



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-14056-TDI/1067**

**CLIMATOLOGIA E COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS  
FRONTAIS SOBRE A AMÉRICA DO SUL**

Kelen Martins Andrade

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela  
Dr<sup>a</sup> Iracema Fonseca Albuquerque Cavalcanti, aprovada em 4 de abril de 2005.

INPE  
São José dos Campos  
2005

551.58 (8)

Andrade, K. M.

Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul / Kelen Martins Andrade. – São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005.

185 p.; - (INPE-14056-TDI/1067).

1.Frentes. 2.Meteorologia sinótica. 3.Climatologia.  
4.Variação anual. 5.Circulação atmosférica. I. Título.

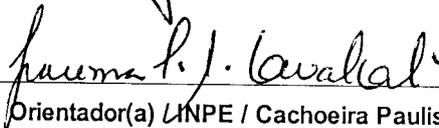
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestrado em  
Meteorologia

Dr. Nelson Jesus Ferreira



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti



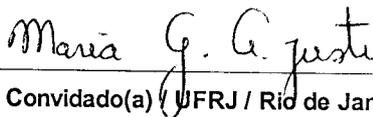
Orientador(a) UNPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Prakki Satyamurty



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva



Convidado(a) UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

Aluno (a): Kelen Martins Andrade

São José dos Campos, 04 de abril de 2005



*AOS MEUS PAIS: RUI E SUELI,*

*E AOS MEUS IRMÃOS: KEILA, KLAUSS E KAROL.*



## **AGRADECIMENTOS**

À Dra. Iracema Fonseca Albuquerque Cavalcanti pela orientação dada de forma tão competente e profissional, pelo apoio e por mostrar a mágica e a beleza de pesquisar.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao CNPQ pela bolsa concedida por um ano.

Ao CPTEC pela infraestrutura oferecida.

Aos membros da banca examinadora pelas críticas e sugestões.

Ao Dr. Gustavo C. J. Escobar pelas explicações e sugestões.

Aos amigos Hélio Camargo, Christopher Castro e Lincoln Muniz pela acessibilidade e grande ajuda.

Aos amigos do grupo de previsão do tempo do CPTEC que tiveram que aguentar momentos não muito fáceis.

À Alice, funcionária da biblioteca do CPTEC, pela disponibilidade de sempre.

À minha prima, Cristiane, por ser um exemplo de profissional, mulher e pessoa que sempre tentei seguir.

Ao Tiago Andrade por ter me apoiado a tomar a decisão de iniciar o mestrado.

A todos meus amigos por terem sido pacientes, bons ouvintes e verdadeiros amigos. Em especial, ao Luiz Eduardo pela paciência, apoio e dicas na fase de finalização deste trabalho.

Os agradecimentos são extensivos a todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a finalização deste trabalho.



## RESUMO

Neste estudo foi feita uma climatologia do período de 1980-2002 dos sistemas frontais que afetam o Brasil, em várias áreas, e foram destacados os padrões atmosféricos em relação ao deslocamento das frentes pelo Brasil e sul da América do Sul. Foi observada uma diminuição de sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas e menor frequência no verão. No inverno mais frentes frias conseguem avançar pelo interior do Brasil. Na área considerada ao sul de 35°S não há uma variabilidade sazonal significativa. Quanto ao comportamento, foram observados alguns padrões e características das variáveis atmosféricas relevantes ao deslocamento dos sistemas. Em superfície foi notado que a intensidade e o posicionamento dos sistemas de alta e baixa pressão são características importantes no deslocamento dos sistemas, no inverno e verão. A alta pressão mais intensa sobre o Pacífico e menos intensa sobre o Atlântico favoreceu o avanço das frentes. Pressões ligeiramente mais altas sobre o centro-sul do Brasil acompanhada de forte subsidência impediram o avanço dos sistemas frontais. A intensidade do escoamento de norte em baixos níveis sobre o continente e oceano, quando a frente se encontra na região mais ao sul analisada (sul da América do Sul), é também relacionada com o seu deslocamento. Em altos níveis, intensas anomalias zonais positivas de geopotencial sobre o Sul do Brasil e sobre o Pacífico, mais afastada da costa oeste da América do Sul, favoreceram o deslocamento das frentes para o oceano. A posição do jato em altos níveis, também favoreceu o deslocamento das frentes sobre o continente. No verão, a Alta da Bolívia mais afastada para oeste ou o Cavado do Nordeste para leste favoreceu o avanço das frentes frias para latitudes mais baixas. Dois estudos de casos extremos, no verão e inverno, destacaram a evolução dos sistemas frontais com relação às configurações atmosféricas, algumas delas encontradas nos compostos.



# **CLIMATOLOGY AND BEHAVIOUR OF FRONTAL SYSTEMS IN SOUTH AMERICA.**

## **ABSTRACT**

A climatology from 1980 to 2002 of frontal systems that reach Brazil and the main atmospheric patterns related to their displacement over the continent are analysed in this study. A reduction of frontal systems was observed in low latitudes and in summer. During the winter, more cold fronts can reach interior areas of Brazil. There is not a significant seasonal variability south of 35°S. Atmospheric characteristics relevant to the displacement of the systems were identified. It was noticed that the intensity and position of low and high pressure systems are important features associated with the displacement of the frontal systems. The intensity of low level flow over the continent and ocean, when the front is located in the southernmost analysed region (south of South America), is also related to its displacement to the ocean or over the continent. High pressure over southeast Pacific and less intense over the Atlantic Ocean, were favorable to the displacement of systems to lower latitudes over Brazil. Higher pressure and subsidence over central-south Brazil inhibited the movement of the fronts over the continent. At high levels, intense positive zonal geopotential anomalies over southern Brazil and over southeast Pacific, far from the west South America coast, were favorable to the frontal displacement to the ocean. The high level jetstream positioned at lower latitudes was also favorable to the frontal movement over the continent. In the summer, the displacement of Bolivia High westward or the Northeast trough eastward, were also favorable to this movement. Two case studies, one in the winter and another in the summer enhanced the displacement of the frontal systems with respect to the atmospheric conditions, some of them discussed in the composite analysis.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>33</b>
2.1 – Características Gerais de Sistema Frontal .....	33
2.2 – Frontogênese e Frontólise.....	35
2.3 – Comportamento de Sistemas Frontais na América do Sul .....	38
<b>CAPÍTULO 3 - DADOS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
3.1 – Dados.....	45
3.2 – Metodologia.....	46
3.2.1 – Climatologia.....	46
3.2.2 – Compostos e Campos Analisados.....	54
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
4.1 – Climatologia .....	55
4.1.1 – Média Mensal .....	55
4.1.2 – Comparação com os Dados do Boletim Climanálise.....	57
4.1.3 – Média Sazonal.....	60

4.1.4 – Variabilidade Interanual.....	63
4.2 – Análise dos Compostos para o Inverno .....	68
4.2.1 – Grupo SAS e Oceano .....	68
4.2.2 – Grupo Rota 1/ Sul.....	69
4.2.3 – Grupo Rota 1/ Sudeste .....	70
4.2.4 – Grupo Rota 2/ Sudeste e Centro-Oeste.....	72
4.2.5 – Grupo Rota 2/Sudeste, Centro-Oeste e sul da BA .....	73
4.2.6 – Rota 1/ Sul da Bahia .....	74
4.2.7 – Discussão Comparativa.....	74
4.3 – Análise dos Compostos para o Verão .....	94
4.3.1 – Grupo SAS e Oceano .....	94
4.3.2 – Grupo Rota 1/ Sul.....	95
4.3.3 – Grupo Rota 1/ Sudeste .....	96
4.3.4 – Grupo Rota 2/ Sudeste e Centro-Oeste.....	98
4.3.5 – Grupo Rota 2/Sudeste, Centro-Oeste e sul da BA .....	99
4.3.6 – Rota 1/ Sul da Bahia .....	100
4.3.7 – Discussão Comparativa.....	101
4.3.8 – Discussão Comparativa entre Verão e Inverno .....	122

<b>CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASOS</b> .....	<b>127</b>
5.1 – Verão.....	127
5.2 – Inverno.....	144
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b> .....	<b>167</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>177</b>

## LISTA DE FIGURAS

- 2.1 - Sistema frontal desenvolvido. Linhas inteiras: Isóbaras. ....333
- 2.2 - Média climatológica anual (1974-1980) do campo de deformação em 850 hPa entre 45°N e 45°S. Intervalo de contorno  $2.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  .....377
- 2.3 - Média climatológica anual (1974-1980) de função frontogênica no nível de 850 hPa entre 45°N e 45°S. As linhas tracejadas indicam valores negativos e as linhas cheias valores positivos. Intervalo de contorno  $2.5 \times 10^{-12} \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1}$  .....377
- 2.4 - Frequência de frentes em superfície durante: a) Janeiro, Fevereiro e Março, 1958 (Verão, HS) e b) Julho, Agosto e Setembro, 1957 (Inverno, HS). Os valores representam o número de vezes em 100 dias que parte de uma frente estava situada dentro da área de  $4 \times 10^5 \text{ km}^2$ .....399
- 2.5 - Esquema típico de formação de nebulosidade convectiva (I), distribuição mensal de sistemas frontais que penetram nas bandas de latitude (II) e distribuição mensal do número de sistemas frontais que organizaram convecção tropical (III) nas bandas de latitude a,b,c e d. ....41
- 3.1 - Mapa da América do Sul destacando as áreas selecionadas para estudo e rotas. Rota 1 (linha contínua): rota litorânea; Rota 2 (linha tracejada) : rota litorânea e continental. Os números de 1 a 11 significam as áreas selecionadas para estudo.....477
- 3.2 - Séries temporais para janeiro de 2002: (a) PNM (hPa) x temperatura (°C) (925 hPa); (b) componente meridional do vento (m/s) em 925 hPa para área 6. ....499

3.3 - Séries temporais para julho de 2002: (a) PNM (hPa) x temperatura (°C) (925 hPa); (b) componente meridional do vento (m/s) em 925 hPa para área 6. ....	50
3.4 - Diagrama Hovmoller para janeiro de 2002: (a) vento meridional (m/s) (sombreado) e temperatura (°C) em 925 hPa (isolinha) para 50°W; (b) OLR (W/m <sup>2</sup> ) (sombreado) e precipitação (mm/dia) (isolinha) em 50°W. ....	51
3.5 - Diagrama Hovmoller para julho de 2002: (a) vento meridional (m/s) (sombreado) e temperatura (°C) em 925 hPa (isolinha) para 50°W; (b) OLR (W/m <sup>2</sup> ) (sombreado) e precipitação (mm/dia) (isolinha) em 50°W. ....	522
3.6 - Exemplos de imagens do satélite GOES para os grupos:(a)SAS e oceano (b) Rota 1/Sul; (c) Rota 1/SE; (d) Rota 1/SBA; (e) Rota 2/SE e CO e (f) Rota 2/SE, CO e SBA. ....	533
4.1 - Mapa com a localização das cidades litorâneas. ....	577
4.2- Comparação do número de sistemas frontais entre a Climatologia pelo método objetivo e Climanálise no período de 1992-2002 para: (a) banda (A) 35°/25S; b) banda (B) 25°/20°S e (c) banda (C) ao norte de 20°S.....	59
4.3 - Gráfico da média sazonal de sistemas frontais para o período de 1980-2002 para as áreas selecionadas.....	61
4.4 - Gráfico da média sazonal de sistemas frontais no período entre 1980-2002 quanto ao deslocamento: Rota 1/SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/Sudeste, Rota 2/SE e CO, Rota 1/SBA, Rota 2/SE,CO e SBA. ....	63

4.5 - Frequência anual de sistemas frontais: a) área3, b) área 6 e c) área 11 para o período de 1980-2002. ....	64
4.6 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o inverno .....	80
4.7 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura em 925 hPa ( $^{\circ}C/dia$ ) (sombreado) para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o inverno .....	822
4.8 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5} s^{-1}/dia$ ) (sombreado) em 500 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno. ....	844
4.9 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) SAS e oceano; (b) Rota 1/Sul; (c) Rota 1/SE para dia inicial para o inverno. ....	855
4.10 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno. ....	855
4.11 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o inverno. ....	866

4.12 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno .....	877
4.13 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura ( $^{\circ}C/dia$ ) (sombreado) em 925 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno .....	899
4.14 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5} s^{-1}/dia$ ) (sombreado) em 500 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/ para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno. ....	91
4.15 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) Rota 2/SE e CO; (b) Rota 2/SE, CO e SBA; (c) Rota 1/SBA para dia inicial para o inverno. ....	922
4.16 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno. ....	922
4.17 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno. ....	933
4.18 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o verão .....	1088

- 4.19 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura (°C/dia) (sombreado) em 925 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o verão.....110
- 4.20 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>/dia) (sombrado) em 500 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão. .... 1122
- 4.21 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) SAS e oceano; (b) Rota 1/Sul; (c) Rota 1/SE para dia inicial para o verão. .. 1133
- 4.22 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão. .... 1133
- 4.23 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d e g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão. .... 1144
- 4.24 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR (W/m<sup>2</sup>) (sombreado) para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão..... 1155
- 4.25 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura (°C/dia) (sombreado) em 925 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão ..... 1177

- 4.26 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>/dia) (sombreado) em 500 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão..... 1199
- 4.27 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) Rota 2/SE e CO; (b) Rota 2/SE, CO e SBA; (c) Rota 1/SBA para dia inicial para o verão..... 12020
- 4.28 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão. .... 12020
- 4.29 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão. .... 12121
- 4.30 - Diferença dos campos de PNM (hPa) (isolinhas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) entre os grupos (a) Rota 1/Sul - SAS e Oceano; (b) Rota 1/SE - SAS e Oceano; (c) Rota 2/SE e CO - SAS e Oceano; (d) Rota 2/SE, CO e SBA - SAS e Oceano; (e) Rota 1/SBA - SAS e Oceano no dia inicial para o verão..... 1222
- 4.31 - Posição e intensidade da alta pressão sobre o Atlântico Sul no dia inicial para os grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/SE, Rota 2/SE e CO, Rota 2/SE, CO e SBA e Rota 1/ SBA no inverno (a) e verão (b) na latitude de 30°S. .... 1233

- 5.1 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (f) vento meridional (m/s) para o dia 29/12/1999. .... 1299
- 5.2 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 30/12/1999..... 1311
- 5.3 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 31/12/1999.....**Erro! Indicador não definido.**3
- 5.4 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 01/01/2000..... 1366

- 5.5 - (a) Imagem do satélite GOES – 06 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 02/01/2000..... 13939
- 5.6 - (a) Imagem do satélite GOES – 18 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 03/01/2000..... 14242
- 5.7 - Diagrama de Hovmoller do vento meridional (m/s) (sombreado) e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em 925 hPa (isolinha) para agosto de 1999 na longitude de  $55^{\circ}\text{W}$ . ..... 1455
- 5.8 - Série temporal de temperatura em 925 hPa e pressão ao nível médio do mar para área 8 no período entre 11 a 16/08/1999. .... 1466
- 5.9 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 11/08/1999..... 1477

- 5.10 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 12/08/1999..... 15050
- 5.11 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 13/08/1999..... 1533
- 5.12 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 14/08/1999..... 1566

- 5.13 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 15/08/1999..... 1599
- 5.14 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 16/08/1999..... 16262
- 5.15 - Diagrama Hovmoller do geopotencial em 500 hPa na latitude de  $45^{\circ}\text{S}$  e faixa longitudinal de  $120^{\circ}\text{W}-0^{\circ}$  para o período entre 01 e 17/08/1999..... 1655
- 6.1 - Esquema ilustrativo das principais características atmosféricas em (a) baixos níveis e (b) médios e altos níveis para o grupo de sistemas frontais que não avançam pelo Brasil; e, (c) baixos níveis e (d) médios e altos níveis para o grupo de sistemas frontais que avançam pelo Brasil. .... 17373



## LISTA DE TABELAS

- 4.1 - Média mensal de sistemas frontais para as áreas 1,2,3,4,5,6,7,9 10,  
11 .....55
- 4.2 - Lista dos meses de ocorrência dos eventos El Niño e La Niña no  
período entre 1979 e 2001.....65
- 4.3 - Número mensal de sistemas frontais em anos de ocorrência de El  
Niño e La Niña para (a) área 3 e (b) área 6. Células com # significam  
que nesses meses ambos os fenômenos não estavam ativos .....67
- 4.4 - Porcentagem de sistemas frontais em relação ao número de dias de  
deslocamento para os grupos Rota 1/SE e Rota 2/SE e CO no  
verão e inverno.....126



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CA	-Cavado em Altos Níveis
CPC	-Climate Prediction Center
CPTEC	-Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CO	-Centro-Oeste
COLA	- Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions
DJF	-Dezembro, Janeiro, Fevereiro
GrADS	-Grid Analysis and Display System
JJA	-Junho, Julho, Agosto
MAM	-Março, Abril, Maio
NCAR	-National Center for Atmospheric Research
NCEP	-National Center for Environment Prediction
NW-SE	-Noroeste-Sudeste
OLR	-Outgoing Longwave Radiation
PNM	-Pressão ao Nível Médio do Mar
SAS	-Sul da América do Sul
SBA	-Sul da Bahia
SE	-Sudeste
SON	-Setembro, Outubro, Novembro

VCAN -Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCAS -Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCPS -Zona de Convergência do Pacífico Sul

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Durante todo o ano, sobre os continentes, a atmosfera experimenta vários tipos de distúrbios transientes, tanto de origem tropical como extratropical. Os distúrbios transientes de alta frequência mais comuns são as frentes frias. Os sistemas frontais são de grande importância devido ao fato de provocarem mudanças significativas no tempo em diversas partes do globo principalmente na região subtropical e de latitudes médias e altas. No Brasil podem causar chuvas intensas, ventos fortes, geadas, com impactos na agricultura, recursos hídricos, setor econômico e social.

O conceito de frente surgiu depois da I Guerra Mundial e foi introduzido por Bjerknes (1919), que fez uma analogia entre as diferentes massas de ar e exércitos adversários que se confrontavam em um campo de batalha. Ele definiu como frente a zona de transição entre duas massas de ar com características físicas distintas e fortes gradientes de temperatura e umidade, o que é atualmente chamada de zona frontal. Mais tarde, alguns autores, preferiram definir frente como sendo a intersecção da superfície frontal com o nível da superfície, e é esta intersecção que é representada nas cartas sinóticas (Pettersen, 1956; Vianello, 1991; Oliveira et al., 2001).

As zonas frontais são identificadas pelo mínimo relativo da pressão, máximo de vorticidade ciclônica ao longo da frente, fortes gradientes horizontais de temperatura, umidade e movimento vertical, forte cisalhamento vertical e horizontal do vento, rápida mudança de cobertura de nuvens e precipitação (Carlson, 1991).

Embora o conceito de frentes já exista há algumas décadas, ainda há poucos estudos científicos sobre esses sistemas e seus comportamentos no

Hemisfério Sul. De modo geral, os sistemas deslocam-se de oeste para leste, e, em algumas regiões podem sofrer influência da orografia, como no caso da Cordilheira dos Andes na América do Sul (Seluchi et al., 1998), as montanhas do sudeste Australiano (Colquhoun et al., 1985) e a cadeia montanhosa que corta a Ilha do Sul na Nova Zelândia (Smith, 1991).

Na América do Sul, geralmente os sistemas provenientes do Pacífico deslocam-se para leste, e, depois da passagem pela Cordilheira dos Andes adquirem uma componente em direção ao Equador. Esses sistemas podem avançar pelo continente ou deslocar-se para o oceano Atlântico (Cavalcanti, 1985; Satyamurty et al., 1998, Seluchi et al., 1998).

No Brasil, as frentes frias atuam durante todo o ano, e afetam mais significativamente as Regiões Sul e Sudeste sendo responsáveis pelas chuvas e frio, principalmente no sul do país (Quadro et al., 1996). Além disso, essas regiões são caracterizadas por serem bastante frontogenéticas, como verificado por Mattos (1987). No entanto, como mostrado por Kousky (1979), a penetração de sistemas frontais e seus remanescentes têm um papel importante também na precipitação no sul da Região Nordeste. Kousky e Ferreira (1981) também mostraram a importância das frentes nas chuvas de inverno no norte do país. Em alguns casos estudados por eles, o ar de latitudes médias da América do Sul cruzou o equador entrando no Hemisfério Norte.

Oliveira (1986) fez uma climatologia das frentes frias e da interação com a convecção sobre a Amazônia, utilizando imagens de satélite. Dando continuidade ao trabalho de Oliveira, Lemos e Calbete (1996) fizeram uma climatologia dos sistemas frontais para o período de 1987 a 1995, utilizando análises de cartas sinóticas. Alguns estudos mais recentes para estabelecer uma climatologia dos sistemas frontais na América do Sul têm sido realizados usando dados de reanálises do NCEP/NCAR (Kalnay, 1996), como em Justí da Silva e Silva Dias (2002) e Cavalcanti e Kousky (2003). Todos os trabalhos anteriores mostraram que a frequência de frentes frias diminui com o

decréscimo da latitude, e que, suas passagens estão diretamente ligadas às mudanças de tempo nas regiões afetadas.

Portanto, neste trabalho tem-se como objetivo geral fazer uma climatologia da passagem de sistemas frontais sobre a América do Sul, durante um período de 23 anos, principalmente sobre o Brasil e estudar o comportamento dos sistemas bem como suas características e as condições sinóticas e dinâmicas associadas a esses comportamentos. O comportamento se refere ao deslocamento do sistema sobre o Brasil, pelo interior do continente, litoral ou oceano. Nota-se em observações diárias que os sistemas frontais que afetam áreas ao sul do Brasil podem se deslocar sobre o continente, afetando várias áreas do Brasil, ou podem se deslocar para o oceano sem influenciar o tempo nessas áreas. A proposta deste estudo é identificar as características da atmosfera associadas à esses casos.

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo. No Capítulo 3 são apresentados os dados e a metodologia aplicada neste trabalho. No Capítulo 4 é apresentada a climatologia dos sistemas frontais para áreas na América do Sul e no Brasil, bem como a análise da variabilidade sazonal e interanual da frequência dos sistemas frontais ao longo do litoral e interior do continente brasileiro. As características atmosféricas associadas e os padrões quando os sistemas frontais se deslocam para o oceano, e sobre o Brasil, pelo litoral e pelo interior são também mostrados neste Capítulo. Estudos de casos estão inseridos no Capítulo 5. As conclusões finais encontram-se no Capítulo 6.



## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo é apresentada uma revisão do assunto, mostrando as características gerais dos sistemas frontais e estudos sobre o comportamento destes sobre a América do Sul.

#### 2.1 - Características Gerais de um Sistema Frontal

Um sistema frontal clássico é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície, denominado ciclone, Figura 2.1.

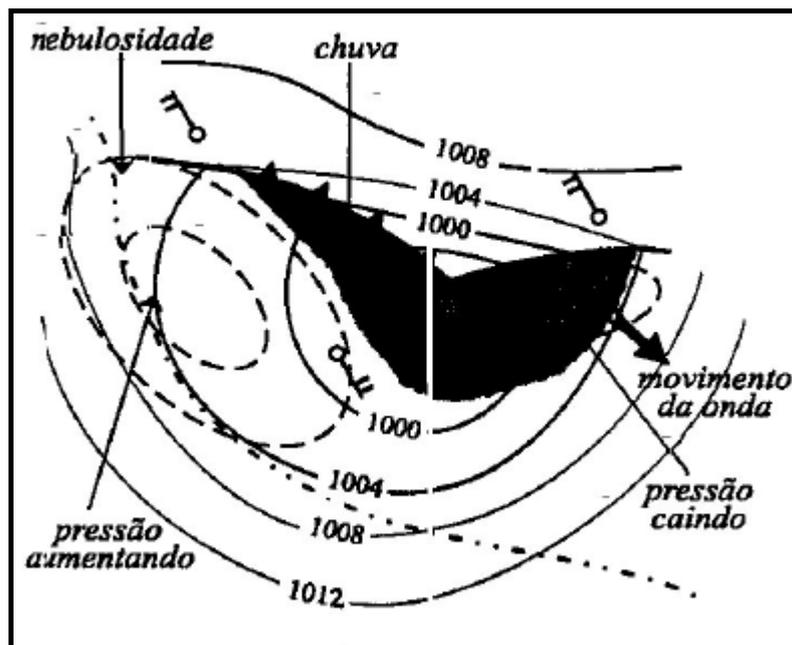


FIGURA 2.1 - Sistema frontal desenvolvido. Linhas inteiras: Isóbaras.

FONTE: Oliveira et al. (2001, p. 273).

De acordo com o modelo clássico da Escola Norueguesa, as frentes podem ser classificadas como frente fria, quente, estacionária e oclusa.

Em uma frente fria o ar frio desloca o ar quente na superfície, que sofre ascensão e origina nuvens com grande desenvolvimento vertical e conseqüentemente ocasiona precipitação adiante da frente. As frentes frias podem se deslocar rapidamente ou lentamente, e as que se deslocam mais rápido são mais inclinadas, isto é, maior o ângulo entre a superfície frontal e a superfície da terra (Vianello, 1991). A inclinação, ou seja, a relação entre o ascenso vertical e o deslocamento horizontal, de uma frente fria de deslocamento rápido é 1:40 a 1:80 e para as de deslocamento lento a inclinação é de 1:100. Antes da chegada de uma frente fria é notada sensível redução na pressão, aumento da temperatura e intensificação dos ventos. Após a passagem da frente, a pressão sobe rapidamente, a temperatura cai e o vento muda de direção (normalmente de sudoeste para noroeste no Hemisfério Norte, e de norte ou nordeste para de sul ou de sudoeste no Hemisfério Sul) (Vianello, 1991; Fedorova, 1999; Oliveira et al., 2001).

Na frente quente o ar quente substitui o ar frio. Normalmente a precipitação é contínua e considerada de leve a moderada, no caso do ar ser estável, mas no caso de ar instável, as chuvas tornam-se intensas, com trovoadas e aguaceiros. A aproximação de uma frente quente é caracterizada por pequena ou nenhuma queda da pressão atmosférica, bem como pequenas variações na temperatura. Após a passagem da frente, a pressão e a temperatura podem elevar-se ligeiramente (Vianello, 1991; Fedorova, 1999; Oliveira et al., 2001).

Quando não há nenhum ou pouco avanço das massas de ar, a frente é dita estacionária. Em uma frente estacionária o movimento do ar não se dirige para a massa de ar quente ou frio, mas paralelo à linha da frente. A precipitação associada é geralmente leve e estratiforme, mas pode-se tornar bem significativa se permanecer estacionária por muito tempo. (Oliveira et al., 2001).

Uma frente oclusa ocorre quando o setor frio de uma frente, que normalmente move-se mais rápido, alcança o setor quente, e o ar quente é forçado a subir, afastando-se do solo. Há dois tipos de frentes oclusas: fria e quente. Na

oclusão tipo quente, o ar frio adiante da frente quente é mais frio que o ar atrás da frente fria, fazendo com este seja forçado a subir. Na frente oclusa fria, o ar é mais frio atrás da frente fria que aquele que está adiante da frente quente, portanto, neste caso, é o ar quente que é forçado a subir. Em ambas as frentes, a nebulosidade e a precipitação acontecem nos dois lados da frente. À medida que a oclusão evolui, a nebulosidade e precipitação diminuem de intensidade. (Vianello, 1991; Oliveira et al., 2001).

A idéia que se tinha sobre a estrutura frontal com modelos frontais da Escola Norueguesa dominaram por mais de meio século. Com o propósito de melhorar esses modelos, Harrold (1973) introduziu o conceito de esteira transportadora quente, que é em termos gerais uma corrente de ar bem definida, com alta temperatura potencial úmida escoando ao longo do comprimento da frente fria. A esteira transportadora quente transporta uma grande quantidade de calor, umidade e momento de oeste para os pólos e para cima. O ar na esteira transportadora quente flui ao longo da frente fria, freqüentemente na forma de um jato em baixos níveis na camada limite na dianteira da frente fria em superfície (Browning, 1985, Carlson, 1991). O conceito de esteira transportadora foi utilizado por Ryan e et al. (1985) e Browning (1985) para explicar sistemas frontais na Austrália e no Reino Unido, respectivamente.

## **2.2 – Frontogênese e Frontólise**

Bergeron em 1928 propôs uma teoria para explicar cinematicamente a formação e dissipação de frentes através da investigação das massas de ar de grande escala, e concluiu que as frentes se formam como resultado de movimento confluyente em regiões entre massas de ar diferentes. Assim, introduziu os termos frontogênese para o processo de formação ou intensificação de uma frente e frontólise para o enfraquecimento e dissipação (Pettersen, 1956).

As frentes poderão se formar ao longo do eixo de dilatação no campo de deformação horizontal quando as isotermas possuírem uma orientação

favorável relativa ao eixo (Pettersen, 1956). Orlanski et al. (1985) concluíram que o campo de deformação horizontal é o principal agente frontogenético em baixos níveis.

Pettersen (1956) introduziu uma função para medir a tendência frontogenética em um fluxo, a chamada função frontogenética dada por:

$$F = -\frac{1}{2}|\nabla T|(D \cos 2g + d)$$

onde  $D$  é a deformação total :  $D = (D_1^2 + D_2^2)^{1/2}$ ;  $D_1 = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$  e  $D_2 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ ;

$d$  é a divergência :  $d = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ , e  $g = \alpha - \beta$ ;

sendo  $\alpha$ : o ângulo entre o vetor gradiente horizontal de temperatura e o eixo x e  $\beta$ : o ângulo entre o eixo de dilatação e o  $\nabla T$ .

Quando  $F$  é positivo as isotermas tendem a convergir, e o processo é dito frontogênese, enquanto a frontólise ocorre quando  $F$  é negativo.

Satyamurty e Mattos (1989) fizeram um estudo climatológico dos campos de deformação e frontogênese em 850 hPa, na banda de latitude entre 45°N e 45°S. Quando o campo de deformação for forte (na região entre dois anticiclones, ou seja, no colo) e, se a distribuição de temperatura for favorável para poder gerar zonas de forte gradiente térmico tem-se uma região propícia à formação de frente (Palmén e Newton, 1969). A Figura 2.2 mostra que os máximos de deformação no Hemisfério Sul estão situados sobre o sudoeste da África do Sul, da Austrália e da América do Sul. No Hemisfério Norte estão localizados no Atlântico Oeste e Pacífico Oeste, que são as regiões de início das “storm tracks” nesse hemisfério.

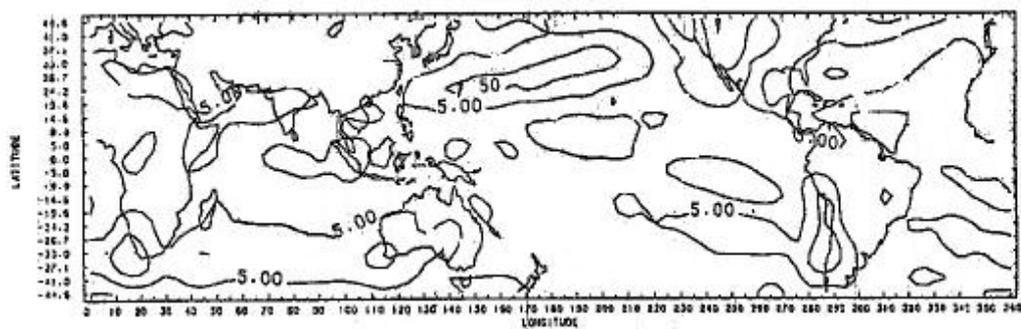


FIGURA 2.2 - Média climatológica anual (1974-1980) do campo de deformação em 850 hPa entre 45°N e 45°S. Intervalo de contorno  $2.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .  
 FONTE: Mattos (1987, p. 26).

Na Figura 2.3 pode-se identificar os máximos da função frontogênica no sudoeste da África do Sul, sudoeste Australiano, na região da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), na parte sul da América do Sul e no Oceano Atlântico Subtropical (máximo positivo entre dois núcleos negativos). Observa-se que a leste das Montanhas Rochosas nos EUA, do Himalaia, na Ásia e da Cordilheira dos Andes, na América do Sul tem-se regiões fortemente frontogênicas.

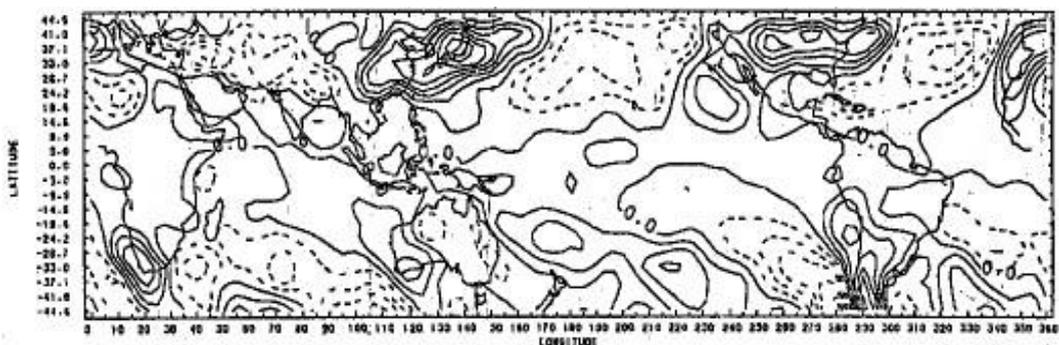


FIGURA 2.3 - Média climatológica anual (1974-1980) de função frontogênica no nível de 850 hPa entre 45°N e 45°S. As linhas tracejadas indicam valores negativos e as linhas cheias valores positivos. Intervalo de contorno  $2.5 \times 10^{-12} \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .  
 FONTE: Mattos (1987, p. 32).

Na América do Sul observa-se a linha zero orientada de noroeste para sudeste que passa sobre o estado do Rio de Janeiro (~ 22°S, 45°W) e divide as regiões de frontogênese a sudoeste e frontólise (valores negativos da função frontogenética) a nordeste. Isto concorda com observações diárias de mapas sinóticos de que as frentes em seu deslocamento para nordeste geralmente tendem a se enfraquecer após passarem pelo Rio de Janeiro e que os sistemas ciclônicos provenientes do Pacífico tendem a desenvolver bandas frontais sobre o norte e leste da Argentina.

### **2.3 Comportamento dos Sistemas Frontais na América do Sul**

Um dos sistemas sinóticos mais importantes sobre a América do Sul é o sistema frontal. Tais sistemas são ativos durante o ano todo, e podem penetrar até latitudes tropicais e sem dúvida são partes fundamentais dos regimes de precipitação e temperatura em quase todo o continente (Lemos e Calbete, 1996; Quadro et al., 1996).

Taljaard (1972) apresentou a distribuição das frentes em superfície para o Hemisfério Sul durante o International Geophysical Year (IGY). Para a identificação das frentes foram utilizados mapas diários referentes ao período de verão e inverno de 1958 e o critério usado nessa identificação foi a baroclinia média da atmosfera, ou seja, a zona de máximo gradiente horizontal de temperatura. Taljaard (1972) calculou o número de frentes em diferentes latitudes para um período de 100 dias em uma área de  $4 \times 10^5 \text{ km}^2$ . Os resultados estão sumarizados na Figura 2.4. Observa-se que durante todo o ano, nesse período, as frentes em superfície se distribuíram no sul e sudeste da América do Sul, sobre os oceanos e sul da Austrália e África.

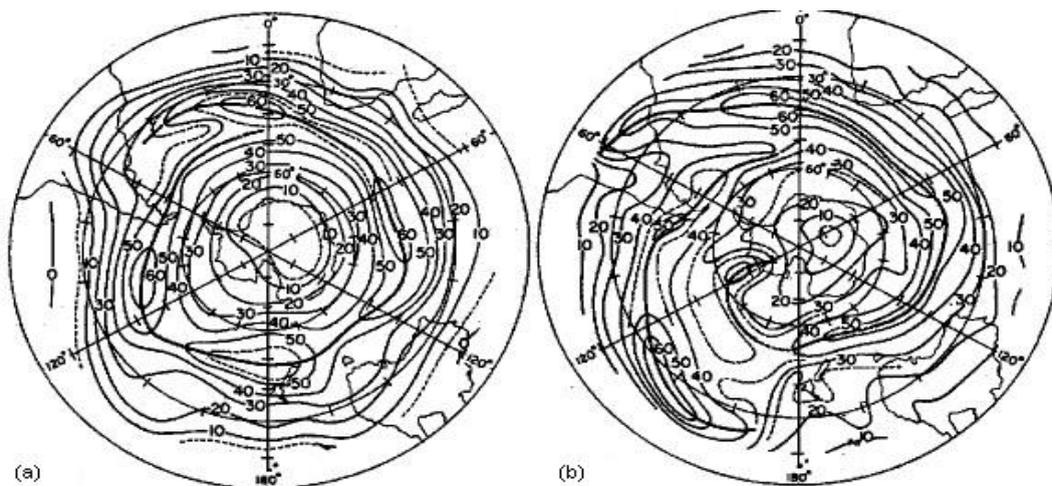


FIGURA 2.4 - Frequência de frentes em superfície durante: a) Janeiro, Fevereiro e Março, 1958 (Verão, HS) e b) Julho, Agosto e Setembro, 1957 (Inverno, HS). Os valores representam o número de vezes em 100 dias que parte de uma frente estava situada dentro da área de  $4 \times 10^5 \text{ km}^2$ . FONTE: Taljaard (1972).

As ondas baroclínicas de latitudes médias modificam-se ao atravessar os Andes e interagem com a circulação atmosférica sobre a América do Sul. Conseqüentemente os sistemas frontais que se deslocavam de oeste para leste, sobre o Pacífico, agora ganham uma componente em direção ao Equador, propagando-se de sudoeste para nordeste ao longo da costa leste da América do Sul, chegando a atingir latitudes tropicais. Adicionalmente eles podem se acoplar com mecanismos típicos de convecção, intensificando-se e permanecendo ativos durante vários dias (Cavalcanti, 1985; Reeder e Smith, 1998; Satyamurty et al., 1998; Seluchi et al., 1998). Durante a primavera e verão, os sistemas frontais organizam-se com a convecção tropical e intensa atividade convectiva ocorre sobre a Argentina, Brasil, Bolívia e leste do Peru (Satyamurty et al., 1998).

Um estudo sobre a interação entre os sistemas frontais e a convecção na Amazônia foi realizado por Oliveira (1986). Nesse trabalho, foi feita uma climatologia no período de 1975 a 1984 dos sistemas frontais que atuam no Brasil. Foram utilizadas imagens do satélite GOES-EAST a fim de identificar os sistemas em 4 bandas latitudinais ( $40^{\circ}$ - $35^{\circ}$ S,  $35^{\circ}$ - $25^{\circ}$  S,  $25^{\circ}$ - $20^{\circ}$ S e ao norte de  $20^{\circ}$ ). Os resultados desse trabalho são sumarizados na Figura 2.5.

Na banda 1 ( $40^{\circ}$ - $35^{\circ}$ S) é esquematizado um sistema e a nebulosidade convectiva sobre o continente atingindo o sul do Brasil. Nesta banda de latitude verifica-se que há penetração dos sistemas frontais durante todo o ano, no entanto o máximo de eventos ocorre em julho (12). Por outro lado, em relação à convecção na Amazônia, esta se dá nos meses de verão. Muitos desses sistemas frontais podem desviar-se para o oceano, ou, permanecer estacionários na região Sul, quando então provocam muita chuva, como verificado por Severo (1994).

Foi visto nesse trabalho de Oliveira (1986) que vários fatores, como por exemplo, a existência de uma alta pressão no Brasil central e a intensificação do jato pode contribuir para que as frentes frias não atinjam as latitudes de  $35^{\circ}$ - $25^{\circ}$ S. No verão, alguns sistemas podem permanecer semiestacionários sobre a Região Sudeste configurando assim a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Algumas frentes frias, porém, atingem o Nordeste e deslocam-se para o Oceano onde posteriormente ocorre uma frontólise. Segundo Oliveira (1986), na faixa latitudinal de  $35^{\circ}$ S- $25^{\circ}$ S, há uma redução do número de eventos, mas o máximo ainda ocorre em julho (7,7). No entanto, a máxima interação entre sistemas frontais e a convecção tropical é no mês de novembro. Para os sistemas que atingem as latitudes de  $25^{\circ}$ S- $20^{\circ}$ S, o máximo se dá em outubro (5 casos). As frentes que ultrapassam  $20^{\circ}$ S rumo ao nordeste são menos freqüentes, no entanto, na maior parte das vezes estão associadas com a convecção tropical na Amazônia, com o máximo ocorrendo em novembro. Notou-se também que a trajetória dos sistemas frontais, quando se encontravam ao sul de  $40^{\circ}$ S era mais zonal. Entre  $35^{\circ}$ S e  $40^{\circ}$ S algumas frentes

ganham trajetória mais meridional e atingem as latitudes mais baixas, enquanto outras seguem zonalmente.

