificação frontal por análise operacional**

A localização da zona frontal foi identificada pelo método utilizado nas práticas operacionais sinóticas. Esta zona é determinada da seguinte forma: (1) uma zona "alongada" num cavado de um ciclone baroclínico (por mapas de pressão ao nível da superfície) e vorticidade ciclônica (ao nível de 1000 hPa); (2) uma zona de confluência de linhas de corrente nos níveis baixos (925 e 850 hPa), (3) localizada entre regiões com advecção de ar quente e frio (níveis de 925 e 850 hPa (PETTERSEN 1956, BLUESTEIN 1993, FEDOROVA 1999, FEDOROVA e CARVALHO 2000)). (4) Por "forte" gradiente de temperatura é geralmente significativa em ordem de grandeza ou maior do que a força da escala sinótica típica de 10 K por 1000 km<sup>-1</sup> (ou 10g kg<sup>-1</sup> de taxa de mistura de vapor de água por 1000 km) " (BLUESTEIN 1993). Na zona frontal "a temperatura muda drasticamente na direção horizontal por uma média de 3°C nas regiões subtropicais e 4-5°C nas latitudes médias e nas regiões polares" pela definição de TALJAARD (1972).

#### **4.3.2 Identificação frontal usando temperatura potencial equivalente**

O estudo da estrutura de uma frente que passa pela América do Sul para o nordeste do Brasil (GEMIACKI, 2005; Fedorova et al., 2016) mostra que uma variação de temperatura na ZF não foi observada no NEB. Ao mesmo tempo, uma variação na temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) foi satisfatória nesta região. Portanto, Uma distribuição horizontal da advecção de ( $\theta_e$ ) foi usada para identificação frontal. Estes

parâmetros foram calculados pelas seguintes equações (BOLTON 1980) citada por Fedorova et al, (2016):

$$\theta_e = T_k \left( \frac{1000}{p} \right)^{0.2854(1-0.28*10^{-3}r)} \exp \left[ \frac{3.267}{T_{lcl}} - 0.00254r(1+0.81*10^{-3}r) \right] \quad (1)$$

onde  $T_K$  é a temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $p$  pressão atmosférica (hPa),  $r$  razão de mistura no nível inicial (g  $\text{kg}^{-1}$ ),  $T_{lcl}$  a temperatura absoluta no nível de condensação por levantamento ( $^{\circ}\text{K}$ ), calculada pela equação:

$$T_{lcl} = \frac{1}{\frac{1}{T_d - 56} + \frac{\ln(T_K - T_d)}{800}} + 56, \quad (2)$$

$$\text{Adv}\theta_e \equiv -V_H \cdot \nabla_H \theta_e = - \left( u \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right), \quad (3)$$

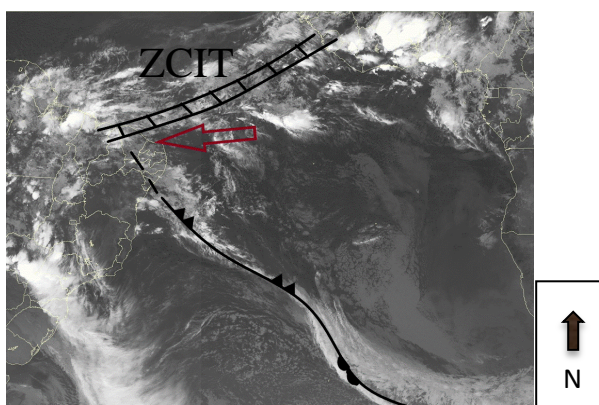
onde  $x$  e  $y$  são os componentes do vento (m / s).

Uma onda de calor nos mapas de  $\theta_e$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) à frente da ZF e uma onda de frio de  $\theta_e$  (K) com um gradiente alto atrás dela têm sido usados como critérios para a identificação de ZF. Além disso, as ZFs foram observadas entre os valores positivos de  $\text{Adv}\theta_e$  na frente da ZF e os valores negativos de  $\text{Adv}\theta_e$  por trás dele (FEDOROVA, 2016).

#### 4.4 Ligações da extremidade frontal com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

Para a identificação da ligação da zona frontal com a ZCIT foram analisadas as seguintes características: 1 - Na imagem de satélite foi observada a ligação da banda de nebulosidade associada com a extremidade frontal e a ZCIT na região do NEB, como ilustrado na Figura 9;

**Figura 9 – Ilustração da ligação da extremidade frontal com ZCIT pelo recorte da imagem de satélite no canal IR. Seta vermelha indica região de ligação.**

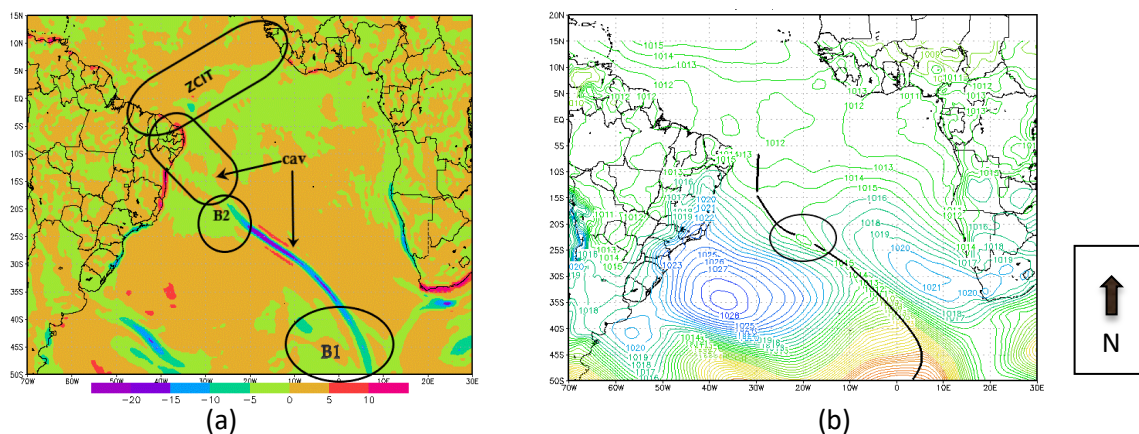


Fonte: CPTEC/INPE, 2018.



2 - No campo de vorticidade foram observados valores negativos da vorticidade relativa no ciclone, cavado do ciclone e na ZCIT, no horário em que foi observada a ligação, como mostrado na Figura 10;

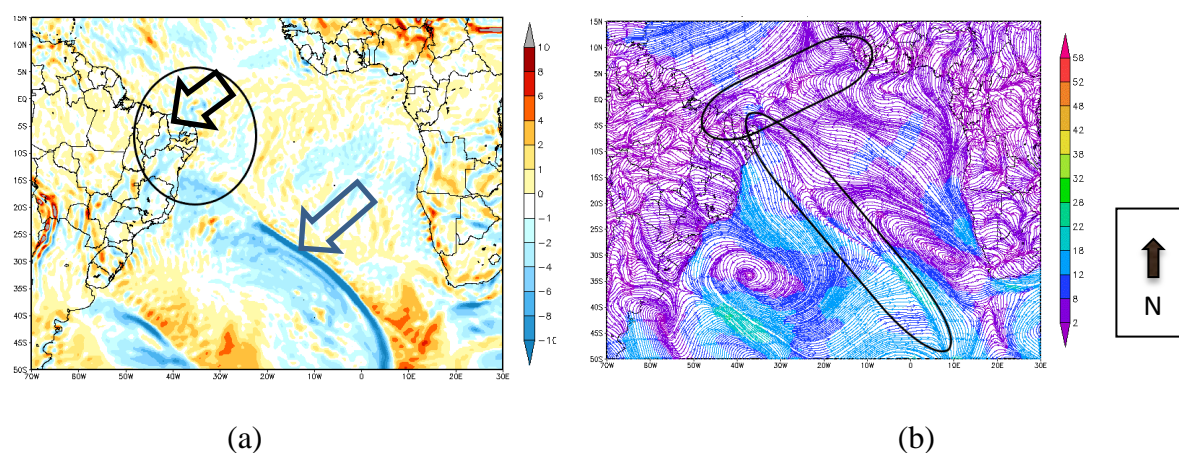
**Figura 10 - Identificação da ZCIT e FF no campo da vorticidade relativa e posição dos centros de baixa pressão no campo de PNM.**



Fonte: Autor, 2018

3 - NO campo da advecção de temperatura potencial equivalente foram observados entre os valores positivos de  $Adv\theta_e$  na frente da ZF e os valores negativos de  $Adv\theta_e$  por trás do cavado do ciclone e na ZCIT, nas regiões indicadas na Figura 11.

**Figura 11 - (a) Campo de advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) e (b) linhas de corrente no nível 1000 hPa. círculo-região de interesse. Seta azul – posição da frente fria, seta preta região da ligação da EF com ZCIT.**



Fonte: Autor, 2018.

## **4.5 Análise dos fenômenos adversos associados**

### **4.5.1 Análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoadas**

A análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoadas foi feita usando dados do METAR das estações meteorológicas localizadas nos estados da costa leste do NEB, disponíveis em : <https://www.redemet.aer.mil.br/>.

### **4.5.2 Análise de precipitação**

Para a análise da precipitação foram utilizados dados de estimativa de precipitação por satélite de alta resolução espaço-temporal (8 km x 8 km a cada 30 min) do CMORPH do *Climate Prediction Center* (CPC) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), disponíveis em: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov>; no domínio de 30°S a 10°N e 70°W a 20°W.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o período de estudo (2008-2017), foram registrados 27 sistemas frontais que chegaram até a região do NEB. Estes sistemas foram analisados desde a sua formação, durante todo período de deslocamento até atingirem a região de interesse e ligação ou não com ZCIT. A Tabela 1 mostra tempo de vida dos sistemas frontais até a região de estudo. Entre 27 casos identificados na região do NEB 5 (cinco) tiveram ligação com ZCIT.

**Tabela 1. Zonas frontais que atingiram a região do NEB durante 10 anos (2008-2017), duração das frentes frias e ligação com ZCIT. N- não, S – sim.**

Nº	INÍCIO	FIM	DURAÇÃO	Ligação com ZCIT
1	01/06/2008	02/06/2008	2 dias	N
2	11/09/2008	20/09/2008	10 dias	N
3	06/10/2008	10/10/2008	5 dias	N
4	01/12/2008	06/12/2008	6 dias	N
5	20/08/2009	23/08/2009	4 dias	N
6	07/04/2010	10/04/2010	4 dias	S
7	01/06/2010	05/06/2010	2 dias	N
8	12/08/2010	18/08/2010	6 dias	N
9	02/06/2011	05/06/2011	4 dias	S
10	01/09/2011	02/09/2011	2 dia	N
11	17/10/2011	20/10/2011	4 dias	N
12	24/09/2012	27/09/2012	4 dias	N
13	12/08/2013	16/08/2013	5 dias	N
14	05/10/2013	08/10/2013	6 dias	N
15	09/05/2014	12/05/2014	4 dias	S
16	03/09/2014	07/09/2014	4 dias	N
17	20/09/2014	23/09/2014	4 dias	N
18	02/10/2014	06/10/2014	5 dias	N
19	14/11/2014	20/11/2014	7 dias	N
20	29/04/2015	04/05/2015	5 dias	S
21	12/05/2015	17/05/2015	5 dias	N
22	01/01/2016	05/01/2016	5 dias	N
23	28/03/2017	03/04/2017	7 dias	N
24	16/05/2017	22/05/2017	7 dias	S
25	01/09/2017	04/09/2017	6 dias	N
26	31/10/2017	04/11/2017	5 dias	N
27	10/11/2017	16/11/2017	6 dias	N

Fonte: Autor 2018.

No total foram observadas 27 casos e somente 5 casos com ligação. Entre os casos sem ligação, 3 tiveram duração de 2 dias (a menor duração registrada em todos os casos analisados), 5 com duração de 4 dias, 6 com duração de 5 dias, 5 com duração de 6 dias, 2 com duração de 7 dias e 1 com duração de 10 dias (a maior duração registrada entre os casos analisados). Entre os 5 (cinco) casos com ligação, 3 tiveram a duração de 4 dias, os outros dois tiveram a duração de 5 e 7 dias respectivamente.

Foram escolhidos para o estudo os casos que ocorreram no mês de maio de 2015 (04/05 e 16/05, às 18 UTC e 12 UTC respectivamente). A escolha desses casos foi baseada pelo seguinte critério: os dois casos ocorreram no mês de maio de 2015; o caso que ocorreu no dia 04/05 teve ligação com a ZCIT e o caso do dia 16/05 não teve ligação. Foram feitas análises para encontrar diferenças entre os dois casos.

**Tabela 2. Número de casos ocorridos em cada estação do ano durante o período de 2008 a 2017. Número em vermelho (com ligação), número em preto (sem ligação).**

PERÍODO	NÚMERO DE OCORRÊNCIAS FFs NO NEB												TOTAL ANUAL
	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	
2008	1						1			1	1		4
2009									1				1
2010					1		1		1				3
2011							1			1	1		3
2012										1			1
2013									1		1		2
2014						1				2	1	1	5
2015					1 → 1	1							2
2016		1											1
2017					1	1		1		1		2	6
Soma todas frentes	1	1	0	0	2	4	3	1	3	6	4	3	27
Soma frentes com ligação com ZCIT	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	5
Estações do ano	VERÃO			OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA			

Fonte: Autor 2018.

A Tabela 2 mostra o período de estudo e as estações do ano. Pode ser observado que a maioria dos episódios de frentes ocorreram entre os meses de Agosto, Setembro e Outubro, registrando 13 casos. A estação de Verão registrou o menor número de casos (2). Os casos observados com ligação com ZCIT ocorreram nos meses de Abril e Maio, com exceção de um caso que ocorreu em junho. Durante a atuação dos dois sistemas no NEB, foram registradas chuvas fortes na costa leste do NEB, colocando em risco a vida humana por conta de inundações e deslizamentos de terra provocada pelas enxurradas.

## **5.1 Análise da frente fria com ligação com ZCIT ocorrido nos dias de 29/04 a 04/05/2015**

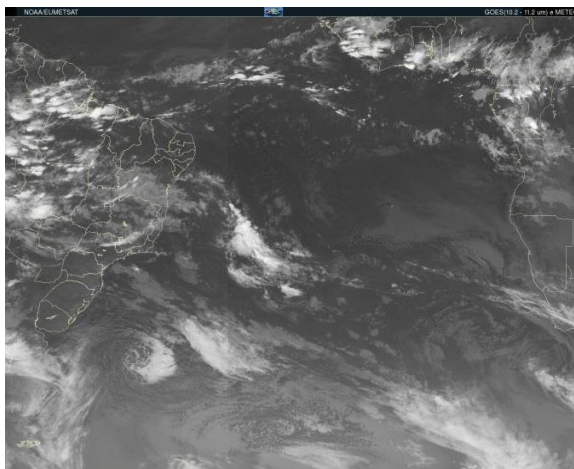
### **5.1.1 Análise do processo de desenvolvimento da frente fria com ligação com ZCIT**

A Figura 12 mostra as imagens de satélite e o campo de pressão ao nível médio do mar (PNM) referente ao período da formação da frente fria, deslocamento até alcançar a região do NEB. A formação do sistema se deu no dia 29 de abril de 2015 na região sudeste do Brasil (Figura 12 a e b), conhecida como região ciclogênica (FEDOROVA et al, 2016). A intensificação do sistema de alta pressão localizada ao sul da costa do Uruguai nas coordenadas 50°S e 50°W, o bloqueio da alta subtropical próximo da costa da África localizada nas coordenadas 32,5°S e 3°W, fez deslocar a frente fria para a região do NEB, na Figura 8. Também foi observada uma frente secundária que posteriormente formou oclusão instantânea com a frente principal (Figura 12 g), realimentando o sistema.

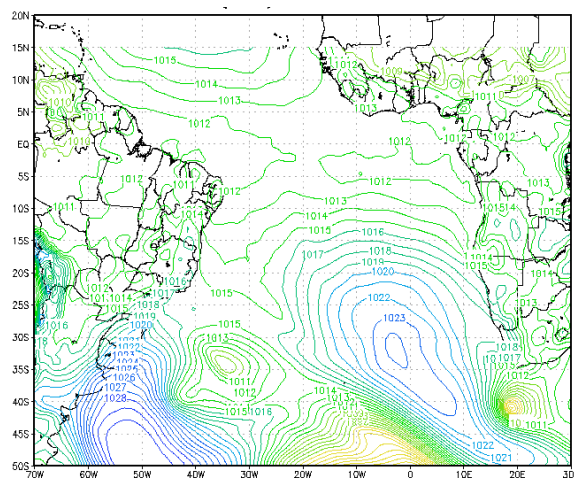
A extremidade frontal deste sistema alcançou o estado de Alagoas no dia 04 de Maio às 18Z, neste horário foi observada a junção da banda de nebulosidade da extremidade frontal com a banda de nebulosidade da ZCIT (Figura 12 k) influenciando no tempo na região do NEB.

No campo da PNM na Figura 12 b foi observado um cavado da ZCIT mais intenso na costa leste do NEB, sua intensidade foi diminuindo na medida em que o sistema frontal foi se deslocando em direção ao nordeste.