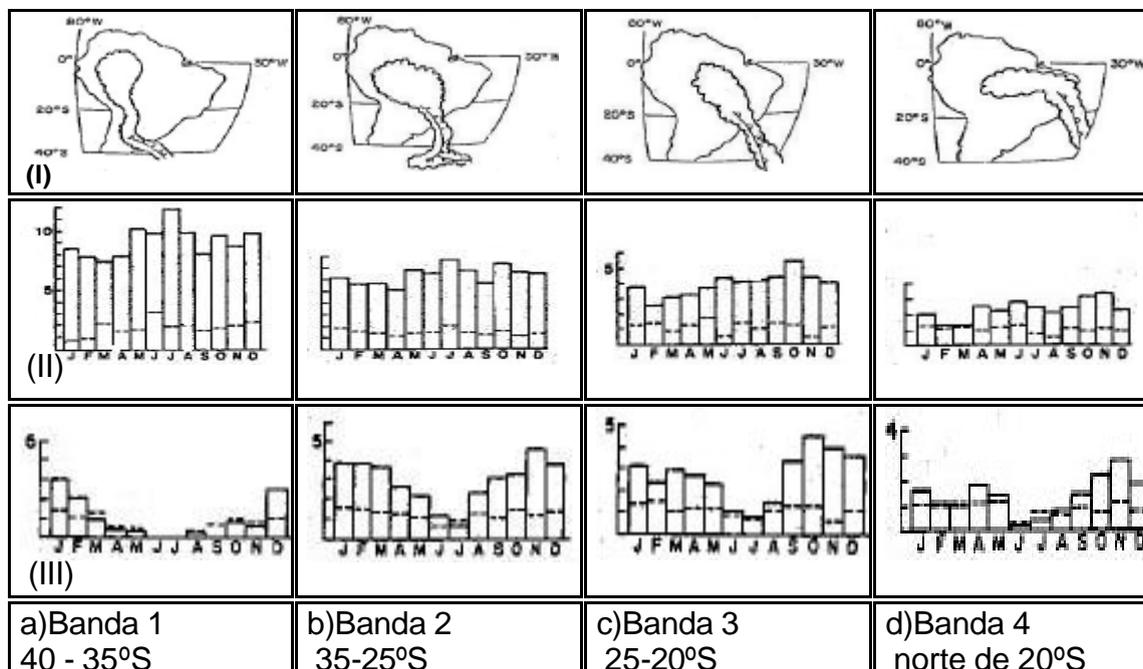


FIGURA 2.5 - Esquema típico de formação de nebulosidade convectiva (I), distribuição mensal de sistemas frontais que penetram nas bandas de latitude (II) e distribuição mensal do número de sistemas frontais que organizaram convecção tropical (III) nas bandas de latitude a,b,c e d.

FONTE: Adaptada de Oliveira (1986).

Kousky (1979) também identificou uma maior freqüência de ocorrência de sistemas frontais no sul da Bahia nos meses de março a dezembro para o período de 1961 a 1970. Notou que há uma tendência de anos com maiores totais de precipitações corresponder a anos com maior número de passagem de frentes. Às vezes, as frentes frias afetam também o estado do Ceará contribuindo para o total pluviométrico mensal, como verificado por Alves (1992). Sobre o nordeste, as frentes não apresentam grande contraste de temperatura, entretanto, ficam ativas devido ao grande contraste de umidade.

Lemos e Calbete (1996), dando continuidade ao trabalho de Oliveira (1986), fizeram uma climatologia das frentes que ocorreram entre 1987 a 1995 nas bandas de latitude: 35°S-25°S, 25°S-20°S e ao norte de 20°S. Nesse período a média anual foi de 6, 5 e 4 sistemas para as latitudes de 35°S-25°S, 25°S-20°S e ao norte de 20°S, respectivamente. Nesse estudo Lemos e Calbete (1996) usaram além das imagens de satélite, as cartas sinóticas das 12 e 00 GMT, enquanto Oliveira apenas analisou imagens de satélite.

Justi da Silva e Silva Dias (2002) fizeram a partir de dados da reanálise do NCEP do período de 1981-1999 uma climatologia dos sistemas frontais usando um critério diferente de Oliveira (1986) e Lemos e Calbete (1996). Nesse estudo foi usada apenas a mudança no sinal da componente meridional do vento. Nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, o vento em baixos níveis tem direção de nordeste, devido à influência da alta subtropical do Atlântico Sul, e então numa situação pré-frontal o vento é tipicamente de noroeste depois gira de sudoeste e de sudeste à medida que a frente se desloca.

Mais recentemente Cavalcanti e Kousky (2003) mostraram a média anual de passagem de frentes frias para o período de 1979-2000 usando também os dados da reanálise do NCEP/NCAR. No entanto, o critério usado para esse trabalho levou em conta a temperatura, pressão e vento. Foi encontrado que os sistemas seguem duas trajetórias principais, uma pela costa brasileira e outra pelo interior. A variabilidade sazonal concorda com todos os trabalhos mencionados anteriormente, com a maior frequência ocorrendo na estação de inverno.

Em termos de variabilidade interanual, Cavalcanti (1996) verificou que durante o El Niño estendido de 1990 a 1994, os sistemas frontais tiveram comportamento anômalo, sendo que a maioria deles não se deslocou de sul para norte e foi intensificado na Região Sul pelo jato subtropical, o que causou enchentes em algumas cidades. Fedorova e Carvalho (2000) apresentaram outro estudo observacional sobre a frequência de zonas frontais durante um

ano em que ocorreu La Niña (julho de 1996 até março de 1997) e El Niño (julho de 1997 até março de 1998), e os resultados mostraram que a ocorrência de frentes frias na faixa latitudinal de 20°S e 40°S foi maior em anos de El Niño do que de La Niña quando estes fenômenos estavam em suas fases mais ativas. Para os dois anos analisados, as frentes frias foram observadas mais ao sul da América do Sul, mas em anos de El Niño, as frentes tiveram maior frequência sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai. Em anos de El Niño, o jato subtropical se intensifica devido ao aumento do gradiente de temperatura norte-sul, bloqueando o avanço das frentes para as latitudes mais baixas (Cavalcanti, 1996).

No inverno, as massas de ar frio penetram sobre o continente na retaguarda das frentes frias, podendo causar geadas fortes ao sul de 30°S e moderada nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo e sul de Minas Gerais, às vezes, com prejuízos para a agricultura (Marengo et al., 1997). Algarve (1994) observou que antes da ocorrência de geadas os sistemas frontais se deslocavam rapidamente favorecendo a entrada mais rápida das massas frias e o predomínio de altas pressões na região. Naquele estudo, também observou-se que o deslocamento rápido de outros sistemas frontais, em seguida, favorecia a realimentação das altas pressões na região.

Na estação de verão, a entrada de ar frio não provoca quedas tão bruscas na temperatura, no entanto, organiza atividade convectiva e chuva em áreas onde normalmente há pouca precipitação (Garreaud, 2000). A circulação de grande escala nos níveis médios para o verão e inverno é caracterizada por uma onda longa com uma crista a oeste dos Andes e um cavado a leste da América do Sul e Atlântico sudoeste (Fortune e Kousky, 1983; Garreaud, 2000). Resultados de Cavalcanti e Kousky (2003) mostraram que a amplificação de um padrão de onda com uma crista sobre o Pacífico leste e um cavado sobre a América do Sul fornece um sinal favorável para esses eventos e pode ser detectado com 4 dias de antecedência.

As incursões de ar frio também podem afetar latitudes tropicais causando um grande declínio da temperatura, em eventos conhecidos como friagens (Marengo et al., 1997). O efeito canalizante da Cordilheira dos Andes ajuda a massa de ar frio a permanecer por alguns dias e avançar para norte dentro da região Amazônica afetando também a Bolívia, Colômbia, Venezuela e Guianas (Parmenter, 1976; Seluchi et al., 1998, Dapozzo e Silva Dias, 1994). Há casos em que uma frente fria cruzou o Equador no norte da Região Amazônica, seguido por uma friagem (Fortune e Kousky, 1983). Durante o período de 16-19 de abril de 1999 uma frente fria avançou para o norte da Argentina, Uruguai, Paraguai e centro-sul do Brasil. A massa de ar frio associada a este sistema causou grande impacto sobre o Brasil, tendo sido documentadas quedas bruscas de temperaturas em vários estados brasileiros e neve nas partes mais altas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. (Satyamurty et al, 2002).

## **CAPÍTULO 3**

### **DADOS E MÉTODOS**

Neste Capítulo é feita uma descrição dos dados utilizados para a obtenção da climatologia dos sistemas frontais e apresentados os métodos e os critérios utilizados para a realização deste estudo.

#### **3.1- Dados**

Foram utilizados os seguintes dados e variáveis meteorológicas:

- Dados diários de vento em 925 e 200 hPa, temperatura em 925 hPa, pressão ao nível do mar, geopotencial em 500 e 200 hPa provenientes da reanálise do National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) para o período de 1980 a 2002. Esses dados estão dispostos em pontos de grade com espaçamento 2,5° latitude x 2,5° disponibilizados em 17 níveis na vertical e a média diária de quatro horários (00, 06, 12 e 18 GMT), (Kalnay et al., 1996).
- Dados de radiação de onda longa disponibilizados pelo NCEP e fornecidos pelo National Oceanic and Atmospheric - Climate Diagnostic Center (NOAA-CDC), Boulder, Colorado (CDC-NCEP/NOAA), dispostos em pontos de grade com resolução espacial de 2,5° de longitude/latitude para o período de 1980 a 2002.
- Imagens do satélite Goes no canal infravermelho disponíveis no CPTEC/INPE para o período de 1994 a 2002.
- Dados diários de precipitação de 1980-2002 para o Brasil processados em ponto de grade pelo Climate Prediction Center (CPC) e disponibilizados pelo NCEP/NOAA.

Para visualização e análise das variáveis meteorológicas foi utilizado o software Grid Analysis and Display System (GrADS) fornecido pelo Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions (COLA).

## **3.2- Metodologia**

### **3.2.1 – Climatologia**

Primeiramente, foi feita uma climatologia das frentes frias que se deslocam sobre a América do Sul durante o período de 1980-2002. Foi desenvolvido e aplicado um programa para identificar os casos de sistemas frontais que passaram pelo leste da Argentina, Uruguai, Sul, Sudeste, Centro-Oeste do Brasil e sul da Bahia, catalogando-os por mês, estação e ano. Este programa foi desenvolvido em Grads e consiste em verificar a média em uma área, composta por 5 pontos de grade, da queda de temperatura, do aumento da pressão ao nível médio do mar e da mudança da componente meridional do vento de um dia para o outro. A Figura 3.1 mostra a localização das áreas estudadas em que cada área abrange 5 pontos de grade com espaçamento  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ . A rota 1 indica a trajetória dos sistemas que se deslocam pelo litoral, e a rota 2, a dos sistemas que se deslocam sobre o continente, afetando também o interior.

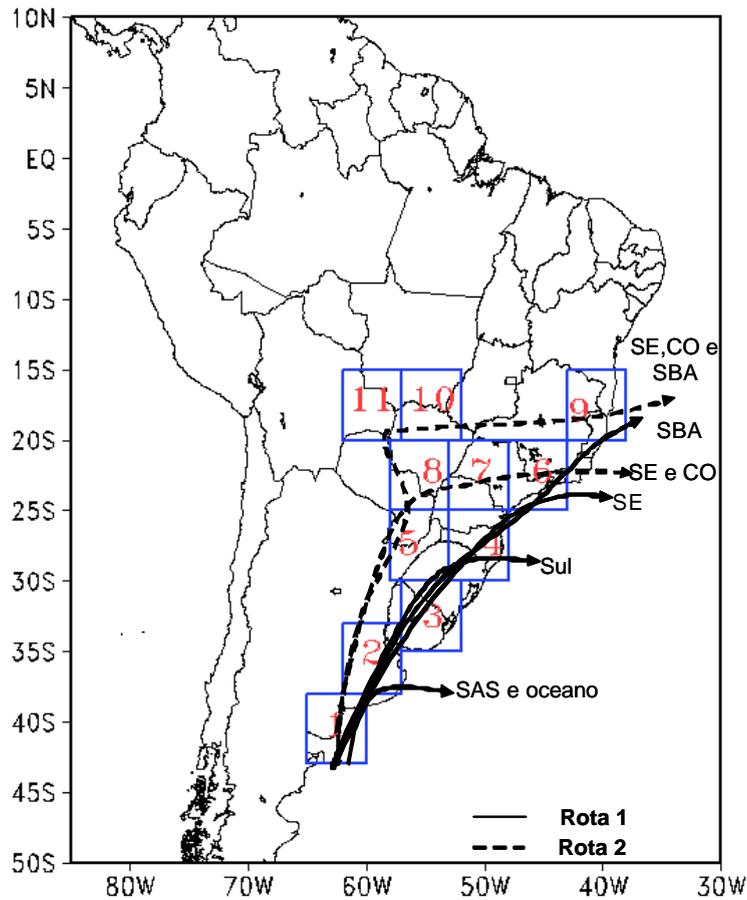


FIGURA 3.1 - Mapa da América do Sul destacando as áreas selecionadas para estudo e rotas. Rota 1 (linha contínua): rota litorânea; Rota 2 (linha tracejada) : rota litorânea e continental. Os números de 1 a 11 significam as áreas selecionadas para estudo.

O critério utilizado para a identificação automática dos sistemas frontais foi que no intervalo de um dia para o outro houvesse queda de temperatura em 925 hPa, aumento de pressão ao nível médio do mar e mudança na componente meridional do vento em 925 hPa, considerando a média dos 5 pontos em cada área analisada. Critério semelhante foi utilizado por Cavalcanti e Kousky (2003) em uma análise climatológica, porém considerando todos os pontos de grade sobre a América do Sul. Entretanto, naquele trabalho havia um limite fixo de queda de temperatura e aumento de pressão e seriam selecionados casos em que o aumento da pressão fosse maior que 2 hPa e a queda de temperatura

em 925 hPa maior que 2°C, com ocorrência de ventos de sul, acima de 2m/s. Outro critério, utilizado por Cavalcanti e Coura da Silva (2002) foi testado, para resultados de uma simulação climática de 10 anos, em que deveria haver queda de temperatura, aumento de pressão e ventos de sul em 850 hPa na área analisada, no intervalo entre 3 dias. Esse critério foi bem adequado aos resultados do modelo, utilizados naquele estudo, porém com os dados de reanálise foi verificado que eram obtidos melhores resultados reduzindo o intervalo de um dia para o outro e considerando o vento em 925 hPa.

Além disso, nos meses de verão foram usados dados de precipitação e OLR para a contabilização das frentes, uma vez que nessa estação do ano, principalmente em latitudes mais ao norte não há contraste significativo da temperatura, mas os sistemas são acompanhados por ocorrência de precipitação. Nestes casos foram verificados os mapas diários de precipitação para acompanhar os sistemas, ou se estes provocaram chuva em uma determinada região. Para cada área específica foi feita a média de precipitação ocorrida diariamente. Foram feitos também diagramas de Hovmoller com a precipitação e OLR para três longitudes (40°W, 50°W e 60°W).

Análises adicionais foram realizadas para confirmar os casos e verificar algumas ocorrências que poderiam não ter sido detectadas automaticamente pelo programa que foi desenvolvido. Com os dados de reanálise foram feitas as séries temporais de PNM, temperatura em 925 hPa e componente meridional do vento em 925 hPa. Através do diagrama de Hovmoller da temperatura e da componente meridional do vento pode-se observar o deslocamento latitudinal dos sistemas frontais, principalmente para os anos em que não há imagens de satélite digitalizadas disponíveis.

Como exemplo, nas Figuras 3.2 e 3.3 são apresentadas as séries temporais da PNM, temperatura e componente meridional do vento em 925 hPa para a área 6, localizada em 25-20°S, 48-43°W, para o mês de janeiro e julho de 2002. Na Figura 3.2, em janeiro, são identificados 5 casos de passagem de frentes (2 a

4; 7 a 9; 14/16; 22 a 23; 28 a 29). No entanto, através da detecção automática foram identificados 6 sistemas. Para a ratificação foi feita a análise adicional e constatou-se que 1 sistema a mais encontrado era atuação de uma mesma frente fria. Em julho, Figura 3.3, para a área 6 foram identificados 6 (2, 8 a 10, 13 a 15, 17 a 18, 24 a 25, 28 a 29) sistemas frontais tanto pela detecção automática quanto pela análise adicional.

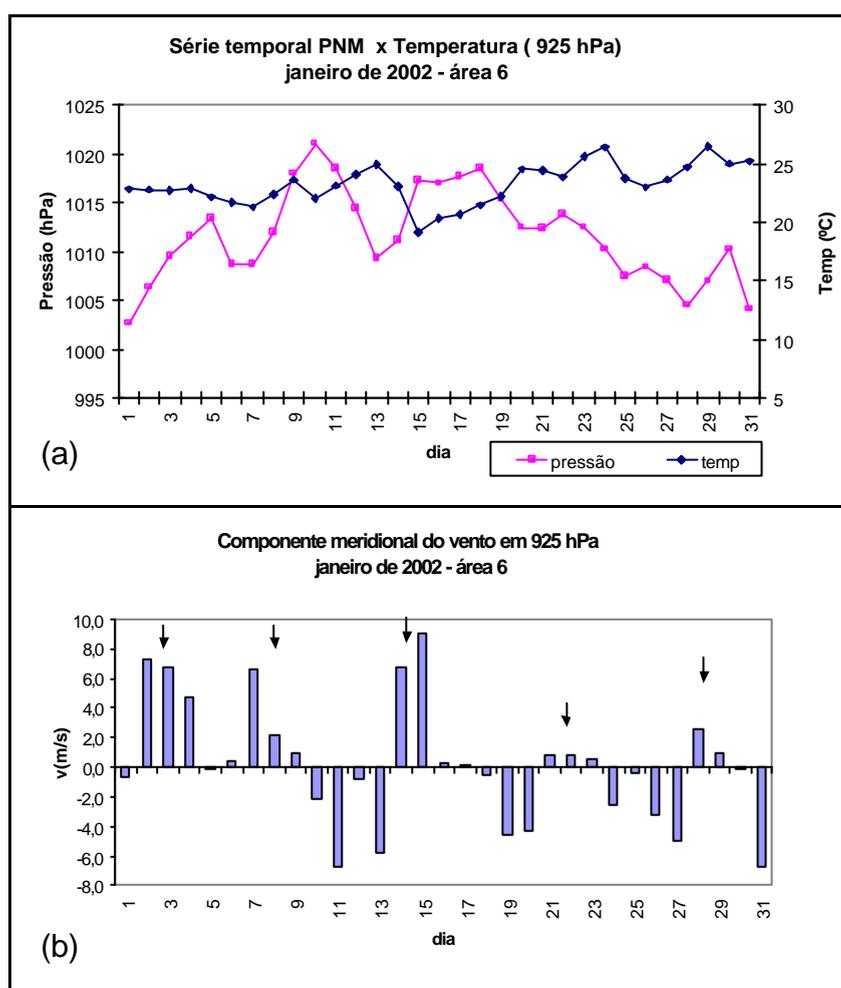


FIGURA 3.2 - Séries temporais para janeiro de 2002: (a) PNM (hPa) x temperatura (°C) (925 hPa); (b) componente meridional do vento (m/s) em 925 hPa para área 6.

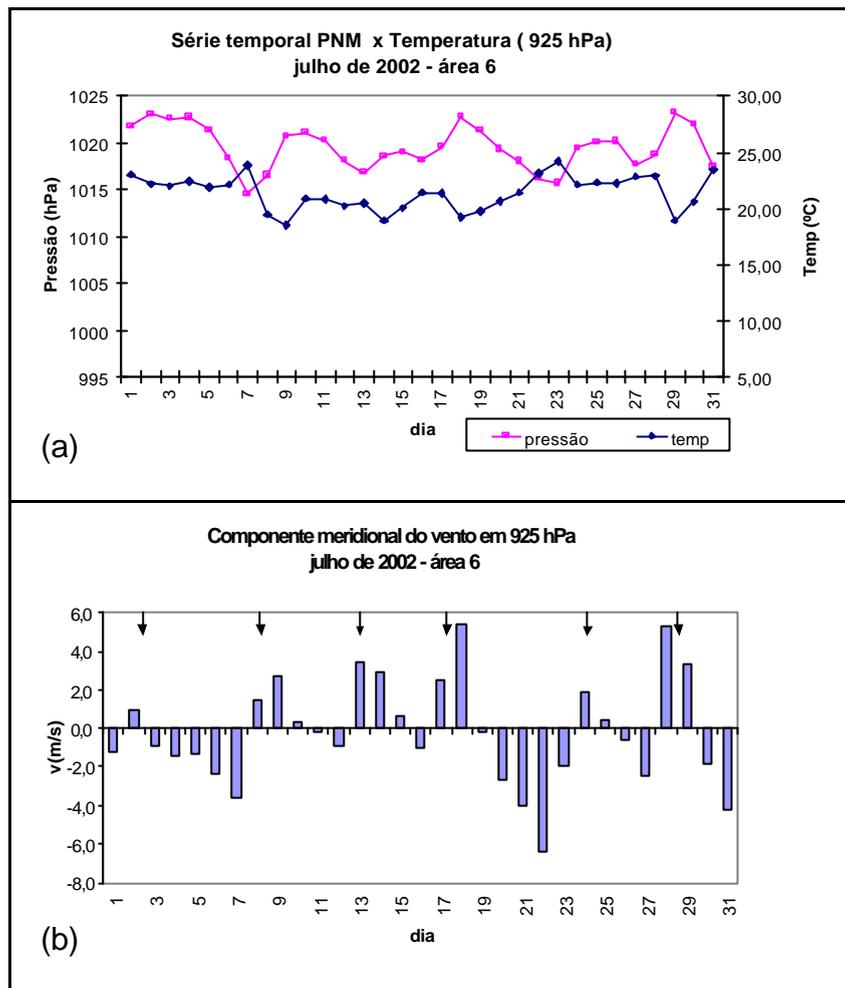


FIGURA 3.3 - Séries temporais para julho de 2002: (a) PNM (hPa) x temperatura (°C) (925 hPa); (b) componente meridional do vento (m/s) em 925 hPa para área 6.

Através do diagrama de Hovmoller da componente meridional do vento e temperatura em 925 hPa podemos observar o deslocamento dos sistemas frontais no mês de janeiro (Figura 3.4 a) e julho de 2002 (Figura 3.5 a) para a longitude de 50°W. Nota-se através das Figuras 3.4 e 3.5 b que o campo de OLR é consistente com a precipitação. No inverno nota-se que a chuva acumulada em 24 horas associada à passagem de sistemas frontais é menos intensa que no verão. Ressalta-se que aqui foram mostrados dois exemplos

para uma área específica, no entanto, tal análise foi feita para todas as áreas estudadas.

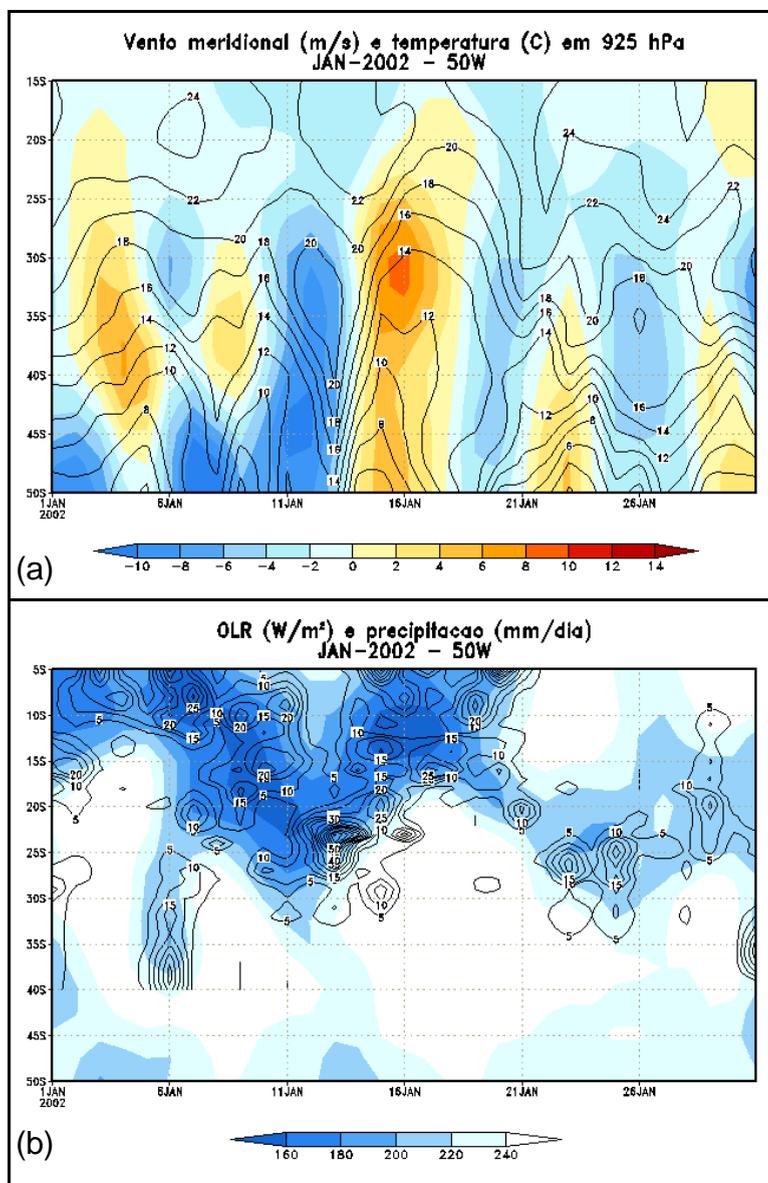


FIGURA 3.4 - Diagrama Hovmoller para janeiro de 2002: (a) vento meridional (m/s) (sombreado) e temperatura (°C) em 925 hPa (isolinha) para 50°W; (b) OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) e precipitação (mm/dia) (isolinha) em 50°W.

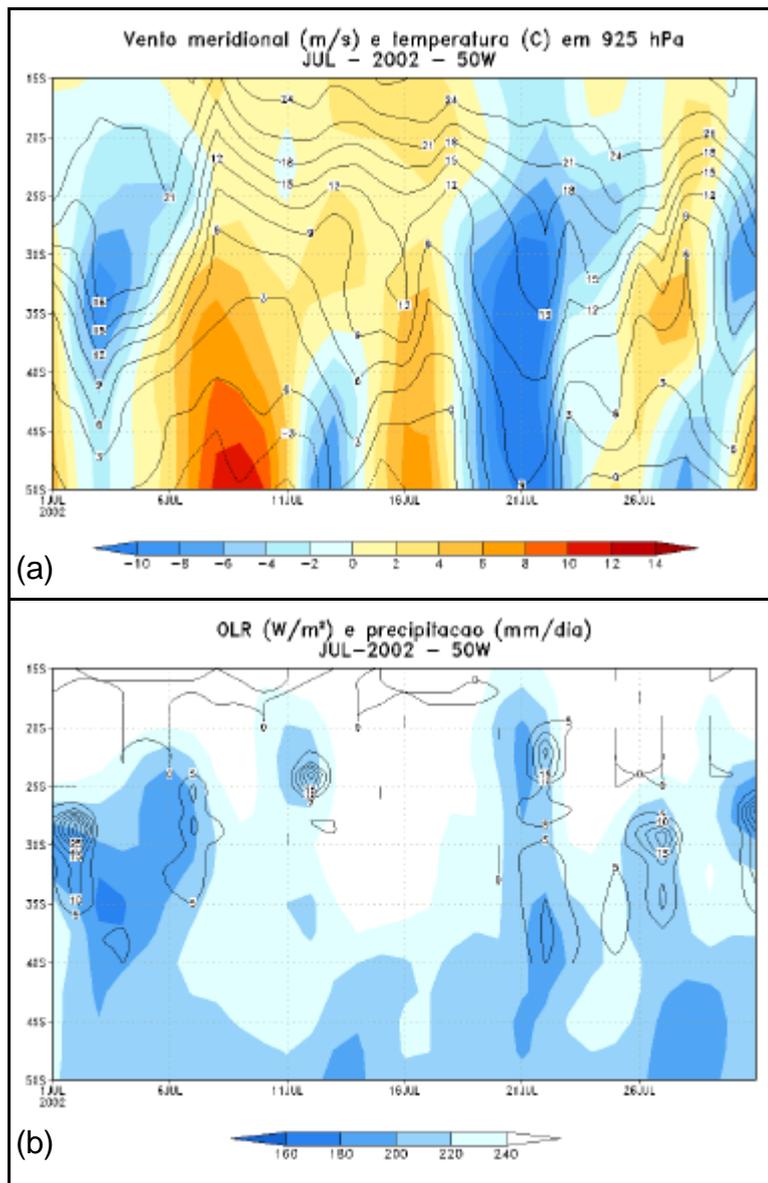


FIGURA 3.5 - Diagrama Hovmoller para julho de 2002: (a) vento meridional (m/s) (sombreado) e temperatura (°C) em 925 hPa (isolinha) para 50°W; (b) OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) e precipitação (mm/dia) (isolinha) em 50°W.

A partir do método descrito, os sistemas frontais foram identificados em cada área, assim como as passagens pelas várias áreas e em cada estação do ano. Os sistemas também foram classificados em vários grupos, baseados na sua

identificação no sul da América do Sul, e da posição alcançada sobre a América do Sul, como especificado a seguir: SAS e oceano (os sistemas que não se deslocaram sobre o Brasil, indo para o oceano); sul (os sistemas que se deslocaram até o sul (área 4)); SE (sistemas que se deslocaram até o sudeste do Brasil, pelo litoral (área 6)), SE e CO (sistemas que se deslocaram até o SE, atingindo também o centro-oeste (áreas 6, 7,8)); SE, CO e SBA (sistemas que atingiram o sul da Bahia e afetaram o sudeste e centro-oeste do Brasil); SBA (sistemas que atingiram o sul da Bahia, se deslocando pelo litoral). As imagens de satélite (Figura 3.6) ilustram a posição dos sistemas frontais dos grupos citados.

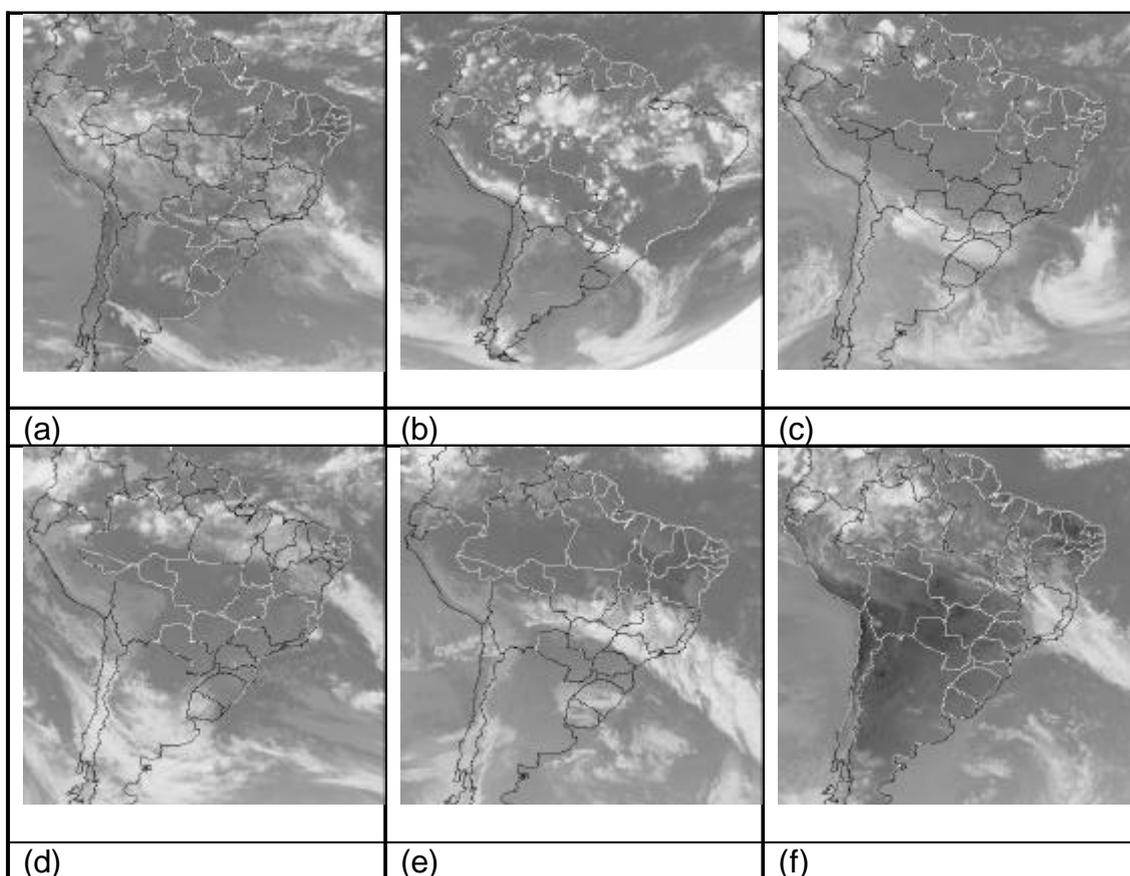


FIGURA 3.6 - Exemplos de imagens do satélite GOES para os grupos: (a) SAS oceano; (b) Rota 1/Sul; (c) Rota 1/SE; (d) Rota 1/SBA; (e) Rota 2/SE e CO e (f) Rota 2/SE, CO e SBA.

### 3.2.2 – Compostos e Campos Analisados

Com o fim de analisar as características atmosféricas associadas ao comportamento de cada grupo, foram feitas médias dos dias identificados de vários campos para a formação de compostos.

Os campos analisados neste trabalho foram divididos em 4 níveis da atmosfera, superfície, baixos, médios e altos níveis. As variáveis usadas para representar cada nível foram: PNM e anomalia de OLR, escoamento e advecção de temperatura em 925 hPa, escoamento e advecção de vorticidade em 500 hPa, geopotencial e anomalia zonal do geopotencial em 200 hPa e escoamento e magnitude do vento em 200 hPa. Os dias considerados para análise foram: dia inicial, quando o sistema frontal foi identificado na Argentina, dia inicial+1 (dia seguinte ao dia da identificação) e dia do evento (dia em que o sistema frontal chega na área especificada).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1-Climatologia

##### 4.1.1- Média Mensal

De acordo com a metodologia descrita no item 3.2.1, considerando queda de temperatura em 925 hPa, aumento da PNM, componente meridional do vento positiva em 925 hPa e confirmação e verificação através de análises adicionais com diagramas de Hovmoller e séries temporais obteve-se o número de sistemas frontais para cada mês no período entre 1980 e 2002 para as áreas selecionadas na Figura 3.1.

Cada área especificada corresponde aos seguintes intervalos de latitude e longitude: área 1: 43-38°S, 65-60°W; área 2: 38-33°S, 62-57°W; área 3: 35-30°S, 57-52°W; área 4: 30-25°S, 53-48°W; área 5: 30-25°S, 58-53°W; área 6: 25-20°S, 48-43°W; área 7: 25-20°S, 53-48°W; área 8: 25-20°S, 58-53°W; área 9: 20-15°S, 43-38°W; área 10: 20-15°S, 57-52°W; área 11: 20-15°S, 62-57°W. São mostradas na Tabela 4.1 as médias mensais do número de sistemas frontais para cada área em estudo, onde os valores foram aproximados para números inteiros.

TABELA 4.1 - Média mensal de sistemas frontais para as áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Área 1	7	6	6	6	7	7	7	7	6	6	7	7
Área 2	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	5
Área 3	5	4	5	5	6	5	6	5	6	6	5	6
Área 4	4	3	4	5	5	5	5	4	5	5	5	5
Área 5	3	3	3	4	4	4	5	4	5	5	5	4
Área 6	4	3	5	5	5	5	5	4	5	6	5	5
Área 7	2	3	3	4	4	4	4	4	5	5	4	3
Área 8	1	2	3	3	4	4	4	3	4	4	3	3
Área 9	1	1	2	3	3	3	4	3	3	3	2	2
Área 10	1	3	3	4	4	4	4	4	5	4	3	2
Área 11	2	2	3	3	4	3	4	3	4	3	3	2

A partir dos dados da tabela pode-se notar a diminuição do número de sistemas para latitudes mais baixas, resultado também observado por Oliveira (1986).

Para a área 1 (posicionada mais ao sul da América do Sul) não há uma variação significativa durante os meses do ano, ou seja, os sistemas atingem essa região durante todo o ano, e, o número médio mensal é de 7 sistemas frontais.

Na área 2 o máximo se dá entre maio a novembro (6). Nos meses de verão o número médio é de 5 frentes, e a média arredondada ao longo do ano é de 5 sistemas frontais por mês.

Para a área 3, que abrange o Uruguai e o extremo sul do RS, a média durante o ano também é de 5 sistemas por mês.

Na área 4, os meses de janeiro, fevereiro, março e agosto são os que apresentam menor número de frentes, enquanto nos demais meses do ano aproximadamente 5 sistemas atingem essa área.

Para as áreas 5, 7, 8, 10 e 11 posicionadas pelo interior, nota-se que nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro há menos frentes, ou seja, no verão os sistemas não conseguem penetrar pelo interior com tanta frequência. Na área 6, que compreende parte da Região Sudeste, o máximo se dá no mês de outubro (6), o mínimo ocorre em janeiro e fevereiro, e a média é de 5 sistemas frontais por mês durante o ano.

As áreas com menor número de sistemas estão localizadas mais ao norte tanto no interior (área 11) quanto no litoral (área 9), com uma média de 3 sistemas por mês e mínimo (2 sistemas) em dezembro, janeiro e fevereiro na área 11 e 1 na área 9 em janeiro e fevereiro.

#### 4.1.2- Comparação com os Dados do Boletim Climanálise

A Figura 4.2 mostra a comparação do número de sistemas encontrados neste estudo e a frequência de sistemas obtidos a partir da revista Climanálise, publicada mensalmente pelo CPTEC/INPE para o período de 1992-2002. Nessa publicação a contagem dos sistemas frontais é feita a partir de imagens de satélite, cartas sinóticas e análise das 12 GMT. Nesta comparação estão contabilizados os sistemas que tiveram seu deslocamento pelo litoral do Brasil como mostrado na Figura 4.1.

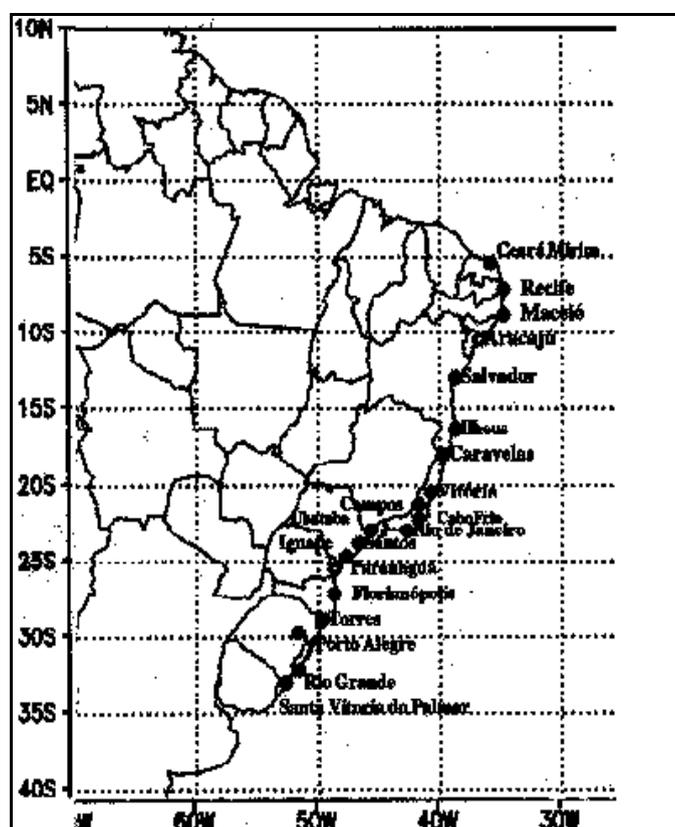


FIGURA 4.1 - Mapa com a localização das cidades litorâneas.

FONTE: Climanálise.

Esta comparação foi dividida em três bandas latitudinais de acordo com a divisão feita mensalmente na revista Climanálise. A banda (A) 35°/25°S está

entre as cidades de Santa Vitória do Palmar-RS e Iguape-SP a banda (B) de 25°/20°S de Iguape-SP até Vitória-ES e a região ao norte de 20°S desde Vitória-ES até Ceará Mirim-RN correspondente à banda (C). Nos casos da revista Climanálise os sistemas são detectados pontualmente para cada cidade especificada na Figura 4.1, enquanto no método objetivo são detectados em áreas específicas com grade 2,5°x2,5°. Portanto, foi necessário dividir as bandas A, B e C de acordo com as áreas descritas na Figura 3.1. Para a banda A foi usada a média das áreas 3 e 4 (Figura 3.1), para a banda B a área 6 e na banda C a média mensal de sistemas frontais foi comparada com a área 9.

Nota-se através da Figura 4.2 a -b que principalmente para as bandas localizadas ao sul de 20°S, ou seja, que compreende as Regiões Sul e Sudeste as duas análises apresentam resultados semelhantes. No mês de dezembro é encontrada a maior diferença entre os dois métodos que estão sendo comparados, aproximadamente dois sistemas na banda A e 1 sistema na banda B. Para a banda cujas frentes atingem regiões ao norte de 20°S o método usado neste estudo apresenta um número maior, principalmente nos meses de junho e julho, onde a diferença é de aproximadamente dois sistemas frontais.

Na climatologia de 1987-1996 feita por Lemos e Calbete (1996) quando comparado com Oliveira (1986) também foram encontradas algumas diferenças no número de sistemas frontais e isto se deve à metodologia aplicada em cada estudo. Neste caso as diferenças também se devem ao método usado para a contagem e detecção dos sistemas. Na climanálise além das imagens de satélites também são utilizadas as análises e cartas sinóticas das 12 GMT, enquanto neste estudo é aplicado um método objetivo citado no Capítulo 3 utilizando dados diários em uma grade de 2,5° x 2,5°.

Como resultado dessas comparações, nota-se que as análises através do método objetivo apresentaram consistência com aquelas realizadas mensalmente no boletim Climanálise.

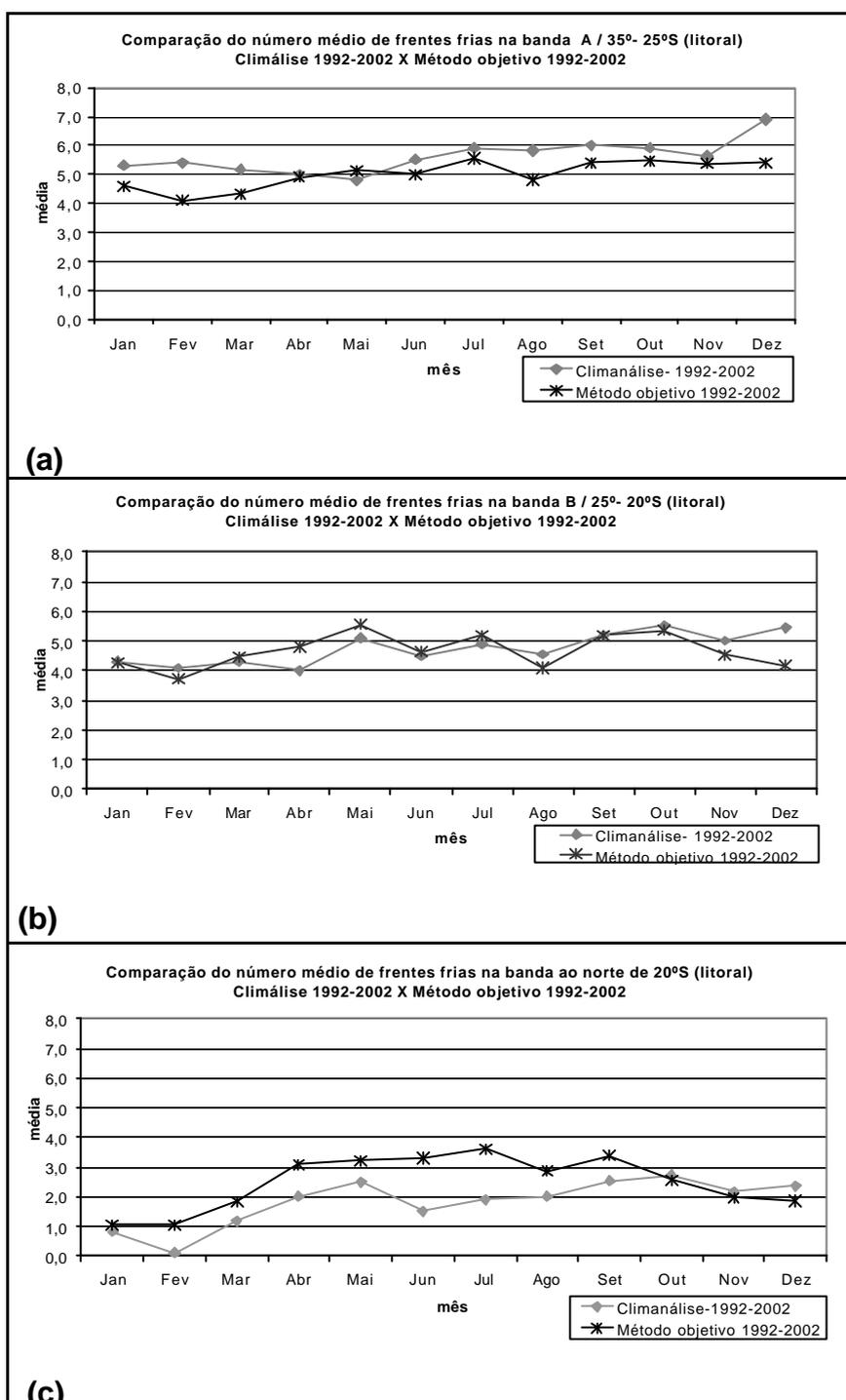


FIGURA 4.2- Comparação do número de sistemas frontais entre a Climatologia pelo método objetivo e Climanalise no período de 1992-2002 para: (a) banda (A) 35°/25S; b) banda (B) 25°/20°S e (c) banda (C) ao norte de 20°S.

#### 4.1.3 - Média Sazonal

Com o intuito de verificar a variação sazonal são mostradas na Figura 4.3 a frequência de sistemas frontais, no período de 1980 a 2002, para as áreas especificadas na Figura 3.1, para o verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON). Nota-se através deste gráfico que há uma diminuição de sistemas à medida que se consideram as áreas de sul para norte (área 1 para área 11). Analisando cada área em particular observamos que para as áreas 1, 2, 9 e 10 é no inverno que ocorrem mais sistemas frontais. Isso indica que no inverno mais sistemas atingem latitudes mais baixas e longitudes mais a oeste do que em outras estações do ano. É nessa época do ano que há um maior contraste térmico separando as massas de ar e estas chegam a atingir a Região central do país e algumas vezes chegando até o sul da Região Norte, caracterizando o fenômeno conhecido como “friagem” (Fortune e Kousky, 1983; Marengo et al., 1997, Seluchi et. al., 1998).

Os resultados obtidos para a área 9, que compreende o sul da Bahia, são coerentes com os resultados encontrados por Kousky (1979) e Oliveira (1986). Kousky (1979) observou maior frequência de frentes frias que atingem o sul da Bahia nos meses que correspondem ao outono, inverno e primavera. Naquele estudo, através da análise de 10 anos de dados (1961-1970) foi observado no verão um número menor de passagem de sistemas frontais no sul da Bahia. No entanto, observou-se naquele estudo que tais sistemas ou seus remanescentes, bem como a permanência da ZCAS tem papel significativo na precipitação nos meses de verão nessa região.

Nas áreas 3, 4, 5, 6 e 7 a maior frequência de sistemas frontais se dá na primavera, ou seja, mais sistemas atingem as Regiões Sul e Sudeste nesta estação do ano. Oliveira (1986) encontrou um máximo na primavera, com o maior número de sistemas frontais em outubro, na banda latitudinal entre 25°-20°S que corresponde à área 6. Naquele estudo também foi observado um grande número de ciclogênese sobre o continente, principalmente na

primavera. Gan (1992) encontrou um máximo secundário de ciclôgenese em outubro (105 casos) sobre a região 90°-30°W – 15°-50°S.

Exceto na área 1, o verão é a estação do ano que apresenta o menor número de sistemas frontais. Vale ressaltar que para os meses de verão além do critério usado que consiste em aumento da PNM, queda de temperatura e mudança na direção do vento meridional foram considerados dados de precipitação e os diagramas de Hovmoller para seguir o deslocamento das frentes, conforme descrito no Capítulo 3, pois nessa estação a pouca variação de pressão e temperatura em latitudes baixas pode não refletir a ocorrência da zona frontal.

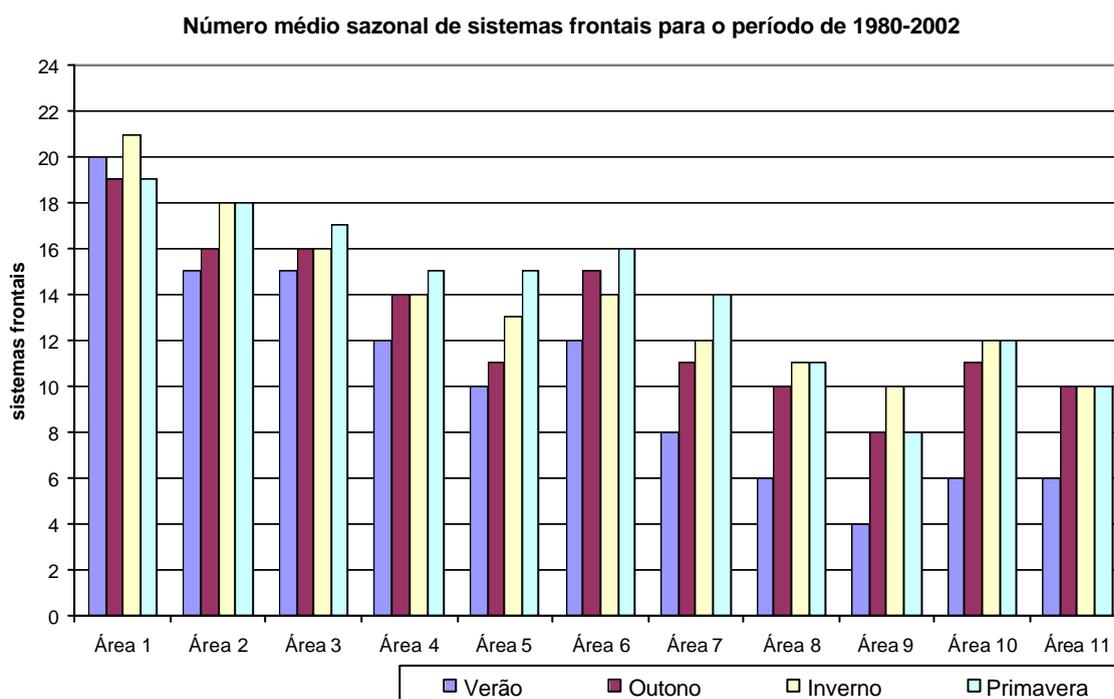


FIGURA 4.3 - Gráfico da média sazonal de sistemas frontais para o período de 1980-2002 para as áreas selecionadas.

A Figura 4.4 mostra o número de sistemas frontais de acordo com o deslocamento, ou seja, foram contabilizados os sistemas que chegaram até a

área especificada e tiveram posteriormente um deslocamento para o oceano. Nos grupos dos sistemas classificados nas categorias SAS e oceano, Sul, SE e ao chegar nessas regiões tiveram seu deslocamento para o oceano, a frequência foi maior no verão, ou seja, é nessa estação que as frentes não conseguem atingir latitudes mais baixas, restringindo sua ação sobre as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. No entanto, no verão há atuação da ZCAS que se caracteriza como uma banda de nebulosidade orientada no sentido NW-SE, cuja área de atuação engloba o centro-sul da Amazônia, Regiões Sudeste e Centro-Oeste e prolonga-se até o Oceano Atlântico. Devido à sua persistência a ZCAS exerce um papel fundamental no regime de chuvas nessas áreas. Há uma variabilidade nessa posição média, e quando a ZCAS está deslocada para norte, atinge o estado da Bahia causando anomalias de precipitação no sul do Nordeste (Chaves e Cavalcanti, 2001). Embora o número de sistemas que chegam a latitudes mais ao norte seja menor, nota-se que aqueles que chegam até o Sudeste ou mesmo ao sul da BA acabam sendo responsáveis por parte da precipitação nessas áreas e também pela manutenção da ZCAS. O menor número de sistemas frontais que atingem latitudes mais baixas no verão pode ser devido à ocorrência da ZCAS que, persistente sobre as Regiões Sudeste e Centro-Oeste, faz com que as frentes se desloquem apenas até essas áreas.

Nota-se que o inverno é a estação do ano em que há um maior número de frentes que passam por todas as áreas especificadas (Rota 2/SE, CO e SBA). Nas estações de transição, primavera e outono, o comportamento em relação ao deslocamento dos sistemas é muito similar, exceto para o grupo do SE e SBA. No grupo do SE, na primavera há mais sistemas que foram para o oceano que no outono, e, para o SBA a situação é contrária. Como não foram contabilizados os sistemas que passaram de 15°S, nos grupos Rota 1/SBA e Rota 2/SE, CO e SBA são considerados tanto os sistemas que tiveram o seu deslocamento para o oceano quanto aqueles que se deslocaram para latitudes ao norte de 15°S.

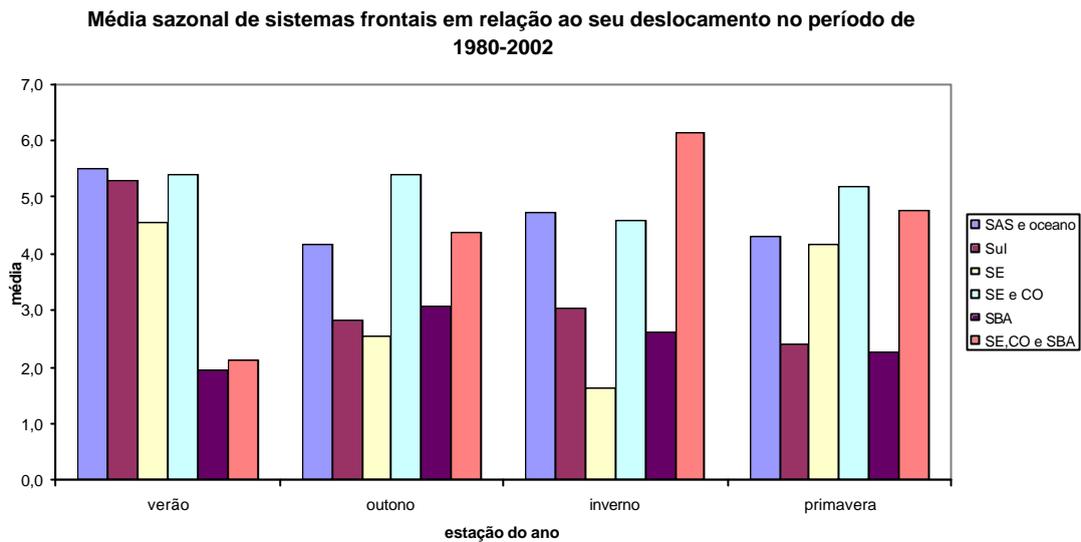


FIGURA 4.4 - Gráfico da média sazonal de sistemas frontais no período entre 1980-2002 quanto ao deslocamento: Rota 1/SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/Sudeste, Rota 2/SE e CO, Rota 1/SBA, Rota 2/SE, CO e SBA.

#### 4.1.4 – Variabilidade Interanual

Em relação à variabilidade interanual dos sistemas frontais foram escolhidas três áreas para análise, uma sobre o sul do Brasil (área 3), outra no Sudeste (área 6) e a última no interior do país (área 11). Nota-se através dos gráficos 4.5 a-c a frequência anual de sistemas frontais no período entre 1980-2002. Na área 3 (gráfico 4.5 a) observa-se que em grande parte do período o número de frentes frias na região variou entre 60 e 70 por ano, com valor máximo de 80 em 1984 e mínimo de 51 em 2001. Na área 6, em 82% do período a frequência de sistemas frontais é de 50 a 60. No ano de 1999 foi observado o maior valor e em 2001 o menor. Para área localizada mais a oeste do Brasil (área 11), foi notada que em 56% do período a frequência de frentes variou entre 35 e 45. No entanto, a maior quantidade de sistemas frontais ocorreu em 1982 e menos frentes atingiram essa área em 1980. Não foi observado um padrão para um número máximo ou mínimo de sistemas frontais que atingem as regiões especificadas em eventos de El Niño e La Niña. No entanto,

observa-se que para a área 3, o máximo ocorre em 1984, ano em que inicia-se o fenômeno La Niña. Para a área 6 o máximo de sistemas frontais também ocorre em um ano de La Niña (1999). Já para a área 11 mais frentes frias chegaram a essa área em um ano em que o fenômeno El Niño estava ativo (1982).

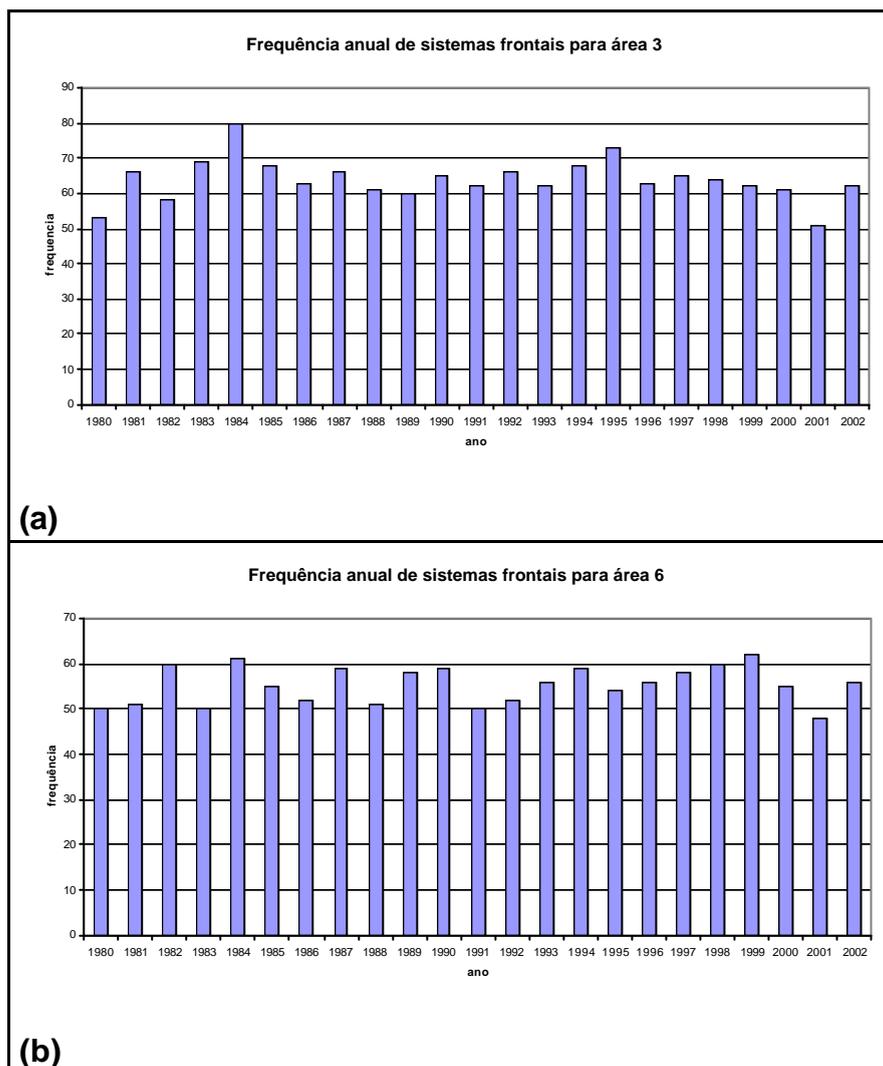


FIGURA 4.5 - Frequência anual de sistemas frontais: a) área3, b) área 6 e c) área 11 para o período de 1980-2002.

(continua)

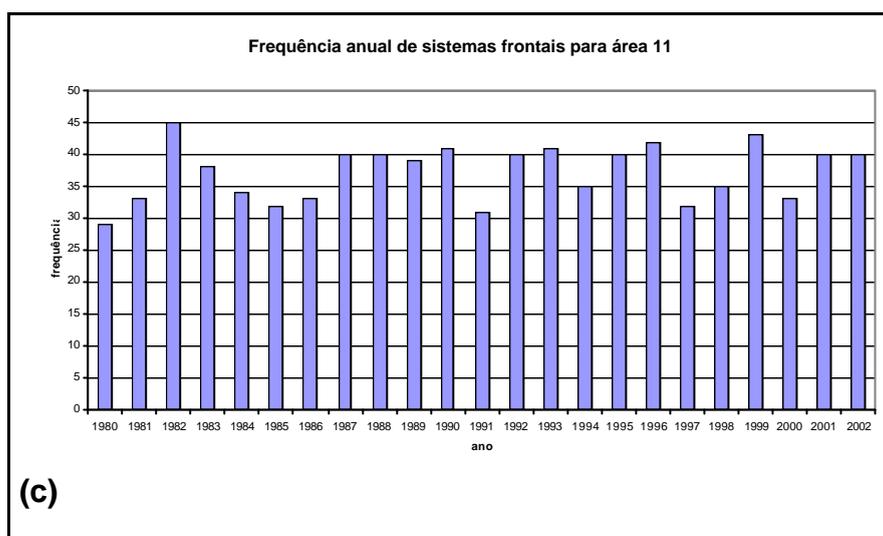


FIGURA 4.5 - Conclusão.

Em relação ao evento de El Niño e La Niña foi feita uma análise em duas áreas específicas correspondentes ao Sul (área 3, 35°-30°S) e Sudeste (área 6, 25°-20°S). Foram escolhidos dois períodos de acordo com a Tabela 4.2 com ocorrência de El Niño e La Niña com intensidade entre forte e moderada.

TABELA 4.2 - Lista dos meses de ocorrência dos eventos El Niño e La Niña no período entre 1979 e 2001.

<b>El Niño</b>		<b>La Niña</b>	
Início	Fim	Início	Fim
Out, 1979	Abr, 1980	Set, 1984	Jun, 1985
Abr, 1982	Jul, 1983	Mai, 1988	Jun, 1989
Ago, 1986	Fev, 1988	Set, 1995	Mar, 1996
Mar, 1991	Jul, 1992	Jul, 1998	Jun, 2000
Feb, 1993	Set, 1993	Dec, 2000	Mai, 2001
Jun, 1994	Mar, 1995		
Abr, 1997	Abr, 1998		

FONTE: Trenberth (1997).

Observa-se através da Tabela 4.3 que para o El Niño de 82/83 para as duas áreas analisadas o segundo semestre (Jul-Dez) apresentou um número ligeiramente maior de sistemas frontais que no primeiro semestre (Jan-Jun), no

entanto não há uma diferença tão significativa no número de frentes frias. Para o evento que ocorreu em 97/98 a maior freqüência ocorre nos meses de setembro e novembro para área 3 e em setembro e outubro para área 6.

Os dois eventos de La Niña estudados 88/89 e 98/99 mostram um pouco mais de sistemas frontais no primeiro semestre que no segundo para as duas áreas, 3 e 6 (Tabela 4.3). Fedorova e Carvalho (2000) analisando casos de sistemas frontais na faixa latitudinal de 20 a 40°S no ano de El Niño (julho de 1997 até março de 1998) e La Niña (julho de 1998 até março de 1999) encontram maior freqüência de frentes frias no segundo semestre para El Niño e nos meses de janeiro, fevereiro e março para o ano de La Niña, uma vez que naquele estudo não são considerados os meses entre abril e junho. Levando em consideração que no estudo feito por Fedorova e Carvalho a área de abrangência é de 20 a 40°S os resultados encontrados estão coerentes com este trabalho.

TABELA 4.3 – Freqüência mensal de sistemas frontais em anos de ocorrência de El Niño e La Niña para (a) área 3 e (b) área 6. Células com # significam que nesses meses ambos os fenômenos não estavam ativos.

Anos com ocorrência de El Niño					Anos com ocorrência de El Niño				
área 3	82	83	97	98	área 6	82	83	97	98
jan	#	4	#	6	jan	#	2	#	4
fev	#	3	#	6	fev	#	2	#	6
mar	#	4	#	6	mar	#	4	#	6
abr	4	5	6	5	abr	4	5	2	4
mai	5	8	6	#	mai	3	5	6	#
jun	4	5	4	#	jun	4	6	6	#
jul	5	6	6	#	jul	4	5	5	#
ago	5	#	5	#	ago	5	#	4	#
set	5	#	8	#	set	5	#	7	#
out	7	#	4	#	out	8	#	7	#
nov	6	#	7	#	nov	6	#	5	#
dez	4	#	6	#	dez	4	#	4	#

Média	82/83	97/98
1º sem	4,7	5,7
2º sem	5,4	6

Anos com ocorrência de La Niña					Anos com ocorrência de La Niña				
área 3	88	89	98	99	área 6	88	89	98	99
jan	#	4	#	5	jan	#	3	#	5
fev	#	5	#	7	fev	#	3	#	6
mar	#	6	#	5	mar	#	5	#	3
abr	#	4	#	5	abr	#	5	#	6
mai	7	4	#	5	mai	5	6	#	7
jun	4	6	#	6	jun	4	4	#	6
jul	4	#	5	6	jul	2	#	6	6
ago	6	#	7	4	ago	3	#	4	3
set	6	#	5	7	set	3	#	6	6
out	5	#	5	5	out	5	#	6	5
nov	5	#	4	5	nov	5	#	6	4
dez	3	#	5	6	dez	5	#	3	5

Média	88/89	98/99
1º sem	5	5,5
2º sem	4,8	5,3

Média	88/89	98/99
1º sem	4,4	5,5
2º sem	3,8	5

(a)	(b)
-----	-----

## 4.2 - Análise dos Compostos para o Inverno

Compostos dos diversos grupos foram realizados para identificar as características dominantes dos mesmos. Nessas análises são mostrados os campos correspondentes ao dia inicial (dia em que o sistema foi identificado na posição ao sul do Brasil), dia +1 (dia posterior ao dia de identificação) e dia do evento (dia em que o sistema foi identificado em cada área) para os 6 grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/SE, Rota 2/SE e CO, Rota 2/SE, CO e SBA e Rota 1/SBA. As análises foram feitas em campos de pressão e anomalias de OLR, escoamento e advecção de temperatura em 925 hPa, escoamento e advecção de vorticidade em 500 hPa, geopotencial e anomalia zonal de geopotencial em 200 hPa e escoamento e magnitude do vento em 200 hPa. As discussões se referem a características associadas a um sistema frontal, embora os campos ilustrem a média de vários sistemas. Inicialmente são apresentadas as características de cada grupo e após uma discussão sobre o comportamento dos sistemas.

### 4.2.1 – Grupo SAS e Oceano

No grupo SAS e oceano (Figura 4.6 a-c) nota-se que a atividade convectiva associada ao sistema de baixa pressão está mais intensa no dia inicial, desintensificando-se no dia do evento à medida que a baixa pressão se desloca para leste. Nota-se também uma intensificação da anomalia positiva de OLR ao norte do sistema, o que representa subsidência nessa área como pode ser visto na Figura 4.9 a. Observa-se no dia inicial que a região onde há movimento ascendente é no norte da Argentina e sul do Uruguai, acima da região de baixa pressão em superfície.

No escoamento em baixos níveis observa-se no dia inicial o cavado associado ao sistema frontal sobre o nordeste da Argentina e no dia do evento deslocado para leste com a frente fria chegando a atingir a fronteira com o Uruguai (4.7 a,b,c). Pode-se observar que a confluência dos ventos está bem definida, indicando que o composto está representando bem a posição dos sistemas.

Nota-se também a advecção de ar frio atrás do sistema frontal e de ar quente na frente, sobre o oceano Atlântico.

Em 500 hPa (Figura 4.8 a-c) observa-se o domínio de uma circulação anticiclônica sobre o centro-norte do Brasil. Nos três dias analisados nota-se o domínio de crista e advecção de vorticidade positiva a leste da Região Sul e advecção de vorticidade negativa acompanhando o sistema frontal no norte da Argentina.

Em altos níveis observa-se o jato acompanhando a frente e se intensificando no dia do evento sobre o oceano. O campo de anomalia de geopotencial ressalta a crista sobre o sul e sudeste da América do Sul e um cavado sobre o extremo sul da América do Sul que se desloca para leste e se intensifica sobre o Atlântico Sul (Figuras 4.10 e 4.11 a-c).

#### 4.2.2 – Grupo Rota 1/ Sul

Para os sistemas que chegam até a Região Sul e posteriormente vão para o oceano nota-se, através da Figura 4.6 d-f, que a baixa pressão e a convecção associadas ao sistema frontal estão mais intensas no dia inicial quando comparadas aos casos SAS e oceano. Neste caso notam-se anomalias positivas de OLR no dia inicial em latitudes mais baixas que no caso anterior, a qual enfraquece nos dias posteriores. Observa-se anomalia de OLR positiva estendendo-se desde o Acre até o Atlântico Sul. À medida que o sistema avança, a anomalia positiva de OLR desintensifica-se e a anomalia negativa de OLR associada ao sistema que encontra-se mais ao sul sem atingir o continente brasileiro no dia inicial e dia inicial +1, atinge a Região Sul no dia do evento (Figura 4.6 e-h). As anomalias positivas de OLR observadas nesses dois grupos (SAS e oceano e Rota1/Sul) podem estar associadas à subsidência na faixa central do país que impede que as frentes possam chegar a latitudes mais baixas. No entanto, no dia inicial pode-se observar através de omega em 500 hPa (Figura 4.9 b) que neste último grupo há movimento vertical ascendente numa área que abrange parte da Argentina e também o Rio

Grande do Sul, o qual pode favorecer o avanço do sistema frontal para o Sul do Brasil.

No escoamento em baixos níveis (Figura 4.7 d-f) nota-se um cavado mais pronunciado a leste dos Andes e sobre o extremo sul do continente no dia inicial (Figura 4.7 e). O cavado desloca-se para leste, e, no dia do evento a frente está no Paraná com advecção de ar mais frio a leste do Rio Grande do Sul (Figura 4.7 h).

Tanto em médios quanto em altos níveis nota-se que a advecção de vortacidade positiva e o domínio de uma crista representada pela anomalia positiva de geopotencial, dão suporte para que a frente não consiga avançar além da Região Sul (Figuras 4.8 e 4.10 d-f). Em relação ao geopotencial e anomalia em 200 hPa, comparando os grupos Rota 1/Sul e SAS e oceano nota-se que essa anomalia zonal positiva no Sul do Brasil é mais forte para os casos das frentes que não atingem o continente brasileiro no dia do evento. Embora no dia inicial exista uma crista com a mesma intensidade nos dois grupos, há anomalia negativa mais forte no sul da América do Sul no grupo Rota 1/Sul que pode ser um possível indicador do avanço do sistema. Em altos níveis também nota-se que o jato está mais intenso (Figura 4.11 d-f) desde o dia inicial, e em latitudes mais baixas, comparado ao grupo 1 (SAS e oceano). Além disso, nota-se o deslocamento do cavado acompanhando o deslocamento da frente, o que propicia também o avanço dos sistemas.

#### 4.2.3 – Grupo Rota 1/Sudeste

No grupo dos sistemas que chegam ao Sudeste do Brasil pelo litoral (Rota 1/SE) observa-se que a região de baixa pressão associada ao sistema frontal desloca-se para leste sobre o oceano na seqüência do período analisado. No entanto, o cavado em baixos níveis estende-se até o RS (dia inicial +1) avançando para o Estado de São Paulo (dia do evento) (Figura 4.6 g-i). Neste grupo não é notado um centro de alta pressão na retaguarda da frente. No entanto, verifica-se que a alta pressão no Pacífico Sul encontra-se mais intensa

nos dias inicial e inicial+1, quando comparada ao grupo anterior. Nota-se que a área com anomalia positiva de OLR é menos intensa que nos dois grupos anteriores e sobre parte do Rio Grande do Sul há anomalia negativa de OLR, consistente com a Figura 4.9 c, onde se observa o movimento vertical associado subsidente e ascendente, respectivamente.

Em baixos níveis, Figura 4.7 g-i, observa-se o posicionamento da frente fria pela confluência dos ventos. No grupo Rota 1/SE nota-se um rápido avanço do sistema. No dia inicial ambos os grupos Rota 1/Sul e Rota 1/SE, têm a confluência do vento sobre o norte da Argentina. No dia inicial+1, no primeiro grupo a frente está no sul do Rio Grande do Sul, enquanto para os casos dos sistemas que chegam até o Sudeste a frente encontra-se próximo à Santa Catarina, indicando um rápido avanço dos sistemas de um dia para o outro.

Em 500 hPa, no dia inicial nota-se que há advecção de vorticidade negativa sobre parte do Sul, São Paulo e Mato Grosso do Sul, característica não observada nos dois grupos citados anteriormente (Figura 4.8). No dia seguinte e no dia do evento a advecção de vorticidade negativa torna-se mais intensa, favorecendo o desenvolvimento da pressão mais baixa em superfície (Figura 4.6 g-i). Ainda em níveis médios, nota-se no campo do movimento vertical que no dia inicial a região com ar ascendente se estende do norte da Argentina até o Estado do Paraná, posição bem mais ao norte do que a notada nos dois grupos analisados anteriormente (SAS e oceano e Rota 1/Sul).

Em altos níveis, Figura 4.10, a diferença com relação aos outros dois grupos é que a anomalia positiva de geopotencial ao norte do sistema frontal está deslocada para o oceano, e não é tão intensa no dia inicial e dia inicial+1 quanto nos grupos SAS e oceano e Rota 1/Sul. Embora o cavado associado à frente fria não esteja tão intenso nesse grupo do Sudeste, o posicionamento mais para leste e o domínio de uma região de crista não impede com que o sistema frontal em superfície desloque-se para latitudes mais baixas que os dois grupos citados anteriormente. Ainda em altos níveis (Figura 4.11 g-i)

observa-se que o jato posiciona-se mais ao norte e o cavado associado à frente fria ligeiramente mais intenso quando comparado aos dois primeiros grupos. Isto propicia o avanço do sistema frontal para o Sudeste, uma vez que essa corrente de ar mais intensa em altos níveis não impede o avanço da frente fria.

#### 4.2.4 – Grupo Rota 2/ Sudeste e Centro-Oeste

Em relação aos sistemas que chegam ao Sudeste e Centro-Oeste (Rota 2/SE e CO) observa-se através da Figura 4.12 a-c, o cavado associado à frente fria mais amplificado que no grupo anterior (Rota 1/SE). Uma outra diferença desta configuração em relação ao grupo Rota 1/SE é que no dia inicial+1 observa-se que a alta sobre o Pacífico Sul encontra-se mais intensa (Figura 4.12 b). No dia do evento nota-se a alta pós-frontal centrada sobre a Argentina e a anomalia negativa de OLR se estendendo do Atlântico Sul até o oeste da Região Norte. Observa-se no dia inicial sobre parte da Região Sul do Brasil anomalia negativa de OLR associada ao movimento ascendente nessa região e também no sul de Mato Grosso do Sul (Figura 4.15 a).

Na Figura 4.12 a-c, observa-se que com o passar dos dias a alta do Pacífico Sul adentra pelo oeste da América do Sul e o cavado no Atlântico Sul associado ao sistema frontal se amplifica. No dia do evento nota-se que a alta tem dois centros de máxima pressão, um sobre o Pacífico e outro sobre o continente e a frente chega a atingir o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Tal configuração é parecida com a apresentada por Garreaud (2000). Naquele estudo foram mostrados características e padrões da atmosfera para casos de incursões de ar frio. Ainda em baixos níveis, nota-se pelo escoamento em 925 hPa que no dia do evento o vento de sul chega a atingir o MT e sul de RO (Figura 4.13 a-c). Estes casos podem estar relacionados a incursões de ar frio nas latitudes mais baixas.

Observa-se também que em níveis médios, Figura 4.14 a-c, há uma forte advecção de vorticidade anticiclônica a leste dos Andes entre 30°-40°S,

responsável pela intensificação da alta em superfície. A circulação de grande escala em níveis médios é caracterizados por uma onda longa de latitudes médias, com uma crista a oeste dos Andes e um cavado sobre o leste da América do Sul, consistente com Fortune e Kousky, 1983 e Garreaud, 2000. Consistente com a análise anterior, esses casos parecem estar associados à incursão de ar frio no centro-sul do Brasil.

Em altos níveis (Figura 4.16 a-c), a região com anomalia positiva de geopotencial encontra-se, neste grupo, sobre o oceano Atlântico a leste da Região Sul do Brasil e esta já não é tão intensa quanto nos casos do grupo Rota 1/SE. A corrente de jato associada ao sistema frontal se intensifica no dia do evento e atinge a Região Sul, São Paulo e Mato Grosso do Sul. No entanto, no dia inicial e dia inicial +1 o jato está menos intenso do que no grupo dos sistemas que chegam ao Sudeste com trajetória apenas litorânea.

#### 4.2.5 – Grupo Rota 2/ Sudeste, Centro-Oeste e sul da Bahia

No grupo Rota 2/SE, CO e SBA, Figura 4.12 d-f, observa-se que no dia inicial a configuração do campo de PNM apresenta a alta sobre o Atlântico Sul mais para oeste e o cavado associado à frente fria mais amplificado que no grupo Rota 2/SE e CO. Ainda em baixos níveis também pode-se perceber o escoamento de sul atingindo parte do Centro-Oeste e sul da região Amazônica, no dia do evento (Figura 4.13 d-f). Em relação à incursão de ar frio, este grupo também apresenta algumas características comparadas aos resultados de Garreaud (2000) que evidenciam a entrada e atuação de ar frio no centro-sul da América do Sul.

No campo de anomalia de geopotencial no dia inicial (Figura 4.16 d) nota-se que a área sob o domínio de uma crista, a qual nos grupos anteriores (SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/SE) posicionava-se sobre o sul do Brasil, está sobre o oceano e menos intensa. No entanto, a anomalia positiva de geopotencial sobre o Pacífico encontra-se mais próxima da costa do Chile no dia inicial. No decorrer do período analisado esta anomalia positiva desloca-se

para leste e se intensifica (Figura 4.16 d-f), transferindo energia para que o cavado associado à frente amplifique-se e atinja latitudes mais baixas.

#### 4.2.6 – Grupo Rota 1/Sul da Bahia

O último grupo analisado é aquele referente aos sistemas que chegam até o sul da BA seguindo pelo litoral. Neste grupo nota-se que a banda de nebulosidade associada ao sistema frontal (anomalia negativa de OLR) se desloca sobre o oceano (Figura 4.12 g-i). Nota-se que há, sobre o centro-sul do Brasil, anomalia positiva de OLR associada à subsidência nessas áreas, como pode ser verificado na Figura 4.15 c. Observa-se também que no dia do evento a frente se encontra sobre o oceano e a alta pressão pós-frontal atinge uma posição mais ao norte e a leste quando comparada aos outros casos, centrada em aproximadamente 30°S e 40°W.

#### 4.2.7 – Discussão Comparativa

Neste tópico são feitas as discussões em termos das características e comportamento de um sistema frontal, embora todas as análises tenham sido realizadas através dos compostos.

Em síntese, em relação à PNM e anomalia de OLR (Figuras 4.6 e 4.12), ao comparar o dia inicial de todos os grupos nota-se no grupo das frentes que vão para o oceano que a pressão sobre o Sul e Sudeste está mais alta, isóbaras de 1016 hPa passam pelo centro do continente enquanto nos outros grupos as isóbaras são de 1014 hPa. Observa-se no dia inicial anomalia positiva de OLR sobre o Brasil central nos grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/SE e Rota 1/SBA (Figura 4.6 a,d,g), consistente com movimento subsidente nessas áreas. Nota-se que a região de anomalia positiva de OLR diminui no grupo dos sistemas que chegam até o Sudeste, ou seja, quando observa-se no dia inicial menos subsidência sobre o centro-sul do Brasil as frentes podem deslocar-se até a Região Sudeste. Nos grupos das frentes que seguem pelo interior não há anomalias positivas de OLR no dia inicial sobre o continente e a banda de

nebulosidade está em latitudes mais baixas do que os outros grupos. Isto é consistente com o deslocamento dos sistemas nos dias posteriores para a região central e Sudeste.

Nota-se também que a alta pressão sobre o Pacífico Sul está mais intensa no dia inicial nos grupos dos sistemas que chegam ou passam pelo Sudeste (Rota 1/SE, Rota 2/SE e CO e Rota 2/SE, CO e SBA) que nos demais grupos favorecendo o deslocamento do sistema frontal. Nota-se para o grupo Rota 1/SE no dia inicial+1 que o sistema desloca-se mais rápido que nos dois casos anteriores, ou seja, enquanto para aqueles sistemas que chegam até a Região Sul a frente encontra-se no sul do RS, no dia inicial+1, para aqueles que chegam até o Sudeste observa-se que a frente posiciona-se próximo ao sul de SC no dia inicial +1.

Nos dois grupos dos sistemas frontais que deslocam-se pelo interior (Rota 2/SE e CO e Rota 2/SE, CO e SBA), observa-se no dia inicial+1 o deslocamento do cavado associado à frente fria e a banda de nebulosidade bem organizada sobre a Região Sul e parte do Centro-Oeste. No caso dos sistemas que avançam por todas as áreas, o cavado se estende até o litoral do RS, a anomalia de OLR negativa da banda frontal e anomalia positiva associada à alta pressão na retaguarda do sistema frontal são mais intensas quando comparadas com o grupo Rota 2/SE e CO. Enquanto nos casos de frentes que avançam pelo interior só até o Sudeste o sistema frontal encontra-se próximo à Região Sul, no grupo daquelas que atingem todas as áreas estabelecidas, a frente encontra-se próximo a SP estendendo-se até o Centro-Oeste, no dia inicial +1.

No dia do evento a principal diferença nesses dois grupos (Rota 2/SE e CO e Rota 2/SE, CO e SBA) é a alta pressão na retaguarda da frente fria sobre os estados do Sul e em SP contribuindo para que o sistema chegue ao sul da BA além de atingir o interior do Brasil (Figura 4.12 a-c, d-f). No entanto, em relação

à anomalia negativa de OLR, esta é mais organizada e mais intensa sobre o continente no grupo Rota 2/SE e CO.