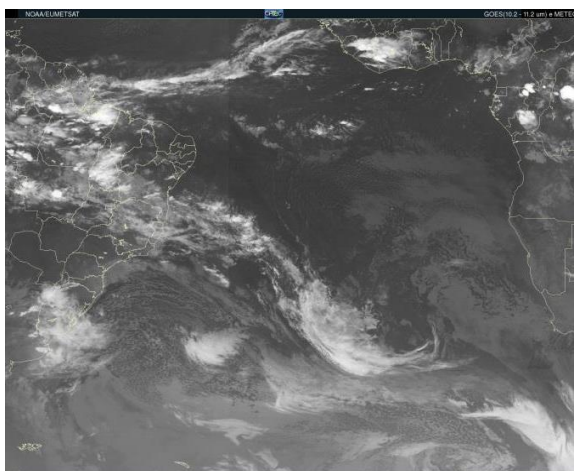
**Figura 12 - Imagem do satélite do GOES 12 no canal infravermelho (a, c, e, g, i, k) e PNM (hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 29 de Abril a 03 de Maio, e 18Z do dia 04 de Maio de 2015.**



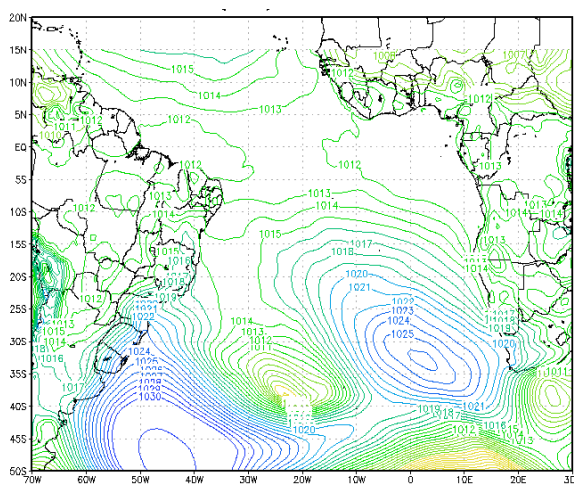
(a)



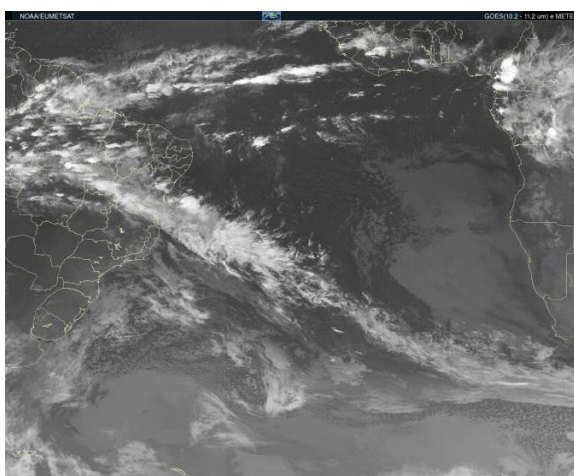
(b)



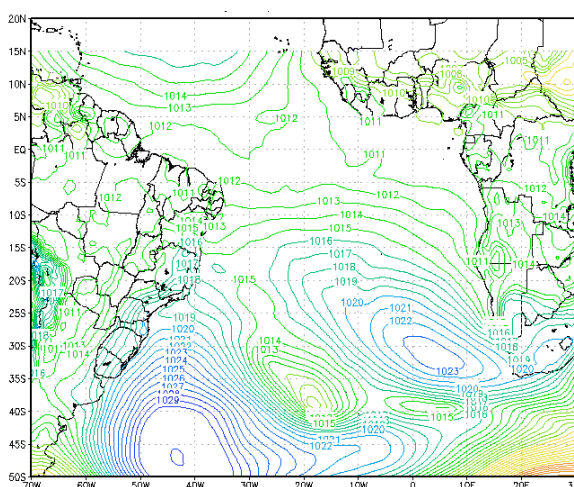
(c)



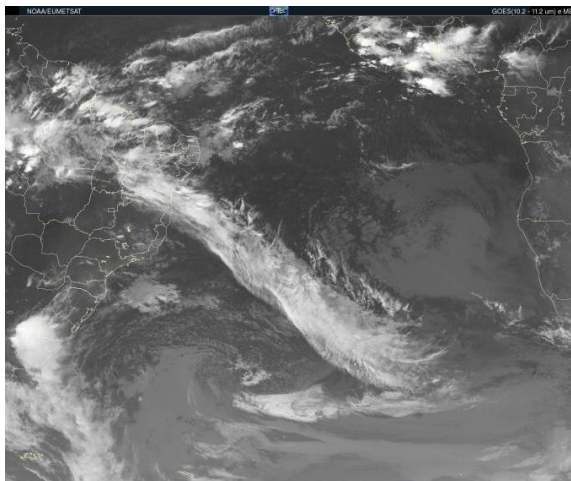
(d)



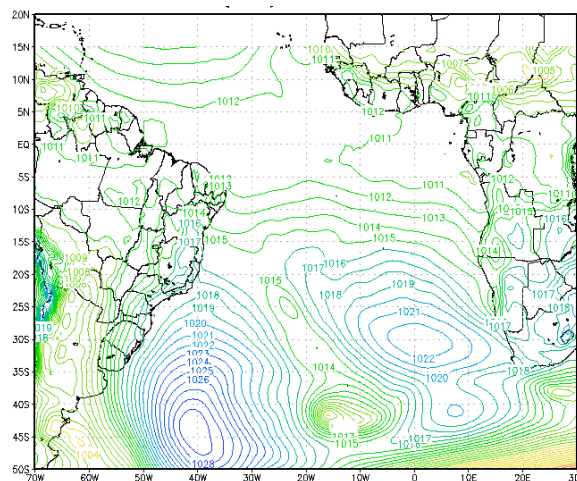
(e)



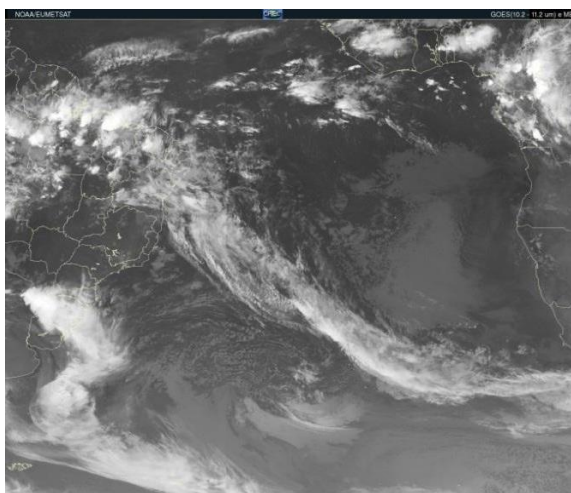
(f)



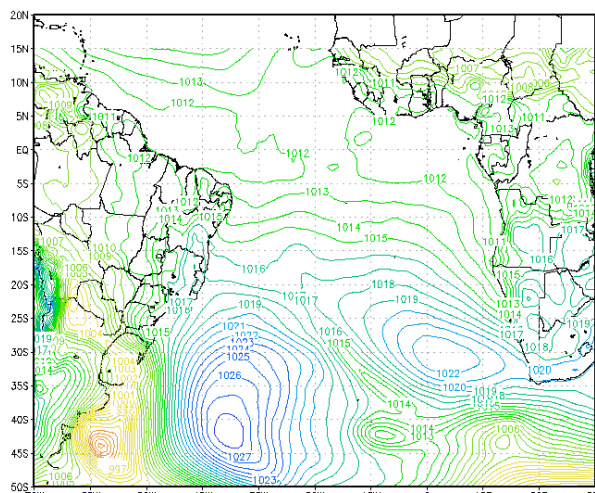
(g)



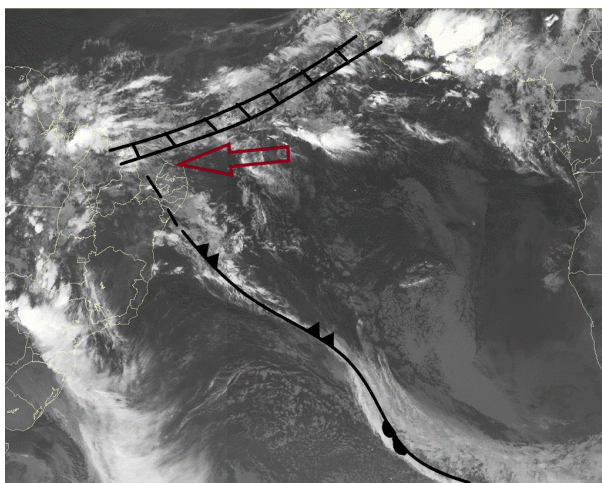
(h)



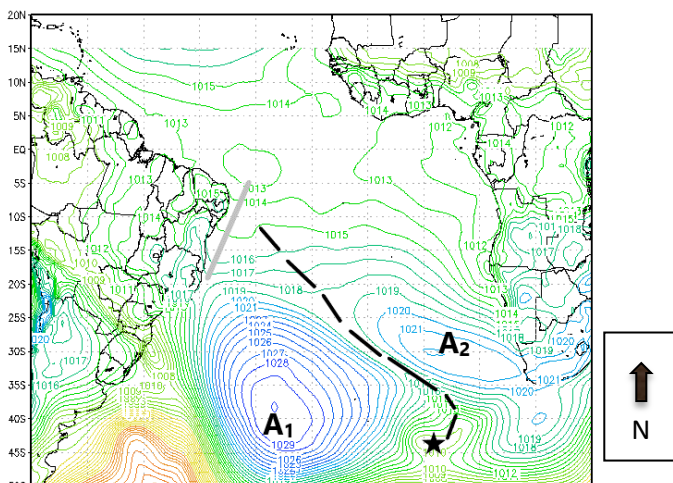
(i)



(j)



(k)



(l)

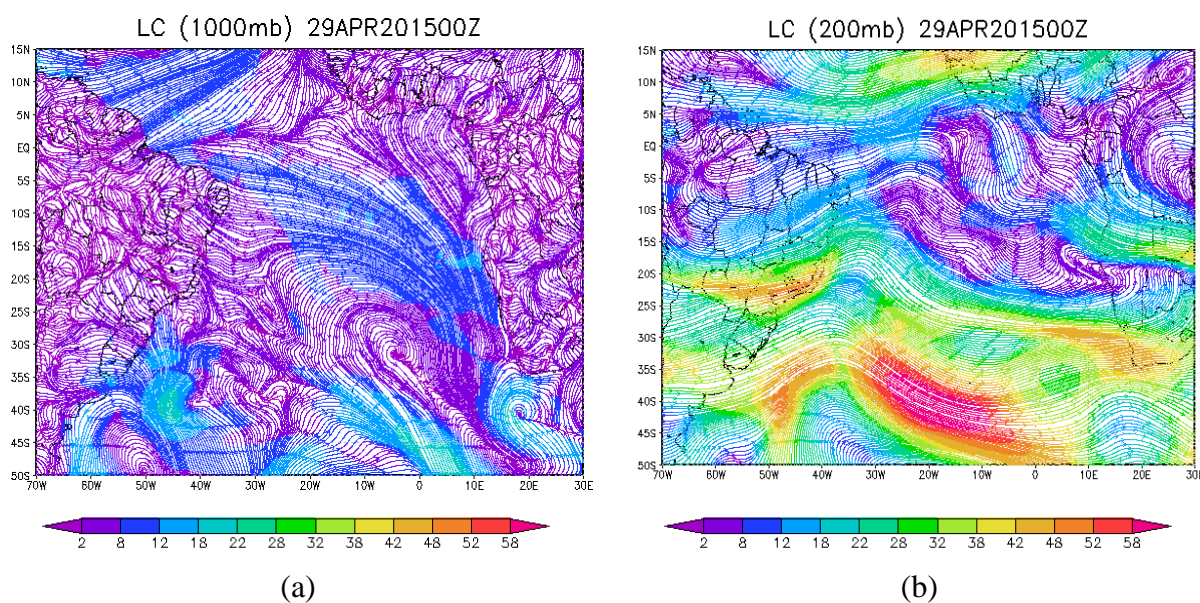
Fonte: Autor 2018.

### 5.1.2 Análise da estrutura da frente fria com ligação com ZCIT

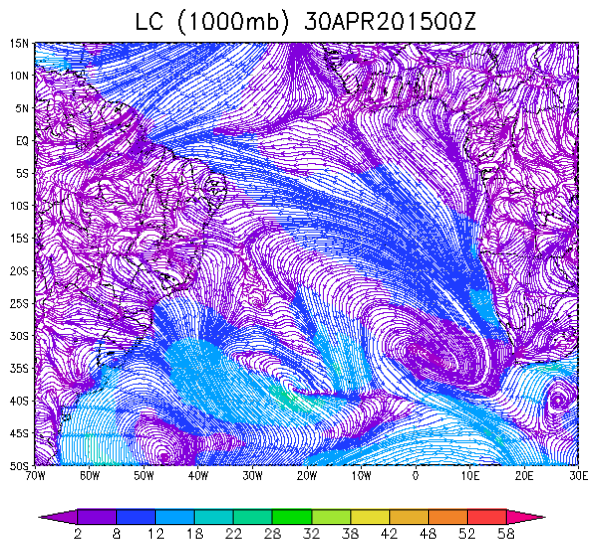
A Figura 13 mostra os campos das linhas de corrente em baixos e altos níveis (1000 e 200 hPa) desde formação da frente fria até ao dia 04 de maio de 2015 às 18Z, período em que foi registada a ligação da extremidade frontal com a ZCIT. O centro do ciclone baroclínico associado ao cavado da frente fria está localizada na latitude de 45°S e na longitude de 0° (Figura 13i). Pode ser observado na figura 9k em baixos níveis (1000 hPa) a posição da ZCIT na região do NEB aproximadamente 4°S. A confluência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste e a confluência na extremidade frontal estão localizadas no nordeste exatamente na região da banda de nebulosidade observada na imagem de satélite (Figura 13 k). A presença desses dois sistemas no NEB influenciou no tempo na região.

Em altos níveis foi observada a presença de um vórtice ciclônico (VCAN) no final do período analisado com o centro localizado na costa leste do NEB na latitude 13°. A corrente de jato subtropical não teve influências na região, pois esteve posicionado no sul da Bahia (Figura 13 c).

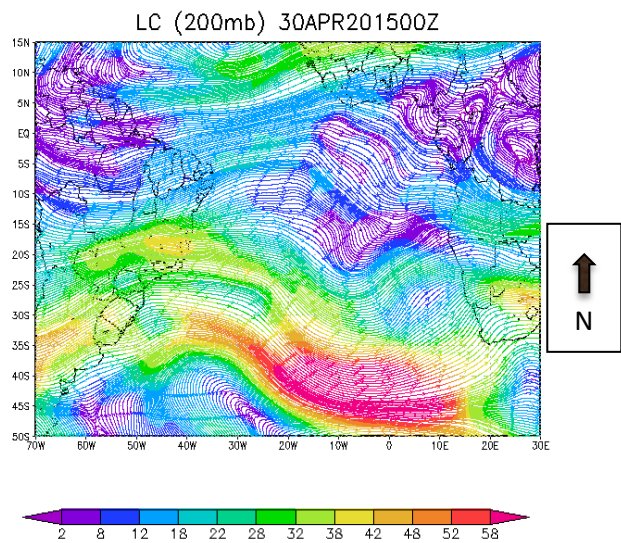
**Figura 13 - Campos de linhas de corrente em baixos níveis (1000 hPa) (a, c, e, g, i, k,) e altos níveis (200 hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 29 de Abril a 03 de Maio, e 18Z do dia 04 de Maio de 2015. A estrela preta na figura L mostra a posição do VCAN.**



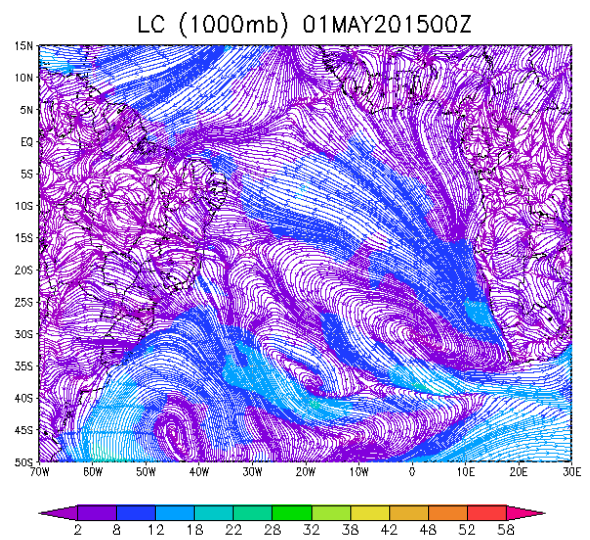




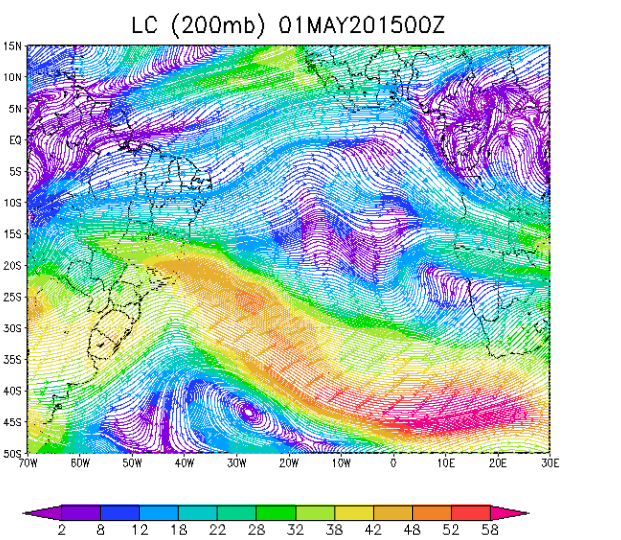
(c)



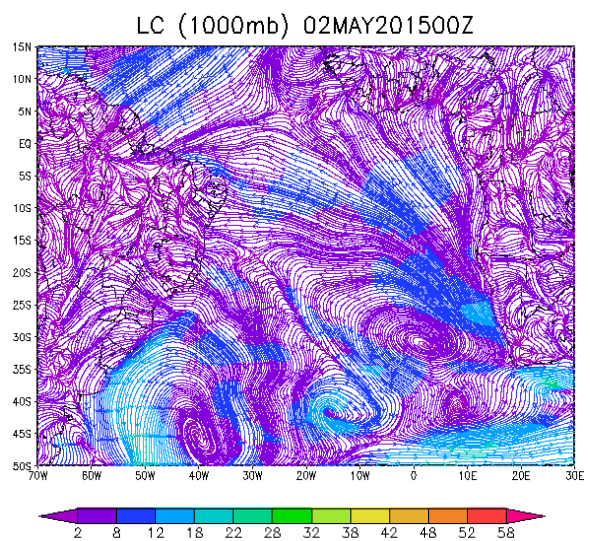
(d)