No grupo dos sistemas que avançam pelo litoral e chegam até o sul baiano notamos uma configuração diferente dos demais (Figura 4.12 g-i). A banda frontal não aparece bem organizada, a anomalia positiva de OLR sobre o centro-sul do Brasil permanece em todos os dias analisados, a alta pressão sobre o Atlântico Sul tem um pequeno deslocamento para leste. No dia do evento o que observa-se é o anticiclone atrás do sistema frontal na sua posição mais a leste com seu centro sobre o oceano Atlântico (próximo a 40°W). Essas características são consistentes com o deslocamento dos sistemas só pelo litoral.

Com relação ao escoamento em baixos níveis da atmosfera e a advecção de temperatura para os grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul e Rota 1/SE, no dia inicial nota-se a confluência do vento próximo ao norte da Argentina e advecção fria na retaguarda do sistema frontal e quente no Atlântico Sul (Figura 4.7). Nos dois primeiros grupos (SAS e oceano e Rota 1/Sul) nota-se que no dia inicial a advecção quente é mais intensa.

A diferença significativa entre os grupos que avançam para o Sudeste pelo litoral daqueles que tem um deslocamento também pelo interior é o vento de quadrante sul que atinge parte da Região Centro-Oeste e sul da região Amazônica, neste último caso. Nos grupos SAS e oceano e Rota 1/Sul observa-se que o escoamento que vem de norte na região de confluência, sobre o oceano, é mais forte, também notado pela advecção quente e mais forte sobre o oceano, do que nos casos em que as frentes se deslocam até o SE, SE e CO, SBA, e SE, CO e SBA em todos os dias analisados.

Em níveis médios, no dia inicial (Figura 4.8 a,d,g) observa-se forte advecção de vorticidade positiva sobre o RS nos grupos SAS e oceano e Rota 1/Sul que impede o avanço dos sistemas para latitudes baixas. Enquanto para o caso em que o sistema chega ao Sudeste nota-se advecção de vorticidade negativa

(advecção de vorticidade ciclônica) em grande parte da Região Sul, em SP e MS, ou seja, o cavado sobre essa região pode ser aprofundado favorecendo a chegada dos sistemas frontais até essa região. No dia inicial+1 (Figura 4.8 b,e,h) notamos que para o grupo Rota 1/Sul a advecção de vorticidade positiva perde a intensidade e o cavado associado ao sistema é intensificado. Para o grupo Rota 1/SE pode ser observada a intensificação da advecção de vorticidade negativa sobre boa parte da Região Sul, MS e SP.

Nota-se também, no dia inicial, que para aqueles grupos que avançam pelo interior (Rota 2/SE e CO) e aqueles que chegam ao sul da BA (Rota 2/SE, CO e SBA e Rota 1/SBA) tanto advecção de vorticidade positiva e advecção de vorticidade negativa (Figura 4.14, a,e,i) são menos intensas que nos grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul e Rota 1/SE (Figura 4.8 a,d,g). Nos casos dos grupos em que as frentes não conseguem se deslocar sobre o continente (SAS e oceano e Rota 1/Sul), há centros de advecção de vorticidade alternados mais intensos sobre o oceano também no dia inicial, do que nos casos dos grupos em que as frentes atingem o interior. Outra diferença entre esses grupos no dia inicial é que os centros de advecção negativos e positivos atrás da frente têm orientação mais meridional nos casos em que os sistemas avançam pelo interior. No dia do evento observa-se em todos os grupos estudados que as regiões de advecção de vorticidade negativa e advecção de vorticidade positiva acompanham a posição do sistema frontal em relação à área em que este se encontra.

Nas Figuras 4.10 e 4.16 são mostrados o geopotencial e anomalia zonal em 200 hPa. Observa-se em todos os grupos estudados e em todos os dias analisados anomalia negativa, positiva e negativa sobre o Atlântico Sul. Nota-se também sobre o Pacífico a oeste da América do Sul anomalia positiva ao sul e negativa ao norte. As principais diferenças nos grupos estão na intensidade e posicionamento, principalmente da anomalia positiva no Pacífico Sul. Observa-se que com o avanço dos sistemas e dependendo da região em que ele chega essa anomalia positiva aproxima-se da América do Sul e em alguns casos atua

sobre o sul da Argentina e Chile. Nos casos dos sistemas que não passam da Região Sul do país, notamos que a região de crista mais intensa a oeste do Chile não atinge o continente sul americano. É interessante notar que no dia inicial dependendo até onde o sistema frontal irá chegar há diferenças no posicionamento e na intensidade das cristas e cavados que influenciam no deslocamento do sistema.

Pode-se observar nas Figuras 4.10 e 4.16 (dia inicial de todos os grupos) uma região com anomalia positiva de geopotencial sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai que é mais intensa nos casos dos sistemas que chegam só até o Sul e menos intensa no grupo das frentes que avançam por todas as áreas estudadas.

Para os sistemas frontais que chegam até o Sudeste deslocando-se tanto pelo litoral (Rota 1/SE) quanto pelo interior (Rota 2/SE e CO) observa-se no dia inicial que a anomalia positiva de geopotencial no Pacífico Sul, no Atlântico e em parte da Região Sul do Brasil está mais intensa no grupo com deslocamento apenas pelo litoral (Figura 4.10 g). A anomalia negativa que se estende desde o Pacífico até o Atlântico Sul no grupo Rota 2/SE e CO na seqüência de dias analisados permanece orientada no sentido NW-SE avançando da costa do Chile para a Região Centro-Oeste do Brasil (Figura 4.16 a-c). No dia do evento, Figura 4.10 c, nota-se que a anomalia positiva de geopotencial sobre o Atlântico Sul está mais intensa no grupo Rota 1/SE, ou seja, impedindo que o sistema frontal atinja latitudes mais baixas deslocando-os para o oceano. A anomalia positiva de geopotencial sobre o Pacífico e sul da América no Sul está menos intensa, não transferindo energia suficiente para que haja o deslocamento do sistema frontal.

Em altos níveis (Figura 4.11 e 4.17), observa-se escoamento mais zonal e bastante intenso, com um centro de máxima velocidade entre 35 e 40 m/s para o grupo SAS e oceano, 40 e 45 m/s nos grupos Rota 1/Sul e Rota 1/Sudeste. Segundo Pezzi et al. (1996), no trimestre junho, julho e agosto o jato atinge a

sua máxima intensidade e atuação na América do Sul. Em média encontra-se oscilando na faixa latitudinal de 25°S e 30°S, com configuração zonal ou com uma suave inclinação de noroeste para sudeste.

No dia inicial a diferença significativa em altos níveis nos grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul e Rota 1/Sudeste é na posição do jato (Figura 4.11 a,d,g). Nos casos em que os sistemas foram para o oceano sem atingir o sul do Brasil o jato posiciona-se mais ao sul que nos casos em que chegaram no Sul e Sudeste. No grupo Rota 1/SE observa-se um segundo centro com máxima velocidade sobre o Atlântico Sul posicionado em latitudes mais altas. Uma outra característica marcante no dia em que o sistema foi identificado refere-se ao posicionamento da circulação anticiclônica em altos níveis sobre o norte da América do Sul. No primeiro grupo a circulação atinge sua posição mais ao norte e no grupo Rota 1/Sudeste chega a atingir o Mato Grosso. No dia inicial para os grupos Rota 2/SE e CO, Rota 2/SE, CO e SBA e Rota 1/SBA (Figura 4.17 a,d,g) observa-se o jato menos intenso quando comparado aos casos mostrados na Figura 4.11 (Rota 1/SAS e oceano, Rota 1/Sul e Rota 1/SE). No entanto, em todos os grupos nota-se o deslocamento do jato para latitudes mais baixas e uma ligeira intensificação à medida que o sistema avança para a Região especificada.

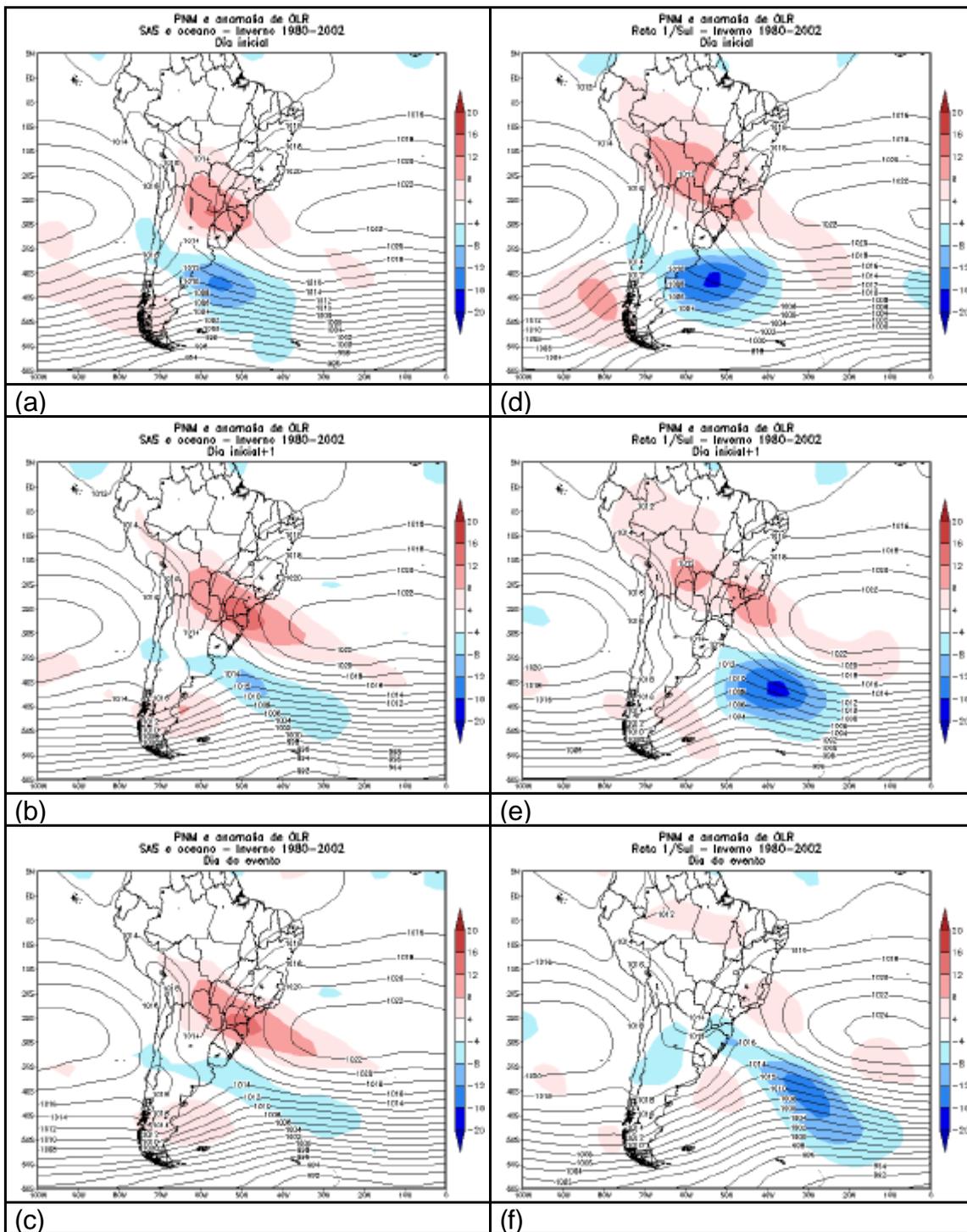
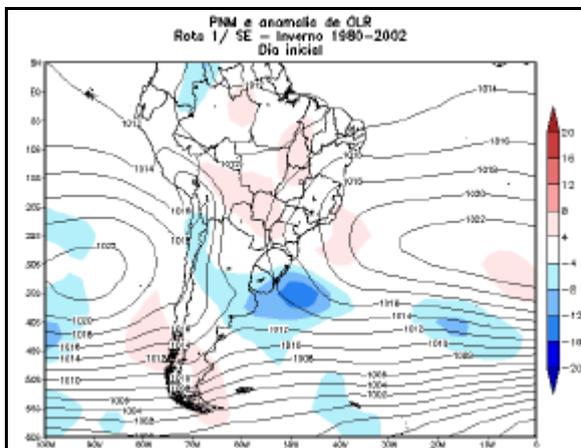
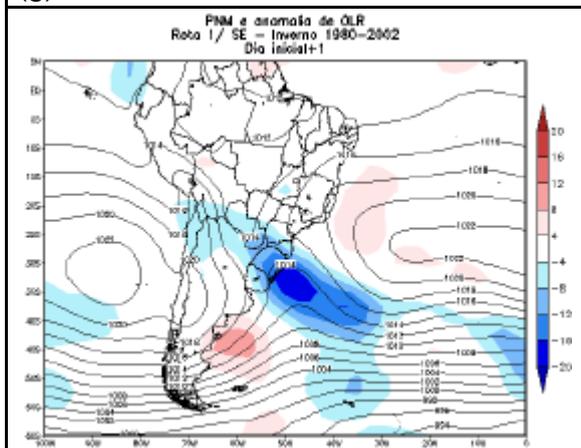


FIGURA 4.6 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

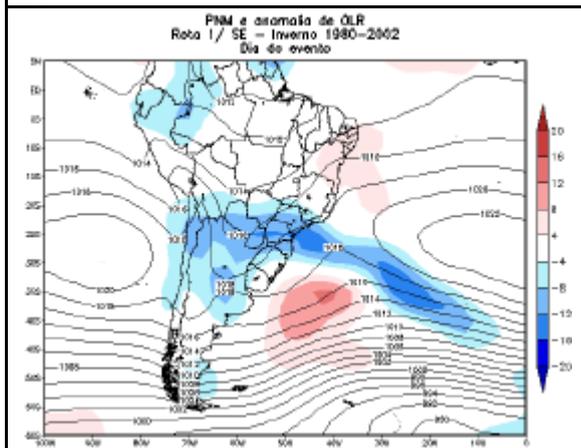
(continua)



(g)



(h)



(i)

FIGURA 4.6 – Conclusão.

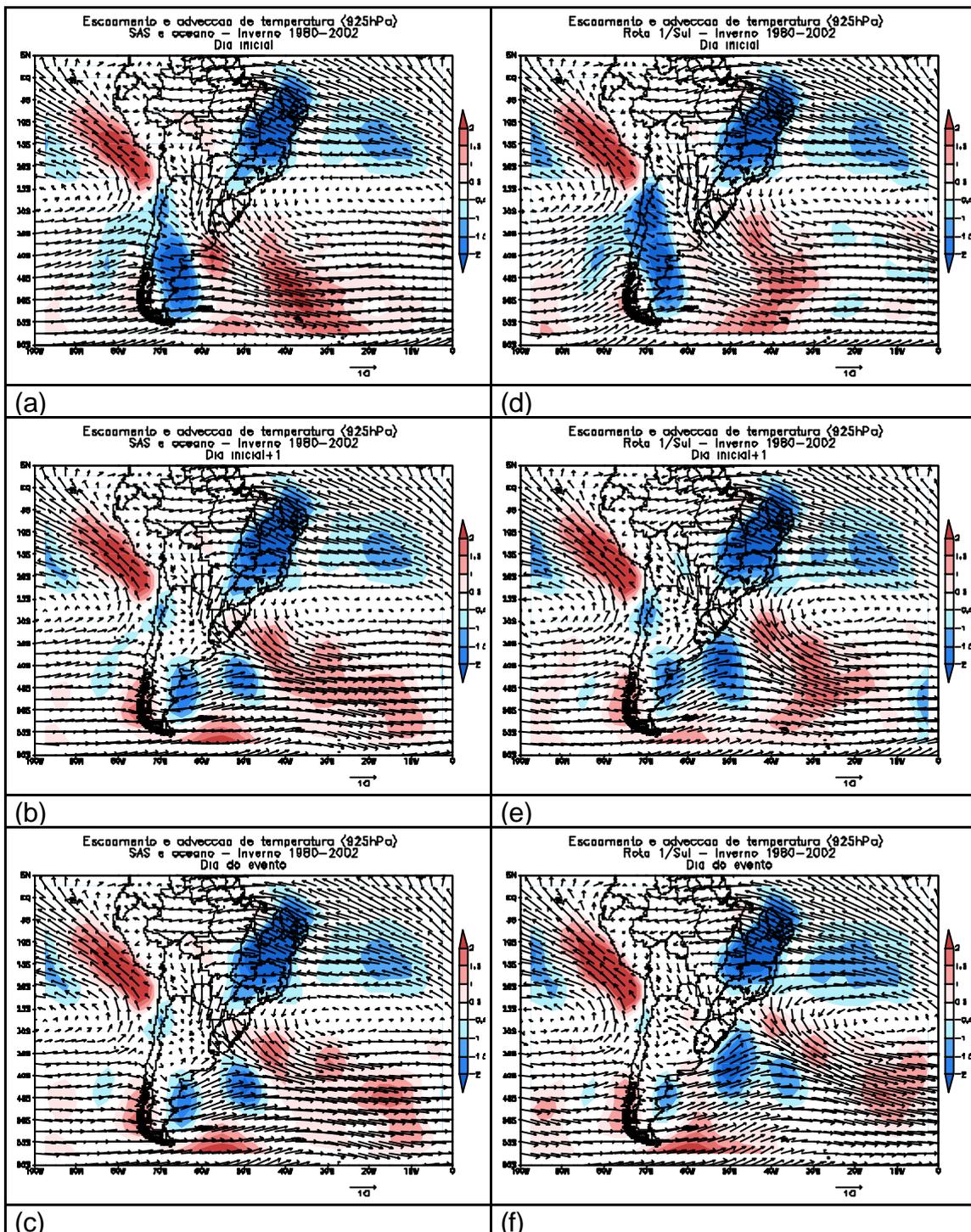


FIGURA 4.7 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura em 925 hPa (°C/dia) (sombreado) para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

(continua)

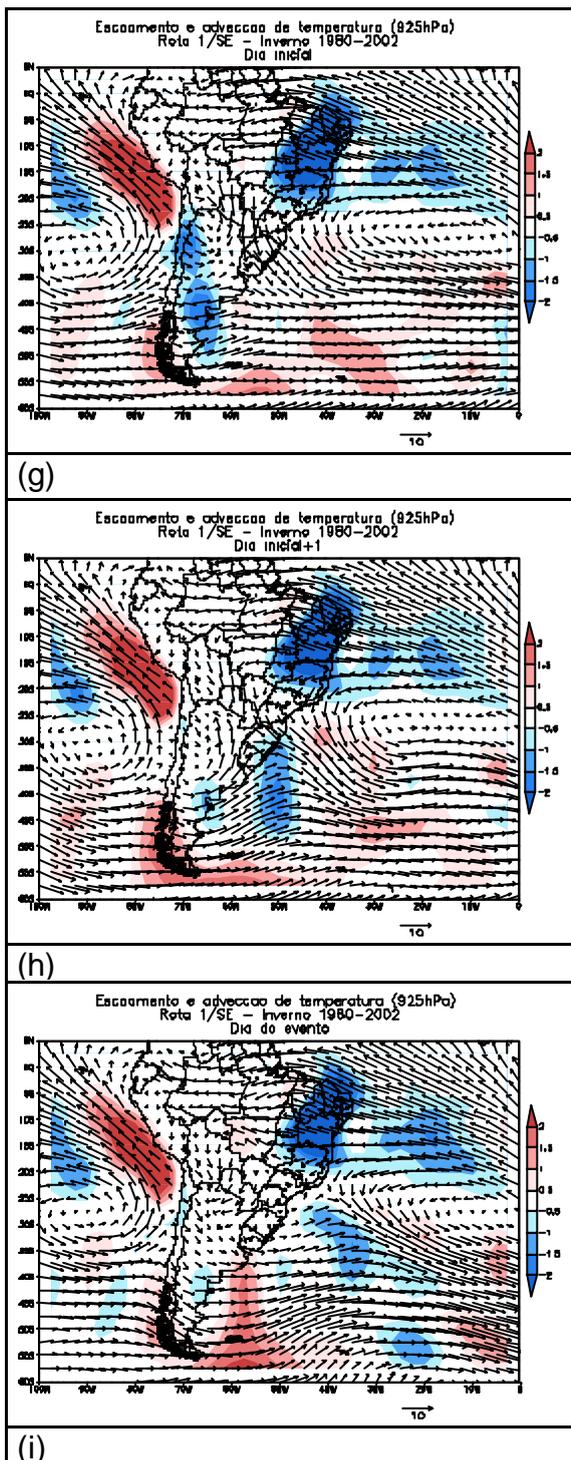


FIGURA 4.7 – Conclusão.

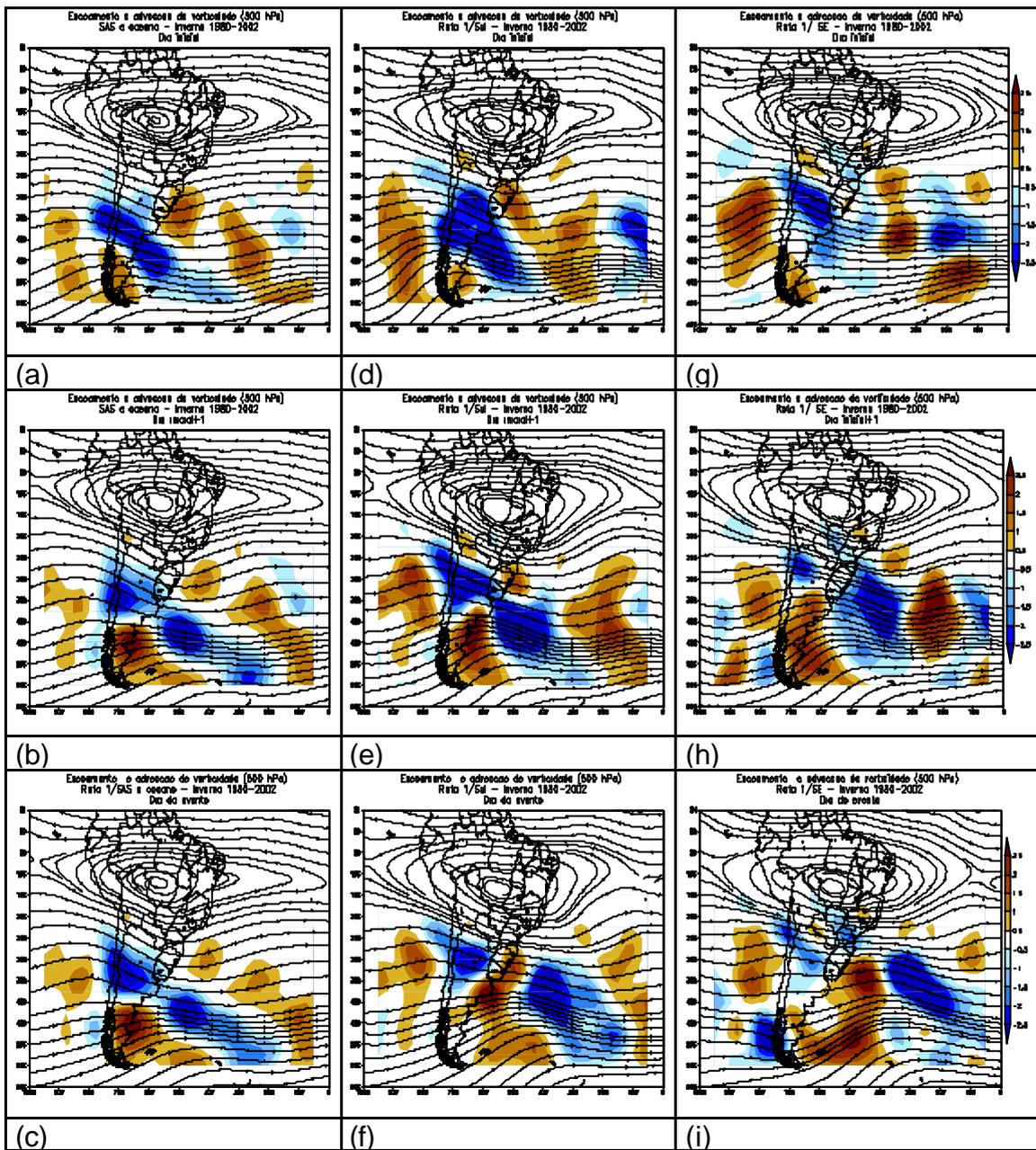


FIGURA 4.8 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) (sombreado) em 500 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno.



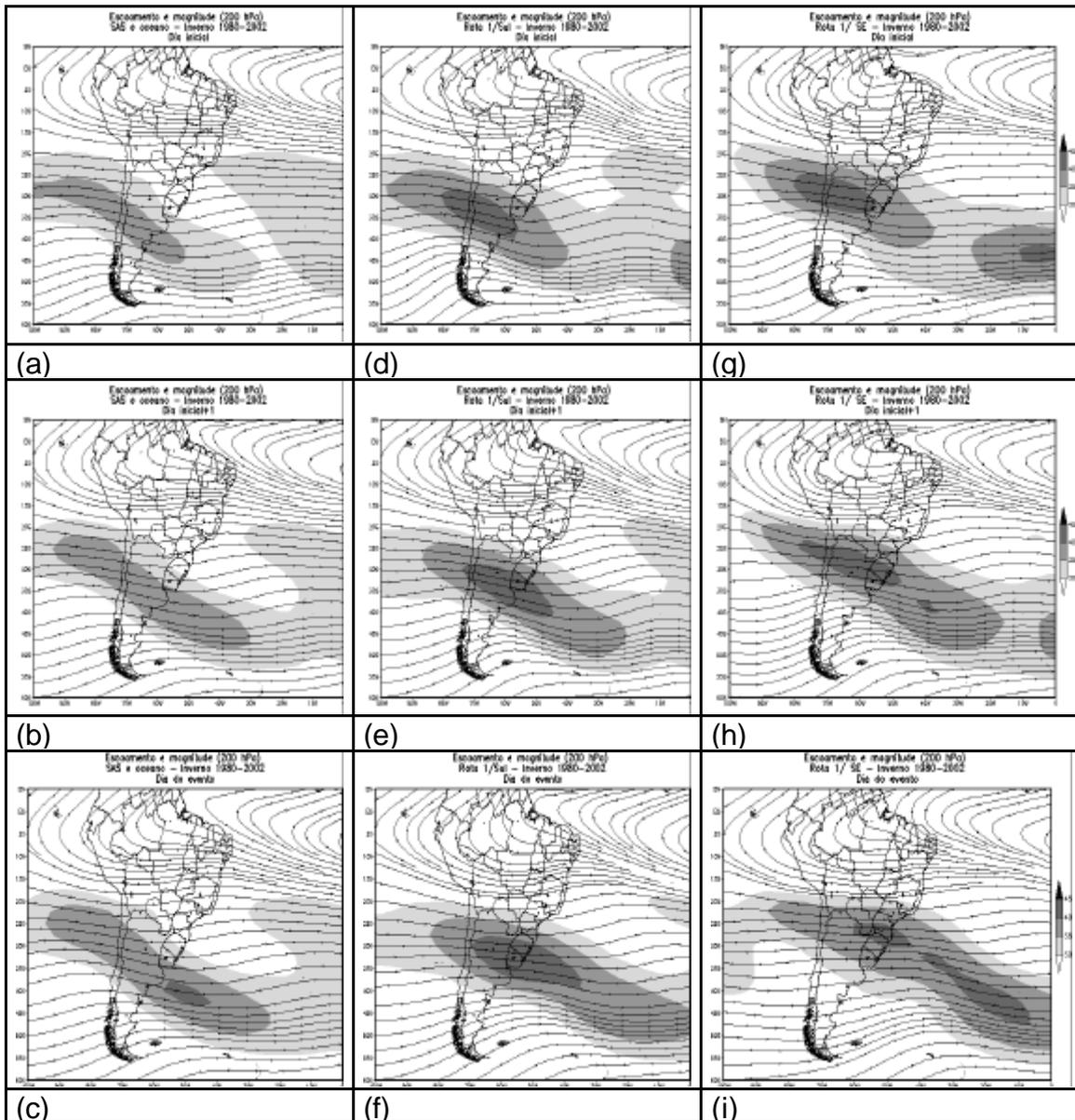


FIGURA 4.11 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

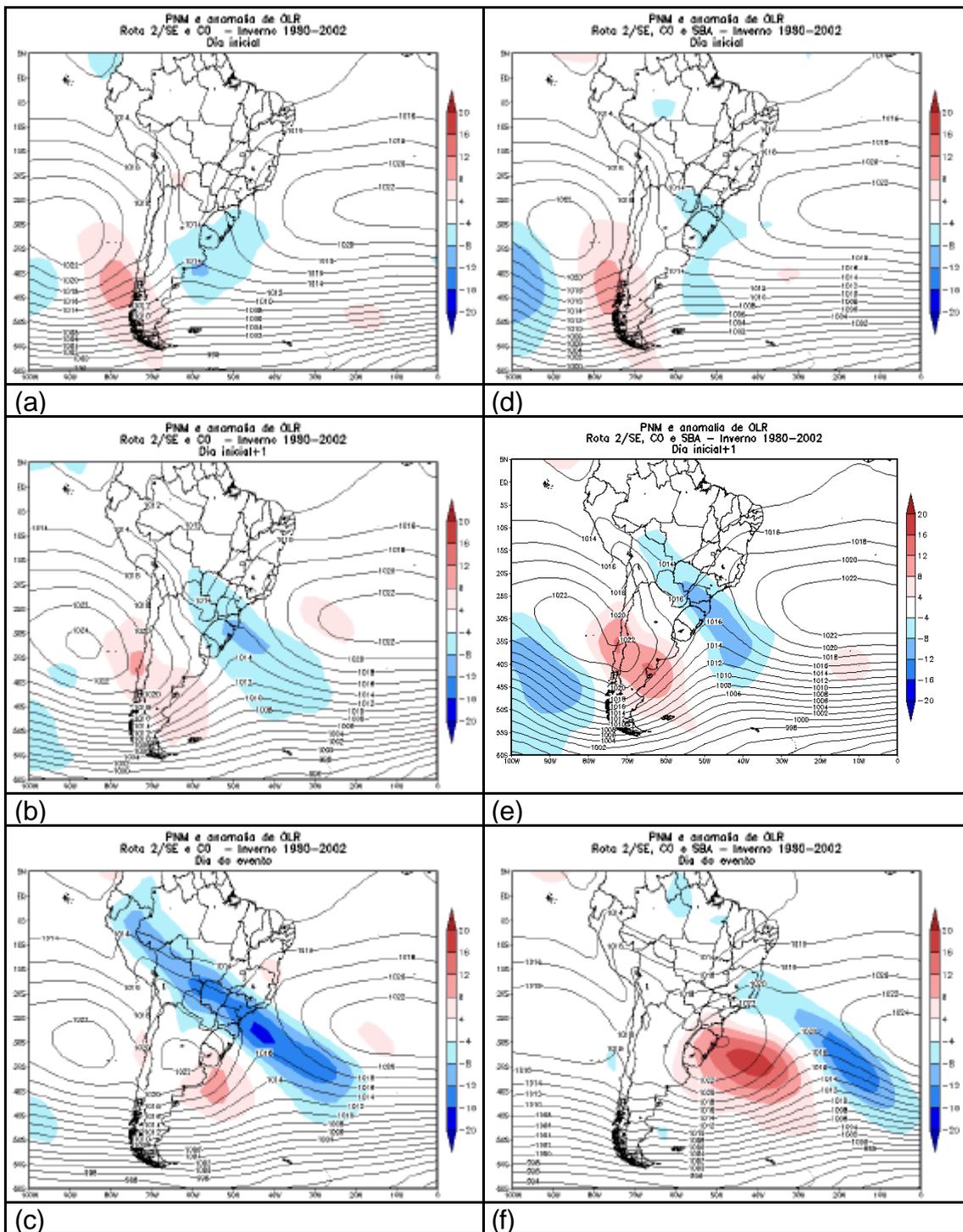
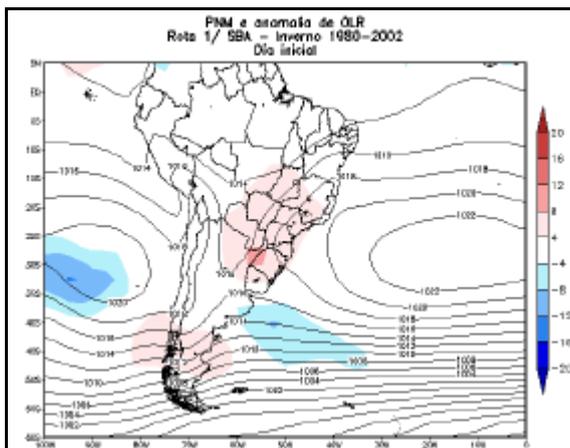
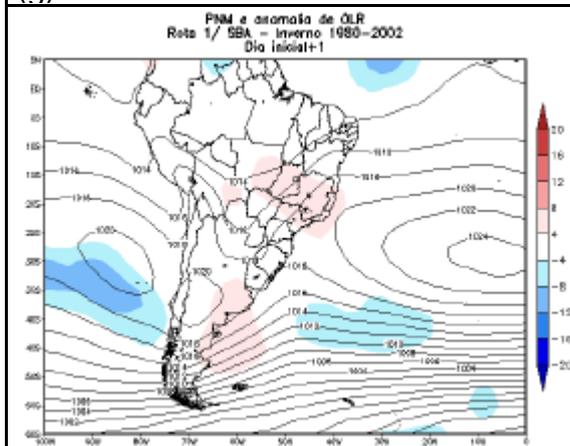


FIGURA 4.12 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

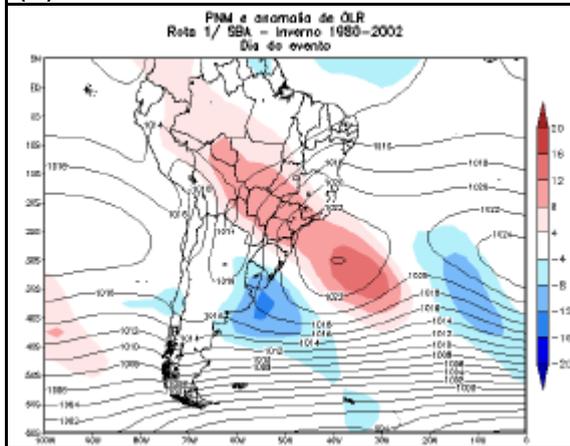
(continua)



(g)



(h)



(i)

FIGURA 4.12 - Conclusão.

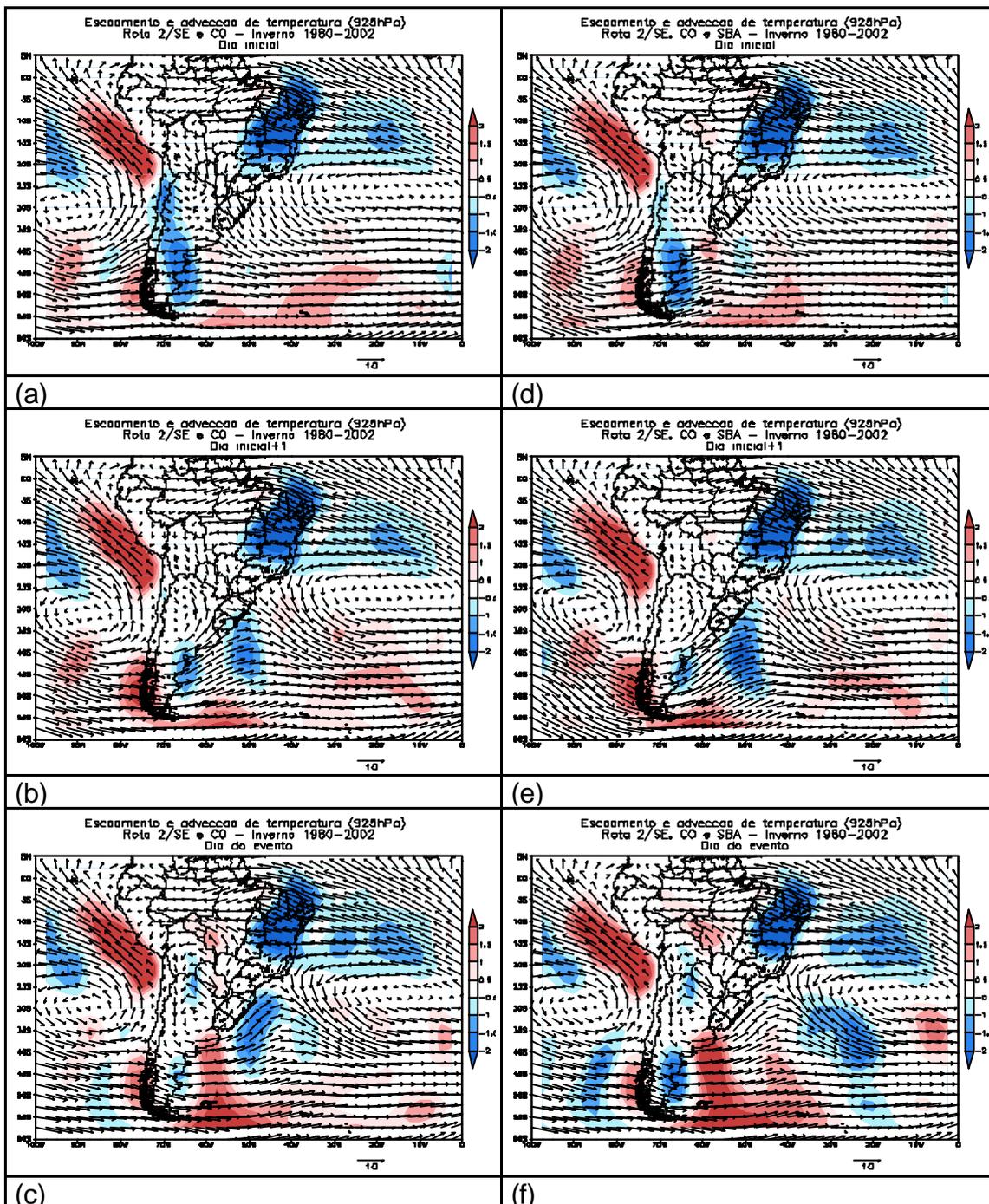


FIGURA 4.13 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura (°C/dia) (sombreado) em 925 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

(continua)

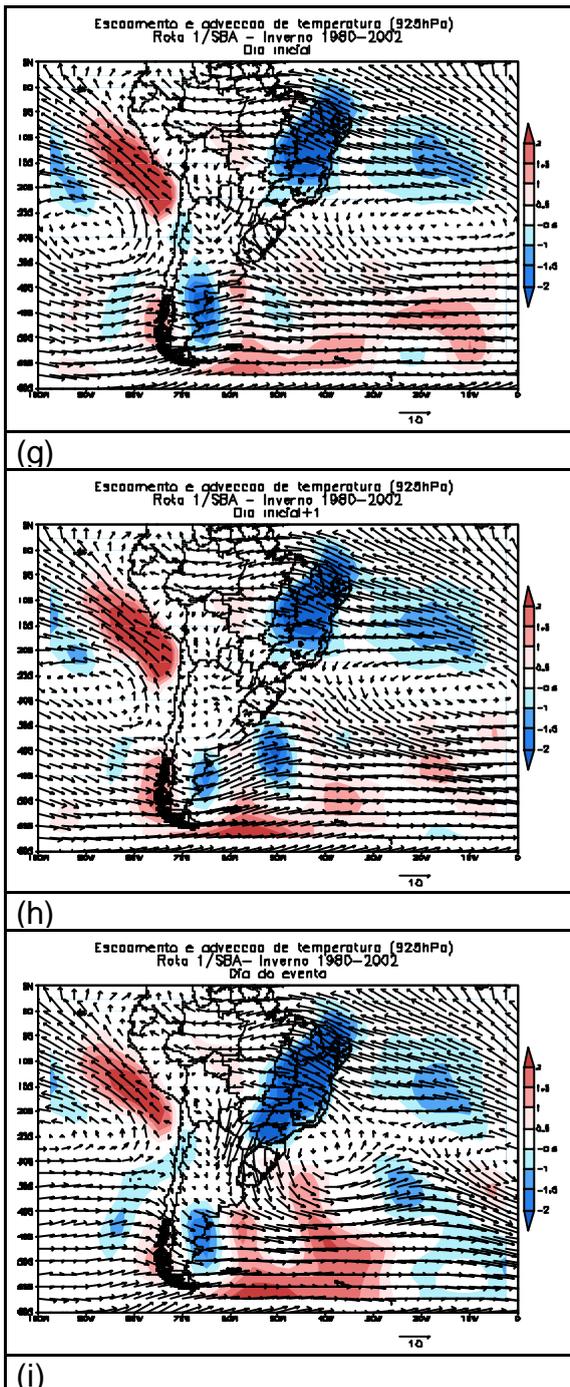


FIGURA 4.13 - Conclusão.

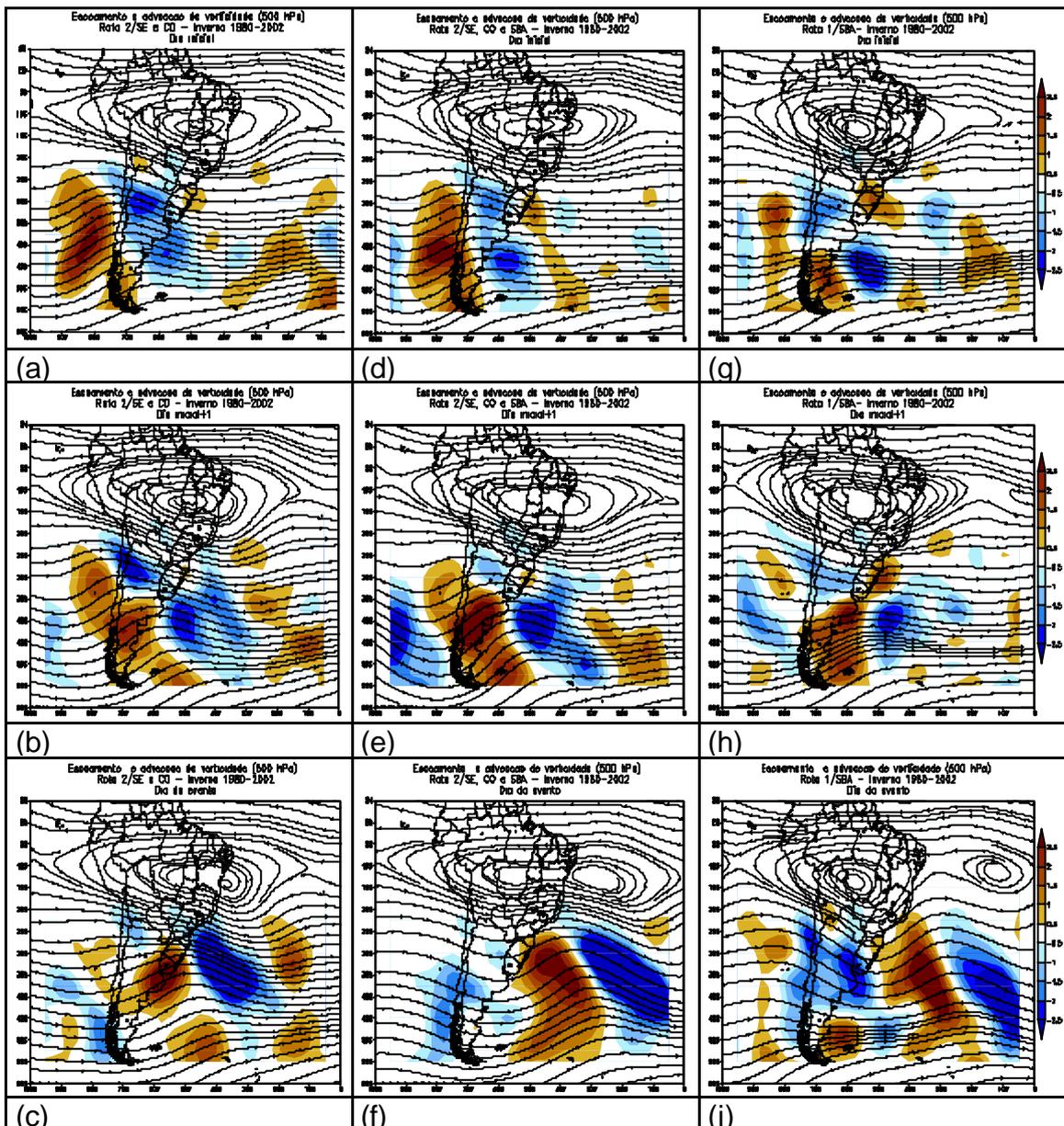


FIGURA 4.14 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) (sombreado) em 500 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/ para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

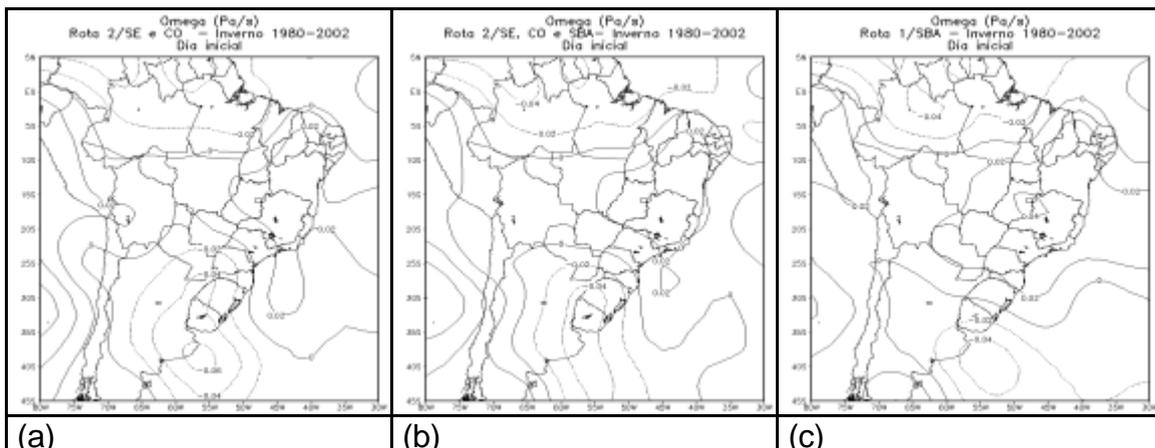


FIGURA 4.15 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) Rota 2/SE e CO; (b) Rota 2/SE, CO e SBA; (c) Rota 1/SBA para dia inicial para o inverno.

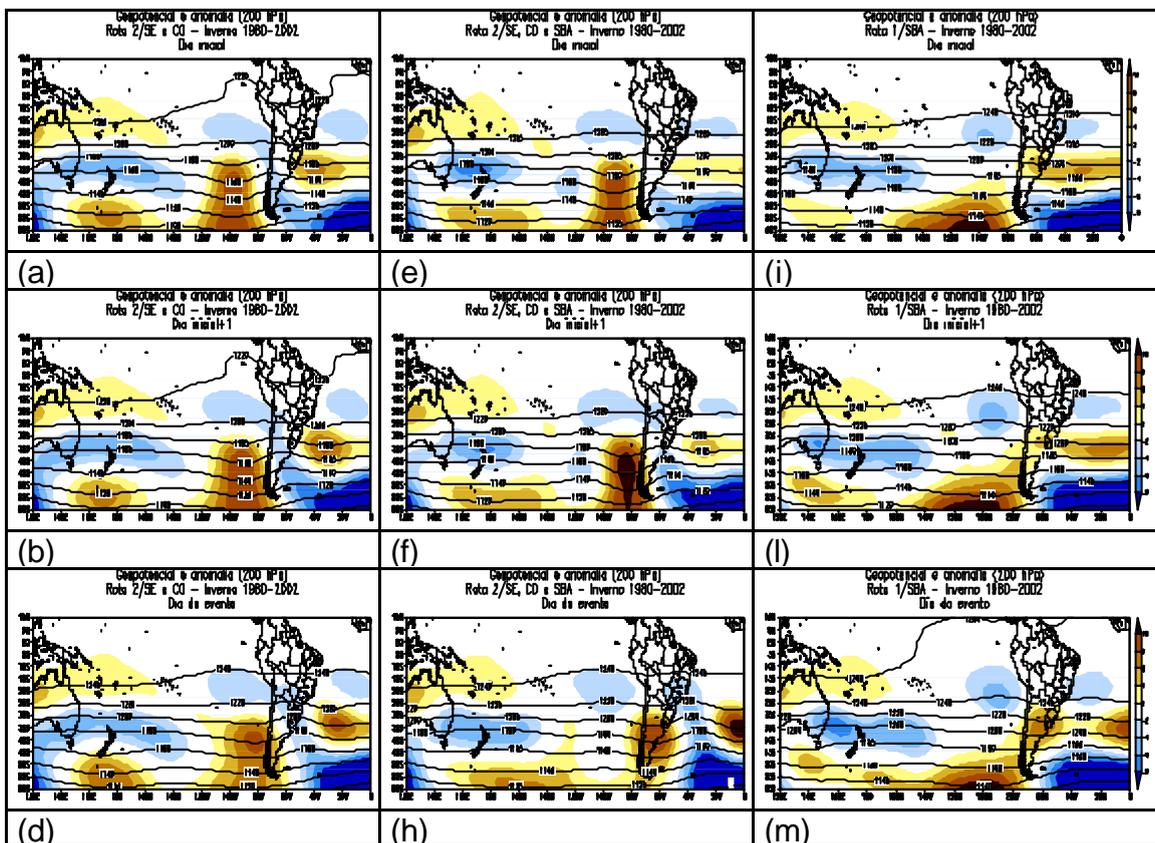


FIGURA 4.16 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

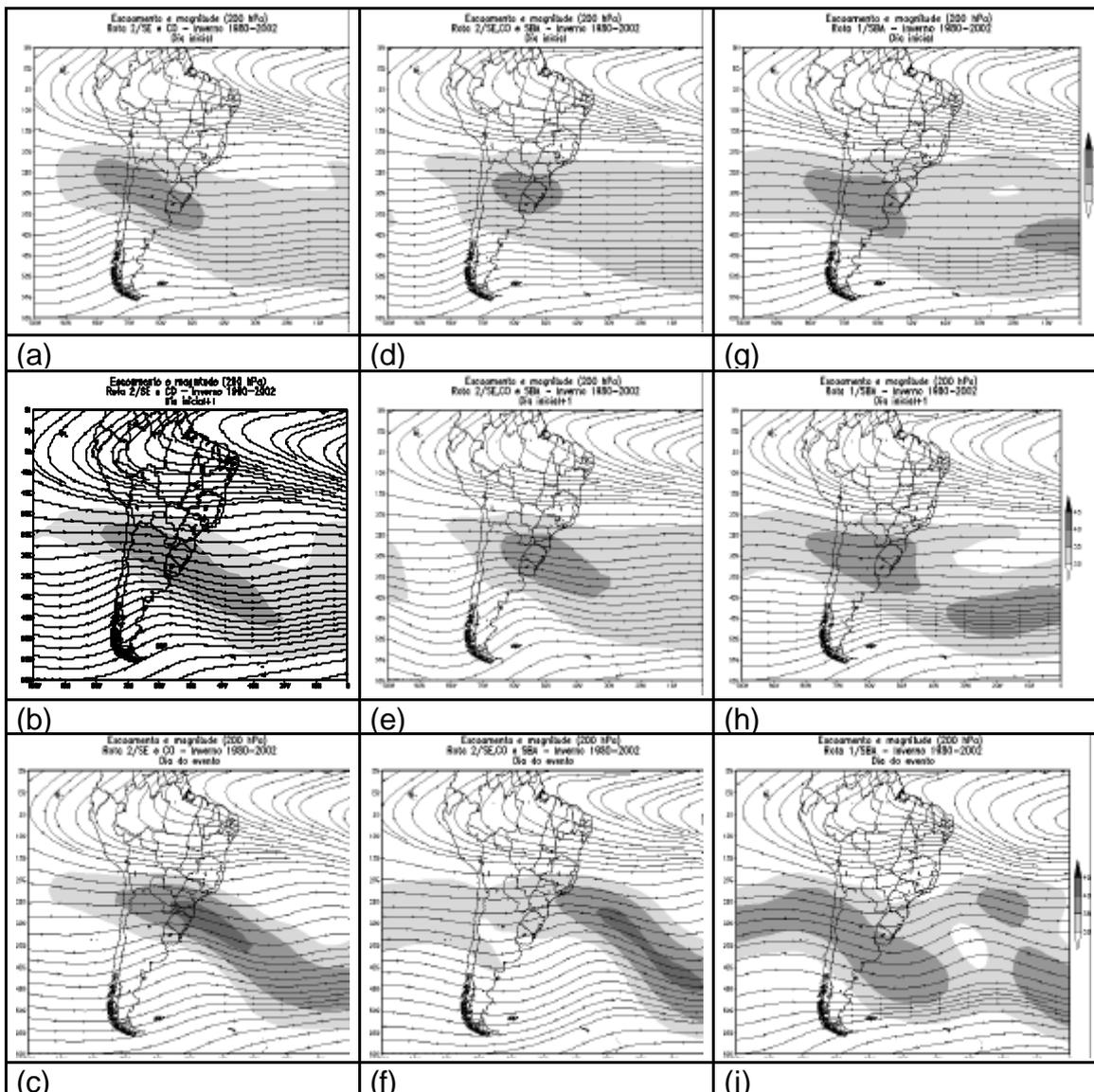


FIGURA 4.17 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d, g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o inverno.

## 4.3 - Análise dos Compostos para o Verão

### 4.3.1 – Grupo SAS e Oceano

Analisando os compostos da pressão ao nível médio do mar juntamente com a anomalia de OLR (Figura 4.18 a-c), das frentes que vão para o oceano, sem atingir o Brasil, podemos notar que as anomalias negativas de OLR têm uma orientação NW-SE com máximo sobre o nordeste da Argentina e no Uruguai. Nota-se também o centro de baixa pressão associado ao sistema frontal ao sul de 60°S sobre o Oceano Atlântico Sul. Vale salientar que todos os compostos feitos para esta região não apresentam mudanças significativas quanto ao dia em que o sistema se iniciou e o dia em que já se encontrava no oceano, pois normalmente o deslocamento desses sistemas dá-se no mesmo dia ou no máximo no dia seguinte em que este foi notado sobre a Argentina.

Em baixos níveis da atmosfera (Figura 4.19 a-c) notamos uma circulação anticiclônica sobre o Atlântico Sul e Pacífico Sul, o cavado e a região de confluência do vento associados ao sistema frontal. Em 500 hPa, nota-se advecção de vortacidade positiva na retaguarda do sistema e advecção de vortacidade negativa na zona frontal, acompanhando o deslocamento do cavado, consistente com o movimento ascendente na região de atuação do sistema frontal, e movimento subsidente atrás do mesmo (Figura 4.21 a). Observa-se que nos 3 dias analisados (dia inicial, dia inicial+1 e dia do evento) há advecção de vortacidade positiva sobre o Uruguai e nordeste da Argentina.

Em altos níveis (Figura 4.22 a-c) observa-se anomalia positiva de geopotencial sobre o centro-sul do Brasil e anomalia negativa associada ao sistema frontal no sul da América do Sul. Tais características também são vistas no nível de 500 hPa. No campo de escoamento de altos níveis (Figura 4.23 a-c) nota-se o anticiclone na região oeste do continente sul-americano denominado como Alta da Bolívia, e um cavado sobre o NE do Brasil.

#### 4.3.2 – Grupo Rota 1/Sul

Em relação aos sistemas frontais que atingem o sul do Brasil e em seguida se deslocam para o oceano pode-se observar também através do campo de PNM um cavado associado à frente fria sobre o oceano deslocando-se para leste (Figura 4.18 d-f). Através do campo de anomalia de OLR pode-se acompanhar o sistema pela banda de nebulosidade (anomalia negativa de OLR) com orientação NW-SE, desde o norte da Argentina, estendendo-se para o oceano. Observa-se para os 3 dias analisados, anomalia de OLR positiva ao norte da banda frontal, indicando possivelmente movimento subsidente que impede o deslocamento da frente para a Região Sudeste. Nota-se que neste grupo, a passagem da frente fria atua como forçante para a organização da convecção em áreas mais ao norte do sistema.

Em 925 hPa, observa-se na Figura 4.19 (d-f) o deslocamento do cavado associado ao sistema frontal, a circulação anticiclônica na retaguarda e no dia do evento a zona de confluência a leste do Rio Grande do Sul.

Em níveis médios (500 hPa), Figura 4.20 d-f, observa-se um cavado sobre o Brasil central, circundado por duas circulações anticiclônicas, e uma série alternada de advecção de vorticidade ciclônica e anticiclônica nas latitudes médias tanto para os casos que chegaram até o Sul quanto àqueles que se deslocaram pelo oceano sem atingir o Brasil. Nota-se sobre a costa sudoeste da América do Sul no dia inicial o cavado associado ao sistema frontal contribuindo para advecção de vorticidade negativa na zona frontal (Figura 4.20 d). Essas áreas com advecção de vorticidade negativa são favoráveis ao movimento ascendente. O nível de 500 hPa é considerado o nível de não divergência, é onde o movimento vertical é máximo. Pela Equação da vorticidade nesse nível, o termo de tendência é balanceado pela advecção de vorticidade, e, advecção de vorticidade negativa também contribui para o aprofundamento do cavado. Observa-se que nos próximos dias o cavado

avança em direção ao oceano e perde a intensidade sobre o continente (Figura 4.20 d-f).

Em altos níveis, Figura 4.22 d-f, observa-se que o cavado associado ao sistema frontal desloca-se rapidamente para leste. No dia inicial nota-se que há anomalia positiva de geopotencial mais intensa que no grupo SAS e oceano sobre o Pacífico, ou seja, pode haver transferência de energia através do escoamento ondulatório da crista para o cavado e fazer com que este se desloque mais para leste que no caso anterior. No dia do evento como ainda é notada anomalia positiva de geopotencial no centro-sul do Brasil o cavado desloca-se para o oceano, mas posiciona-se ao sul de 40°S. Nota-se através da Figura 4.23 d-f, que além da presença da Alta da Bolívia e do Cavado do Atlântico, há sobre parte da Região Sudeste um ponto de inflexão entre crista e cavado, ou seja, uma região de convergência em altos níveis, portanto divergência em baixos níveis, justificando assim a anomalia positiva de OLR sobre essa região, como observado na Figura 4.18 d-f.

#### 4.3.3 – Grupo Rota 1/ Sudeste

Considerando os casos em que os sistemas chegam até a Região Sudeste do Brasil, pelo litoral, nota-se no campo de PNM o cavado associado ao sistema frontal avançando para leste e chegando a atingir o Estado do Rio de Janeiro (Figura 4.18 g-i). A configuração das anomalias de OLR apresenta uma orientação mais meridional no dia inicial+1 (Figura 4.18 g-i). No dia inicial observa-se uma banda convectiva sobre Santa Catarina, Paraná e São Paulo, possivelmente associada a resquício de uma frente fria. No dia inicial +1 nota-se um acoplamento da nebulosidade associada à frente fria na Região Sul com esta já existente. No dia do evento há anomalia negativa de OLR em uma banda NW-SE, se estendendo da costa sudeste para o oceano, e anomalia positiva no Sul, devido à atuação da alta pressão na Região (Figura 4.18 g-i).

Nota-se também neste grupo, na retaguarda do sistema um centro de alta pressão no dia do evento mais intensa quando comparada àqueles casos de frentes que foram até a Região Sul.

Através da Figura 4.19 (g-i), observamos o escoamento e advecção de temperatura em 925 hPa para o grupo Rota 1/ SE. Observa-se no dia do evento advecção negativa de temperatura sobre parte do Sul do Brasil. Nota-se que essa advecção negativa de temperatura é mais intensa que no grupo anterior (Rota 1/Sul) e propicia o desenvolvimento do anticiclone em superfície. Na Figura 4.20, nota-se a advecção de vorticidade positiva sobre o norte da Argentina no dia inicial+1 (Figura 4.20 h) e a leste da Região Sul no dia do evento (Figura 4.20 i). Tal advecção influencia o desenvolvimento da circulação em superfície, neste caso também intensifica a circulação anticiclônica em baixos níveis. A alta na retaguarda do sistema frontal mais intensa no grupo Rota 1/SE e alta do Atlântico Sul menos intensa e mais deslocada para leste parece ser uma das características para o deslocamento do sistema frontal até a Região Sudeste.

Em níveis médios, no dia inicial observa-se uma configuração parecida com as dos grupos SAS e oceano e Rota 1/Sul (Figura 4.20 a,d,g). No dia inicial+1 o cavado associado à frente avança para leste. Entretanto, no dia do evento este cavado tem seu eixo sobre o extremo norte de São Paulo (Figura 4.20 i), enquanto no grupo Sul (Figura 4.20 f) o eixo do cavado passa por Santa Catarina até o Mato Grosso do Sul, e no caso SAS e oceano continua suavizado estendendo-se do Rio Grande do Sul até o Mato Grosso do Sul (Figura 4.20 c).

Uma diferença grande deste grupo com os dois anteriores é a posição do cavado associado ao sistema frontal, indicado pela anomalia negativa de geopotencial intensa e à leste da Argentina, enquanto nos outros grupos o cavado se posiciona sobre o sul da América do Sul. Neste caso a anomalia

positiva de geopotencial sobre o centro-sul do Brasil está menos intensa do que nos outros grupos e se restringe ao continente.

#### 4.3.4 – Rota 2/ Sudeste e Centro-Oeste

Analisando os casos de frentes que se deslocam pelo litoral, chegam até o Sul, Sudeste e atingem também o interior do país (Rota 2/ SE e CO) observa-se no campo de pressão, Figura 4.24 (a-c), uma configuração parecida com os casos dos sistemas que chegam apenas pelo litoral até o Sudeste, porém com maior atividade convectiva. Nota-se que a anomalia negativa de OLR estende-se desde o oceano até parte da Região Norte com uma orientação NW-SE parecendo organizar-se com a convecção sobre parte do Centro-Oeste, Bolívia, RO e sul do AC (Figura 4.24 a-c). Esses casos podem estar associados ao estabelecimento da ZCAS. Sobre o oceano Atlântico Sul na altura do Sudeste há anomalia positiva de OLR antes do evento (Figura 4.24 a,b) e a banda convectiva associada ao sistema frontal no dia do evento está posicionada mais ao sul que nos casos de frentes que se deslocaram apenas pelo litoral.

Em baixos níveis, nos casos das frentes que atingem parte das Regiões Centro-Oeste e Sudeste, nota-se uma desintensificação do escoamento de norte na região do jato em baixos níveis. No dia do evento observa-se vento de quadrante norte até Rondônia e norte da Bolívia e vento de sul no Paraguai e sul de Mato Grosso (Figura 4.25 c). Pode-se observar a confluência do vento até o Centro-Oeste no dia do evento.

Através da Figura 4.26 a-c, observa-se que em 500 hPa a advecção de vorticidade positiva encontra-se sobre o Paraguai, nordeste da Argentina e a leste do Rio Grande do Sul no dia do evento. Nota-se que essa advecção ocorre desde o dia inicial e está mais intensa que nos casos dos sistemas que chegam ao Sudeste deslocando-se apenas pelo litoral, intensificando assim o anticiclone em superfície no grupo Rota 2/SE e CO. Pode-se observar também pela Figura 4.26c que a região de crista estende-se desde o nordeste da

Argentina até parte de MS no dia do evento, mostrando a atuação do sistema frontal também pelo interior. Observa-se que a advecção de vorticidade negativa associada à frente fria também é mais intensa, ou seja, aprofundando o cavado e este atuando até o sul da Região Centro-Oeste.

Através do geopotencial e anomalia zonal, Figura 4.28 a-c, observa-se para todos os dias analisados para o grupo Rota 2/SE e CO um trem de ondas estendendo-se do Pacífico Sul ao leste do Nordeste. No entanto, parece haver uma desintensificação deste trem de onda com o passar dos dias.

#### 4.3.5 – Grupo Rota 2/ Sudeste, Centro-Oeste e sul da Bahia

No grupo referente às frentes que passaram por todas as áreas (Rota 2/SE, CO e SBA) o que se nota no campo da PNM no dia do evento é a alta pressão na retaguarda ligeiramente mais intensa e deslocada para leste, centrada sobre o oceano Atlântico, quando comparado ao grupo anterior (Rota 2/SE e CO). Através da anomalia de OLR podem ser identificados, no dia inicial, dois sistemas frontais (um na Região Sul e outro no sul da BA) e uma área de subsidência separando estes sistemas, configuração que não foi observada no grupo Rota2/SE e CO. Tal configuração também pode estar associada à ocorrência de ZCAS, uma vez que antes da formação do fenômeno pode ser observado um sistema frontal fraco na altura do Sudeste que é reintensificado com a chegada de um novo sistema oriundo do sul do continente sul-americano (Quadro, 1994). No dia do evento, observa-se a banda de nebulosidade associada à frente fria chegando até o sul da BA e subsidência (Figura 4. 28 b) sobre parte do Sul do Brasil, Mato Grosso do Sul e em São Paulo.

Em baixos níveis, observa-se através da Figura 4.25 d-f, o cavado associado ao sistema frontal deslocando-se para norte e chegando na altura no Estado do Rio de Janeiro no dia do evento e a circulação anticiclônica pós-frontal mais intensa a leste da Região Sul. Comparando este grupo com os demais citados anteriormente nota-se que o escoamento de norte na região do JBN está

menos intenso já a partir do dia inicial. Com o avanço do sistema os ventos de quadrante norte transportam umidade e calor a oeste dos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul até o Paraguai, ficando assim a região de confluência entre o Mato Grosso e Mato Grosso do Sul no dia do evento.

Em níveis médios, nota-se que o cavado sobre o centro-sul do Brasil está mais amplificado e a advecção de vortacidade negativa mais intensa se estendendo desde o estado de São Paulo até o Atlântico Sul. Nesse grupo no dia inicial (Figura 4.26 d) é notada a presença de um sistema frontal também próximo à Região Sudeste, logo, tais características são referentes a essa frente. No dia do evento o cavado tem uma inclinação para oeste em relação ao grupo Rota 2/SE e CO (Figura 4.26 f).

Em altos níveis nota-se uma pequena inclinação do cavado do Atlântico para oeste no dia inicial (Figura 4.29 d). No entanto, com o avanço do sistema o cavado do Atlântico desloca-se e no dia do evento inclina-se para leste (Figura 4.28 f). Este é o único grupo que apresenta essa característica. Observa-se neste grupo um cavado pronunciado com anomalia negativa de geopotencial sobre o oceano próximo à Região Sul no dia inicial e dia inicial+1 que está associado possivelmente à presença de outra frente fria no Sudeste, como pode ser visto através da anomalia negativa de OLR (Figura 4.24 de) e o escoamento em baixos níveis (Figura 4.25 d-e). Nota-se também que no dia do evento há uma intensificação do cavado a oeste da América do Sul, característica não observada nos demais grupos estudados.

#### 4.3.6 – Rota 1/ Sul da Bahia

O último grupo a ser analisado foi o dos sistemas que chegaram até o sul da BA (Rota 1/SBA), mas deslocando-se apenas pelo litoral, sem atingir nenhuma área no interior. Neste grupo observamos a baixa pressão associada à frente deslocando-se para leste e a alta pressão no Atlântico Sul mais intensa que nos grupos anteriores. Quando o sistema chega no sul da Bahia, nota-se através do campo de OLR que há um novo sistema no sul do Brasil, e,

anomalia positiva mais forte sobre o Sudeste (Figura 4.24 i). No caso dos sistemas que atingem o sul da BA apenas pelo litoral os padrões de altas e baixas não ficam configurados como em todos os grupos estudados anteriormente.

Quanto à advecção de temperatura (Figura 4.25 g-i), nos casos dos sistemas que atingiram todas as áreas (Rota 2/SE, CO e SBA) e aqueles que chegam até o sul da BA pelo litoral observa-se que a advecção fria se intensifica no dia do evento, devido ao anticiclone que transporta ar mais frio para o continente, e nota-se um outro sistema sobre a Argentina.

Na configuração do dia inicial do grupo referente aos sistemas que chegaram até o sul da BA (Figura 4.25 g) observa-se que a circulação anticiclônica sobre o Atlântico Sul está mais deslocada para oeste. Observa-se que parte da circulação anticiclônica no oeste da América do Sul desloca-se para leste atingindo o Estado de Mato Grosso do Sul. Este grupo é o único em que tal circulação anticiclônica está mais adentro do continente brasileiro. No dia do evento nota-se um escoamento mais zonal em latitudes médias que nos demais grupos (Figura 4.25 i).

#### 4.3.7 – Discussão Comparativa

As principais diferenças de PNM e anomalia de OLR entre os grupos referentes ao Sul, Sudeste e SAS e oceano, no dia em que o sistema foi identificado (dia inicial) podem ser vistas na Figura 4.30, a qual mostra a diferença no campo da PNM entre os grupos Rota 1/Sul e SAS e oceano, Rota 1/SE e SAS e oceano. Na comparação do grupo das frentes que afetam apenas o sul da América do Sul e vão para o oceano, com o grupo dos casos que atingem a Região Sul do Brasil, (Figura 4.30 a) são observadas para este último grupo: pressões ligeiramente mais baixas estendendo-se até o Estado de Santa Catarina e pressão mais alta nas latitudes médias do Atlântico Sul. Esta característica propicia o avanço da frente até o sul do Brasil, comparativamente àquelas que vão para o oceano e não se deslocam sobre o país. A diferença de OLR mostra

mais convecção em uma banda NW-SE no grupo das frentes que se deslocam para o sul do Brasil, comparativamente às que vão para o oceano.

Em relação às diferenças com o grupo do Sudeste, o que se observa (Figura 4.30 b) são pressões mais baixas no Atlântico Sul desde o leste da Região Sudeste, em toda a Região Sul e a alta na retaguarda do sistema sobre o Pacífico Sul a oeste dos Andes ligeiramente mais intensa, condições propícias ao avanço do sistema frontal. Há também maiores valores de anomalias negativas de OLR sobre o oceano e grande parte do Brasil, indicando maior cobertura de nuvens convectivas no caso do grupo que se desloca até o SE pelo litoral (Figura 4.30b). Isso é consistente com a pressão mais baixa nessa região. Neste grupo não são observadas anomalias positivas de OLR associadas possivelmente à subsidência como no grupo anterior (Figura 4.30 a).

Quando fazemos a diferença dos casos que avançaram para o Sudeste pelo interior (Rota 2/SE e CO) e as frentes que não chegaram a atingir o Brasil (SAS e oceano), no dia em que elas foram identificadas (Figura 4.30 d), notamos pressões mais baixas em todo o centro-sul do país, atingindo inclusive os estados da Região Centro-Oeste, e, a alta pressão pós-frontal um pouco mais intensa (Figura 4.30 d). Em relação ao grupo que atinge todas as áreas estudadas, o que pode-se observar são pressões bem mais baixas no Atlântico Sul, ou seja, a alta desintensificada e pressões mais altas no sul da América do Sul. Para os casos que avançam para o sul da BA com deslocamento pelo litoral (Rota 1/SBA) nota-se uma área com pressões mais altas que se estende desde o Atlântico Sul até a Região Sudeste do Brasil. Pressões mais baixas também são notadas ao largo da Região Sul, associadas ao sistema frontal, ou seja, a baixa pressão associada à frente fria é mais intensa nos casos de sistemas que chegaram até o sul da BA pelo litoral. Este último grupo quando comparado aos demais é o que apresenta essa baixa pressão mais intensa. O rápido deslocamento dessa baixa pressão e a Alta no Atlântico Sul mais intensa faz com que a frente desloque-se mais rapidamente para leste.

Nos grupos dos sistemas que chegam ao sul da Bahia, quando o sistema avança pelo litoral parece se deslocar mais rápido do que quando avança pelo interior. No caso Rota 1/SBA, no dia do evento observa-se que a banda de nebulosidade já está próxima a Sergipe e Alagoas (Figura 4.24 i). No caso que passa por todas as áreas quando se desloca pelo interior (Rota 2/SE, CO e SBA), no dia do evento a anomalia negativa de OLR, associada ao sistema frontal está mesmo sobre o sul da BA (Figura 4.24 f). Através do escoamento em 925 hPa observa-se que a frente fria posiciona-se mais ao norte quando segue uma trajetória litorânea.

Em baixos níveis, no dia inicial nota-se em todos os grupos a confluência do vento associada à frente no nordeste da Argentina e um escoamento de norte na região do jato em baixos níveis a leste dos Andes. O grupo que apresenta diferença mais significativa no dia inicial em relação aos demais é aquele em que os sistemas deslocam-se por todas as áreas (Rota 2/SE, CO e SBA) (Figura 4.25 d-f). Neste grupo observa-se um outro sistema frontal na altura do litoral da Região Sudeste com uma banda convectiva que pode ser vista na Figura 4.24 d. Este grupo é o que apresenta o escoamento de norte na região do jato de baixos níveis menos intenso já a partir do dia inicial. No caso dos sistemas que atingem o sul da BA apenas pelo litoral as altas e baixas não ficam configuradas como em todos os grupos estudados anteriormente.

Em um sistema frontal, na retaguarda, com o ar frio, há máxima advecção negativa de temperatura (advecção fria) e adiante da frente ocorre a máxima advecção positiva de temperatura (advecção quente). Através do termo da advecção de temperatura da equação de Sutcliff, sabe-se que a advecção fria é favorável a anticiclogênese e advecção quente à ocorrência de ciclogênese. Este termo é importante principalmente para o deslocamento do sistema que deve se movimentar em direção a tendência de pressões mais baixas, ou seja, para a região onde ocorre a advecção quente. Em todos os grupos é notável a advecção negativa de temperatura sobre o norte da Argentina e Rio Grande do Sul. Isto pode estar relacionado com a presença da Baixa do Chaco e o

escoamento de norte vindo da Amazônia. Embora esse escoamento de norte transporte ar quente e úmido, nessa região onde ocorre a advecção fria as temperaturas estão ainda mais altas, portanto, esse ar vindo da Amazônia traz temperaturas menos elevadas e conseqüentemente causando advecção fria nessas áreas. Tal advecção é observada desde o dia em que o sistema é identificado na sua posição mais ao sul até o dia em que chega à região especificada (SAS, Sul e Sudeste). No entanto, a advecção fria que está na retaguarda do sistema frontal é mais intensa no dia inicial. Com o avanço do sistema essa advecção perde a intensidade, principalmente nos grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul e Rota1/SE, predominando a advecção quente de temperatura na dianteira do sistema. Nos casos em que os sistemas atingiram todas as áreas (Rota 2/SE,CO e SBA) e aqueles que chegam até o sul da BA pelo litoral observa-se que a advecção fria se intensifica no dia do evento, devido ao anticiclone que transporta ar mais frio para o continente, e nota-se um outro sistema sobre a Argentina nesses dois grupos.

Ainda em baixos níveis, quando comparamos os grupos que chegam até o Sudeste, porém um pelo litoral (Rota 1/SE) (Figura 4.24 gi) e o outro pelo interior (Rota 2/SE e CO) (Figura 4.25 a-c), no dia inicial+1 notamos a posição do sistema frontal, a circulação anticiclônica na retaguarda e o cavado associado deslocados para leste. Nos casos em que avançam apenas pelo litoral o anticiclone desloca o sistema para o oceano e este se posiciona mais ao norte que nos casos em que seguem uma trajetória continental.

Em níveis médios (500 hPa), as similaridades entre todos os grupos são a existência de um cavado sobre o Brasil central, circulação anticiclônica sobre o oeste da América do Sul e sobre o Atlântico Sul. As diferenças significativas se referem à intensidade e posição do cavado sobre o Brasil central: no caso Sul e Sudeste está mais amplificado do que o caso SAS e oceano e a crista na retaguarda menos intensa, o que favorece o deslocamento do sistema. Outra diferença é relacionada à posição do centro anticiclônico no Oceano Atlântico, que está mais deslocado para leste no caso SE. O grupo Rota 2/SE, CO e SBA

é o que apresenta no dia inicial advecção de vorticidade negativa mais intensa sobre o oceano na altura de SP, possivelmente relacionada a um outro sistema frontal na região. Neste grupo também o cavado sobre o centro-sul do Brasil está mais amplificado e com eixo ligeiramente mais inclinado para oeste que os demais grupos estudados.

Neste nível, quando comparamos os casos dos sistemas que chegam ao Sudeste apenas pelo litoral e aqueles que avançam pelo litoral atingindo também o interior, as principais diferenças encontradas são: no dia inicial observa-se o cavado entre os dois centros anticiclônicos mais intensificado e o cavado associado ao sistema frontal mais suavizado no grupo Rota 1/SE; no dia do evento nota-se advecção de vorticidade negativa menos intensa que nos casos em que avançam também pelo interior. Enquanto para os grupos que chegam ao sul da Bahia, um pelo interior (Rota 2/SE, CO e SBA) e outro pelo litoral (Rota 1/SBA), observa-se que tanto o cavado associado à frente fria quanto o cavado que atua sobre o Brasil Central encontram-se mais amplificados quando o sistema avança pelo interior.

Em altos níveis fica evidente em todos os grupos analisados que a circulação de verão sobre a América do Sul possui algumas características marcantes, como Alta da Bolívia e um cavado sobre a costa NE do Brasil. A principal diferença entre os grupos é com relação ao escoamento nas latitudes médias e o posicionamento do Cavado do Atlântico (CA) à leste do Nordeste.

No caso SAS e oceano, o escoamento em altos níveis em latitudes médias é mais zonal que nos outros cinco casos, em todos os dias considerados. No caso SE o cavado a sudeste da América do Sul se amplifica mais no dia inicial +1 e no dia do evento. No caso Sul o eixo do CA está localizado mais próximo à costa do que no caso SE, no dia inicial. O eixo do cavado encontra-se mais inclinado nos casos dos sistemas que chegam até o sul da BA seguindo uma trajetória litorânea e o centro do anticiclone boliviano atinge sua posição mais ao sul, aproximadamente em 20°S no dia inicial. No dia em que o sistema

chega à área especificada o eixo do cavado está mais afastado para leste, permitindo que o sistema atue no sul da Bahia. No grupo das frentes que passam por todas as áreas, chegando inclusive ao sul da Bahia nota-se uma pequena inclinação para oeste no dia inicial. No entanto, com o avanço do sistema o CA desloca-se e no dia do evento inclina-se para leste. Este é o único grupo que apresenta essa característica.

Observa-se que nos grupos em que os sistemas avançam para norte há um deslocamento do CA, o qual na maioria dos casos afasta-se da costa leste do Nordeste brasileiro. Esse posicionamento, e a intensidade do cavado em latitudes médias podem ser associados também ao deslocamento dos sistemas até latitudes mais baixas no Brasil.

Ainda em altos níveis, observa-se através do geopotencial e anomalia zonal do geopotencial em 200 hPa anomalias zonais positivas de geopotencial estendendo-se desde o Uruguai até a Bolívia, passando pelo centro-sul do Brasil, ou seja, uma região de crista bem intensificada nos casos do grupo do SAS e oceano. Para os demais também observa-se essa anomalia positiva de geopotencial, no entanto para o grupo do Sul o que observa-se é uma faixa de anomalia positiva de geopotencial também se estendendo sobre o centro-sul do Brasil, mas, um pouco mais intensa e extensa (até  $\sim 20^{\circ}\text{W}$ ) em relação ao caso anterior. Pode-se observar na Figura 4.22 que para os três primeiros grupos estudados (SAS e oceano, Sul e Sudeste) há uma configuração do tipo dipolo defasado, em longitude, no Pacífico e anomalias negativas de geopotencial associado ao cavado do Nordeste. No dia seguinte e no dia do evento os mesmos padrões ainda se mantêm, no entanto para os grupos do Sul e Sudeste o que pode ser observado é o avanço do cavado ao sul da América do Sul associado ao avanço do sistema frontal.

Observa-se em todos os dias analisados para o grupo Rota 2/SE e CO uma configuração de um trem de ondas que vai desde o Pacífico Sul até o leste do Nordeste. Para os demais grupos (Rota 1/SBA e Rota 2/SE, CO e SBA) não

fica evidente essa configuração. O grupo de sistemas que atingiram todas as áreas foi o único em que não observam-se anomalias positivas no Sul do país no dia inicial. Nota-se também que no dia do evento há uma intensificação do cavado a oeste da América do Sul, característica não observada nos demais grupos estudados.

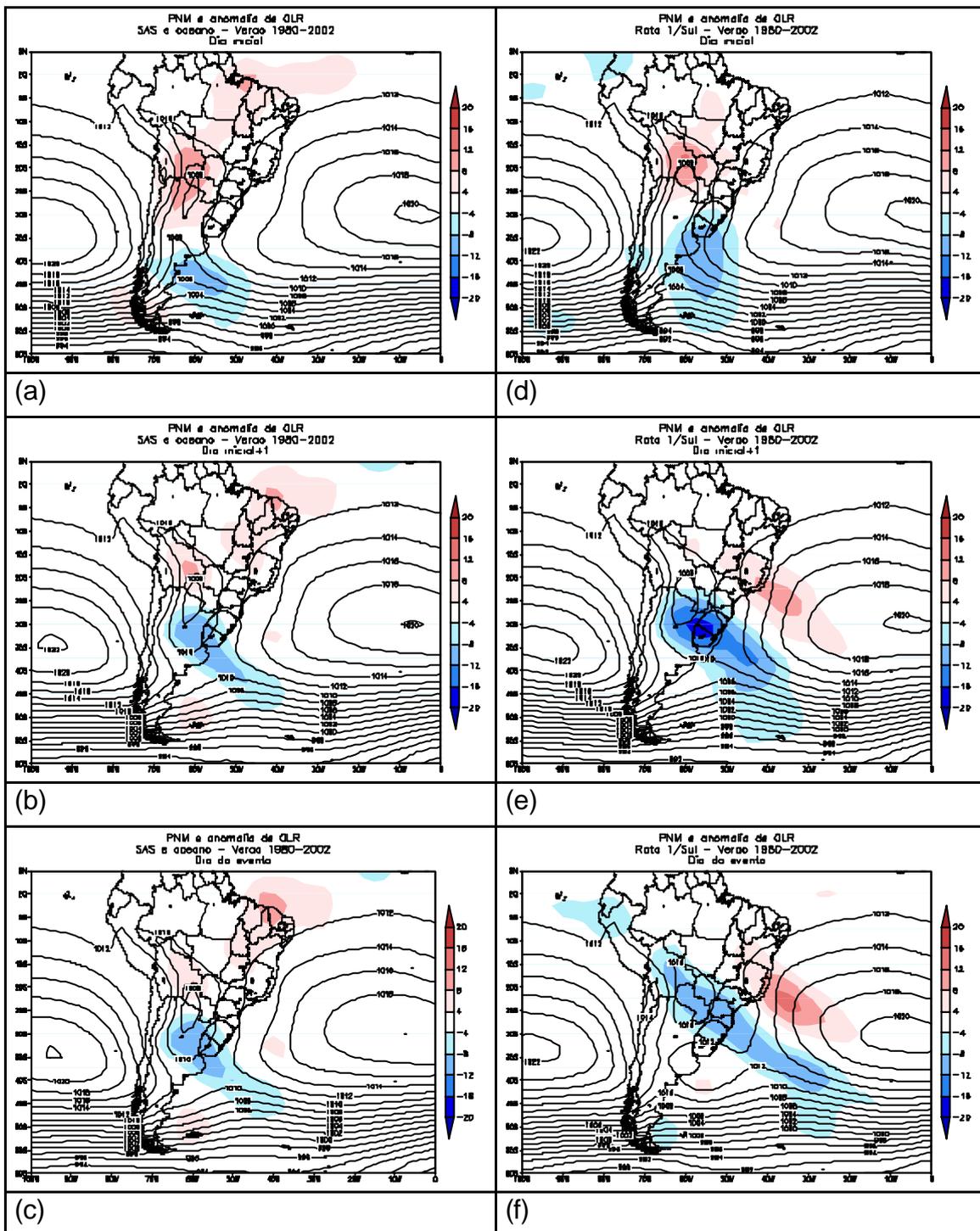


FIGURA 4.18 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o verão.