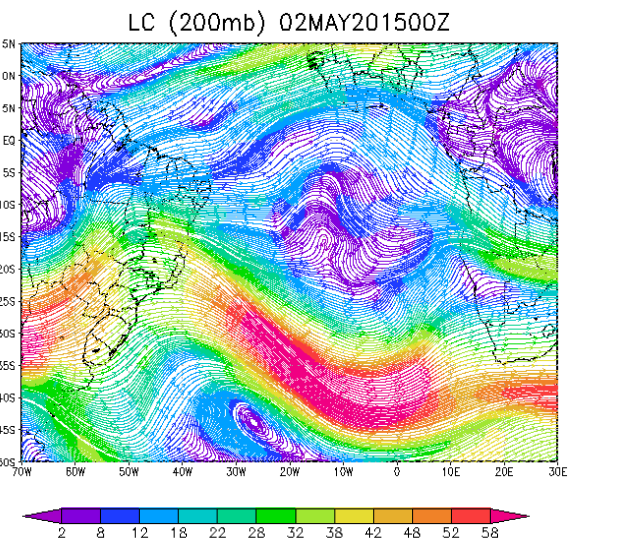
(e)



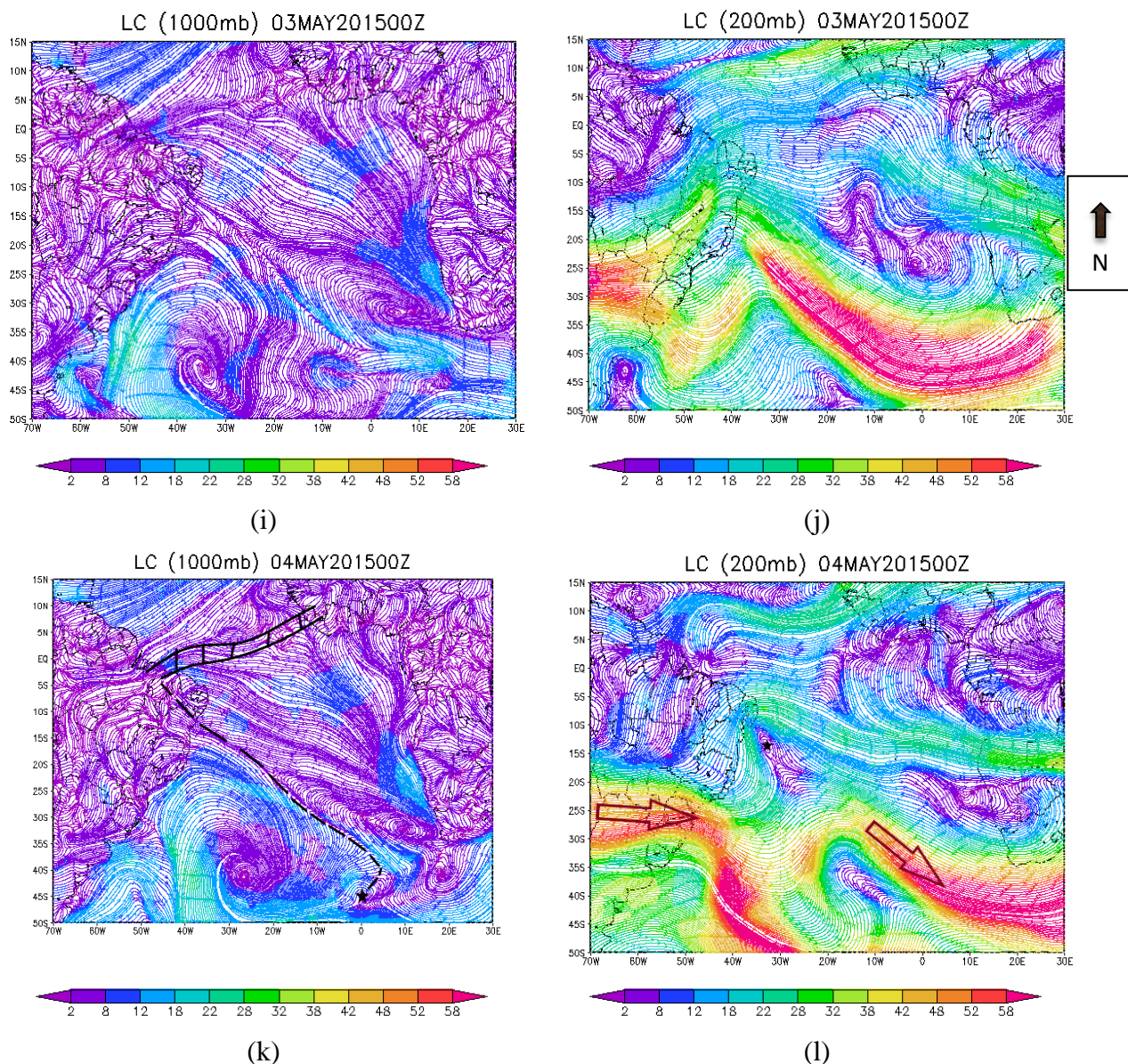
(f)



(g)



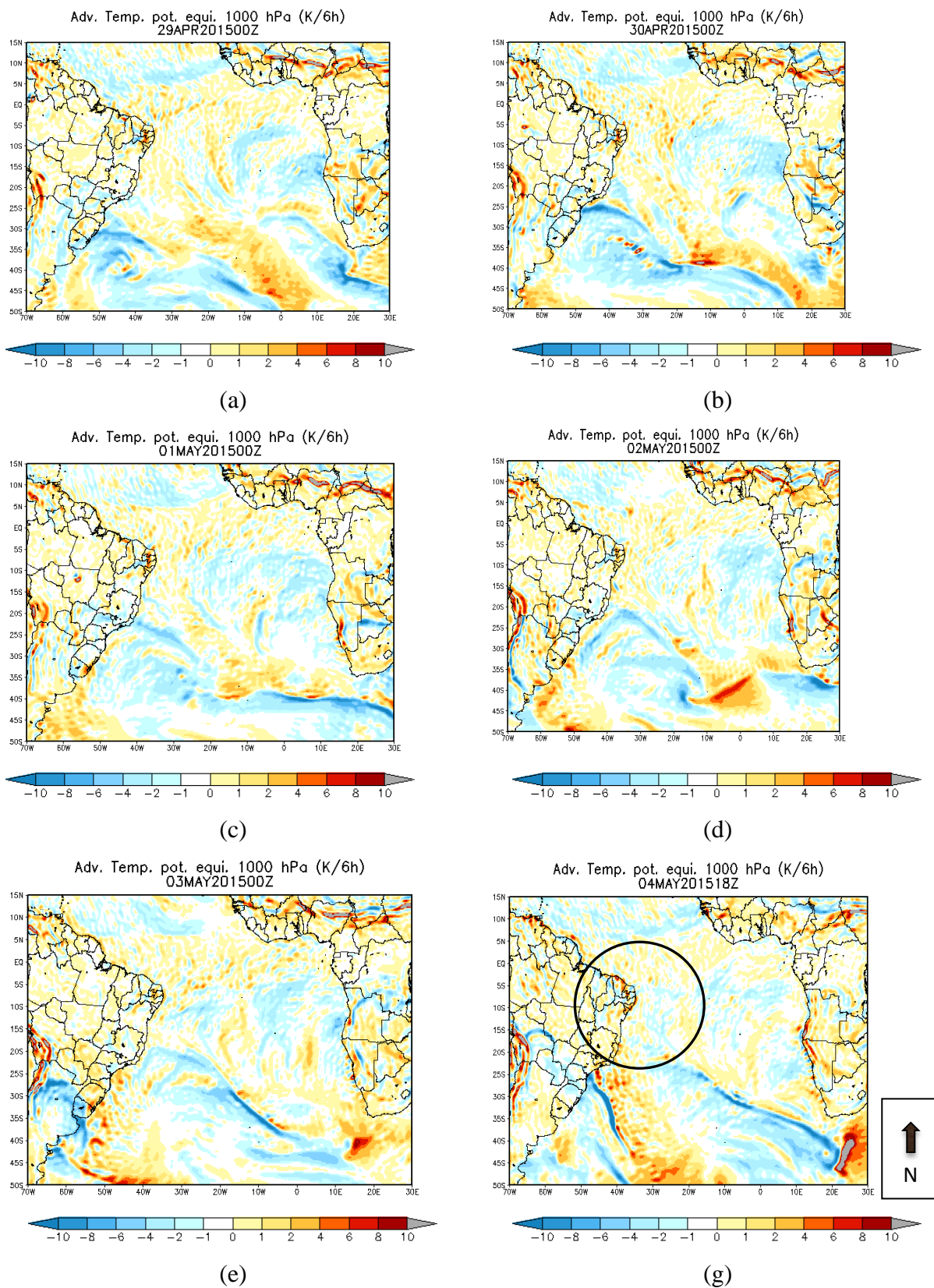
(h)



Fonte: Autor 2018.

A Figura 14 mostra o campo da advecção de temperatura potencial equivalente, nota se através da Figura 14a, no dia 29/04 na região onde se formou o sistema com valores aproximado de  $-10\text{K}/6\text{h}$  (advecção fria) na retaguarda, e  $2\text{K}/6\text{h}$  na vanguarda do sistema. No dia seguinte (Figura 14b) os valores da advecção de temperatura potencial equivalente persistiram, e foi possível observar o deslocamento da advecção fria mais para o norte da costa leste. Na medida em que o sistema foi se deslocando em direção ao NEB a advecção fria foi perdendo sua intensidade (Figura 14 c, d e f) apresentando valores de  $-6\text{K}/6\text{h}$  na retaguarda e  $1\text{K}/6\text{h}$ . No dia em que foi observado o acoplamento da extremidade frontal com a ZCIT (4/05 às 18Z), a região do NEB mostrou fraca advecção fria (aproximadamente  $-4\text{K}/6\text{h}$ ), e advecção quente  $6\text{K}/6\text{h}$  (Figura 14 g).

**Figura 14 - Campos de Advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 29/04 (a), 00Z de 30/04 (b), 00Z de 01/05 (c), 00Z de 02/05 (d), 00Z de 03/05 (e) e 18Z de 04/05 (f) do ano de 2015, círculo região de interesse.**

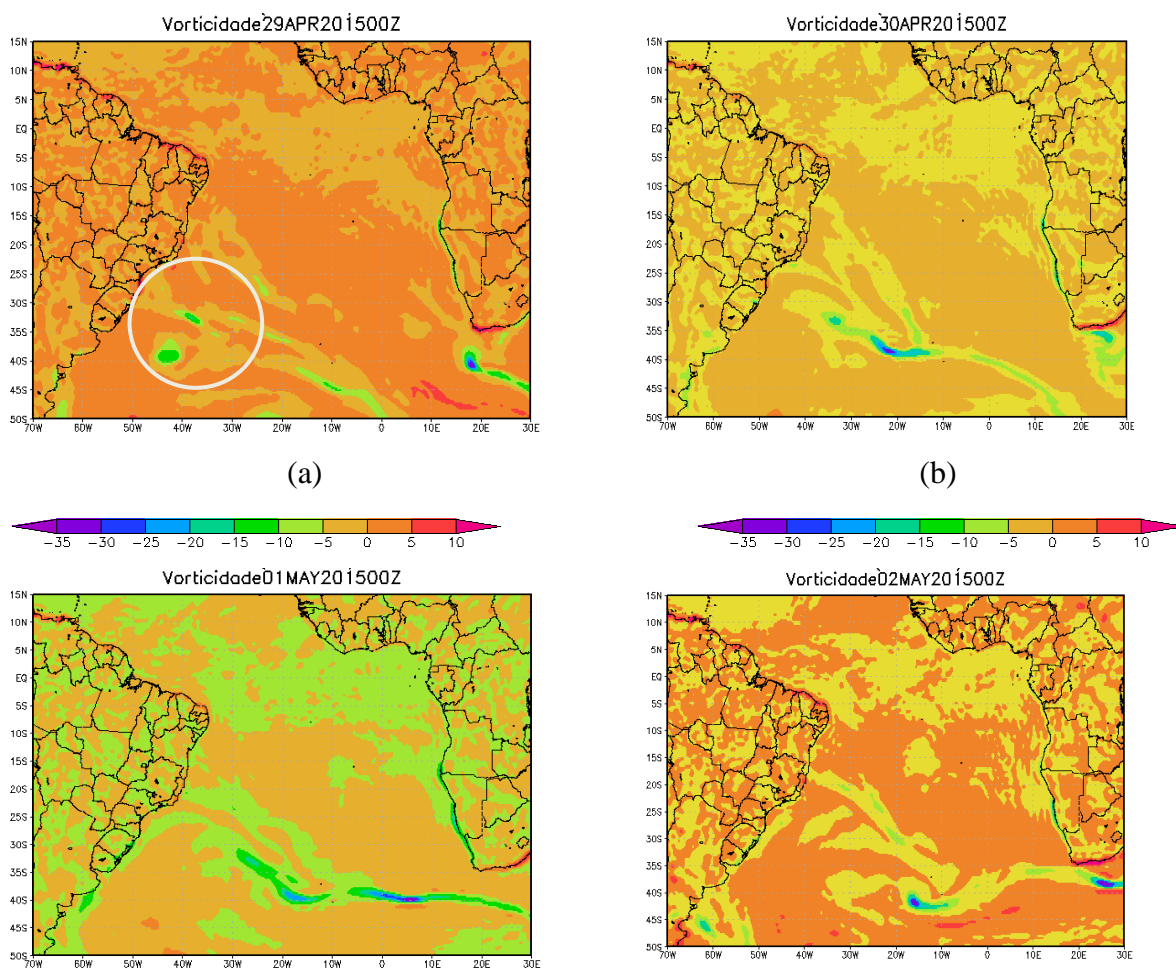


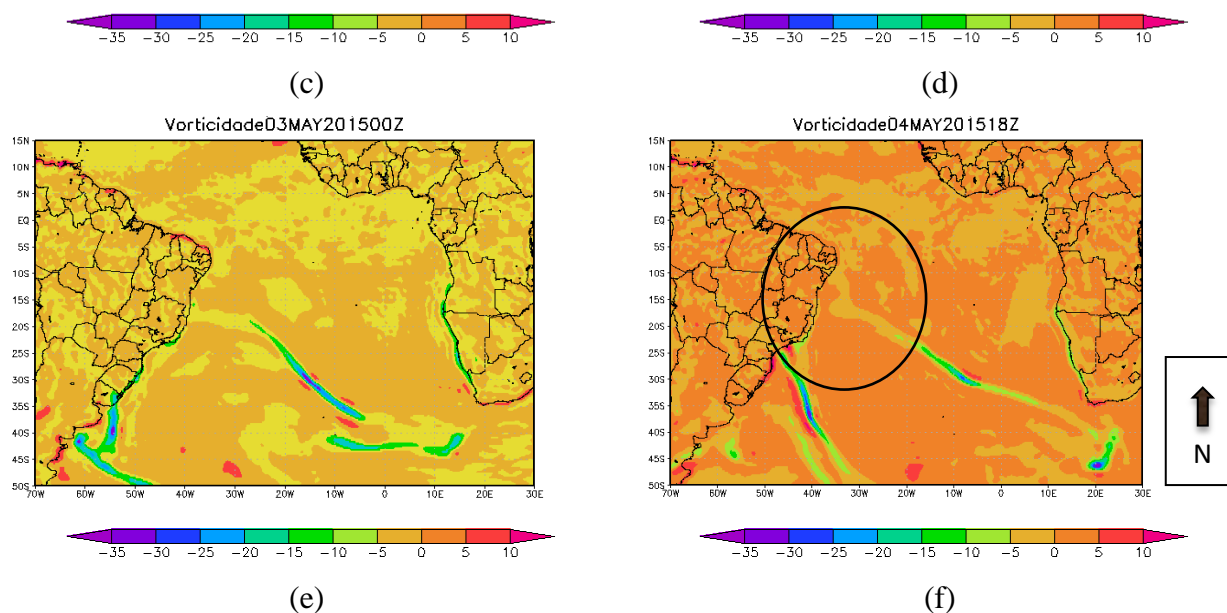
Fonte: Autor 2018.

A Figura 15 mostra os campos da vorticidade relativa desde o dia 29/04 até 4/05 às 18Z. Observa-se a região onde se formou o sistema (Figura 15a) com vorticidade negativa ( $-15 \text{ S}^{-1}$ ) no seu centro. No dia seguinte com o desenvolvimento do sistema nota-se a posição da frente fria e com vorticidade negativa ( $-10 \text{ S}^{-1}$ ), na mesma figura 11b é possível observar a intensificação do sistema com valor máximo de vorticidade relativa aproximado a  $-35 \text{ S}^{-1}$ , e na ZCIT ( $5 \text{ S}^{-1}$ ).

No dia 2 de maio (Figura 15 e) a posição da frente fria na região sudeste da Bahia apresentando a sua máxima vorticidade relativa ( $-35 \text{ S}^{-1}$ ) durante a sua trajetória, e no dia 4/05 que foi observada a ligação com ZCIT o valor da vorticidade relativa observada é de  $-15 \text{ S}^{-1}$  (Figura 15 f). O valor da vorticidade na ZCIT não teve uma variação considerável durante o deslocamento da frente fria para a região do NEB, apresentando o valor da vorticidade relativa de  $5 \text{ S}^{-1}$ .