(continua)

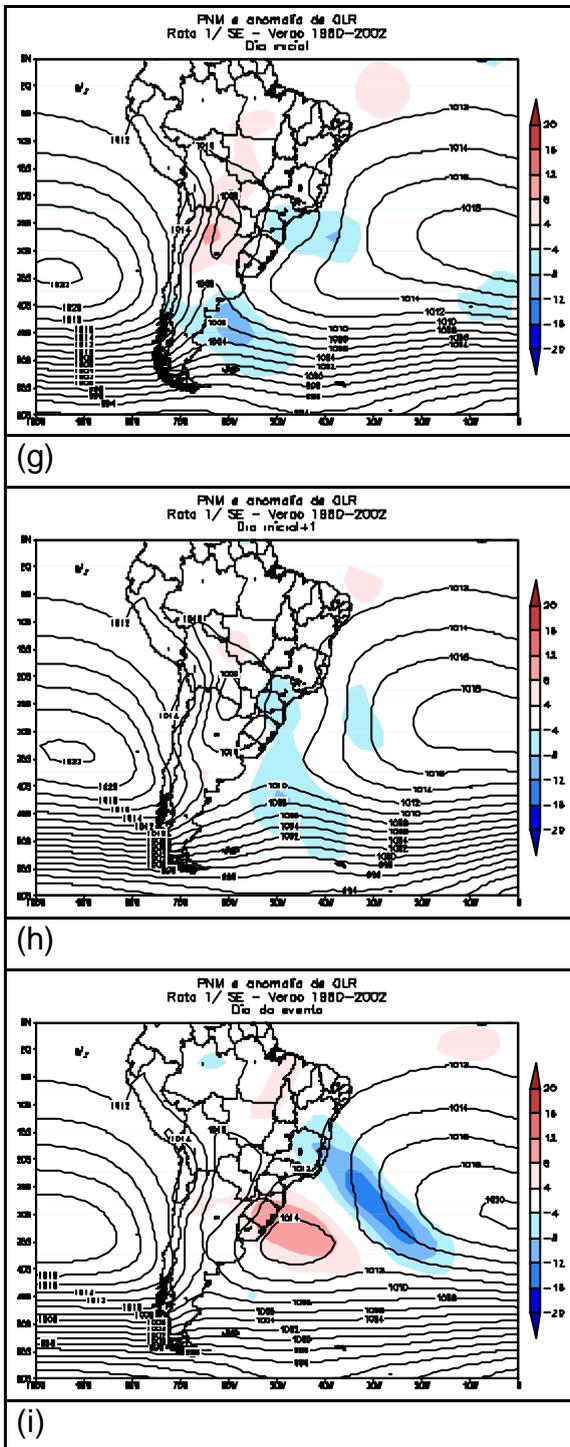


FIGURA 4.18 – Conclusão.

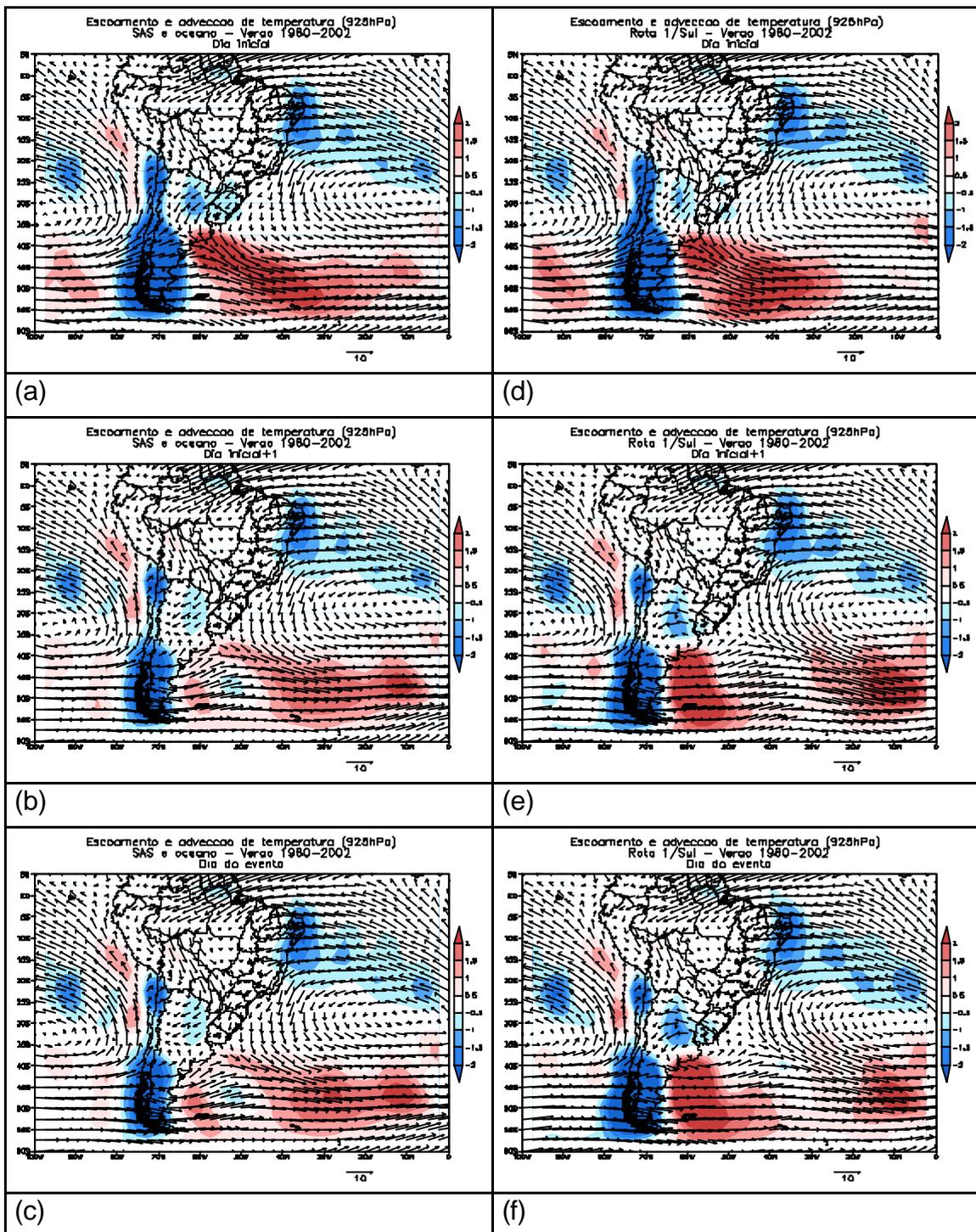
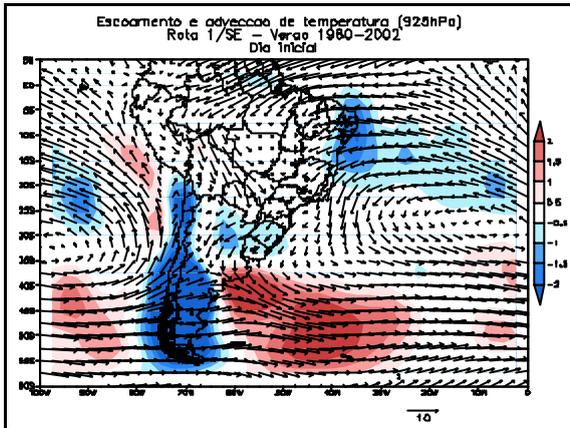
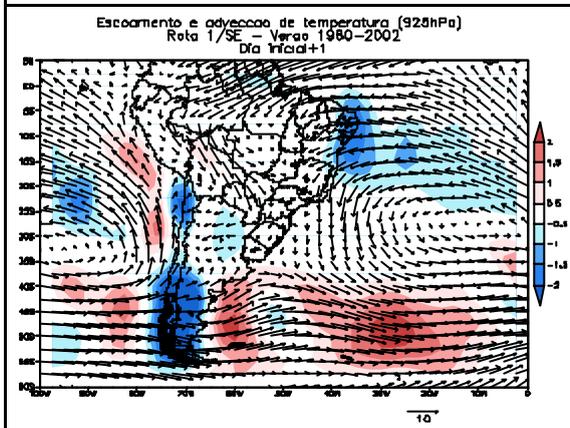


FIGURA 4.19 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura (°C/dia) (sombreado) em 925 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h), e dia do evento (c,f,i) para o verão.

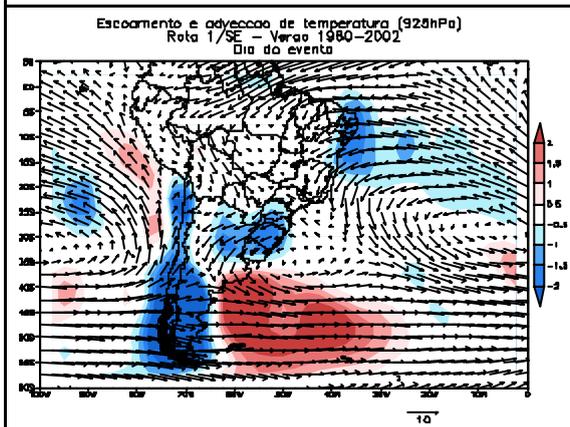
(continua)



(g)



(h)



(i)

FIGURA 4.19 – Conclusão.

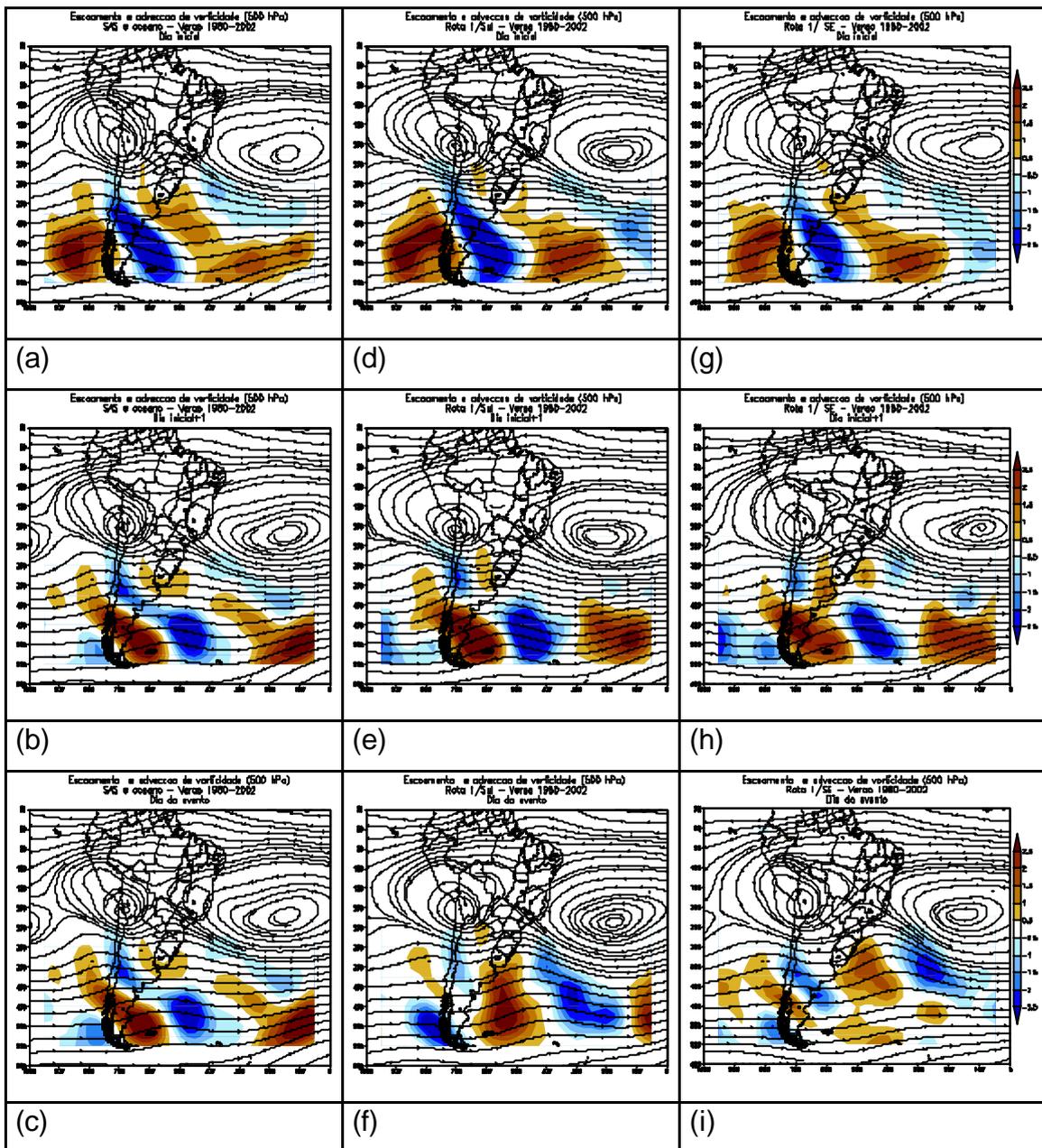


FIGURA 4.20 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) (sombreado) em 500 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

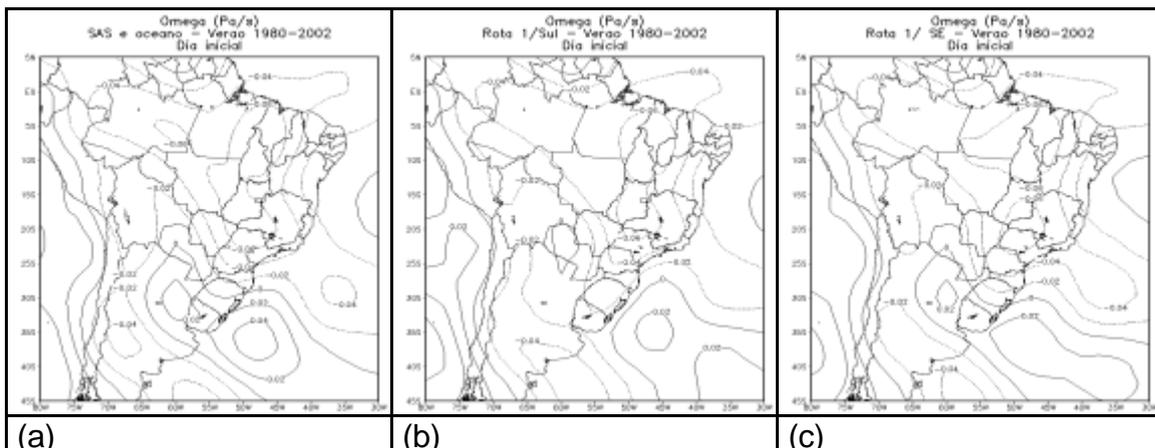


FIGURA 4.21 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) SAS e oceano; (b) Rota 1/Sul; (c) Rota 1/SE para dia inicial para o verão.

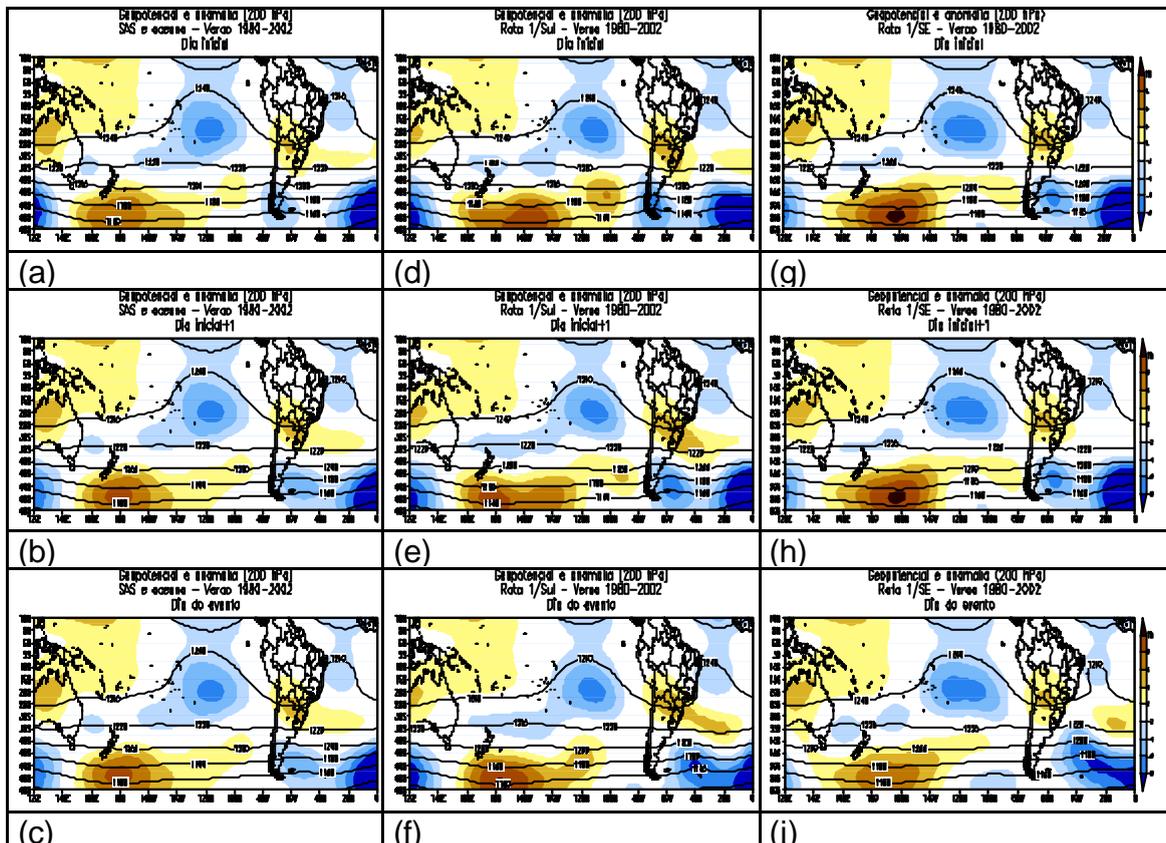


FIGURA 4.22 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

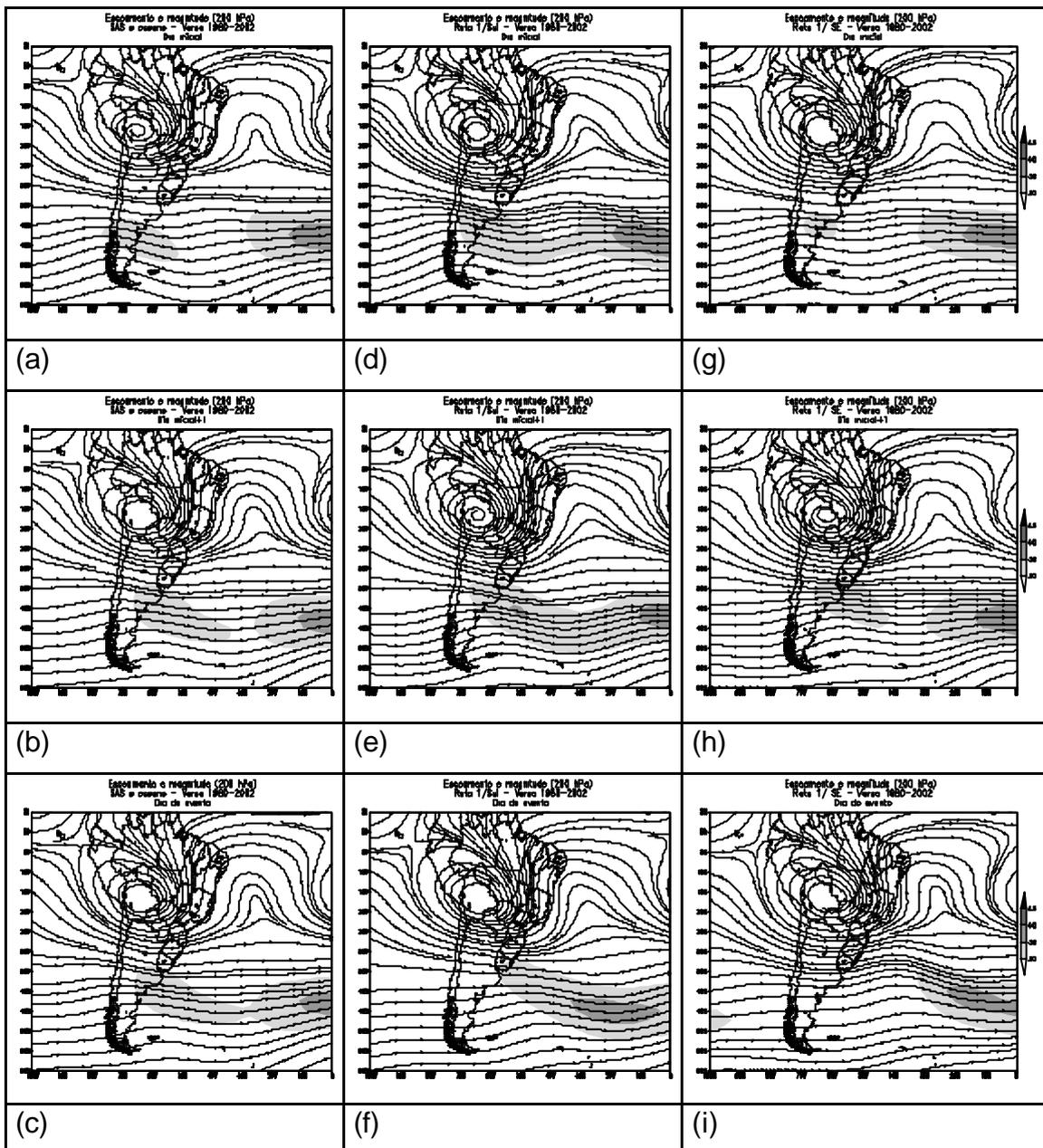


FIGURA 4.23 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: SAS e oceano; Rota 1/Sul; Rota 1/SE para dia inicial (a,d e g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

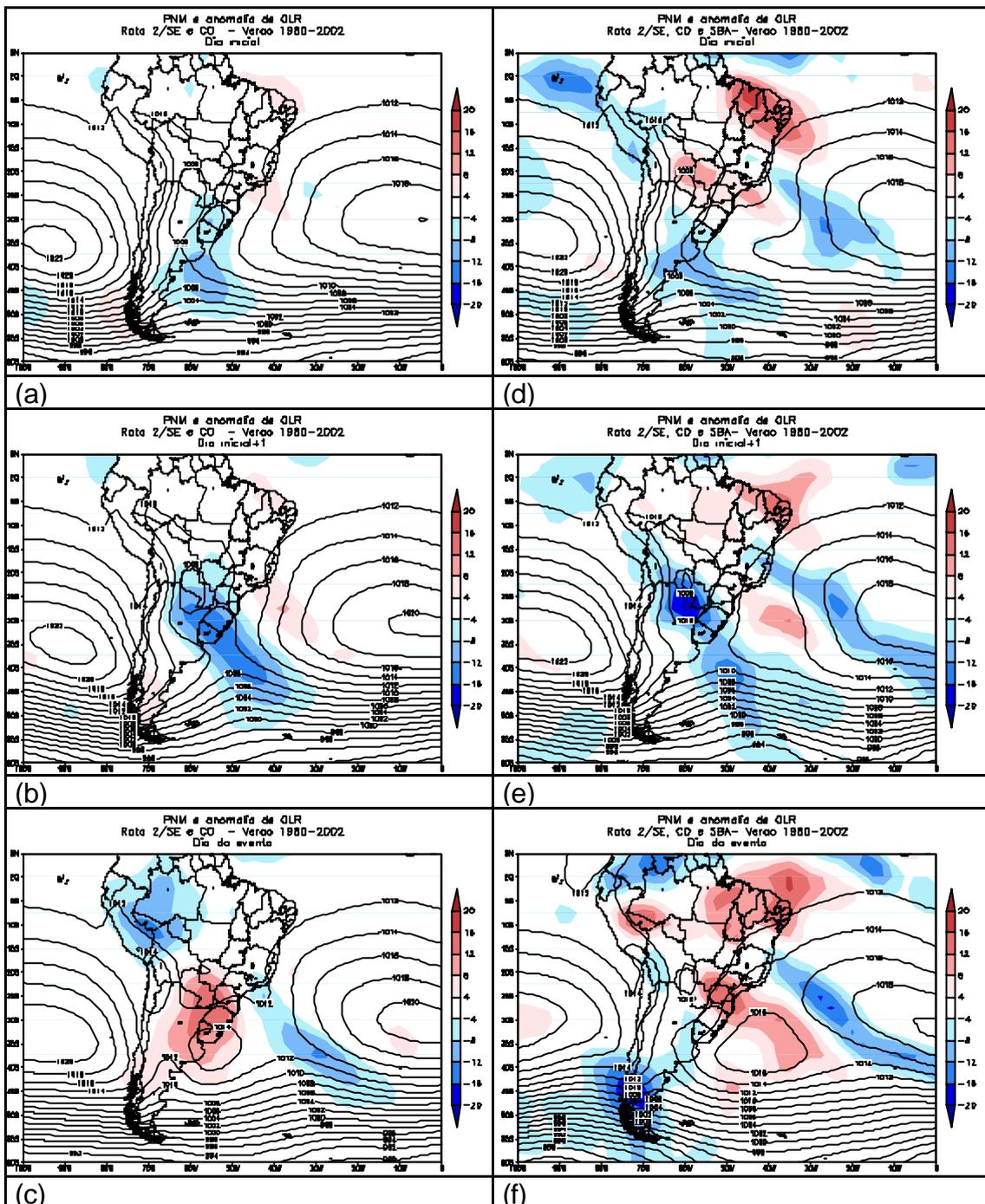


FIGURA 4.24 - Compostos da PNM (hPa) (linhas contínuas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

(continua)

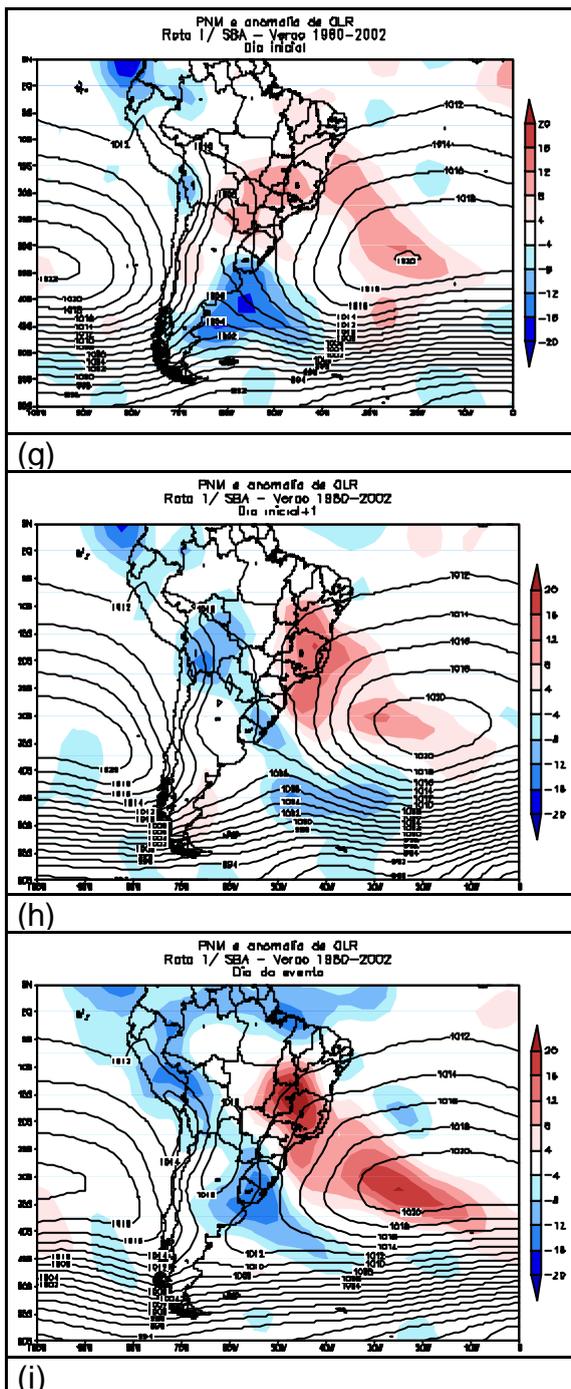


FIGURA 4.24 - Conclusão.

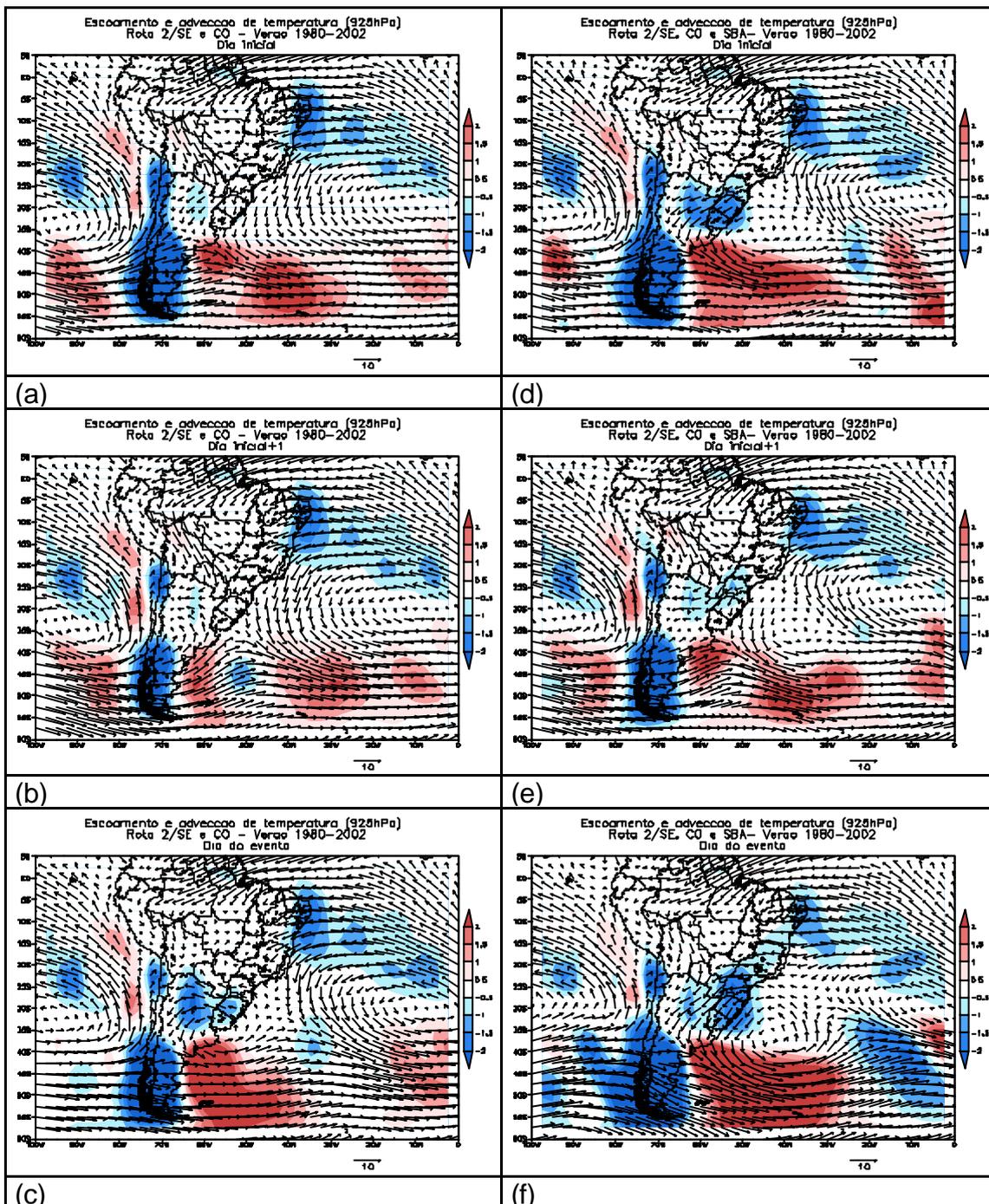


FIGURA 4.25 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de temperatura (°C/dia) (sombreado) em 925 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

(continua)

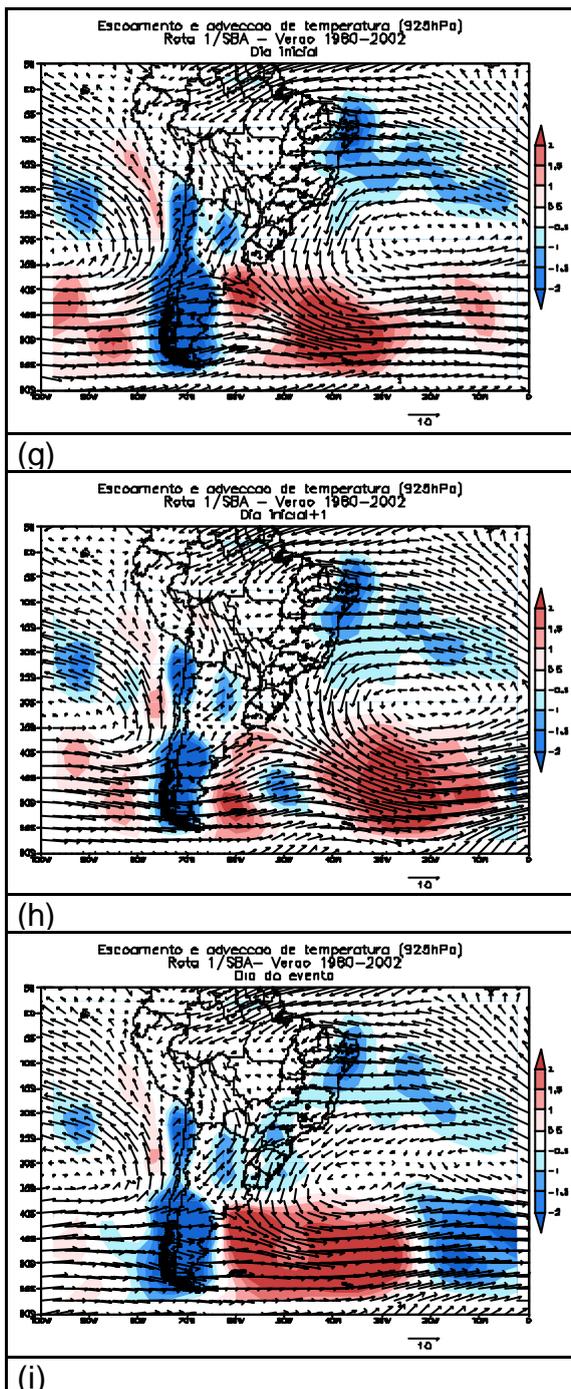


FIGURA 4.25 - Conclusão.

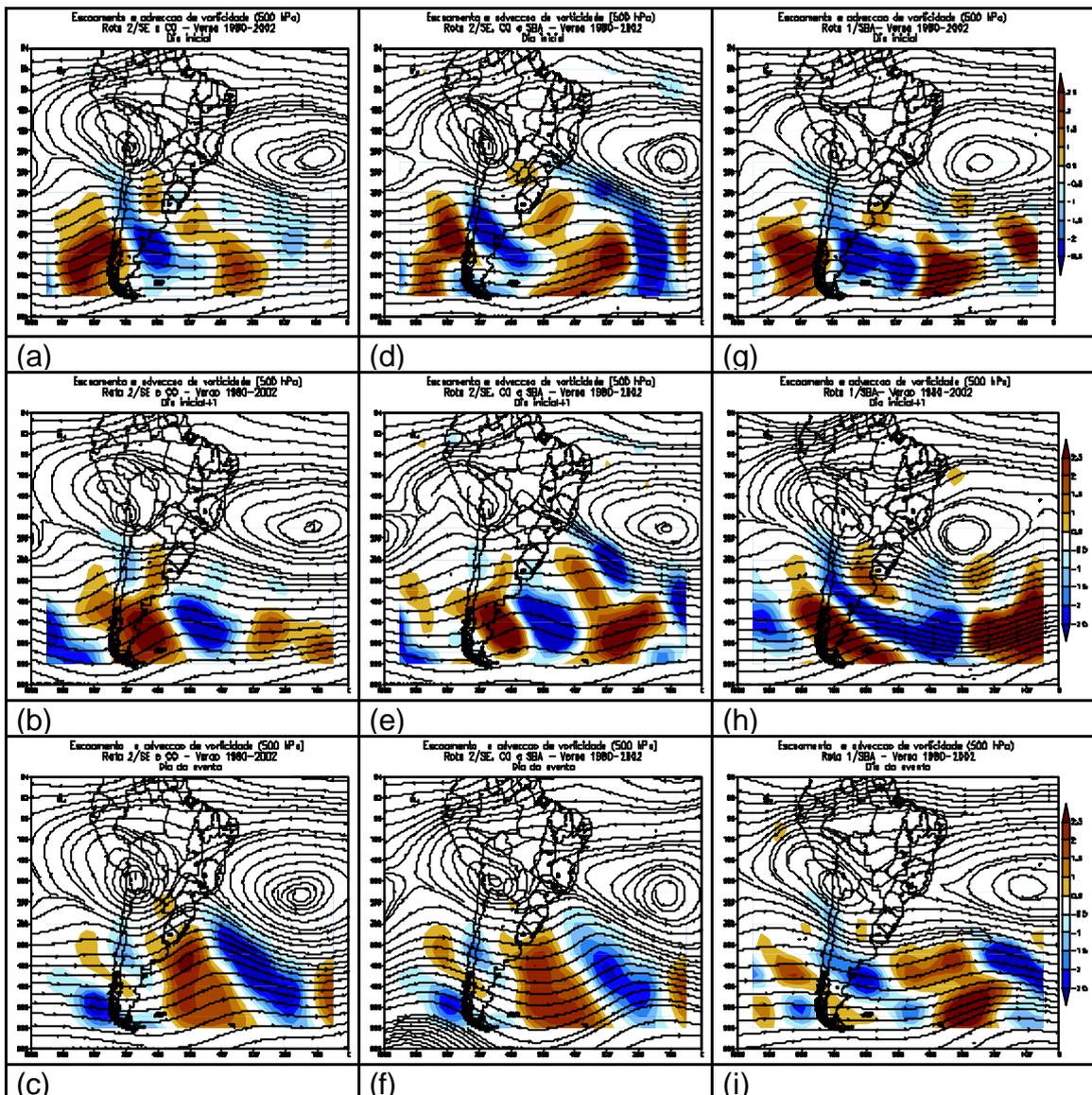


FIGURA 4.26 - Compostos do escoamento (m/s) e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

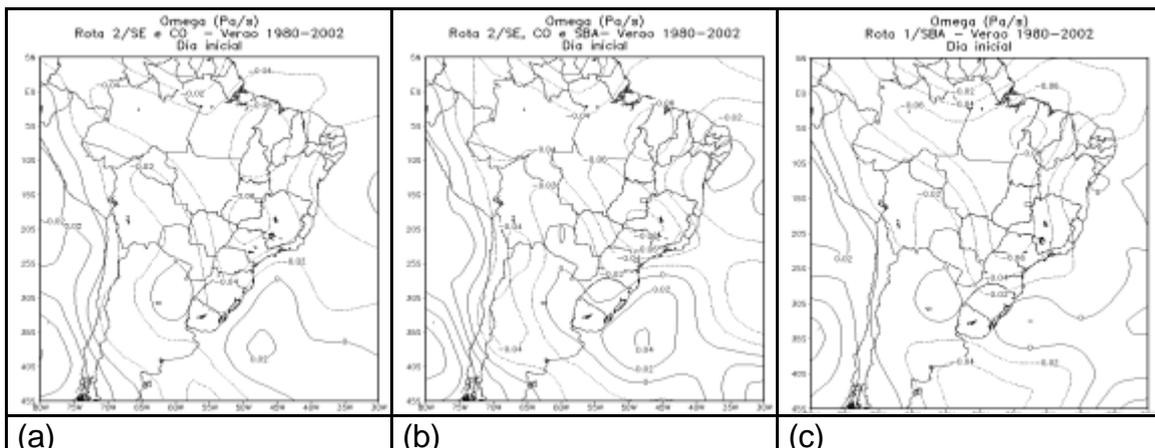


FIGURA 4.27 - Compostos de omega (Pa/s) em 500 hPa para os grupos: (a) Rota 2/SE e CO; (b) Rota 2/SE, CO e SBA; (c) Rota 1/SBA para dia inicial para o verão.

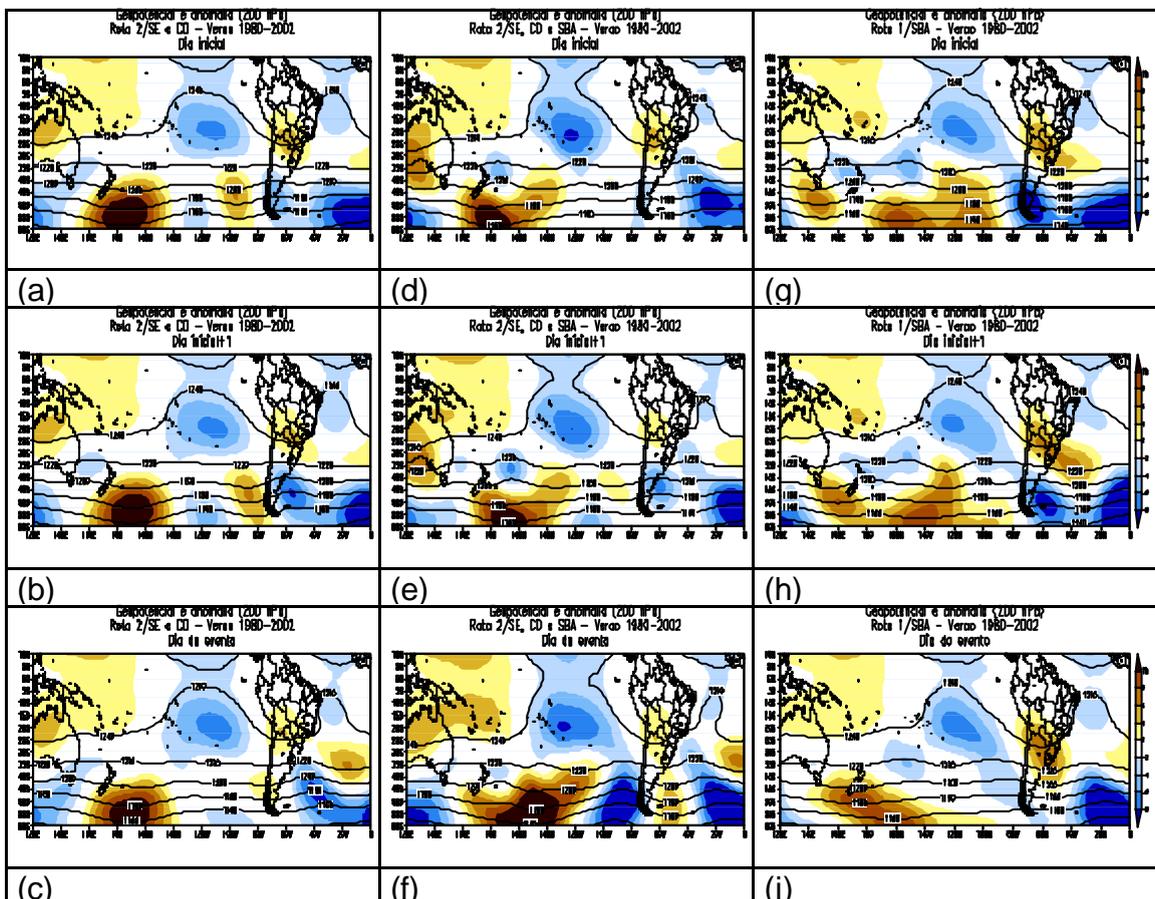


FIGURA 4.28 - Compostos do geopotencial (m) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

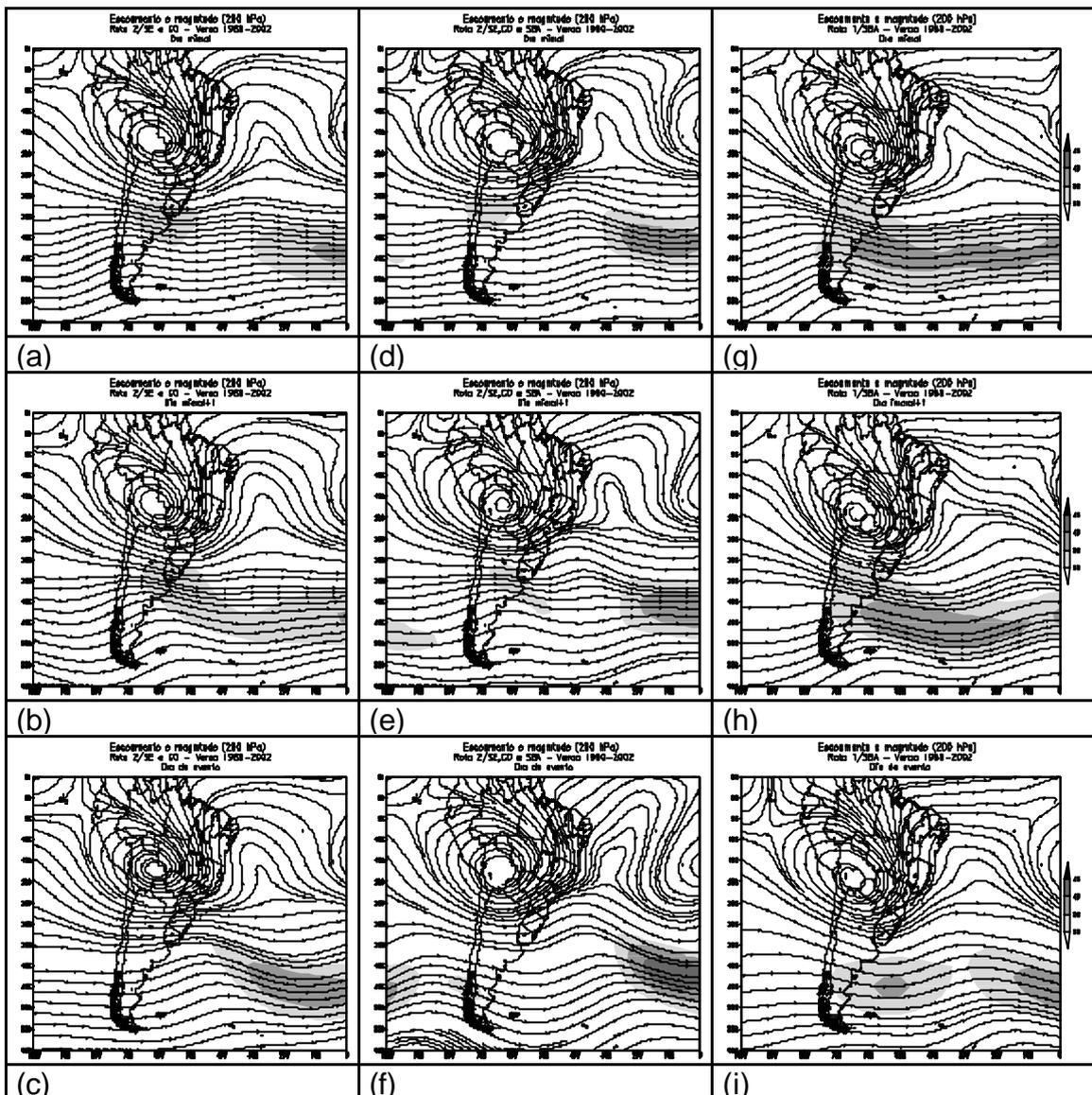


FIGURA 4.29 - Compostos do escoamento (m/s) e magnitude do vento (m/s) (sombreado) em 200 hPa para os grupos: Rota 2/SE e CO; Rota 2/SE, CO e SBA; Rota 1/SBA para dia inicial (a,d,g), dia inicial+1 (b,e,h) e dia do evento (c,f,i) para o verão.

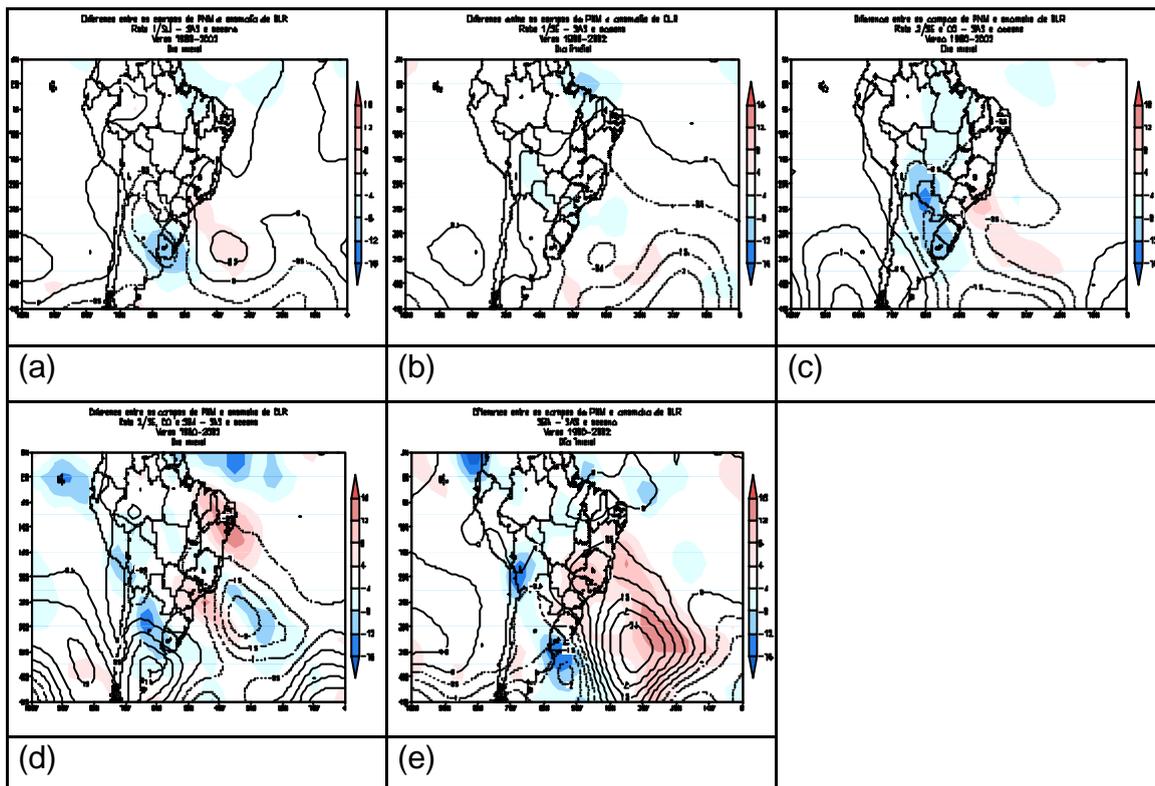


FIGURA 4.30 - Diferença dos campos de PNM (hPa) (isolinhas) e anomalia de OLR ( $W/m^2$ ) (sombreado) entre os grupos (a) Rota 1/Sul - SAS e Oceano; (b) Rota 1/SE - SAS e Oceano; (c) Rota 2/SE e CO - SAS e Oceano; (d) Rota 2/SE, CO e SBA - SAS e Oceano; (e) Rota 1/SBA - SAS e Oceano no dia inicial para o verão.

#### 4.3.8 – Diferenças entre Verão e Inverno

Algumas diferenças entre o verão e inverno foram notadas nas características atmosféricas dos compostos. Em todos os grupos, no dia em que os sistemas encontram-se na sua posição mais ao sul da América do Sul (dia inicial) a Alta Pressão do Atlântico Sul é mais intensa (Figura 4.31) e se posiciona mais a oeste; a região da baixa associada ao sistema estende-se mais longitudinalmente e o centro da Alta do Pacífico Sul se desloca em uma posição mais ao norte (entre  $35^{\circ}$ - $25^{\circ}$ S), no inverno, comparado ao verão. Essas diferenças são consistentes com as características climatológicas mencionadas em Satyamurty et. al., 1998.

Na Figura 4.31 nota-se que para a latitude de 30°S e de 50°W até 30°W (longitudes próximas ao continente) no inverno para o grupo SAS e oceano a pressão está mais alta que nos demais grupos, ou seja, fator que pode interferir no avanço dos sistemas frontais. No grupo Rota 1/Sul são encontradas pressões mais baixas nessas longitudes. No verão nota-se que pressões mais baixas entre 40°W e 15°W ocorrem no grupo dos sistemas que avançam por todas as áreas.

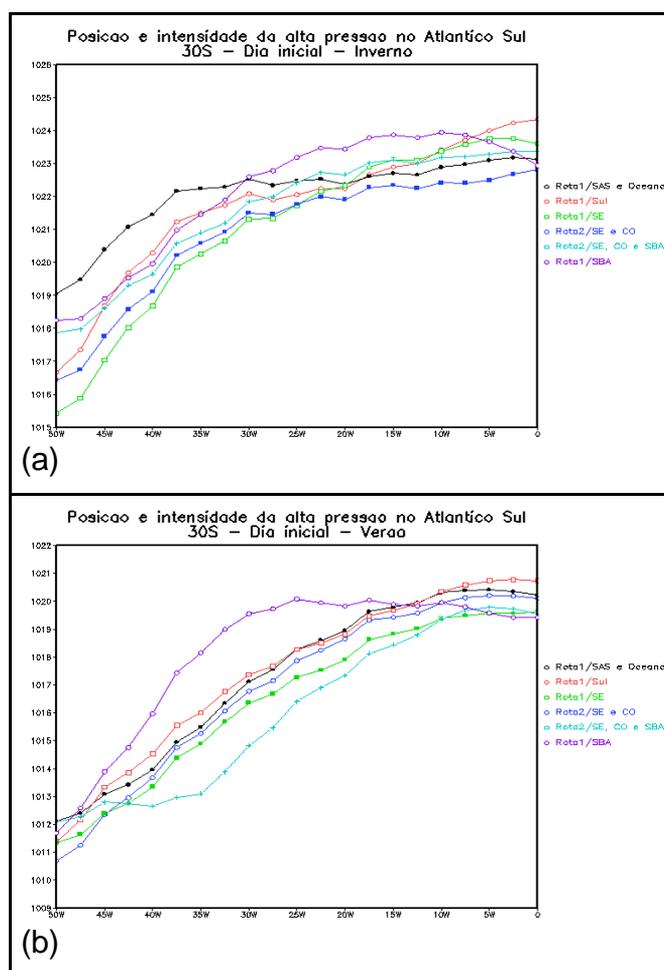


FIGURA 4.31 - Posição e intensidade da alta pressão sobre o Atlântico Sul no dia inicial para os grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/SE, Rota 2/SE e CO, Rota 2/SE, CO e SBA e Rota 1/ SBA no inverno (a) e verão (b) na latitude de 30°S.

No grupo SAS e oceano (Figura 4.6 a,b,c), através da anomalia de OLR nota-se no dia inicial até o dia do evento, anomalia de OLR positiva desde o Mato Grosso do Sul passando pelo Estado de São Paulo e atingindo também a Região Sul do Brasil, no inverno, sendo que tal característica não foi encontrada nos compostos para o verão. Neste grupo, ainda em relação à anomalia de OLR observa-se que a anomalia negativa nos casos do inverno encontra-se no dia do evento sobre o oceano, atingindo poucas áreas do continente, enquanto para o verão a anomalia é mais intensa no continente sobre o norte da Argentina, Uruguai e extremo-sul do RS.

Ao comparar as duas estações do ano para o grupo Rota 1/Sul, percebe-se que a partir do dia inicial +1 até o dia do evento a anomalia negativa de OLR, no verão (Figura 4.18 d,e,f) , tem uma orientação NW-SE mais intensa sobre o continente, organizando-se como a banda frontal. Isto é consistente com o regime de verão, quando a atividade convectiva é mais intensa do que no inverno. No verão o continente está mais quente e com a chegada da frente fria, o ar mais quente ao norte sofre ascensão resultando em pressão relativamente baixa em baixos níveis. O ar ascendente torna-se saturado e ocorre considerável desenvolvimento de nuvens com precipitação associada. Quanto à baixa pressão associada ao sistema observa-se, no inverno, o deslocamento para leste com os seus centros posicionados nas mesmas longitudes que nos casos do verão, mas com pressões ligeiramente mais baixas no verão. No inverno não observa-se um núcleo associado à alta pressão na retaguarda do sistema frontal, e sim pressões mais altas cruzando os Andes, que no dia do evento está posicionada sobre o Uruguai.

No grupo Rota 1/SE, quanto à anomalia de OLR (Figuras 4.6 e 4.18 g,h,i), as diferenças entre o inverno e o verão são: a) no dia inicial observa-se no inverno anomalia positiva próximo a São Paulo, associada à subsidência. Enquanto no verão há anomalia negativa, devido à convecção; b) no inverno a anomalia negativa tem uma orientação NW-SE que se estende de Mato Grosso do Sul até São Paulo, enquanto no verão a banda de nebulosidade aparece com uma

orientação mais meridional e chega atingir os estados de Minas Gerais e Espírito Santo com valores máximos sobre o oceano.

No caso dos sistemas que chegam ao sul da Bahia pelo litoral a banda de nebulosidade que estaria associada à frente fria tanto no verão quanto no inverno não é observada sobre o continente, e sim resquícios sobre o oceano (Figuras 4.12 e 4.24 g,h,i).

Em baixos níveis, para os grupos SAS e oceano, Rota 1/Sul e Rota 1/SE, no verão não foi observado tão claramente a advecção fria na retaguarda do sistema frontal, como no inverno, pois naquela estação o contraste entre as massas de ar é bem pequeno. Uma característica notável na comparação do verão com o inverno em relação ao cavado associado à frente é que nos meses do inverno o cavado está próximo ao continente (a leste da Região Sul). No verão o cavado está menos pronunciado (ao sul de 35°S) e afastado para o mar (próximo a 40°W).

No grupo Rota 1/SBA, Figura 4.12 g-i, nota-se que nos meses de inverno a confluência dos ventos no dia do evento é melhor configurada do que no verão, devido à circulação anticiclônica na retaguarda do sistema estar mais intensa. Neste grupo, no inverno a advecção negativa de temperatura abrange grande parte da Região Nordeste. Enquanto, no verão se restringe somente sobre o leste do Nordeste. A possível explicação para a advecção fria atingir também o interior desta Região no inverno é que nesta estação a circulação da Alta Subtropical do Atlântico está mais próxima do continente. Isto resulta em um escoamento de leste mais forte em direção ao continente e uma maior penetração também da brisa marítima sobre o continente.

Em níveis médios, foi notado que advecção de vorticidade positiva e negativa são mais intensas no inverno do que no verão. Através das Figuras 4.8 e 4.13, escoamento e advecção de vorticidade em 500 hPa, nota-se que no inverno há um centro anticiclônico sobre o centro-norte do Brasil e no verão dois centros

anticiclônicos, um próximo à Bolívia, reflexo da Alta que atua sobre essa região no verão, e o outro sobre o Atlântico.

A Tabela 4.4 mostra a porcentagem de sistemas frontais em relação ao tempo que demora para chegar nas regiões especificadas, no caso, as frentes que chegam ao Sudeste só pelo litoral e pelo interior e litoral (grupos Rota 1/SE e Rota 2/SE e CO). Observa-se que no verão aproximadamente 14% dos sistemas frontais chegam no Sudeste tanto pelo litoral quanto pelo interior em um dia, ou seja, inicia-se em um determinado dia e chega no dia seguinte. Essa porcentagem é máxima nos dois grupos quando o tempo de deslocamento dos sistemas é de 3 dias. No inverno, para o grupo que tem trajetória apenas litorânea a maioria das frentes (38,9%) demora cerca de 3 dias, após ter sido detectada, para chegar ao Sudeste. Enquanto para aqueles casos dos sistemas frontais que avançam também pelo interior a maior parte das frentes frias (37,4%) chega ao Sudeste 2 dias depois do dia que foi detectada. No verão nota-se que há mais casos de frentes que demoram mais de 4 dias para chegar à região especificada.

TABELA 4.4: Porcentagem de sistemas frontais em relação ao número de dias de deslocamento para os grupos Rota 1/SE e Rota 2/SE e CO no verão e inverno.

Verão						
área/tempo (dia)	1	2	3	4	5	6
Rota 1/SE	14,4	19,2	32,7	17,3	13,5	1
Rota 2/SE e CO	14,3	27,7	38,4	13,4	5,4	0,9
Inverno						
área/tempo (dia)	1	2	3	4	5	6
Rota 1/SE	13,9	27,8	38,9	16,7	0	2,8
Rota 2/SE e CO	16,2	37,4	25,3	16,2	3	1

## CAPÍTULO 5

### ESTUDO DE CASOS

Neste Capítulo são apresentadas as análises de dois estudos de casos, um referente à precipitação intensa no verão na área 6 e outro no inverno, associado à queda de temperatura na área 8. O primeiro estudo de caso, referente ao verão, se encaixa no grupo daqueles sistemas que chegam ao Sudeste, porém com trajetória oceânica (Rota 1/SE). O segundo caso, associado à incursão de ar frio no inverno em boa parte do Brasil, está no grupo dos sistemas frontais que avançam por todas as áreas pelo litoral e interior (Rota 2/SE, CO e sul da BA).

#### 5.1 – Verão

Para o verão foi utilizado como critério para o estudo de caso a média diária da precipitação na área 6. O valor médio acumulado da precipitação mais intensa na área 6 foi de 47 mm e o caso selecionado é referente à passagem de um sistema frontal no final de dezembro de 1999 e início de janeiro de 2000 e à formação da ZCAS. Esta situação foi responsável por precipitação intensa na região do Vale do Paraíba, e em algumas localidades do Estado de São Paulo a precipitação acumulada superou a média climatológica (Climanálise, 2000).

Na cidade de São Paulo, devido a esse episódio, foi registrada a maior ocorrência de alagamentos (386) no período entre janeiro de 1999 a janeiro de 2000 (Vieira et. al, 2000). Segundo o boletim da Climanálise, os cinco primeiros dias do mês de janeiro foram marcados por fortes chuvas, que atingiram a região do Vale do Paraíba, o sul de MG e o norte de SP. A precipitação, que atingiu valores em torno de 436 mm em Campos do Jordão, representou valores 150 mm acima da média, ou seja, 50% acima da climatologia. Esta mesma anomalia positiva ocorreu em todo o sul de MG e no norte de SP.

A seguir são mostradas as imagens de satélite das 12Z, campos da PNM e precipitação, escoamento e convergência de umidade específica em 850 hPa, omega em 500 hPa, escoamento e divergência em 200 hPa para o período de 29/12/1999 até 03/01/2000. As imagens dos dias 2 e 3/01/2000 estão no horário 06Z e 18Z, pois não há imagens disponíveis para o horário das 12Z. O sistema frontal que estava sobre a Argentina no dia 29/12/1999 atingiu o litoral da região Sudeste no dia 31/12/1999, onde permaneceu estacionário até o dia 09/01/2000, organizando a ZCAS. As análises são feitas até o dia 03, pois o objetivo é analisar o sistema frontal que deu origem à ocorrência da ZCAS e às intensas precipitações.

No dia 29/12/1999 observa-se a confluência dos ventos no oceano próxima à costa da Argentina, caracterizando o sistema frontal (Figura 5.1 c) e a convergência de umidade. Acompanhando a zona frontal e sobre o norte da Argentina, sul do Paraguai e oeste do Rio Grande do Sul e do Uruguai nota-se movimento ascendente (Figura 5.1 d). Em altos níveis, Figura 5.1 e, observa-se a circulação anticiclônica associada à Alta da Bolívia deslocada para sudeste, centrada em Mato Grosso do Sul, e um cavado que se estende desde o Atlântico até a Região Nordeste do Brasil, padrão típico dos meses de verão. Na borda inferior da circulação anticiclônica observa-se a forte divergência que favorece a convergência em superfície e provoca abundante nebulosidade com forte convecção nas áreas afetadas, a qual pode ser vista através da imagem de satélite e a precipitação acumulada (Figura 5.1 a-b). Esta forte atividade convectiva também pode estar associada ao escoamento de norte em baixos níveis sobre a Bolívia e Paraguai, típica do jato em baixos níveis, como pode ser visto na Figura 5.1 f. Nota-se também no escoamento em baixos níveis e na imagem de satélite, que há outro sistema frontal sobre o oceano, próximo à região Sudeste do Brasil. Na análise dos compostos, Seção 4.3.3, foi observado que para os casos dos sistemas que chegavam ao Sudeste pelo litoral, no dia inicial, ou seja, no dia em que o sistema se encontrava no sul da América do Sul havia um outro sistema frontal atuando próximo a Região

Sudeste do Brasil e o escoamento vindo de norte favorecendo a convecção sobre o Paraguai, norte da Argentina e oeste do Rio Grande do Sul, possivelmente associado a um complexo convectivo de mesoescala.

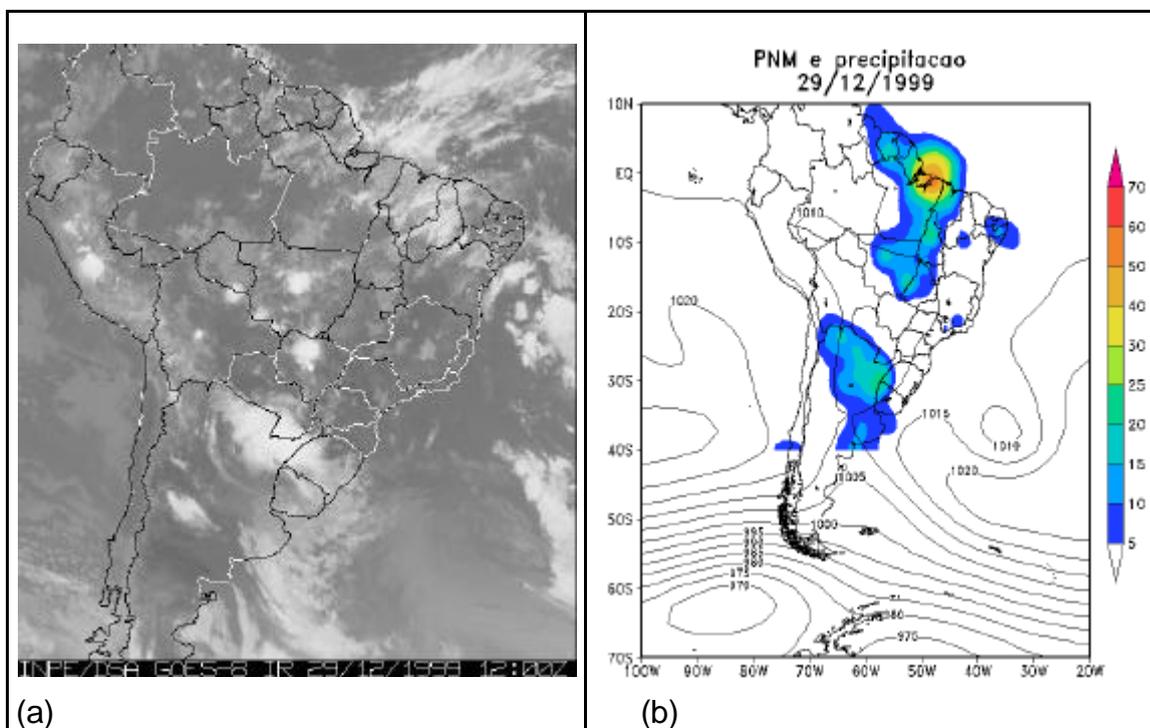


FIGURA 5.1 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa ( $\text{Pa/s}$ ); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (f) vento meridional (m/s) para o dia 29/12/1999.

(continua)

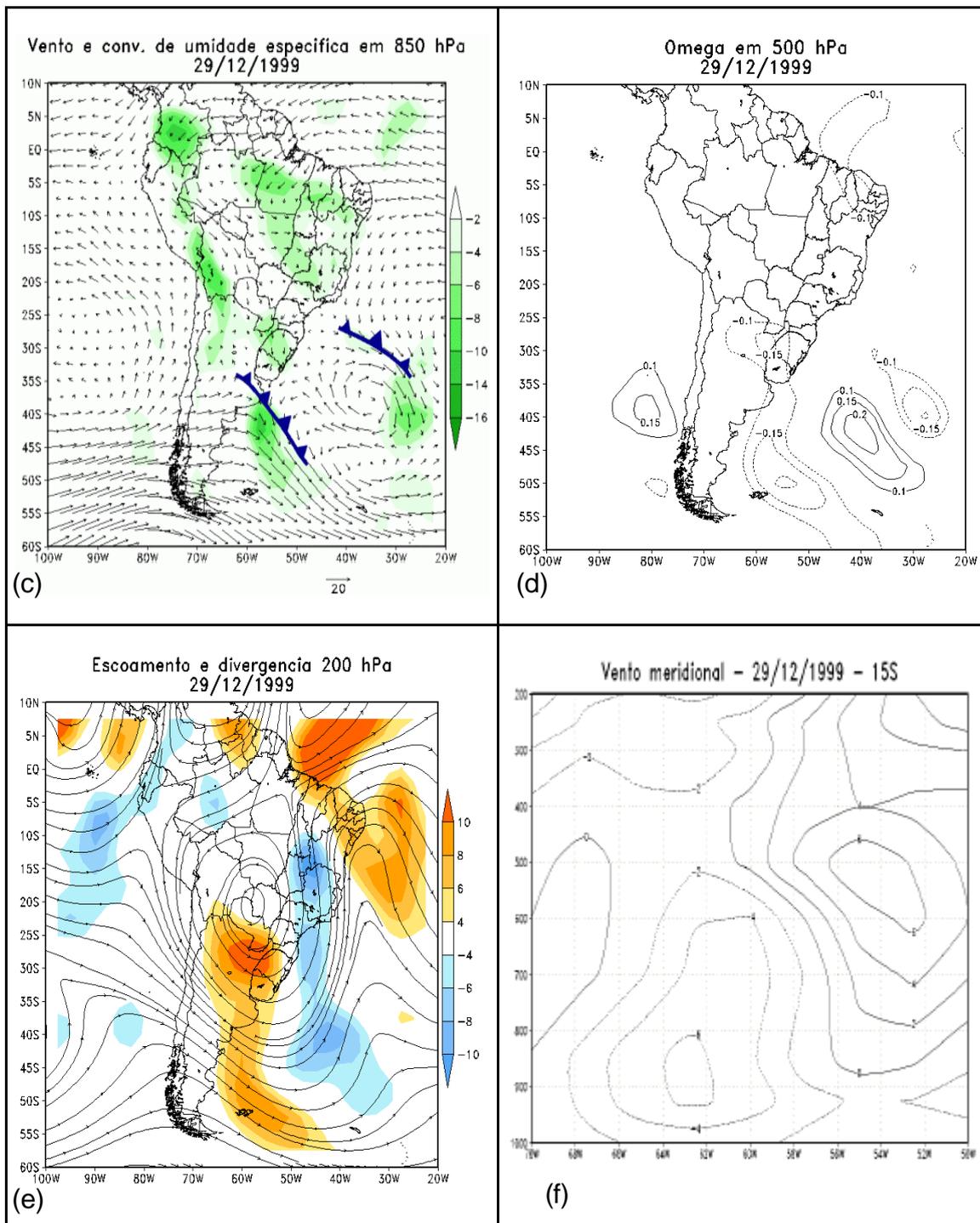


FIGURA 5.1 – Conclusão.

No dia 30/12 o campo de PNM apresenta a alta pressão sobre o Pacífico mais intensa que no dia anterior e adentrando o continente sul americano (Figura 5.2 b) e o movimento subsidente associado sobre parte da Argentina e Chile

(Figura 5.2 d). A frente fria, identificada pela confluência do vento (Figura 5.2 c), encontra-se no sul do Rio Grande do Sul e há um outro sistema sobre o litoral na altura do Estado de São Paulo. Ainda em baixos níveis observa-se intensificação do escoamento vindo de norte sobre o Mato Grosso e Goiás, o qual traz umidade e aumenta a nebulosidade nessas áreas. Em altos níveis, com o avanço do cavado associado ao sistema frontal, o centro da circulação anticiclônica (Alta da Bolívia) desloca-se para oeste e o cavado sobre o Atlântico para leste. Sobre o Pacífico observa-se um outro cavado, com inclinação NW/SE, que se estende até a Patagônia Argentina.

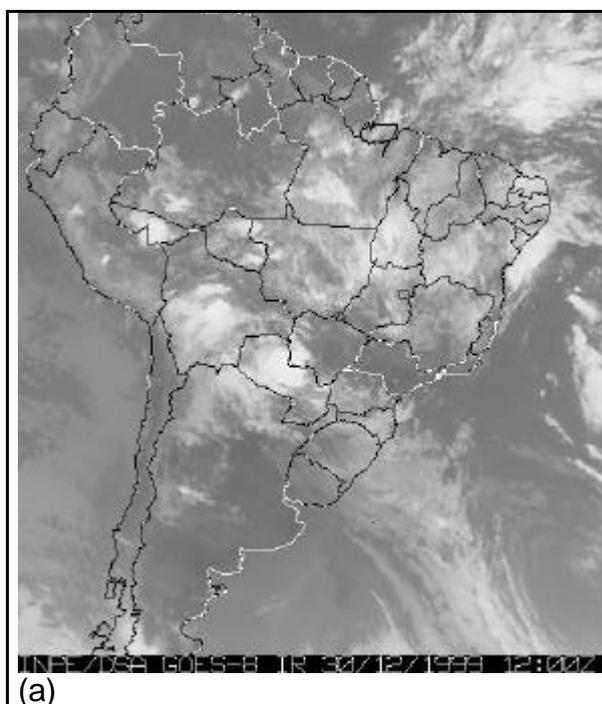


FIGURA 5.2 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa ( $\text{Pa/s}$ ); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 30/12/1999.

(continua)

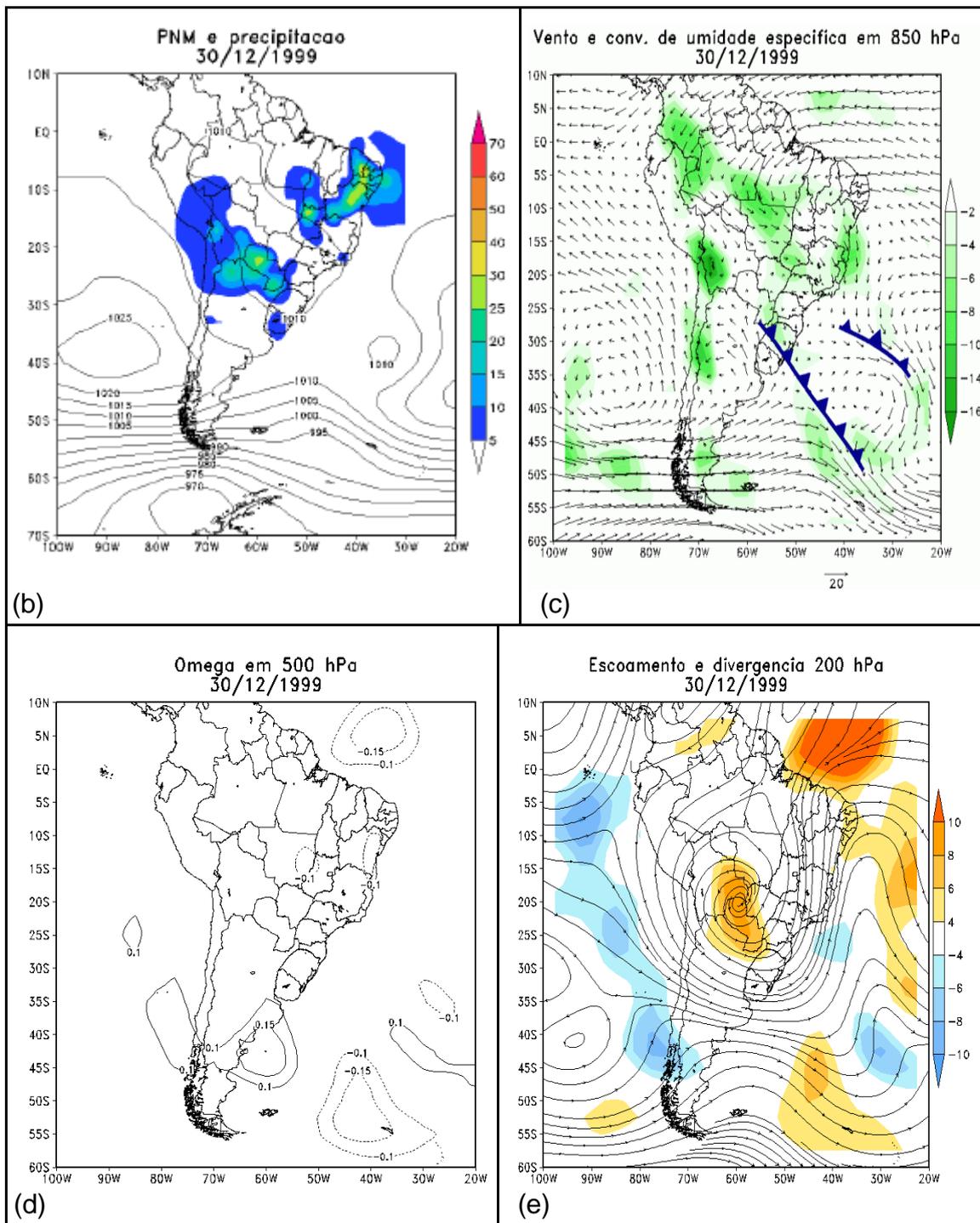


FIGURA 5.2 – Conclusão.

No dia seguinte, 31/12/1999, o sistema frontal se desloca para leste e o movimento ascendente associado favorece a formação de nuvens convectivas sobre o norte do Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina e sul de São

Paulo. Nota-se que com o deslocamento do sistema pelo litoral da Região Sul o escoamento se bifurca e parte dele vai para o oceano e intensifica os ventos e outra parte segue sobre o continente brasileiro até encontrar o fluxo vindo de norte da Amazônia, Figura 5.3 c. Nota-se sobre São Paulo uma ligeira rotação ciclônica nos ventos em baixos níveis (Figura 5.3 c), e o deslocamento do cavado em altos níveis associado à frente para o oceano. Nota-se também que a Alta da Bolívia se desloca para o centro da Bolívia.

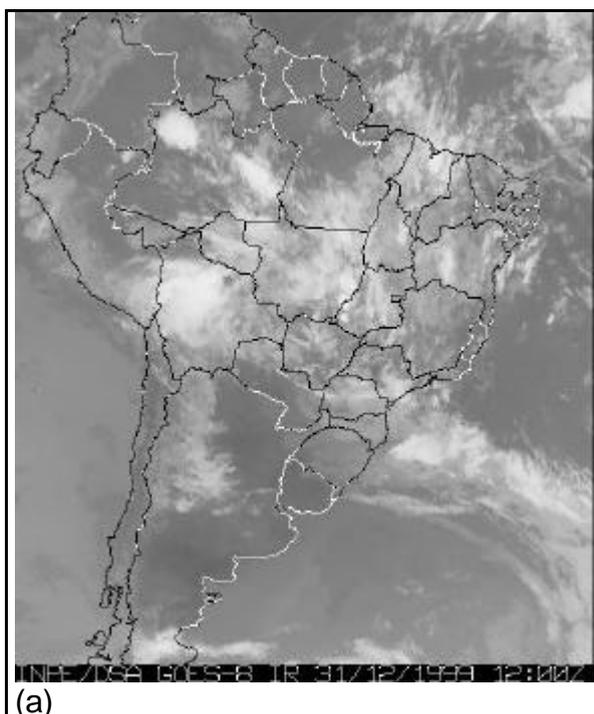


FIGURA 5.3 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 31/12/1999.