**Figura 15 - Campos de vorticidade relativa ( $\text{S}^{-1}$ ) no nível 1000hPa do reanálise ERA-Interim de 00Z de 29/04 (a), 00Z de 30/04 (b), 00Z de 01/05 (c), 00Z de 02/05 (d), 00Z de 03/05 (e) e 18Z de 04/05 (f) do ano de 2015, círculo branco região da formação do ciclone preto região de interesse.**





Fonte: Autor 2018.

## 5.2 Análise da frente fria sem ligação com ZCIT ocorrido nos dias 12 a 17/05/2015

### 5.2.1 Análise do processo de desenvolvimento da frente fria com ligação com ZCIT

A Figura 16 mostra as imagens de satélite no canal infravermelho e os campos de PNM. Nota-se na Figura 16a às 00Z uma banda de nebulosidade convectiva próxima a costa leste do sul do Brasil nas coordenadas 30°S e 39°W. No campo de PNM (Figura 16b) pode ser observado a presença de um ciclone baroclínico associado a convecção na região. Na costa do NEB foi observada a presença de um cavado e mais ao sul a presença da alta subtropical (45°S e 45°W).

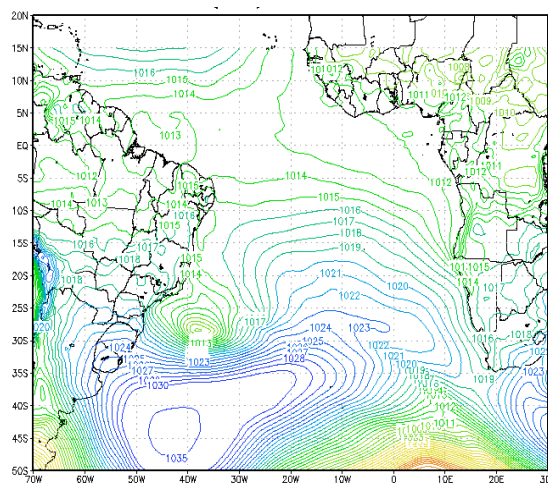
Com a presença da crista na retaguarda do ciclone (Figura 16b), sua intensificação forçou o deslocamento do centro da baixa pressão para o leste. Durante o seu deslocamento o cavado do ciclone associado a frente fria intensificou, sua extremidade alcançou o sul do Sergipe no dia 15/05 às 18Z (Figura 16h).

A banda de nebulosidade da ZCIT esteve posicionada mais ao norte (5°N) durante a atuação da frente fria no NEB. Com o bloqueio da alta subtropical e o enfraquecimento do cavado na costa leste do NEB a frente fria iniciou o seu processo de dissipação no dia 17/05 (Figura 16 l).

**Figura 16 - Imagem do satélite do GOES 12 no canal infravermelho (a, c, e, g, i, k,) e PNM (hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 12, 13, 14, 16, 17 18Z do dia 15 de Maio de 2015.**



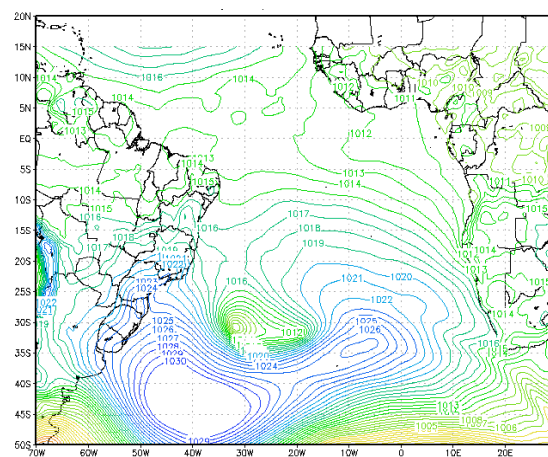
(a)



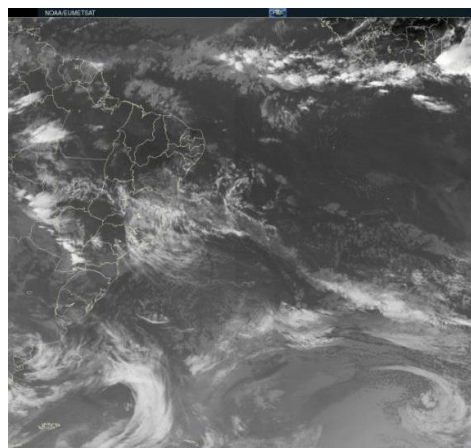
(b)



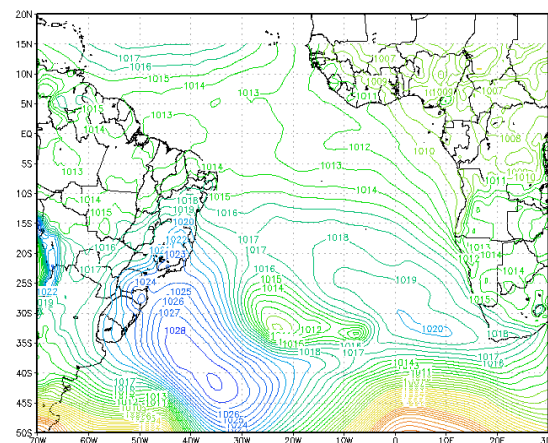
(c)



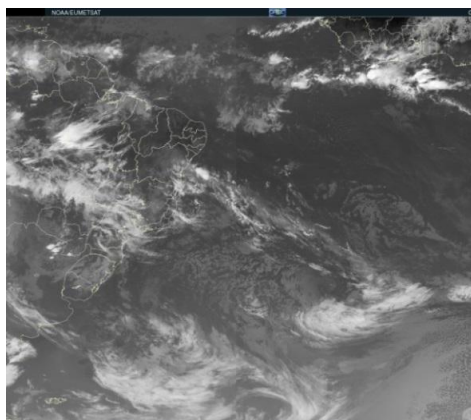
(d)



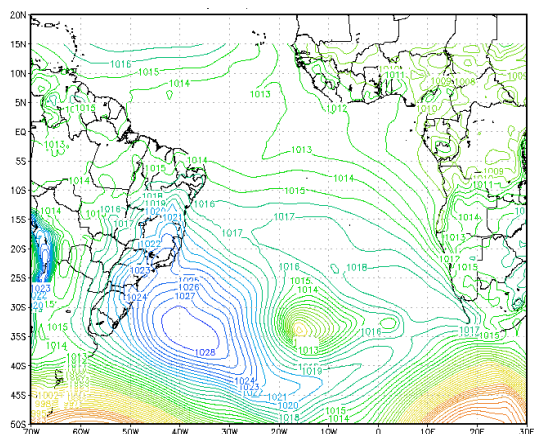
(e)



(f)



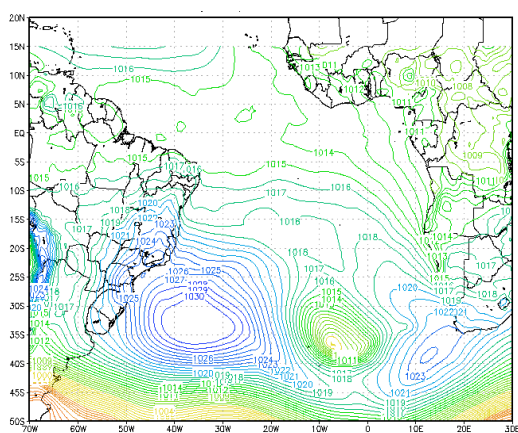
(g)



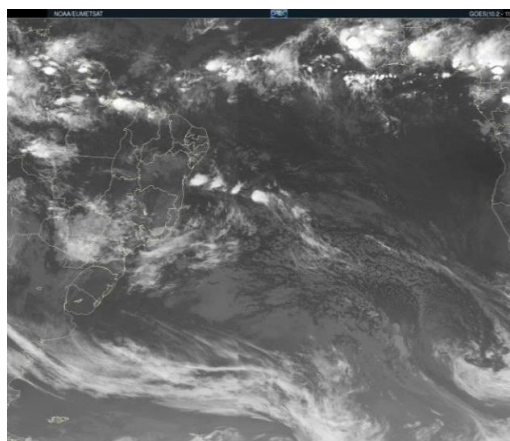
(h)



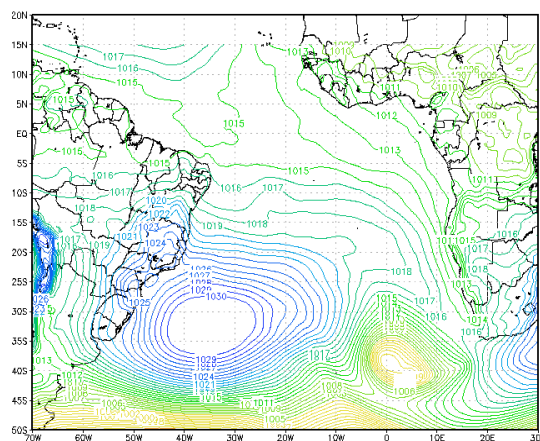
(i)



(j)



(k)



(l)

Fonte: Autor 2018.

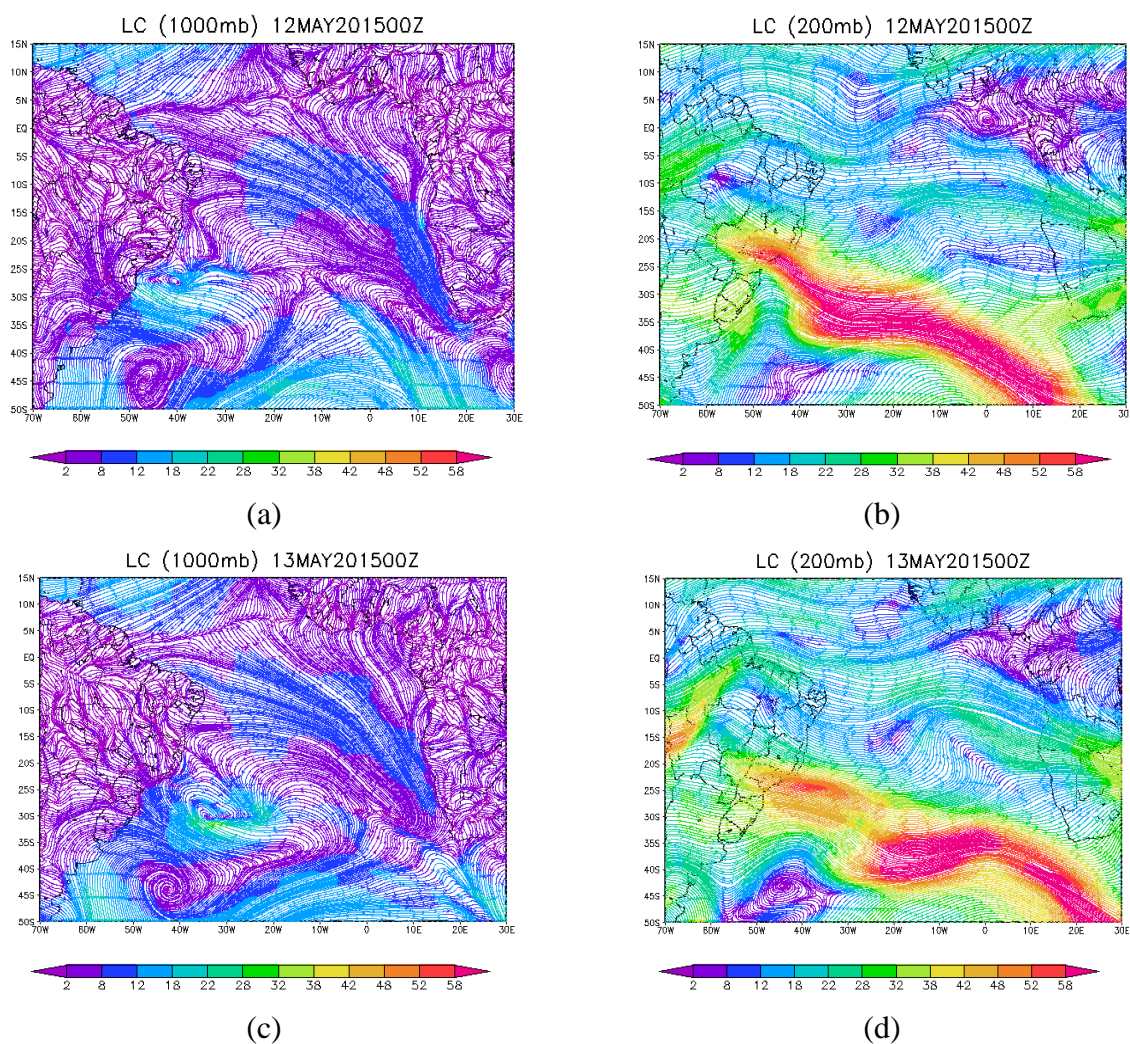
### 5.2.2 Análise da estrutura da frente fria com ligação com ZCIT

A Figura 17 mostra os campos das componentes do vento zonal e meridional em baixos e altos níveis (1000 e 200 hPa). Nota-se na Figura 17a próximo a costa leste de Santa Catarina a formação de um centro de baixa pressão na latitude 27°S. E em altos níveis a

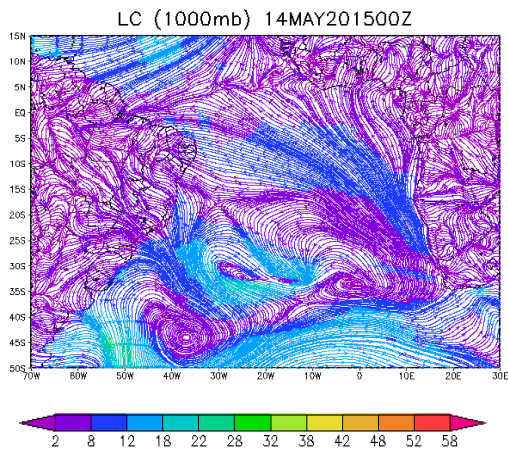
presença da corrente de jato subtropical com a entrada do lado frio posicionado na região onde se formou o centro do ciclone. Na medida em que o cavado do ciclone baroclínico foi se intensificando, a corrente de jato em altos níveis desintensificou. A intensificação máxima do cavado foi observada no dia 15/05 quando a sua extremidade alcançou o sul do Sergipe (Figura 17g). Em altos níveis nesse dia foi vista a presença de corrente de jato subtropical apresentando bifurcação cuja saída de uma parte de CJS posicionada na região do Piauí (Figura 17h) influenciando no tempo na região do NEB e a outra parte da CJS posicionada mais ao sul na latitude 20°S.

A confluência dos alísios de nordeste e de sudeste, que indica a posição da ZCIT no dia 15/05, estava posicionada na região de Amapá (2°N) (Figura 13g), não apresentando nenhuma ligação com a extremidade frontal.

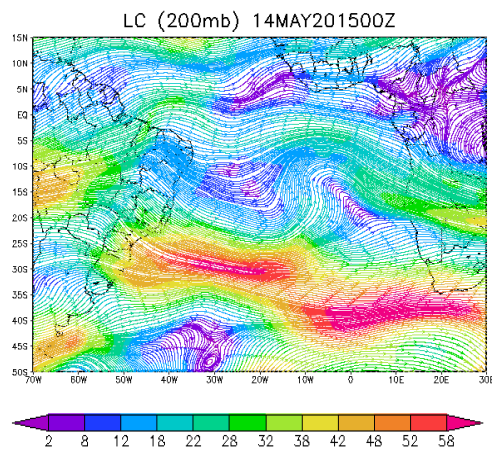
**Figura 17 – Análise de linhas de corrente em baixos níveis (1000 hPa) (a, c, e, g, i, k,) e altos níveis (200 hPa) (b, d, f, h, j, l) para as 00Z dos dias 12, 13 14, 16 e 17 de Maio e 8Z do dia 15 de Maio de 2015.**



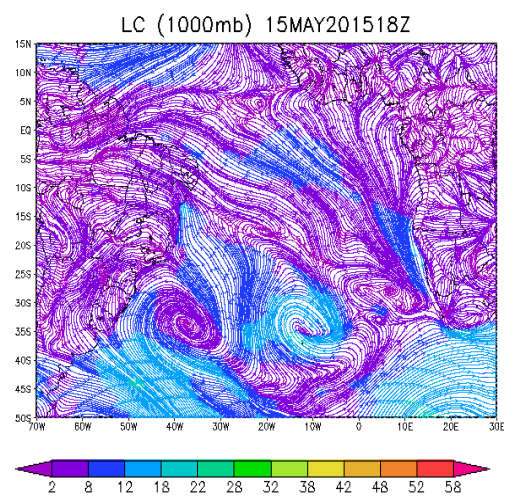




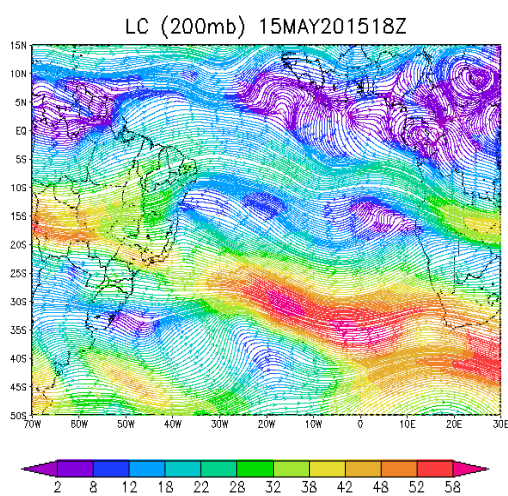
(e)



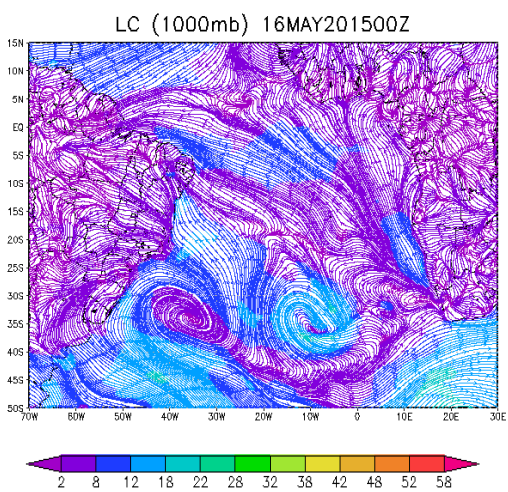
(f)



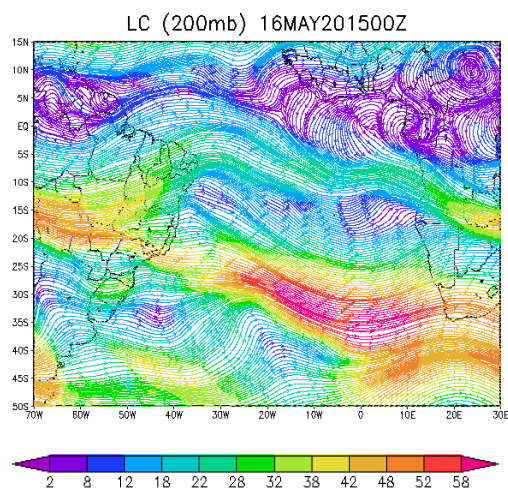
(g)



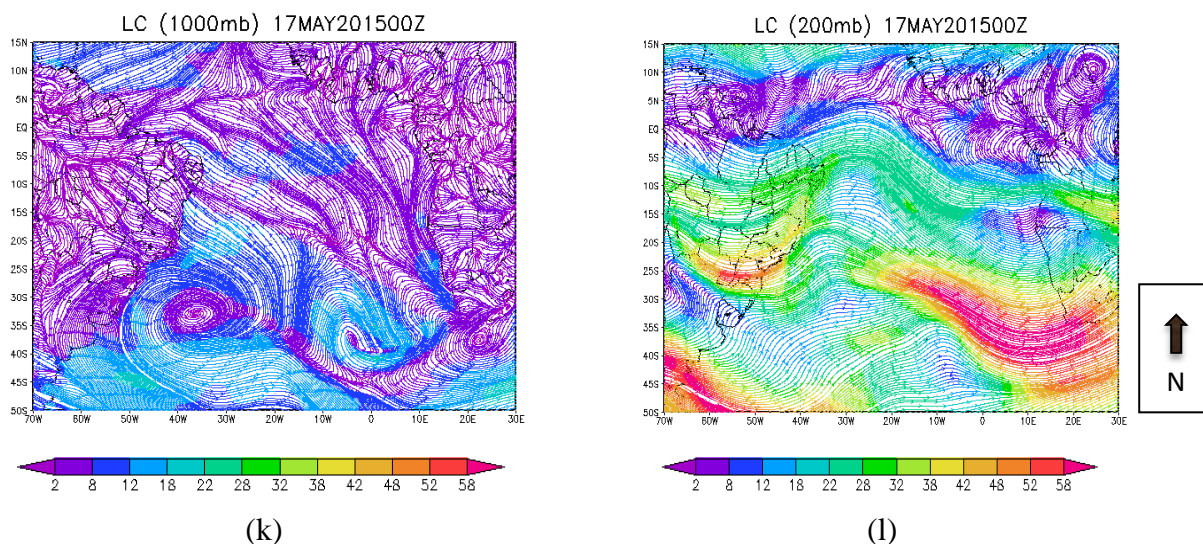
(h)



(i)



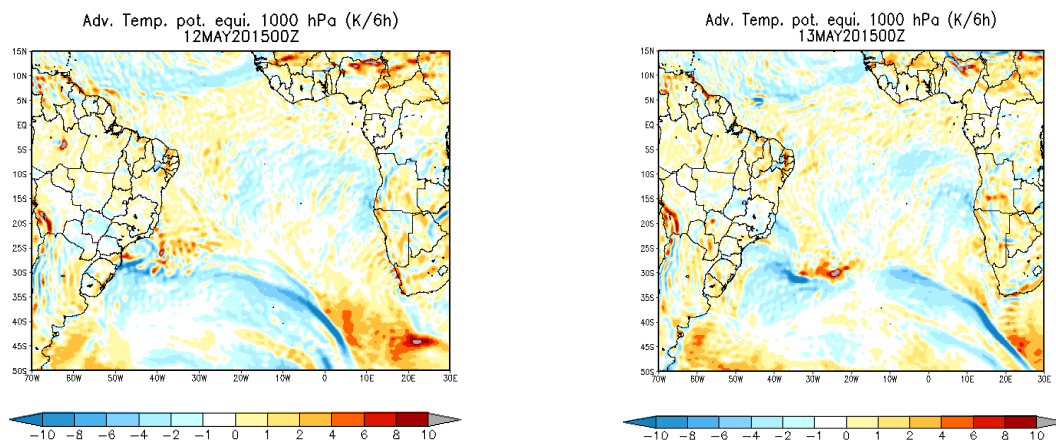
(j)

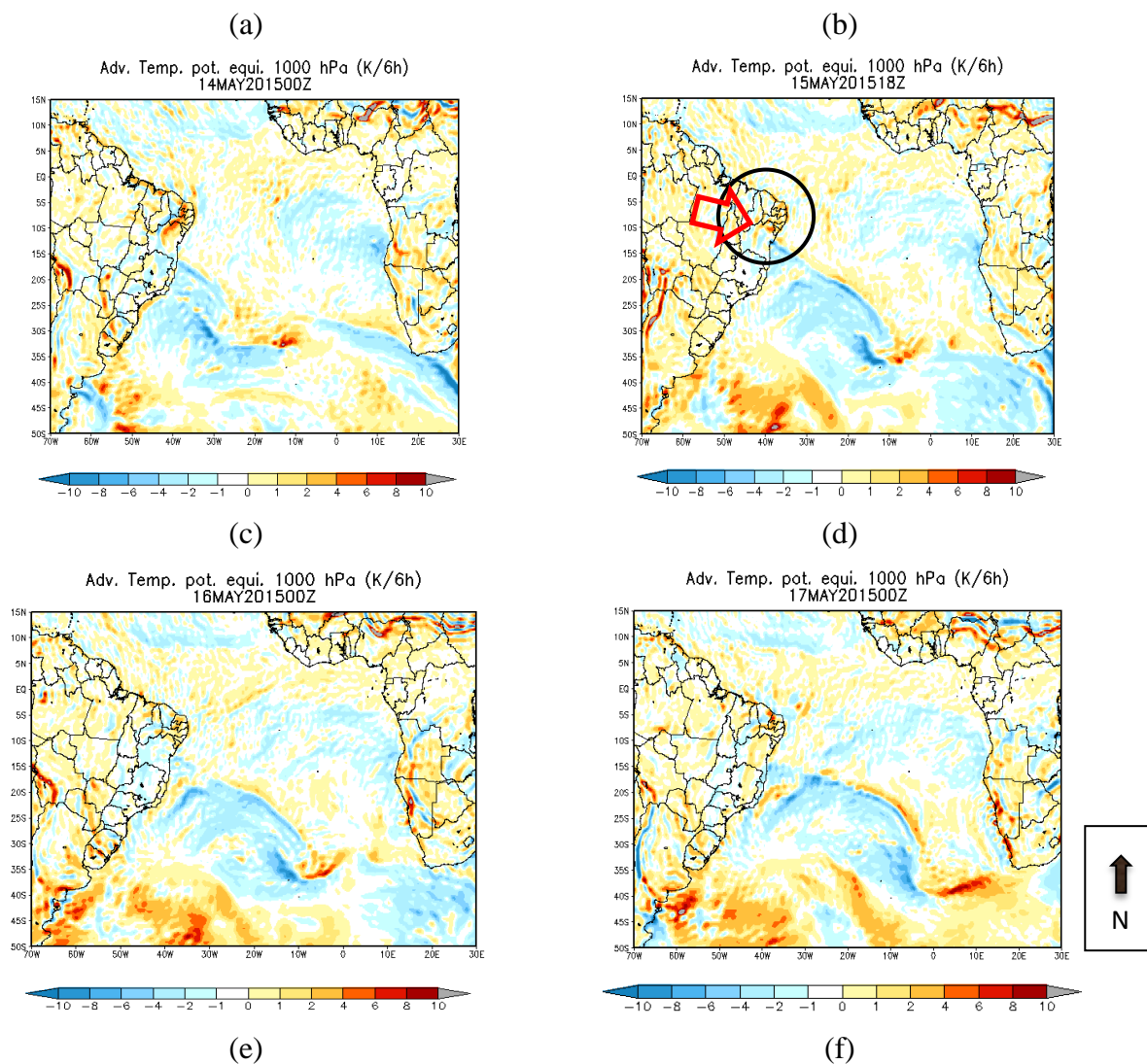


Fonte: autor 2018.

A Figura 18 mostra o campo de advecção de temperatura potencial equivalente, nota-se que na região da formação do ciclone a presença de advecção fria na retaguarda do ciclone ( $-8\text{K}/6\text{h}$ ) e advecção quente na vanguarda ( $6\text{K}/6\text{h}$ ) (Figura 18a). Durante a evolução do sistema, a advecção fria na retaguarda do ciclone ( $-8\text{K}/6\text{h}$ ) e advecção quente na vanguarda ( $6\text{K}/6\text{h}$ ) persistiu. No dia 15 de Abril às 18Z (Figura 18d) é possível observar a advecção fria na região sul do Sergipe com advecção fria de  $-10\text{K}/6\text{h}$ , a máxima advecção fria registrada ao longo da trajetória da frente fria, e na vanguarda do sistema frontal mostrou advecção quente ( $4\text{K}/6\text{h}$ ). O campo da advecção mostrou que a FF não atingiu o estado de Alagoas, a advecção fria se limitou somente até a região sul do Sergipe. Na região da ZCIT, a advecção quente não teve uma grande variação, apresentando valor aproximado a  $4\text{K}/6\text{h}$  (Figura 18).

**Figura 18 - Análise da Advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 12/05 (a), 00Z de 13/05 (b), 00Z de 14/05 (c), 18Z de 15/05 (d), 00Z de 16/05 (e) e 00Z de 17/05 (f) do ano de 2015, seta vermelha mostra extremidade frontal onde extraído o valor da advecção fria.**

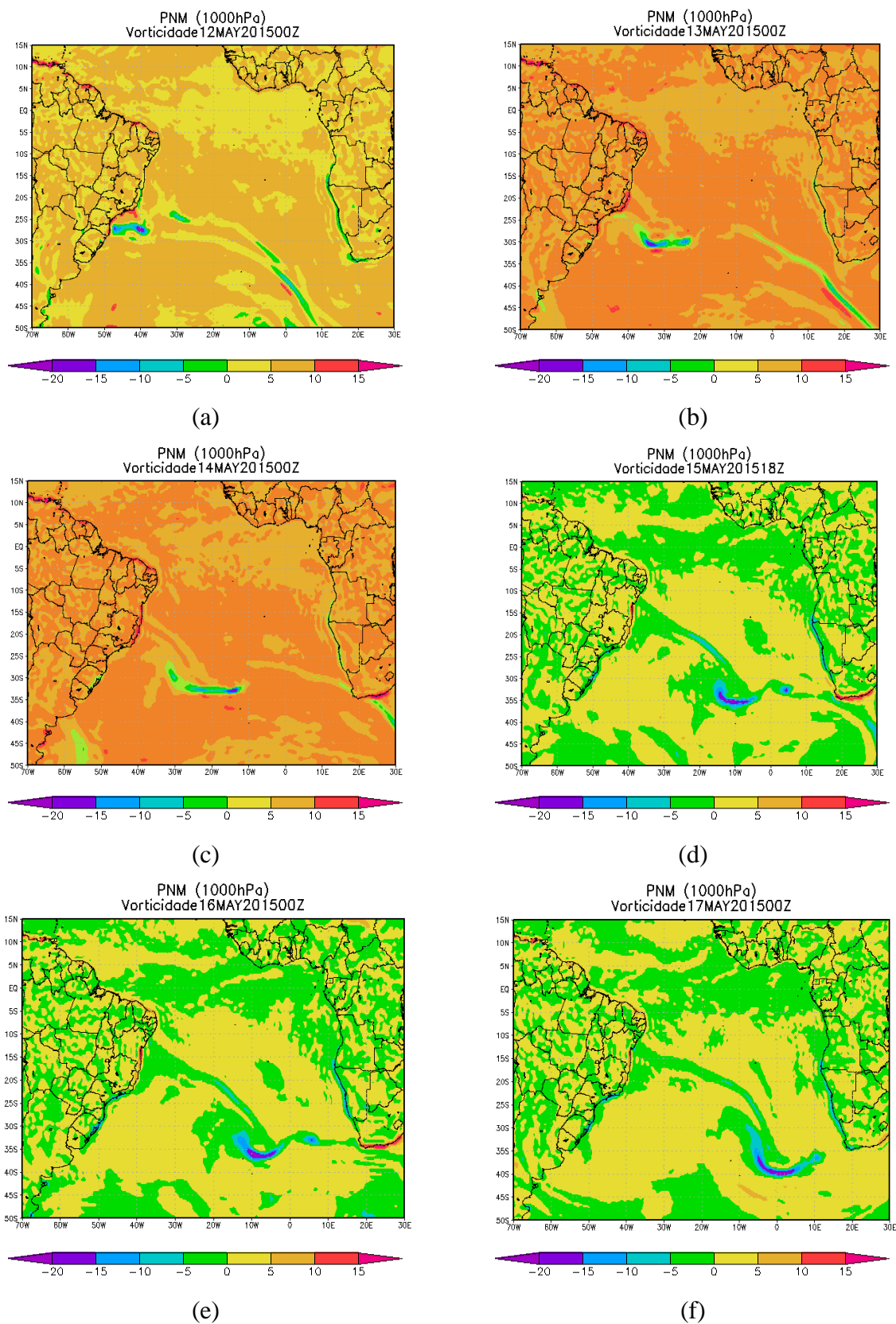




Fonte: autor 2018.

A Figura 19 mostra os campos da vorticidade relativa desde o dia 12 a 17/05/2015. Nota-se na figura 19a mostra vorticidade negativa ( $-20S^{-1}$ ) na região ciclogênica próximo à costa da Santa Catarina, o campo da vorticidade relativa mostra a intensidade do sistema durante sua trajetória seja no centro do ciclone bem como ao longo do cavado até atingir ao sul de Sergipe, com valores no centro do ciclone variando de  $-20$  a  $-5 S^{-1}$ , e ao longo FF a intensidade variou de  $-10$  a  $-5 S^{-1}$  (Figura 19 b, c, d, e, f). Na região da ZCIT apresentou vorticidade relativa positiva, sua intensidade variando de  $5$  a  $10 S^{-1}$  durante a atuação da frente fria no sudeste do NEB.

**Figura 19 - Análise da vorticidade relativa ( $S^{-1}$ ) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 12/05 (a), 00Z de 13/05 (b), 00Z de 14/05 (c), 18Z de 15/05 (d), 00Z de 16/05 (e) e 00Z de 17/05 (f) do ano de 2015.**



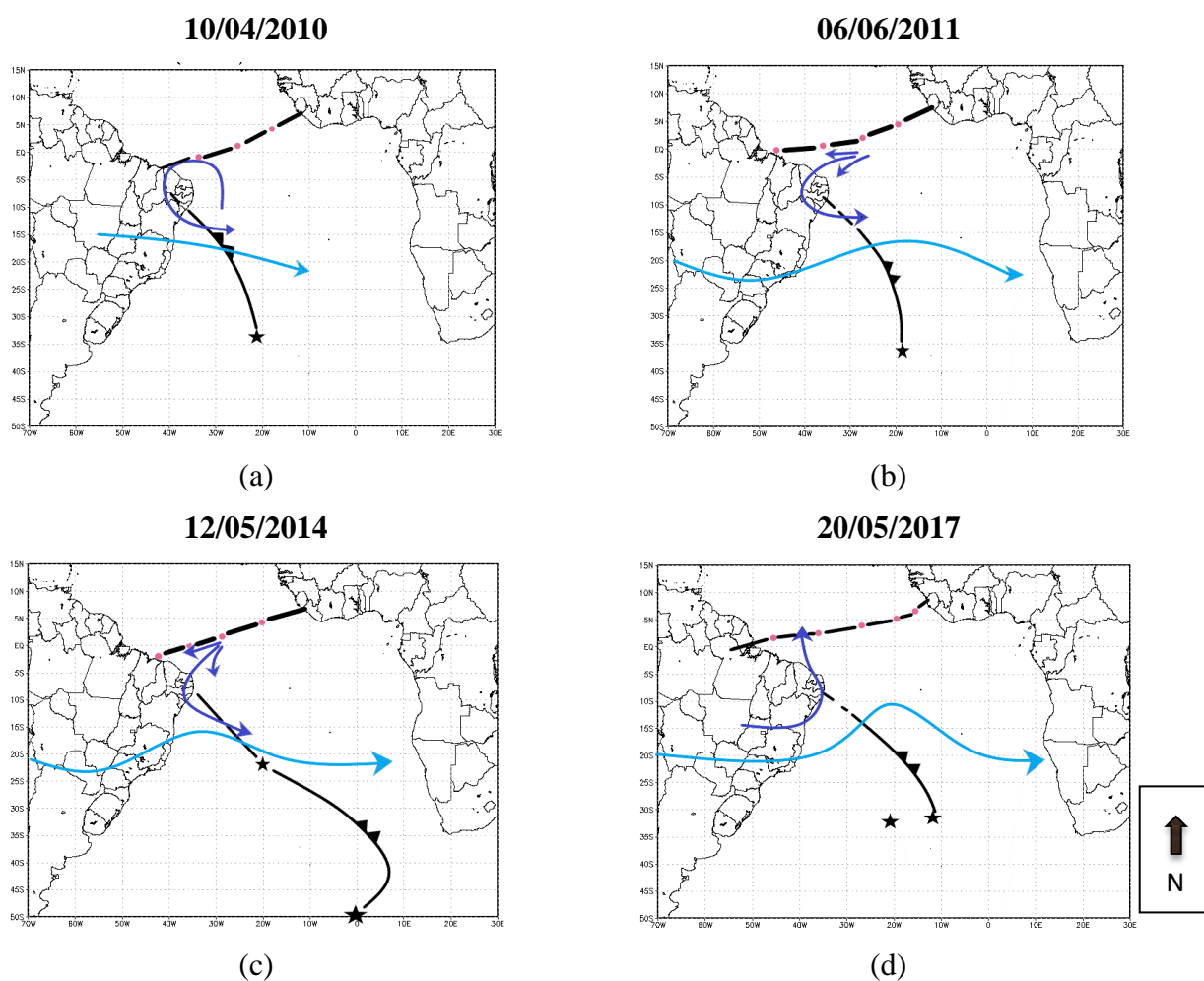
Fonte: autor 2018.

### 5.3 Comparação dos eventos com ligação da zona frontal com ZCIT e sem esta ligação.

#### 5.3.1 Semelhanças entre os casos com ligação da extremidade frontal com ZCIT.

Na Figura 20 estão apresentados 4 (quatro) casos que mostraram um padrão na análise feita da estrutura da troposfera em vários níveis no período em que foi observada a ligação da FF com a ZCIT. Nota-se a pequena variação da posição da ZCIT na costa do Brasil nos 4 casos na região do NEB em torno 0 a 3°S. Os mesmos casos em altos níveis mostraram circulação anticiclônica, e com influência de CJS mais ao sul do da América do Sul (20°S). Foi observada a posição dos centros dos ciclones associados aos sistemas frontais que tiveram ligações com ZCIT na longitude 20°W variando somente na latitude, entre 35°S a 20°S.

**Figura 20 – Modelo conceitual da estrutura da Atmosfera em vários níveis dos casos com ligação da extremidade da FF com ZCIT. Linhas: azul escuro – circulação em altos níveis; azul claro – corrente de jato em altos níveis; preta descontínua pontilhada – posição da zona de convergência intertropical; estrela centro do ciclone.**



Fonte: Autor 2018

### 5.3.2 Diferenças entre os casos com ligação da FF com ZCIT e sem ligação

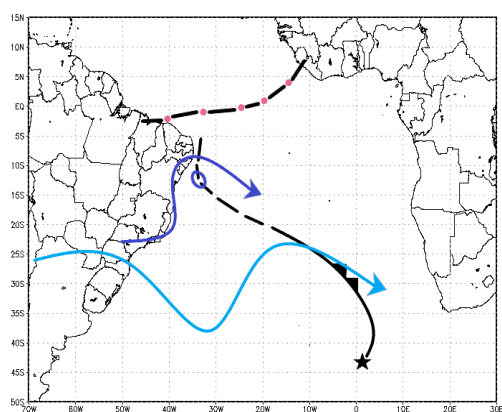
1) A ZCIT na baixa troposfera no caso com ligação (Figura 21a) foi localizado mais sul ( $2^{\circ}\text{S}$ ) do que no caso sem ligação ( $4^{\circ}\text{N}$ ) (Figura 21b).

2) O centro do ciclone associado a frente fria cuja extremidade acoplado com a ZCIT foi localizado nas coordenadas  $43^{\circ}\text{S}$  e  $2^{\circ}\text{W}$ , e no caso sem ligação o seu centro foi localizado mais acima ( $32^{\circ}\text{S}/8^{\circ}\text{W}$ ).

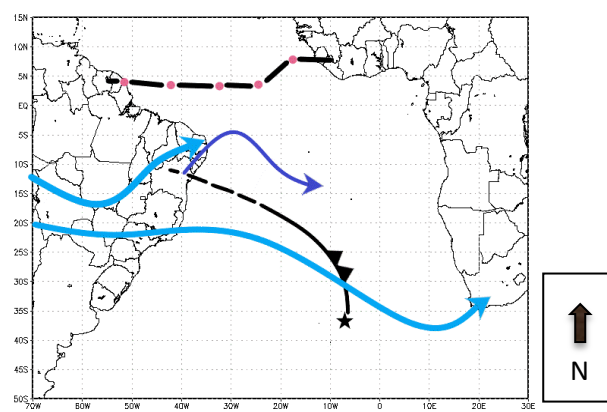
3) Em altos níveis do caso com acoplamento foi observado um cavado intenso na região de estudo, e a sudeste da região uma crista muito intenso, e no caso sem ligação mostrou um fraco cavado na costa leste da região.

4) A Corrente de jato no caso com ligação foi observada mais ao sul da AS na latitude de  $26^{\circ}\text{S}$ , não influenciando a região de estudo. No caso sem ligação mostrou se difluência na corrente de Jato, uma parte da CJS posicionada na região oeste da região de estudo cuja saída posicionada na região de interesse ( $6^{\circ}\text{S}$ ) influenciando o tempo no NEB e uma parte da CJS esteve posicionado mais ao sul ( $22^{\circ}\text{s}$ ).

**Figura 21 – Modelo conceitual da estrutura atmosférica dos casos que ocorreram nos dias 04 (com ligação) (a) e 15 (sem ligação) (b) de Maio de 2015. Linhas: azul escuro – circulação em altos níveis; azul claro – corrente de jato em altos níveis; preta descontínua pontilhada – posição da zona de convergência intertropical; estrela centro do ciclone.**



(a)



(b)

Fonte: Autor 2018.

### 5.4 Análise dos eventos com ligação da zona frontal com ZCIT

As características de cinco eventos com ligação da zona frontal com ZCIT são apresentadas na Tabela 3. Esta tabela mostra valores máximos da vorticidade relativa ( $\text{S}^{-1}$ )

no centro do ciclone, no cavado do ciclone associado à FF, advecção de ( $\theta_e$ ) (K/6h) na região de interesse (onde é observada ligação da banda de nebulosidade da extremidade frontal com ZCIT), posição do ciclone no momento da ligação dos dois sistemas e a circulação do vento em altos níveis (200 hPa).

As imagens de satélite mostraram ligação de nebulosidade da extremidade frontal com a ZCIT em todos 5 (cinco) casos. 4 (quatro) casos mostraram mesmos valores da vorticidade relativa no cavado ( $-5 \text{ S}^{-1}$ ) durante a ligação (II., III., IV. e V. respectivamente), com exceção do caso I, que mostrou maior intensidade com vorticidade relativa igual a  $-10 \text{ S}^{-1}$ . A vorticidade no centro dos ciclones associados aos cavados das FFs, sua intensidade variou entre  $-25$  a  $-15 \text{ S}^{-1}$ . A advecção de theta na região da ligação dos dois sistemas variou entre  $-6$  a  $-5 \text{ K/6h}$ .

**Tabela 3. As características dos casos de FF com ligação com ZCIT, dados pela foto do satélite.**

Caso	Datas	Satélite	Vorticidade		Advec $\Theta_e$ (k/6h)	Posição do ciclone	Circulação 200 hPa	Posição da CJ
			cav ( $\text{s}^{-1}$ )	ciclone ( $\text{s}^{-1}$ )				
I.	10/04/2010	ligação	-10	-25	-5	32,5°S/20°W	Ant.cicl.	17,5°S
II.	06/06/2011	ligação	-5	-15	-6	36,5°S/18,5°W	Ant.cicl.	20°S
III.	12/05/2014	ligação	-5	-20	-6	23°S/20°W	Ant.cicl.	16°S
IV.	04/05/2015	ligação	-5	-25	-5	43°S/2°W	Cicl.	25°S
V.	20/05/2017	ligação	-5	-25	-5	34°S/19°W	Ant.cicl.	20°S

Fonte: Autor, 2018.

### 5.5 Condições da união ou não da zona frontal com Zona de Convergência Intertropical –ZCIT.

#### ➤ Condições da união da zona frontal com ZCIT

Padrões da circulação da troposfera na região do NEB foram estabelecidos para auxiliar na previsão de sistemas frontais e, sequentemente de tempo, na região. Uma das condições principais da penetração das frentes na região do NEB foi a posição da corrente de jato subtropical;

As principais características da circulação propícias para entrada das frentes no NEB e ligação com ZCIT são descritos a seguir;

1 – Ausência da influência da corrente de jato subtropical (CJS) no NEB possibilita entrada de sistemas frontais para o norte do NEB;

2 - circulação anticiclônica em altos níveis na região do NEB, é observado nos eventos de frente fria que atinge o norte do NEB;

3 - circulação anticiclônica em altos níveis na região do NEB desloca corrente de jato subtropical para o sul da América do Sul, tirando sua influência sob a região do NEB;

➤ **Condições para um sistema frontal não alcançar o norte do NEB**

1 – Influência da corrente de jato subtropical (CJS) no NEB impossibilita entrada de sistemas frontais para o norte do NEB;

2 - Circulação ciclônica em altos níveis (200 hPa) na região do NEB;

3 - Circulação ciclônica em altos níveis na região do NEB bloqueia a penetração de frentes na região.

## 5.6 Análise dos fenômenos adversos associados nos casos com ligação da frente fria com ZCIT.

### 5.6.1 Análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoada.

A Tabela 4 mostra os fenômenos adversos investigados nas datas em que ocorreu ligação da frente fria com a ZCIT. As estações meteorológicas registraram chuva forte e névoa úmida em todos os eventos, não foram observados em nenhuma estação os fenômenos Stratus, nevoeiro e trovoadas.

**Tabela 4. Fenômenos adversos associados aos eventos com ligação da frente fria com ZCIT: +RA - chuva forte; BR - Névoa Úmida.**

Datas	Chuva	Névoa Úmida	Stratus	Nevoeiro	Trovoadas
10/04/2010	+RA	BR	-	-	-
06/06/2011	+RA	BR	-	-	-
12/05/2014	+RA	BR	-	-	-
04/05/2015	+RA	BR	-	-	-
20/05/2017	+RA	BR	-	-	-

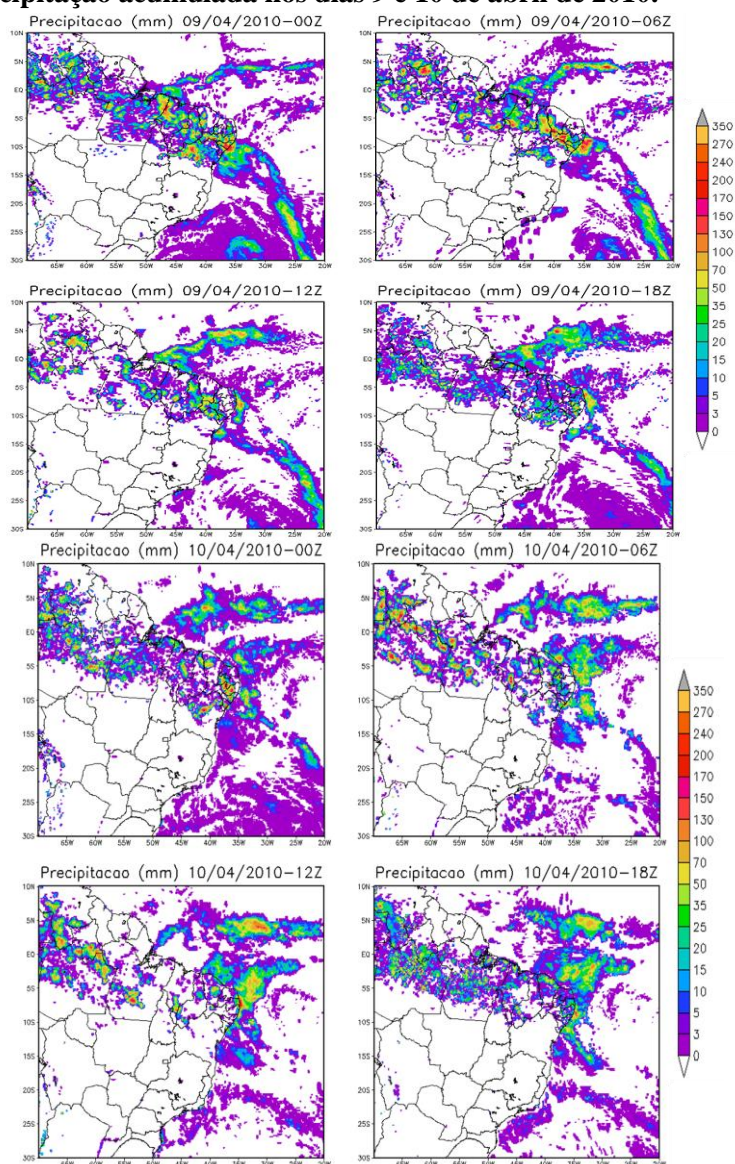
Fonte: Autor 2018.



### 5.6.2 Análise espacial-temporalmente da precipitação pluviométrica associada a frente fria e a ZCIT.

Na Figura 22 visualizam-se os acúmulos de precipitação de 06 horas para os dias 8, 9 e 10/04/2010. Na Figura 22a apresenta acumulados superiores a 200 mm na região de Alagoas, durante a presença da extremidade do sistema frontal no NEB nos dias 09 e 10 foram visualizados os maiores acúmulos de precipitação na região do NEB, período observado a ligação da extremidade frontal com a ZCIT. Pode ser visualizado no dia 09/04/2010 a presença de precipitação ao longo da frente fria, sua intensidade variando entre 25 a 240 mm/6h. A precipitação ao longo da frente fria ajuda a identificar sua posição vista pelos campos usados neste trabalho.

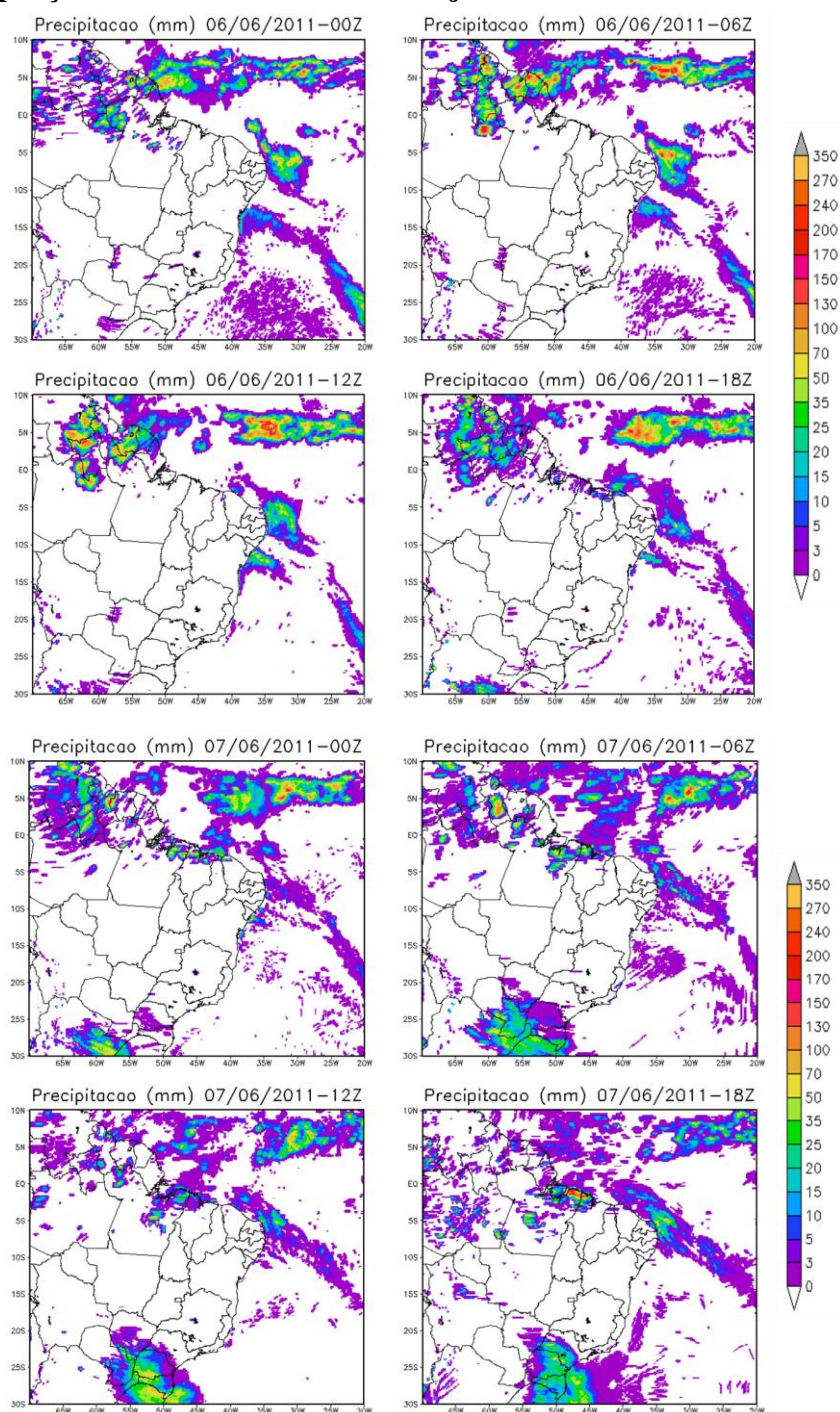
**Figura 22 - Precipitação acumulada nos dias 9 e 10 de abril de 2010.**



Fonte: Autor 2018.

A precipitação acumulada a cada 6 horas para os dias 5, 6 e 7/06/2011 associada à frente fria e a ZCIT está mostrada na Figura 23. Observa-se maior acúmulo de precipitação na extremidade da frente fria no dia 06/06 na costa leste do NEB, com valores aproximados a 200mm. Ao longo da frente foram observados baixos valores da precipitação acumulada (5 a 170 mm), durante a permanência da frente fria na região no NEB.

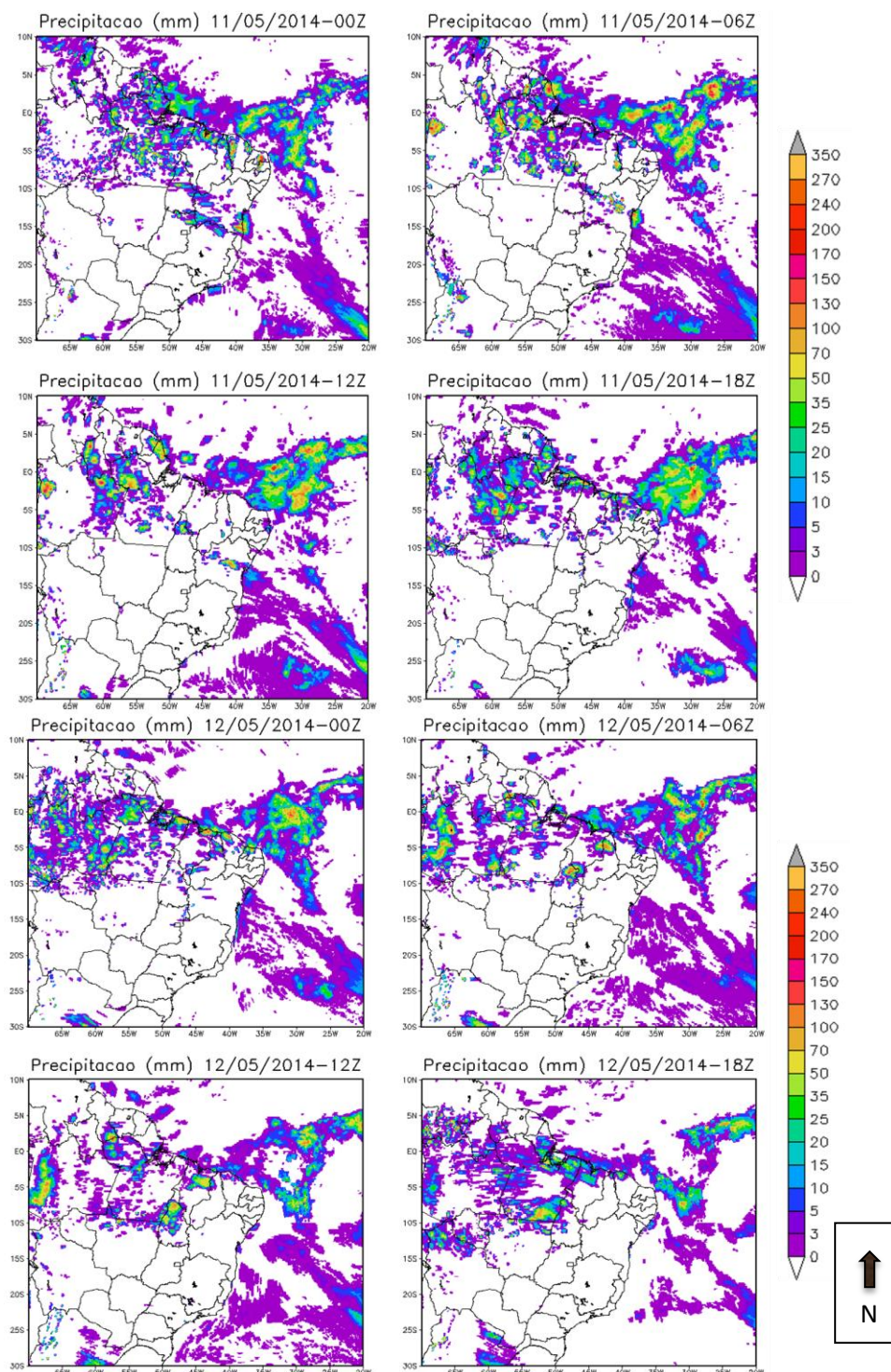
**Figura 23 - Precipitação acumulada nos dias 6 e 7 de junho de 2011.**



Fonte: Autor 2018.

Para o evento do dia 12/05/2014, a precipitação acumulada está mostrada na Figura 24 para os dias 10, 11 e 12/05/2014. é possível observar a ligação da precipitação associada a frente fria e a ZCIT, influenciando o tempo na costa leste do NEB, a máxima precipitação acumulada observada na extremidade frontal é de 170mm.

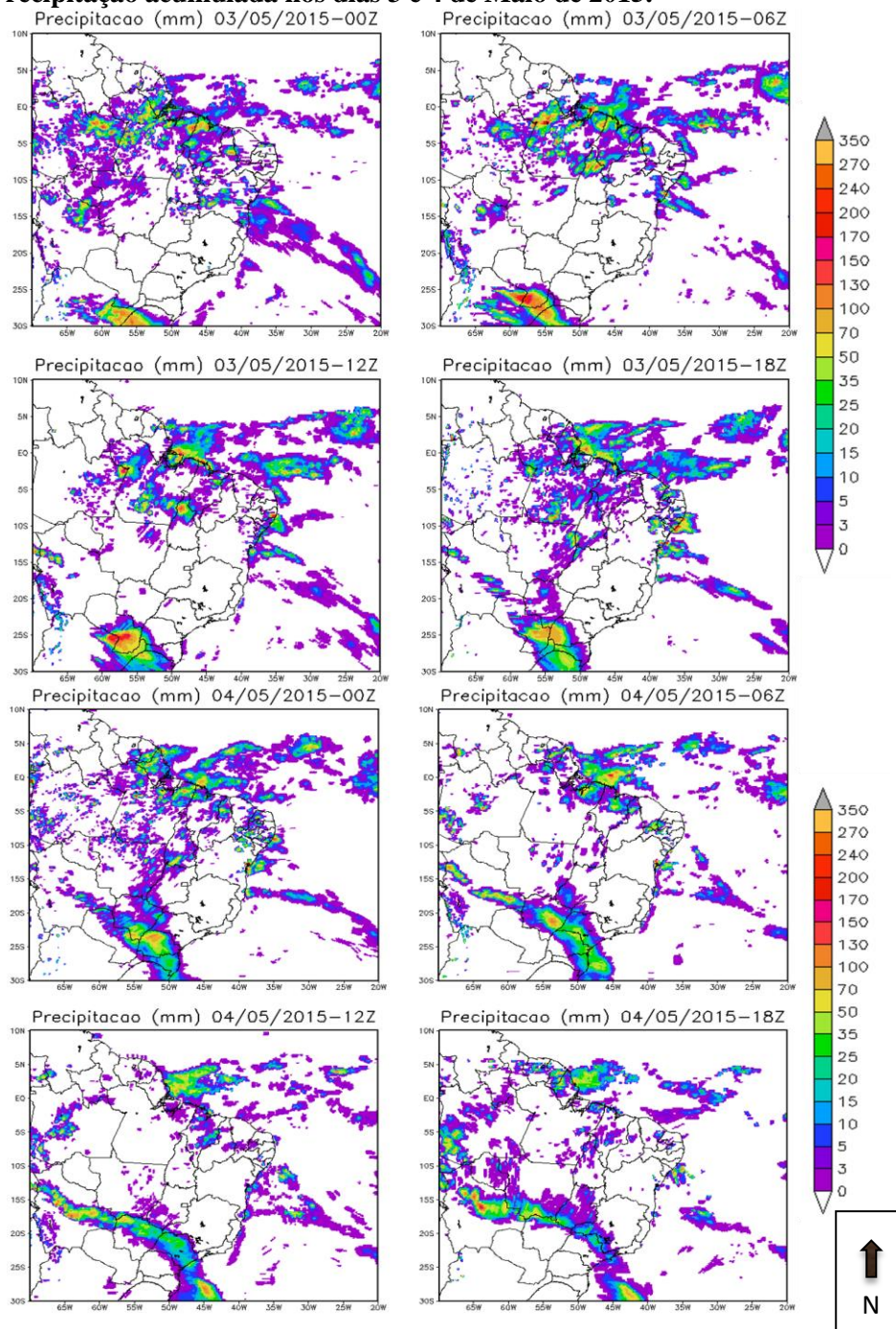
**Figura 24 - Precipitação acumulada nos dias 11 e 12 de Maio de 2014.**



Fonte: Autor 2018.

Na Figura 25 mostra a precipitação acumulada a cada 6 horas, para o evento cuja a ligação foi observada no dia 4/05/2015. É visível observar a precipitação ao longo da frente fria para o dia 3 e 4, a máxima precipitação acumulada foi vista na extremidade frontal (200mm) na costa leste do estado de Alagoas.

**Figura 25 - Precipitação acumulada nos dias 3 e 4 de Maio de 2015.**

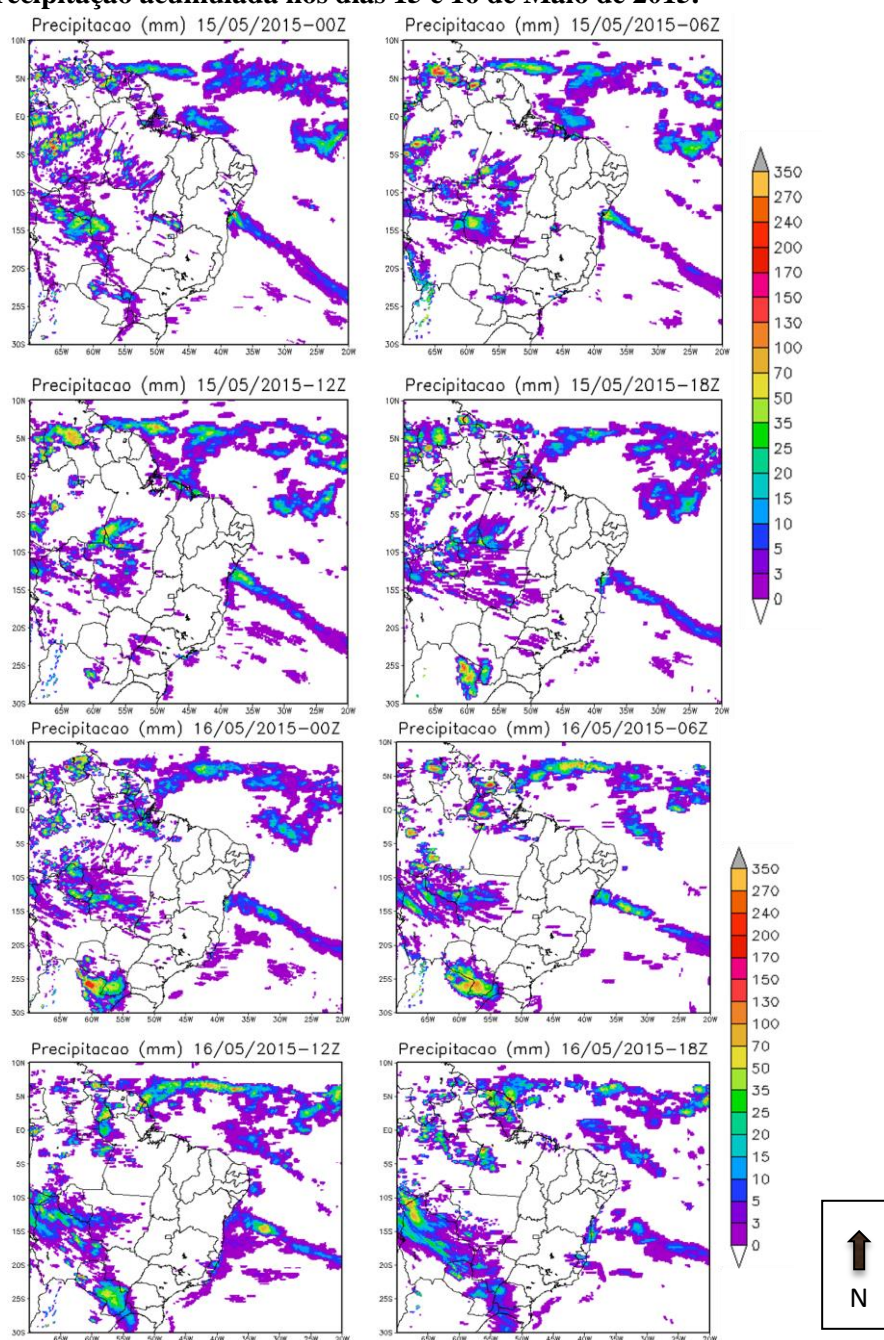


Fonte: Autor 2018.

A Figura 26 mostra a precipitação acumulada do evento sem ligação, cuja sua extremidade alcançou o sul do estado de Sergipe. Observa-se a precipitação acumulada ao longo da frente fria entre os dias 15 e 16/05/2015, a máxima acumulada foi de 130mm.

A análise sinótica feita para este evento mostrou influência de corrente de jato em altos níveis (200hPa), cuja a saída localizada na região de interesse bloqueando a penetração do sistema frontal mais para o norte do NEB. O campo da precipitação acumulada mostrou bem a inibição da precipitação para este região.

**Figura 26 - Precipitação acumulada nos dias 15 e 16 de Maio de 2015.**

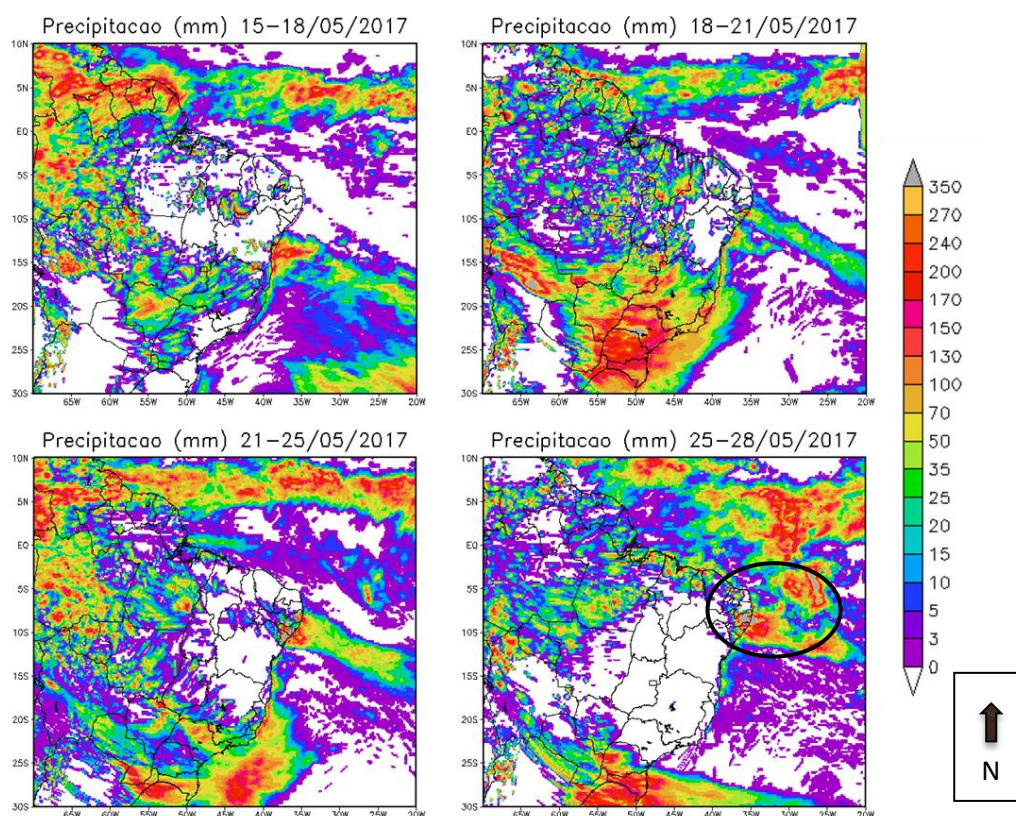


Fonte: Autor 2018.

Na figura 27 visualizam-se os acúmulos de precipitação a cada 3 dias para os dias 15 a 28/05/2017. Os maiores acúmulos de precipitação foram observados desde o dia 18 ate ao dia 28. Período em que a região do NEB estava sob influência da extremidade frontal. Durante esse período a precipitação acumulada a cada 3 dias esteve acima de 350mm.

Pode ser visualizado entre os dias 15 a 18/05/2017, antes da chegada da frente fria na região, fracas precipitações em pontos isoladas, depois da chegada do sistema frontal na região do NEB, é possível visualizar a presença de precipitação ao longo da frente fria, sua intensidade variando entre 25 a 240 mm/3d. Essa precipitação associada a extremidade frontal e a ZCIT no NEB causou vários prejuízos na região segundo a Defesa civil de Alagoas (<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuvas-fortes-causam-deslizamentos-de-barreiras-e-deixam-mortos-e-feridos-em-maceio.ghtml>.)

**Figura 27 - Precipitação acumula (mm) a cada 3 dias, entre os dias 15 a 28 de Maio de 2017.**



Fonte: Autor 2018.

## 6. CONCLUSÕES

Zonas frontais sobre o NEB foram observadas entre 2008 a 2017, com maior frequência entre os meses de Setembro, Outubro e novembro. Durante o período de estudo foram observados 27 casos de frentes frias, onde 5 (cinco) casos de frente fria tiveram ligação com a ZCIT. Os 5 (cinco) casos com ligação foram observados nos meses de Abril, Maio e Junho de acordo com o método de análise operacional.

Foi feito um estudo detalhado dos eventos de frente fria, desde a formação, deslocamento até alcançar a região norte do NEB. As imagens de satélite mostraram ligação de nebulosidade da extremidade frontal com a ZCIT em 5 (cinco) casos. A análise sinótica feita mostrou em 4 (quatro) casos mesmos valores da vorticidade relativa no cavado ( $-5 \text{ S}^{-1}$ ) e um caso mostrou vorticidade relativa no cavado  $-10 \text{ S}^{-1}$ . A vorticidade no centro dos ciclones associados aos cavados das frentes frias com ligação com ZCIT tinha sua intensidade entre  $-25 \text{ S}^{-1}$  a  $-15 \text{ S}^{-1}$ . A advecção de theta, na retaguarda da extremidade frontal na região do NEB apresentou valores entre  $-6$  a  $-5 \text{ K/6h}$ , e na vanguarda apresentou valores entre  $2$  a  $6 \text{ K/6h}$ , em todos os casos com ligação da extremidade frontal com ZCIT.

A estrutura da troposfera nos casos de frente fria com ligação com ZCIT foi determinada da seguinte forma:

- Em 4 casos notou-se uma pequena variação na posição da ZCIT em torno de  $0$  a  $3^\circ\text{S}$  na região do NEB, observada pela confluência dos alísios de nordeste e de sudeste em baixos níveis (1000 hPa);
- Os centros dos ciclones associados aos sistemas frontais com ligação com ZCIT foram localizados na longitude  $20^\circ\text{W}$  variando somente na latitude, entre  $35^\circ\text{S}$  e  $20^\circ\text{S}$ ;
- Foi observada confluência dos ventos na extremidade das frentes frias na região do NEB contribuindo na convecção na região da ligação da frente fria com ZCIT;
- Em altos níveis (200 hPa) 4 casos apresentaram circulação anticiclônica. A corrente de jato subtropical nos 5 (cinco) casos foi localizada mais ao sul da América do Sul, não influenciando a região do NEB.

Foram elaborados padrões da troposfera da união ou não da zona frontal com ZCIT, esses padrões na região do NEB foram estabelecidos para auxiliar na previsão de sistemas frontais e sequentemente de tempo na região. Esses padrões foram baseados pelas diferenças apresentadas entre os casos de frente fria com união com ZCIT e sem união, tais como:

➤ **União da extremidade frontal com ZCIT**

1 – posição da corrente de jato subtropical aproximadamente no sudoeste do Brasil, sem influência na região do NEB;

2 – Circulação anticiclônica em altos níveis (200 hPa) no NEB, contribuindo no deslocamento da Corrente de jato subtropical no sudoeste do Brasil, permitindo o deslocamento das frentes frias para o norte do NEB.

➤ **Sem união da extremidade frontal com ZCIT**

1 – Posição da corrente de jato subtropical no NEB, com influência na região;

2 – Circulação ciclônica em altos níveis (200 hPa) na região do NEB, contribuindo no deslocamento da corrente de jato para a região do NEB, bloqueando a entrada de sistemas frontais para o norte do NEB.

Fenômenos adversos foram analisados nos eventos com ligação da frente fria com a ZCIT. Em todos os eventos foram observados névoa úmida e chuva forte na região do NEB. Trovoadas e stratus não foram observados nas estações meteorológicas do NEB consultadas. Em destaque o evento que ocorreu no dia 20/05/2017, registrou precipitações acima da média para o mês de Maio, com um volume acima de 414,6mm (de acordo com a Defesa Civil, 8% a mais que o previsto). Durante a permanência da extremidade desprendida da frente fria na região do NEB, foram registrados inundações em vários pontos de Alagoas e deslizamentos de terra, provocando destruições de bens materiais e casou 4 mortos.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, K. M. Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul. 2005. 187p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, Iracema F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. 2003. 38p.

ARKIN, P.A. The relationship between interannual variability in the 200 mb tropical wind field and the southern oscillation. *Monthly Weather Review.*, v.110, n. 10, p. 1393-1404, Jun. 1982.

BEEBE, R.G.; BATES, F.C. A mechanism for assisting in the realisation of convective instability. *Monthly. Weather Review*, v.83, n. 11, p.1-10, Jul. 1955.

BERRY, G., C. JAKOB, and REEDER M. (2011b), Recent global trends in atmospheric fronts, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21812, doi:10.1029/2011GL049481.

BERRY, G., M. J. REEDER, and JAKOB C. (2011a), A global climatology of atmospheric fronts, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L04809, doi:10.1029/2010GL046451.

BJERKNES, J. A possible response of the atmosphere Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, v. 18, n. 4, p. 820-829, 1966.

BLUESTEIN, H. B.. Observations and theory of weather systems. In: *Synoptic Dynamic Meteorology in Midlatitudes*. Oxford: Oxford University Press, V. 2, 595p, 1993.

BLUESTEIN, H.B. *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes*. Oxford: University Press, 1993. V.2.

CARLSON, T.N. *Mid-latitude weather systems*. London: Harper Collins Academic, 1991.

CATTO, J. L. et al. Relating global precipitation to atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2012GL051736, 2012.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes frias sobre o Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Justi da Silva, M. G. A.; Silva Dias, M. A. F. (Eds.) *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de Textos. 2009. p.133-148.

CAVALCANTI, I.F.A., V. E. KOUSKY, 1996: Configuração de anomalias associadas à propagação de sistemas sinóticos sobre a América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO

DE METEOROLOGIA, 13., 2004. Anais. 2004, 1331-1332. Acessado em: 10 de setembro de 2017.

COELHO, M. 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*, 19, p. 23-34, 2004.

DAVIES H. C.; ROSSA A. M. P.V. Frontogenesis and upper tropospheric fronts. *Mon. Wea. Rev.*, v. 126, n. 6, p. 1528-1539, 1998. Escobar GCJ, Andrade KM. Climatologia dos índices de instabilidade K e Total Totals (TT) para o Sul e Sudeste do Brasil. In: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém-PA. 2010.

FEDOROVA N., LEVIT V., CRUZ C. D. On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil. *Pure Appl. Geophys.* 2016, 173 p 1403-1421, DOI 10.1007/s00024-015-1166-y.

FEDOROVA, N. *Meteorologia Sinótica*. V.1, Pelotas. Editora e Gráfica Universitária - UFPel, 259 pp. 1999.

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, p. 57-72, 2000.

FERREIRA, A. G. *METEOROLOGIA PRÁTICA*. Oficina de texto. São Paulo, 2006.

FERREIRA, N. J., RAMÍREZ, M. V., GAN, M. A. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil. In: *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, p. 43.

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M. A. F. Composição da zona de convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 19, n. 1, p. 89-98, 2004.

FORTUNE, M.; KOUSKY, V. Two severe freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. *Mon. Wea. Rev.*, v. 111, n. 1, p. 181-196, 1983.

GAN M. A.; KOUSKY, V.E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 1, 19-28, 1986.

GAN MA & RAO VB. 1991. Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119: 1293-1302.

GARREAUD, R. D. Cold air incursions over subtropical South America: mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, v.128, n.7, p. 2544-2559, July 2000.

GEMIACKI, L. . Atuação de Sistemas Frontais na Estação Seca do Nordeste do Brasil. 2005. (MET-UFAL-MS-035). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

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

Hastenrath, S., 1991: *Climate Dynamics of tropics*. Kluwer, Dordrecht. 488 p.

HASTENRATH, S., HELLER, L., 1977. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. *Quart. J. Roy. Meteorological Society*, v. 103, 77-92.

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

JUSTI DA SILVA MGA & SILVA DIAS M. A. F. 2000. A Estatística dos transientes na América do Sul. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000162&pid=S0](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000162&pid=S0)

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

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, v. 36, n. 6, p. 538-551, 1981.

KOUSKY, V., e Cavalcanti, I. F. A. Eventos Oscilação Sul - El Niño: Características, Evolução e Anomalias de Precipitação. *Ciência e cultura*, v.36, n.11, p. 1888-1889, Nov.1984.

LAVERS, D. A., R. P. ALLAN, E. F. Wood, G. Villarini, D. J. Brayshaw, and A. J. Wade (2011), Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23803, doi:10.1029/2011GL049783.

MARENGO, J., A. CORNEJO, P. SATYAMURTY, C. NOBRE, W. SEA, 1997: Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2759-2786. Oliveira, A. S., 1986: Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia, INPE – 4008 – TDI/239.

MARQUES DA SILVA, Richarde et al. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, 2010.

MATTOS, L. F. Frontogênese na América do Sul e precursores de friagem no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. INPE São José dos Campos. 25p. 2003.

MEDINA, M. *Meteorologia básica sinóptica*. Madrid: Paraninfo, 1976.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1-10. 2002.

MOURA, A. D., SHUKLA, J., 1981. On the dynamics of droughts in the Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model., *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 38, n.12, 2653 – 2675.

OLIVEIRA, A. S. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção na Amazônia. Parte I\_ 1986-04. 134 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1986. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbmfiles/15-97ba4b51051a8a72988bb6d2ff0e0da1.pdf>. Acessado em: 24 de setembro de 2017.

ORLANSKI, I.; ROSS, B.; POLINSKY, L.; SHAGNAW, R. Advances in the theory of atmospheric fronts. In: *Atmospheric and Oceanic Modeling (ed.)*. Advances in Geophysics. Orlando: Academic Press, 1985, v.28b. p.223- 252.

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

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

PALMER, C. E. , 1951. On high-level cyclones originating in the tropics. *Transactions of American Geophysics Union*, 32(5):683-695.

PETTERSEN, S. *Weather analysis and forecasting*. New York: McGraw-Hill, 1956. v.1, 498p.

PHILANDER, S.G. *E l Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic press, INC. San Diego, California, 1989.

PITT, M. (2008), *The Pitt Review—Lessons learned from the 2007 summer floods, final report*, Environ. Agency, London.

PONTES DA SILVA B. F., FEDOROVA N., LEVIT V., PERESETSKY A. 2011: Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas Revista Brasileira de Meteorologia 26-3: 295–310.

REBOITA, M. S., ROCHA R. P., and AMBRIZZI T., 2005: Climatologia de Ciclones sobre o Atlântico Sul Utilizando Métodos Objetivos na Detecção destes Sistemas. In: IX CONGREGMET, Congresso Argentino de Meteorologia, Buenos Aires, AR, October 3-7, 2005. Revista brasileira de meteorologia, vol. 21, n. 1, p. 134-140, abril de 2006.

REITER, E. R. *Jet stream meteorology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1969. 515p.

RIEHL, H., BADNER, J., HOYDE, J.E. *Forecasting in the middle latitudes*. Meteorological Monographs. American Meteorological Society, v.1, n.5, 1952. 80p.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. Revista Brasileira de Geofísica, v. 22, n. 2, p. 135–151, ago. 2004. Disponível em:

SATYAMURTY P, MATTOS LF, NOBRE CA & SILVA DIAS PL. 1998. Tropics - South America. In : Meteorology of the Southern Hemisphere, Ed. Kauly, D. J. and Vincent, D. G., Meteorological Monograph. American Meteorological Society, Boston, 119-139.

SATYAMURTY P.; MATTOS L. F. 1989. Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. Monthly Weather Review, 117: 1355-1364.

SCHEUER P. R.: Sistemas frontais associados a episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Catarina, 2017, p. 23-24.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo em curto prazo. Rev. Bras. Meteorologia, v. 2, p. 133- 150, 1987.

SIMMONDS, I. et al. Identification and Climatology of Southern Hemisphere Mobile Fronts in a Modern Reanalysis. Journal of Climate, v.25, n.6, p.1953-1956, 2012.

TALJAARD, J. J.. Synoptical Meteorology of Southern Hemisphere. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY ed. Meteorology of the Southern Hemisphere (Meteorological Monographs, 13). Boston, MA., p. 139-213, 1972.

UVO, C.R. B. e BERNDTSSON R. , 1996. Regionalization and Spatial Properties of Ceará State Rainfall in Northeast Brazil. J. Geoph. Res., vol. 101, no. D2, 4221-4233.

UVO, C. B. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte do Nordeste brasileiro. 1989. 88f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. São José dos Campos-SP, 1989.

UVO, C. R. B. e NOBRE, C. A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A Posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. **Climanálise**, v. 4, n. 07, p.34-40, 1989.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 1991. 449p.

WALISER, E. W. C.; GAUTIER, C. A Satellite-derived Climatology of the ITCZ. Journal of Climate, 6. p.2162-2174. 1993.

XAVIER, T. M. B. S., XAVIER A. F. S., DIAS P. L. S., e DIAS M. A. F. S., 1998: O papel da componente meridional do vento na costa do Nordeste e outras variáveis para prever a chuva no Estado do Ceará (1964-97). R.B.R. Hídricos, 3, 121-139.

XAVIER, T. M. B. S., XAVIER A. F. S., DIAS P. L. S., e DIAS M. A. F. S.: A Zona de Convergência Intertropical e suas relações com a chuva do Ceará (1964-98). R.B. Met., 2000, 15, 27-43.

#### BLBLOGRAFIAS CONSULTADAS

<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuvas-fortes-causam-deslizamentos-de-barreiras-e-deixam-mortos-e-feridos-em-maceio.ghtml>

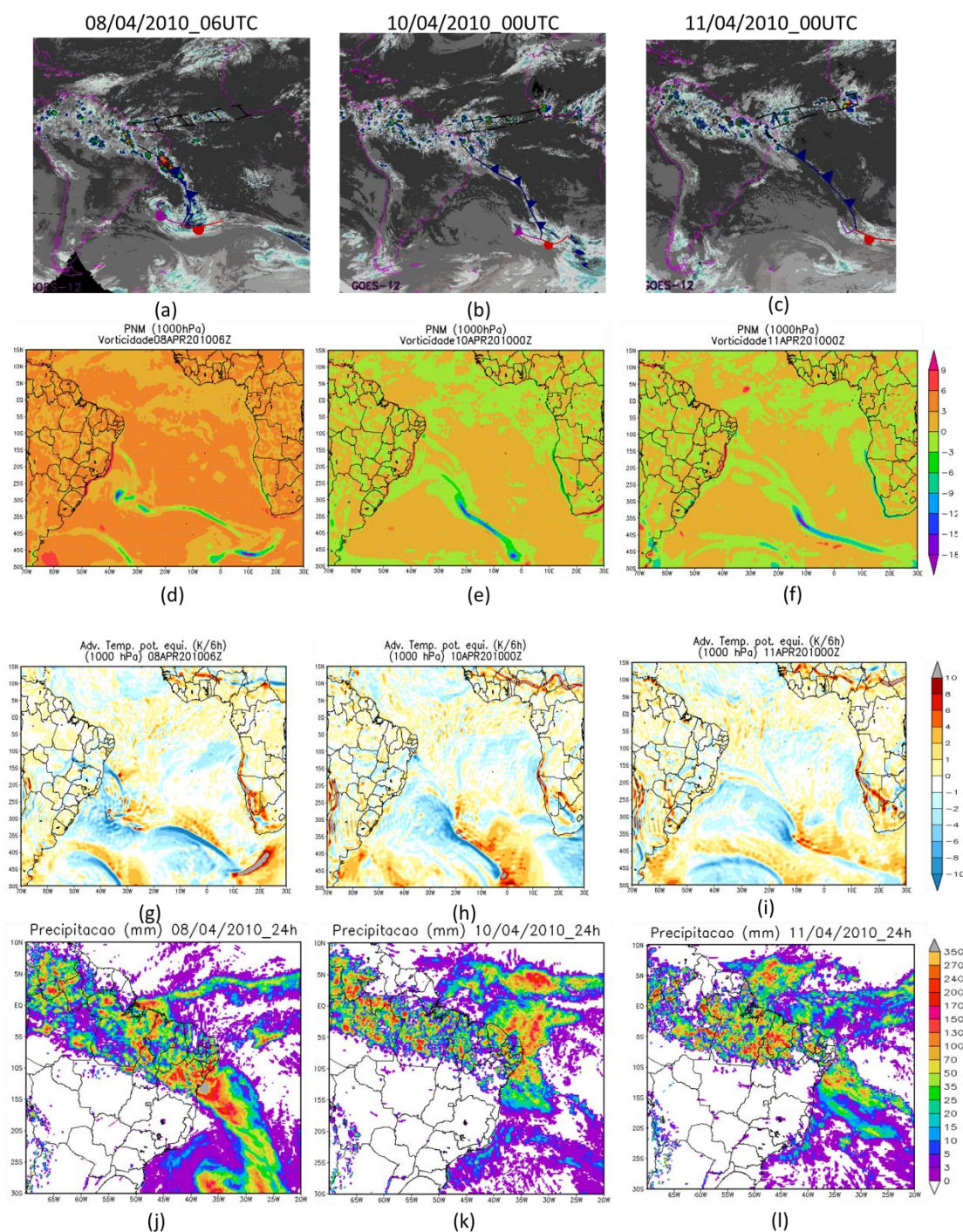
[http://gazetaweb.globo.com/portal/noticia/2017/05/volume-de-chuvas-em-maceio-para-o-mes-de-maio-e-o-maior-em-quatro-anos\\_33963.php](http://gazetaweb.globo.com/portal/noticia/2017/05/volume-de-chuvas-em-maceio-para-o-mes-de-maio-e-o-maior-em-quatro-anos_33963.php),

## ANEXO

ANEXOS A: Exemplo de dois casos de frente fria com as Condições Sinóticas: Um caso com ligação da extremidade frontal com ZCIT e outro sem essa ligação.

**Caso com ligação ocorrido no dia 10 de Abril de 2010.**

**Figura 28-** Imagens de satélite GOES-12 no canal infravermelho (a, b, c), vorticidade relativa do ar (d, e, f), advecção de temperatura potencial equivalente do modelo de reanálise do ECMWF (g, h, i), estimativa de precipitação acumulada 24 horas do CMORPH (j, k, l) entre os dias 08, 10 e 11 de Abril de 2010.



Caso sem ligação ocorrido no dia 15 de maio de 2015.

Figura 28- Imagens de satélite GOES-12 no canal infravermelho (a, b, c), vorticidade relativa do ar (d, e, f), advecção de temperatura potencial equivalente do modelo de reanálise do ECMWF (g, h, i), estimativa de precipitação acumulada 24 horas do CMORPH (j, k, l) entre os dias 13, 15 e 17 de maio de 2015.