(continua)

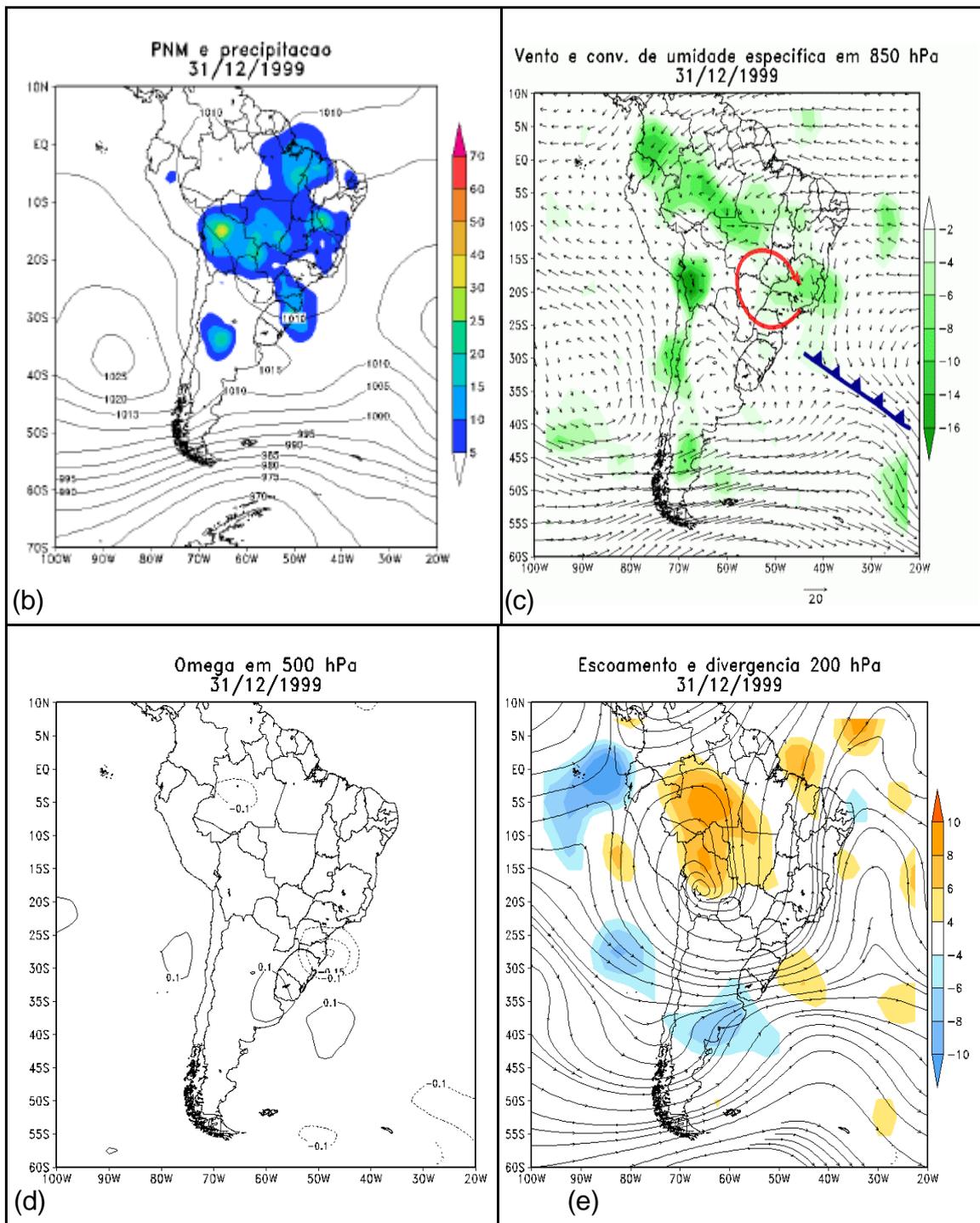


FIGURA 5.3 – Conclusão.

No dia 01/01/2000 a frente fria permanece sobre o oceano. No entanto, devido a um aumento na intensidade dos ventos de quadrante norte, nota-se um

ligeiro recuo do sistema frontal. Observa-se no campo da PNM que sobre o Mato Grosso do Sul e São Paulo, a circulação ciclônica observada no dia anterior intensifica-se e fecha um sistema de baixa pressão em superfície sobre o oeste de São Paulo, sul de Goiás, Mato Grosso do Sul e Triângulo Mineiro (Figura 5.4 b). A circulação ciclônica intensificada é observada no campo do escoamento, onde nota-se que o sistema frontal está atuando apenas no oceano. A Alta da Bolívia se afasta mais para oeste e o cavado do Nordeste para leste, Figura 5.4 e. Oliveira (1986) registrou nove casos de ocorrência da Alta da Bolívia nos quais a passagem de uma frente levava a Alta a deslocar-se para oeste. A advecção de vorticidade negativa associada ao deslocamento do cavado sobre a Região Sul do Brasil provavelmente diminui a vorticidade na região leste da Alta da Bolívia, provocando o seu deslocamento para oeste. Nota-se o aumento da divergência e o forte movimento ascendente sobre grande parte da Região Sudeste, características que favorecem a atividade convectiva nas áreas afetadas. Esse sistema permanece atuando entre São Paulo e o Rio de Janeiro, organizando convecção e pancadas generalizadas em Minas Gerais e São Paulo.

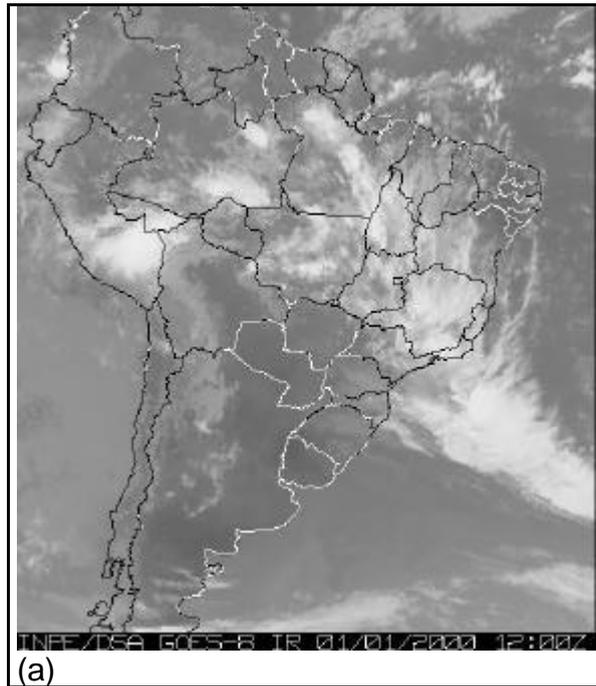


FIGURA 5.4 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 01/01/2000.

(continua)

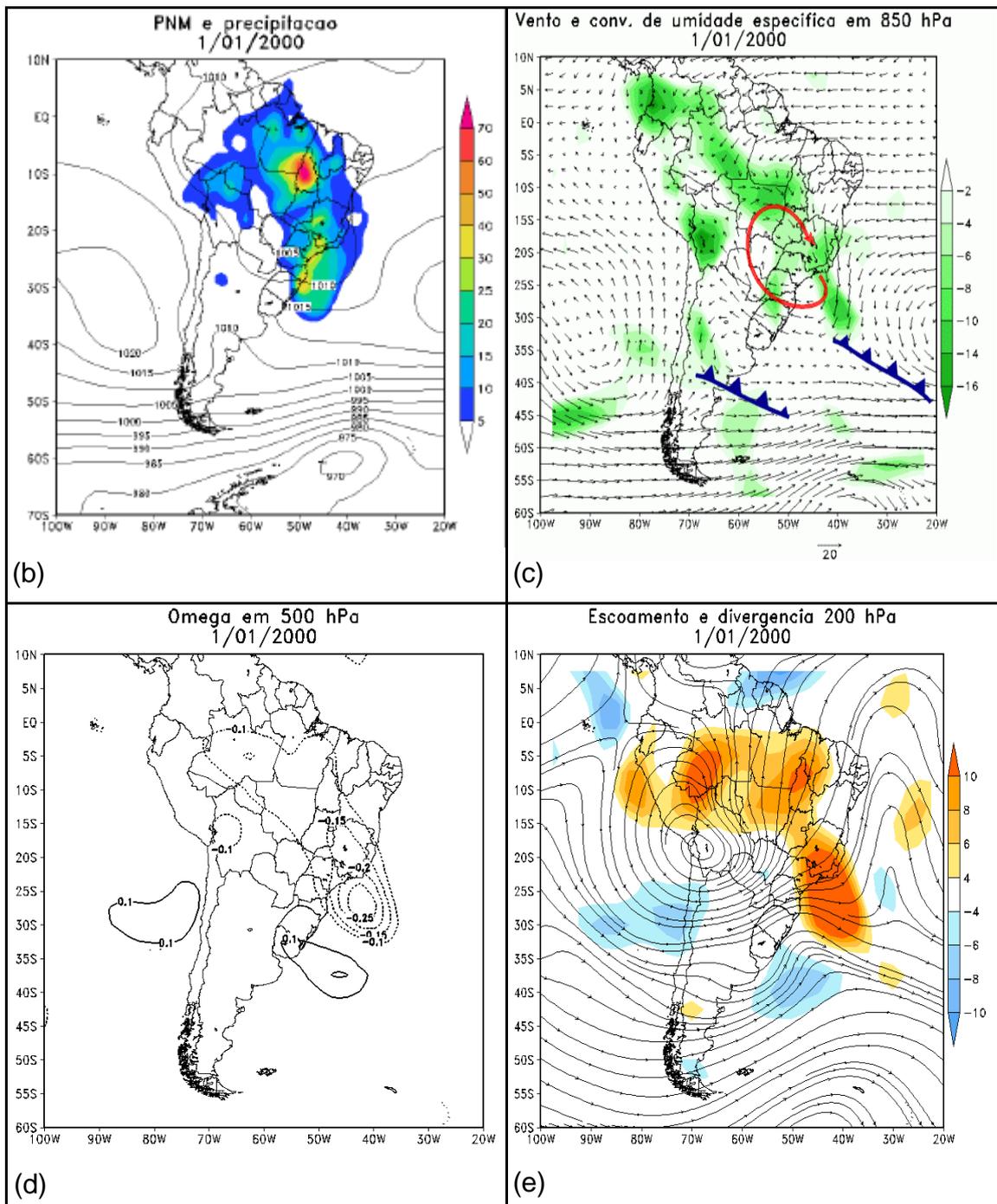


FIGURA 5.4 – Conclusão.

No dia seguinte, 02/01/2000, a frente permanece sobre o oceano e através da Figura 5.5 b, observa-se acumulado diário de precipitação ultrapassando 50 mm na região do Vale do Paraíba e sul do Rio de Janeiro. Em superfície permanece o centro de baixa pressão sobre o continente. Em 850 hPa (Figura

5.5 c), observa-se a intensificação do escoamento de norte, responsável pelo transporte de umidade da Amazônia, sobre o Mato Grosso, Goiás, São Paulo e Minas Gerais. A região de desaceleração desse escoamento em baixos níveis, onde ocorre a maior convergência de umidade, coincide com o norte/nordeste de São Paulo, sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro, áreas que foram bastante afetadas por fortes chuvas e valores acumulados significativos. Em algumas localidades das Serras da Mantiqueira e do Mar houve deslizamentos e alagamentos. Em altos níveis, o cavado e a crista associados ao sistema frontal se intensificam, e, por conservação de vorticidade, intensificam o cavado localizado no Atlântico, próximo à costa da Região Nordeste, gerando uma circulação fechada em altos níveis, conhecida como Vórtice em Altos Níveis do Nordeste (Frank, 1970, Gan e Kousky, 1986). Nota-se em altos níveis uma região bastante divergente que vai desde o Atlântico até o Norte do Brasil e o alinhamento do movimento ascendente associado. Em casos quando a configuração vórtice-frente permanece por vários dias pode se ter uma situação de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Calbete et. al, 1996).

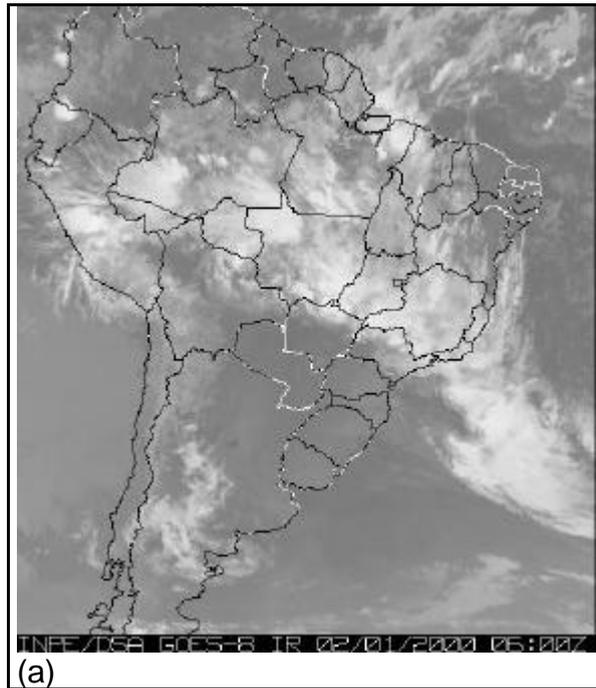


FIGURA 5.5 - (a) Imagem do satélite GOES – 06 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 02/01/2000.

(continua)

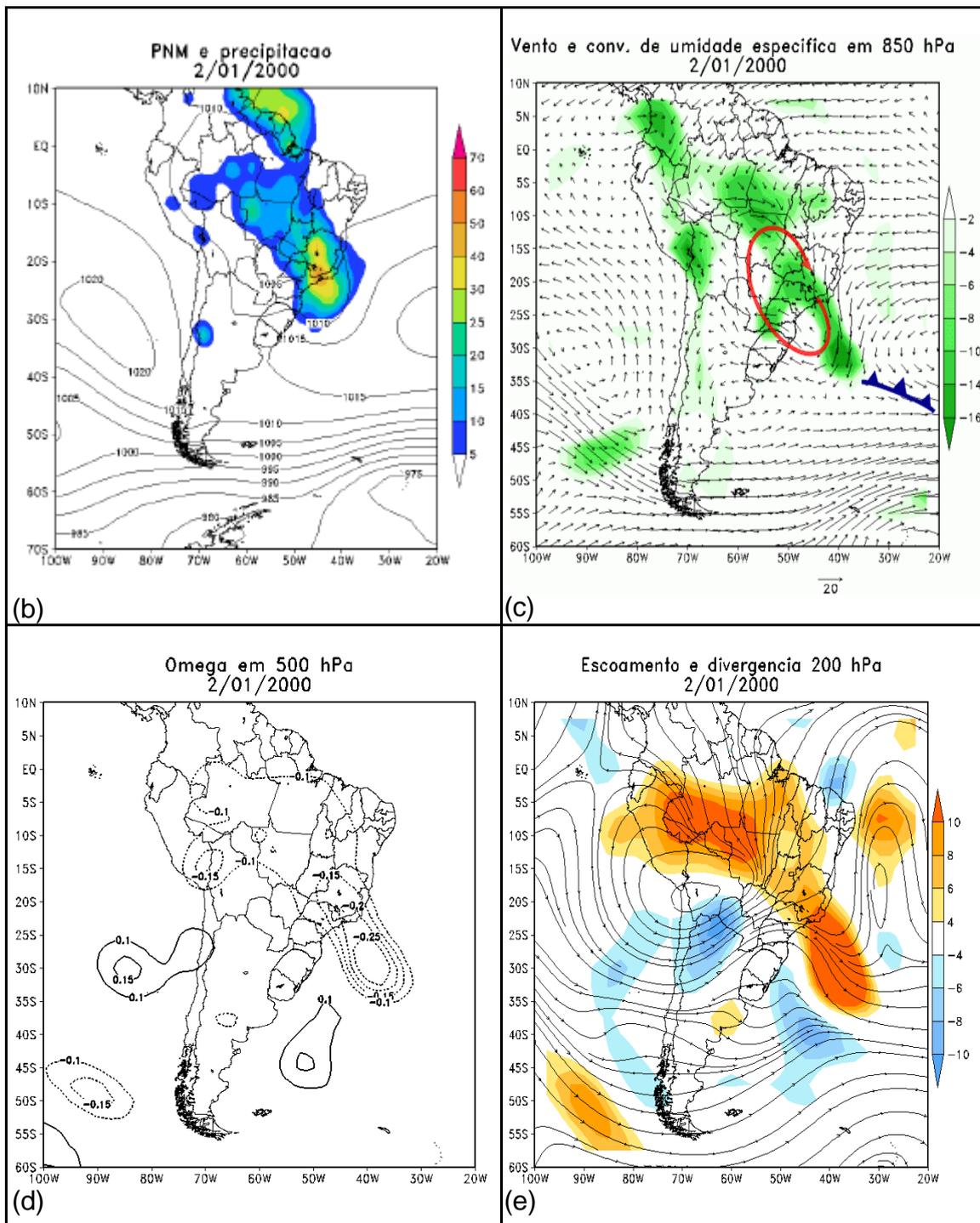


FIGURA 5.5 – Conclusão.

No último dia analisado, 03/01/2000, observa-se a permanência da banda de nebulosidade, no sentido NW-SE, sobre o Sudeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil. Em baixos níveis, os ventos de norte vindos da Amazônia, que

transportam ar úmido, são mais intensos, inclusive sobre o Atlântico, bloqueando o avanço do sistema frontal. Observa-se que há sobre a Argentina um novo sistema frontal. A convergência de umidade e movimento ascendente dão suporte para a manutenção da nebulosidade e convecção, principalmente sobre o Sudeste (Figura 5.6 c). Em 200 hPa, sobre o Atlântico observa-se o vórtice ciclônico do Nordeste e o cavado com ligeira inclinação para leste. O vórtice impede o deslocamento dos sistemas frontais para o litoral do nordeste, contribuindo para a permanência dos mesmos sobre a Região Sudeste onde causam precipitações persistentes (Calbete et. al., 1996). Na análise dos compostos também fica evidente que o posicionamento da Alta da Bolívia e do Cavado do Nordeste são fatores importantes para o avanço dos sistemas frontais para latitudes mais baixas. Na retaguarda do VCAN do Nordeste nota-se uma região de crista intensa, a qual impede o avanço dos sistemas frontais para latitudes mais baixas. A circulação anticiclônica está centrada sobre a Bolívia e toda a região com divergência associada encontra-se sobre o Sudeste, Centro-Oeste e parte da Região Norte, característica que também contribui para a permanência da convecção nessas áreas. Com essa situação sinótica estabeleceu-se um episódio de ZCAS até o dia 09/01/2000 (Figuras não mostradas), segundo o boletim mensal da Climanálise.

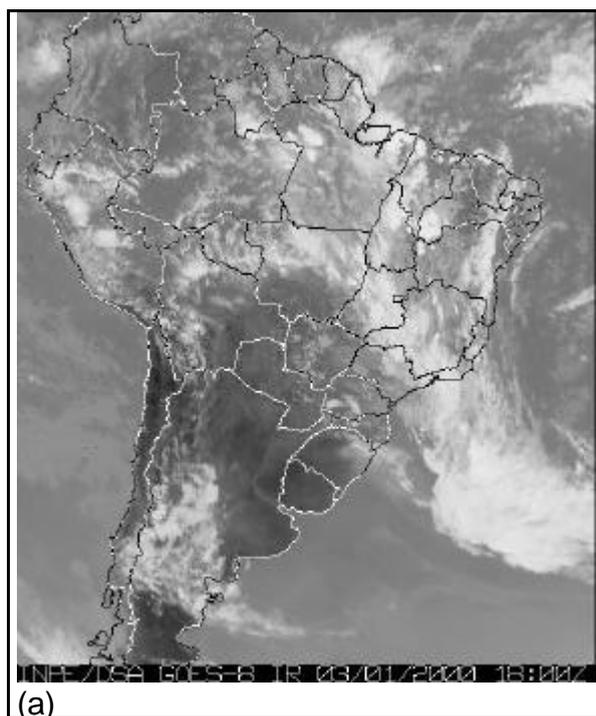


FIGURA 5.6 - (a) Imagem do satélite GOES – 18 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e convergência de umidade ( $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado); (d) omega em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e divergência ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) (sombreado) para o dia 03/01/2000.

(continua)

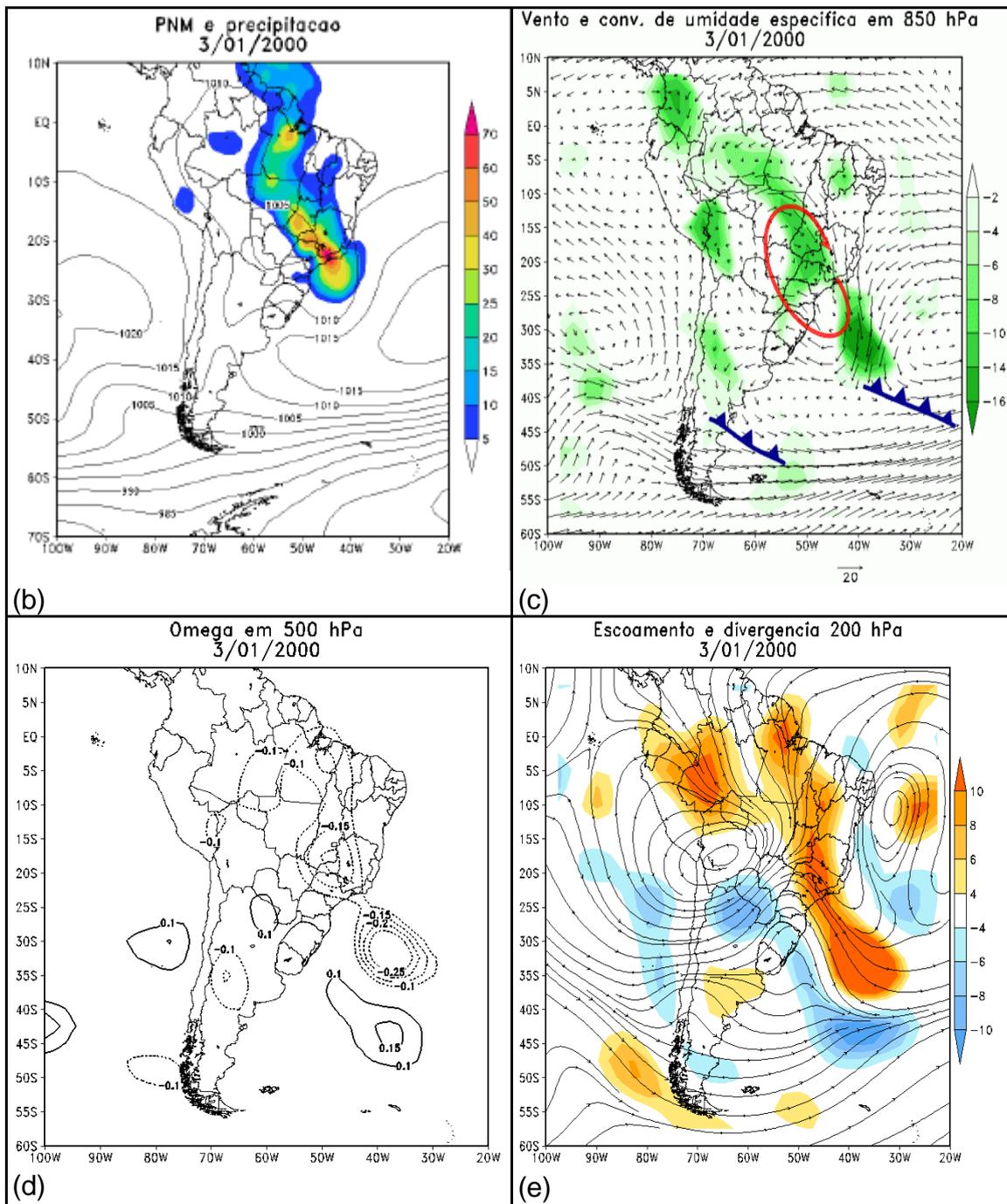


FIGURA 5.6 – Conclusão.

## 5.2 - Inverno

Durante o inverno sabe-se que a passagem de sistemas frontais pelo Brasil pode estar associada a incursões de ar frio para latitudes mais baixas (Fortune e Kousky, 1983 e Marengo et. al., 1997). Estes eventos causam profundo impacto, principalmente na agricultura, pois podem ocasionar geadas de moderada a forte nas Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e eventos conhecidos como “friagens” na Região Norte. Para esta estação do ano, o critério utilizado para a escolha do estudo de caso, foi a queda significativa da temperatura de um dia para o outro na área 8, associada a passagem de uma frente fria.

Através do diagrama de Hovmoller na longitude de 55°W para o mês de agosto de 1999, Figura 5.7, nota-se que três sistemas frontais entraram no interior do Brasil, o mais significativo se refere ao caso selecionado no período entre 11 e 16 agosto de 1999, no qual observa-se a queda brusca de temperatura em latitudes mais baixas. Através da série temporal da temperatura em 925 hPa e da PNM para área 8 nesse período, Figura 5.8, observa-se que no dia 12/08/1999, antes da passagem da frente fria pela região, a PNM era de aproximadamente 1012 hPa e depois da entrada do sistema frontal a pressão atmosférica sobe cerca de 20 hPa e a média da temperatura cai aproximadamente 25 graus do dia 12 ao dia 15/08.

Este sistema frontal deslocou-se pelo interior e litoral do país até a Região Nordeste, enquadrando-se nos grupo Rota 2/SE, CE e sul da BA. Segundo o boletim mensal da Climanálise a passagem desta frente fria associada a uma intensa massa de ar frio provocou geada e quedas bruscas de temperatura no Sul, Sudeste e Centro-Oeste e ocorrência de neve na Serra Gaúcha. Neste período foram registradas as menores temperaturas do mês. No dia 15, na Região Sul na cidade de Cambará do Sul - RS foi registrado -3,0°C; em Chapecó - SC -4,0°C; e em São Joaquim - SC -5,0°C. Neste dia também houve precipitação de neve, de intensidade fraca, em Lagoa Vermelha, Passo Fundo

e Caxias do Sul, no Rio Grande do Sul. Em Livramento, Cambará do Sul e em Bom Jesus, a intensidade foi moderada. Nas cidades de Farroupilha e Veranópolis também houve registro de neve. Nos dias 15 e 16, em São Joaquim e Cambará do Sul-SC houve precipitação de neve de intensidade moderada e fraca (Climanálise, AGO/1999). Na Argentina, o anticiclone associado ao evento frio foi um dos mais intensos desde 1906. No observatório Nacional de Buenos Aires a pressão atmosférica reduzida chegou a 1039,6 hPa no dia 15/08/1999 (Relatório Climatológico do IAG/USP).

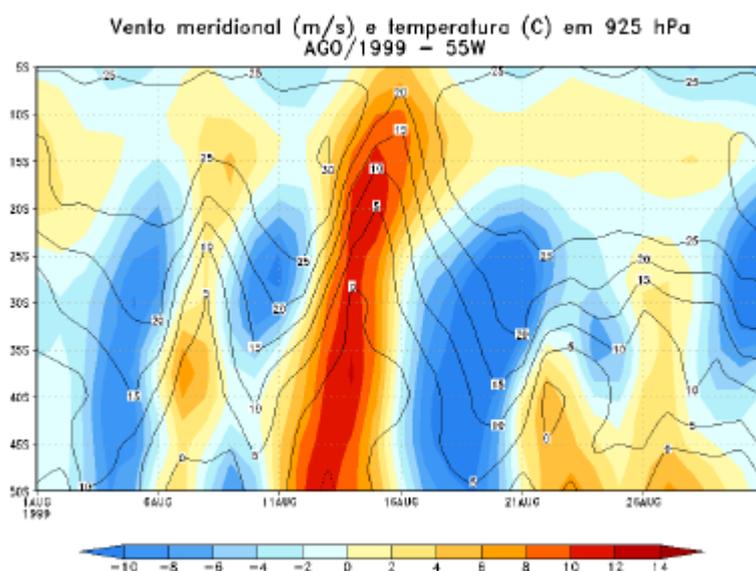


FIGURA 5.7 - Diagrama de Hovmoller do vento meridional (m/s) (sombreado) e temperatura (°C) em 925 hPa (isolinha) para agosto de 1999 na longitude de 55°W.

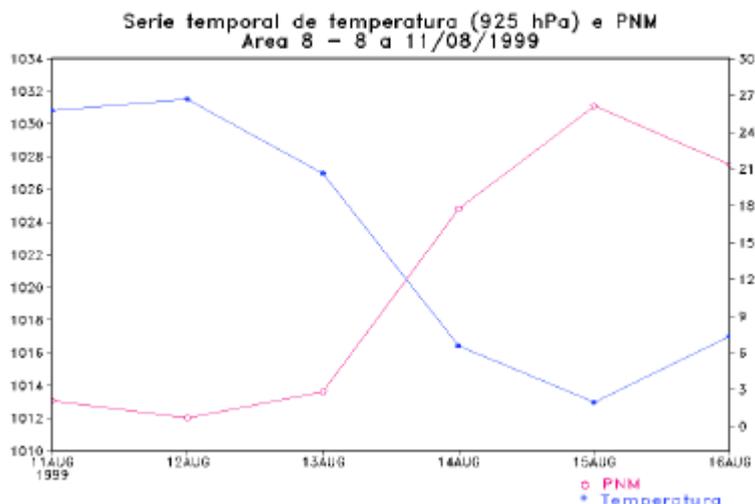


FIGURA 5.8 - Série temporal de temperatura em 925 hPa e pressão ao nível médio do mar para área 8 no período entre 11 a 16/08/1999.

A seguir são mostradas as imagens do satélite Goes às 12Z, campos da PNM e precipitação, escoamento e temperatura em 925 hPa, escoamento e advecção de vorticidade em 500 hPa, escoamento e magnitude do vento em 200 hPa, geopotencial e anomalia zonal em 200 hPa e o vento térmico na camada de 850-500 hPa para o período entre 11 e 16/09/1999.

No dia 11/08/1999, observa-se a frente fria sobre a Argentina na fronteira com o Uruguai (Figura 5.9 c) e temperaturas elevadas no Centro-Oeste. No campo da PNM nota-se a alta pressão atuando no leste do Sul, Sudeste e Nordeste, centrada sobre o Atlântico, e um outro centro de alta pressão sobre o Pacífico de 1030 hPa. Em níveis médios (Figura 5.9 d), observa-se a circulação anticiclônica atuando em grande parte do Brasil e o cavado associado ao sistema frontal bem inclinado com orientação NW/SE no sul da América do Sul. Observa-se no leste do Rio Grande do Sul a advecção de vorticidade positiva com fraca intensidade, coerente com a análise feita nos compostos no dia inicial para o grupo das frentes que avançam por todas as áreas analisadas. Em altos níveis, nota-se uma região com ventos bastante intensos entre 45°S e

30°S, devido ao forte gradiente de temperatura (Figura 5.9 e). Em 200 hPa há um escoamento de SW desde o sul do Brasil até o Sudeste, que contribui para o deslocamento dos sistemas frontais. Em relação ao geopotencial e anomalia zonal em 200 hPa, Figura 5.9 f, pode-se notar anomalia positiva de geopotencial sobre o Rio Grande do Sul, parte da Argentina e Chile e anomalia negativa sobre o Atlântico e Pacífico. Uma forte anomalia positiva à sudeste da Austrália e Nova Zelândia. Nos próximos dias será observado uma intensificação dos cavados e cristas sobre o Pacífico e sobre a América do Sul.

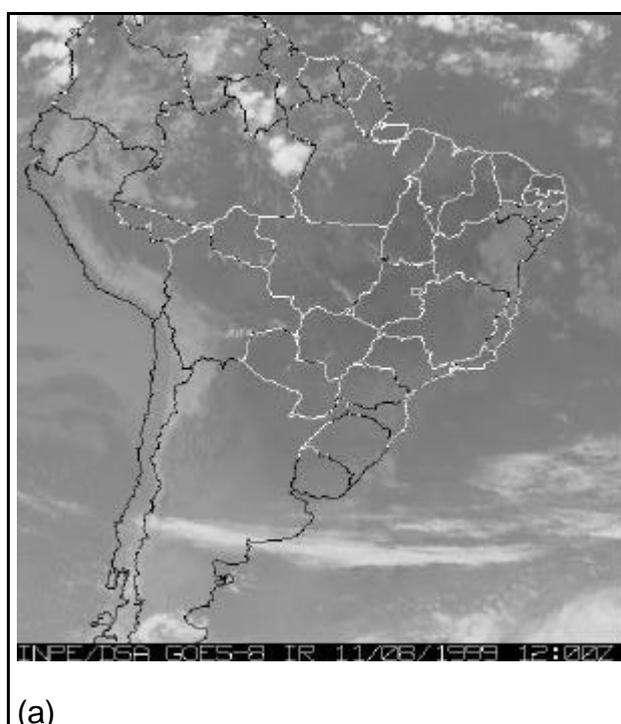


FIGURA 5.9 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 11/08/1999.

(continua)

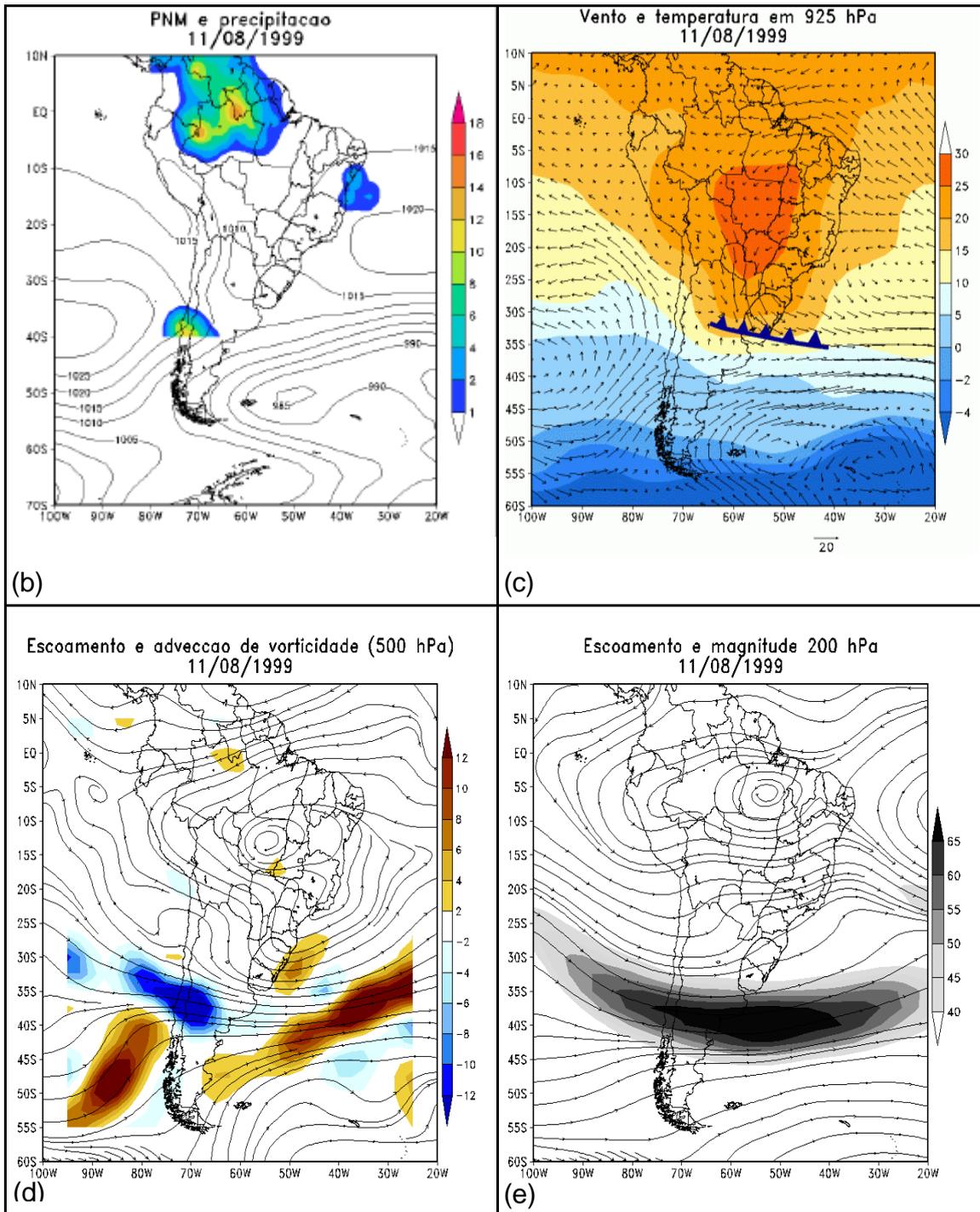


FIGURA 5.9 – Continuação

(continua)

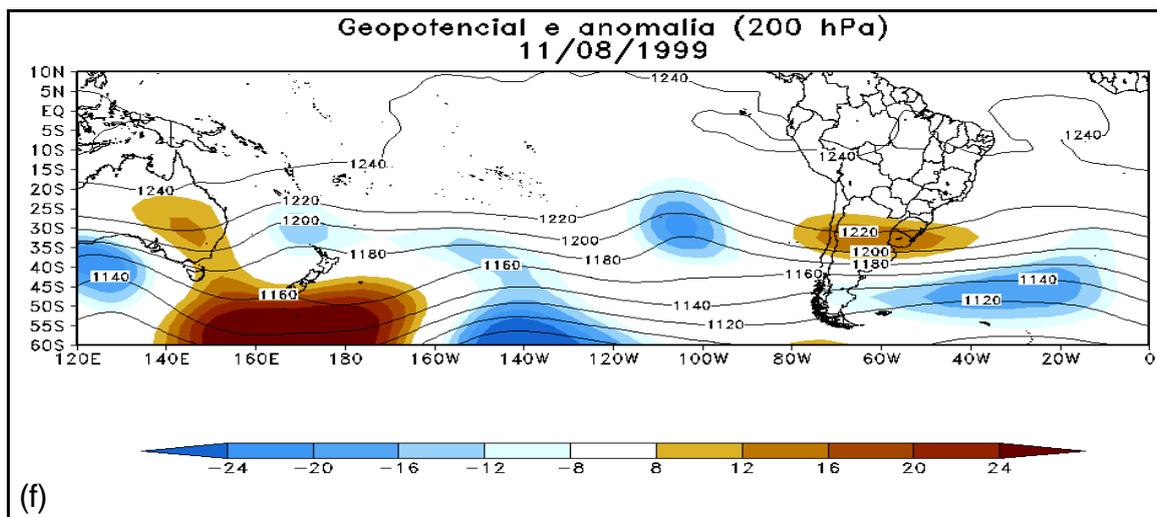


FIGURA 5.9 – Conclusão.

No dia seguinte, 12/08/1999, observa-se que o centro da alta sobre o Pacífico Sudeste se intensifica (1040 hPa) e desloca-se para leste (Figura 5.10 b), bem como a alta semi-permanente do Atlântico. Neste dia começa-se a observar o efeito da Cordilheira dos Andes no sistema de alta pressão juntamente com o escoamento de sul em médios e altos níveis que faz com que o anticiclone e a massa de ar frio sejam forçados a deslocar-se para norte, efeito também observado nos trabalhos de Seluchi e Marengo (2000). Segundo, Lichtenstein (1989) o ar frio de sudoeste que entra no continente, onde a elevação é mais que 2000 m acima do nível do mar, não consegue ultrapassar os Andes, portanto é forçado a contornar o obstáculo da Cordilheira aumentando assim a curvatura anticiclônica. Em baixos níveis, observa-se o avanço da frente fria, agora sobre o Rio Grande do Sul e norte da Argentina, e o ar frio atuando no sul da América do Sul (Figura 5.10 c). Em níveis médios, Figura 5.10 d, observa-se o cavado estendendo-se desde o Atlântico até o oceano Pacífico com orientação NW-SE e a forte advecção de vorticidade positiva próximo aos Andes, devido à configuração em médios e altos níveis da crista a oeste dos Andes (Garreaud, 2000). Tal advecção de vorticidade positiva também é responsável pela intensificação da alta pressão em superfície. Através da anomalia zonal de geopotencial (Figura 5.10 e) nota-se a que a crista

associada ao anticiclone em superfície sobre o Pacífico intensifica-se favorecendo assim o deslocamento do sistema frontal. Nota-se também o início de uma configuração de trem de onda sobre o Pacífico, partindo da anomalia positiva observada no dia anterior a sudeste da Austrália, com centros alternados de anomalia positiva e negativa. Observa-se sobre o Pacífico na altura da costa norte do Chile anomalia negativa de geopotencial, a qual com o passar dos dias parece entrar em fase com o cavado associado à frente. Na Figura 5.10 e, observa-se o jato em altos níveis mais intenso sobre o oceano.

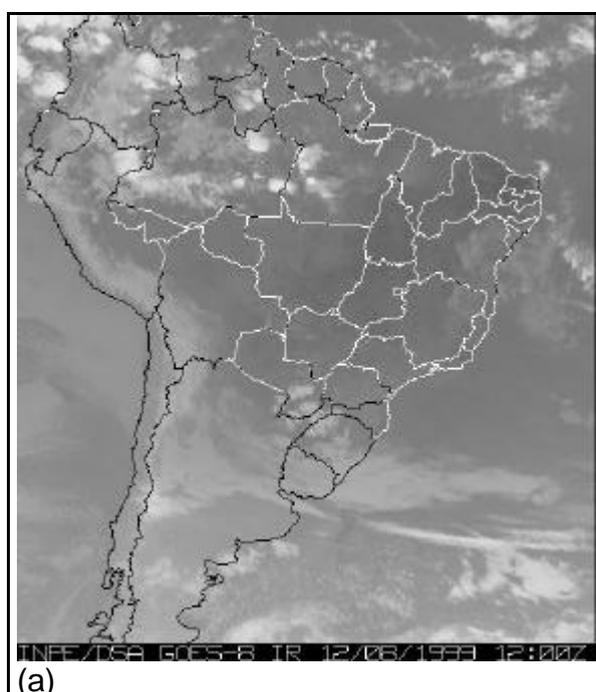


FIGURA 5.10 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 12/08/1999.

(continua)

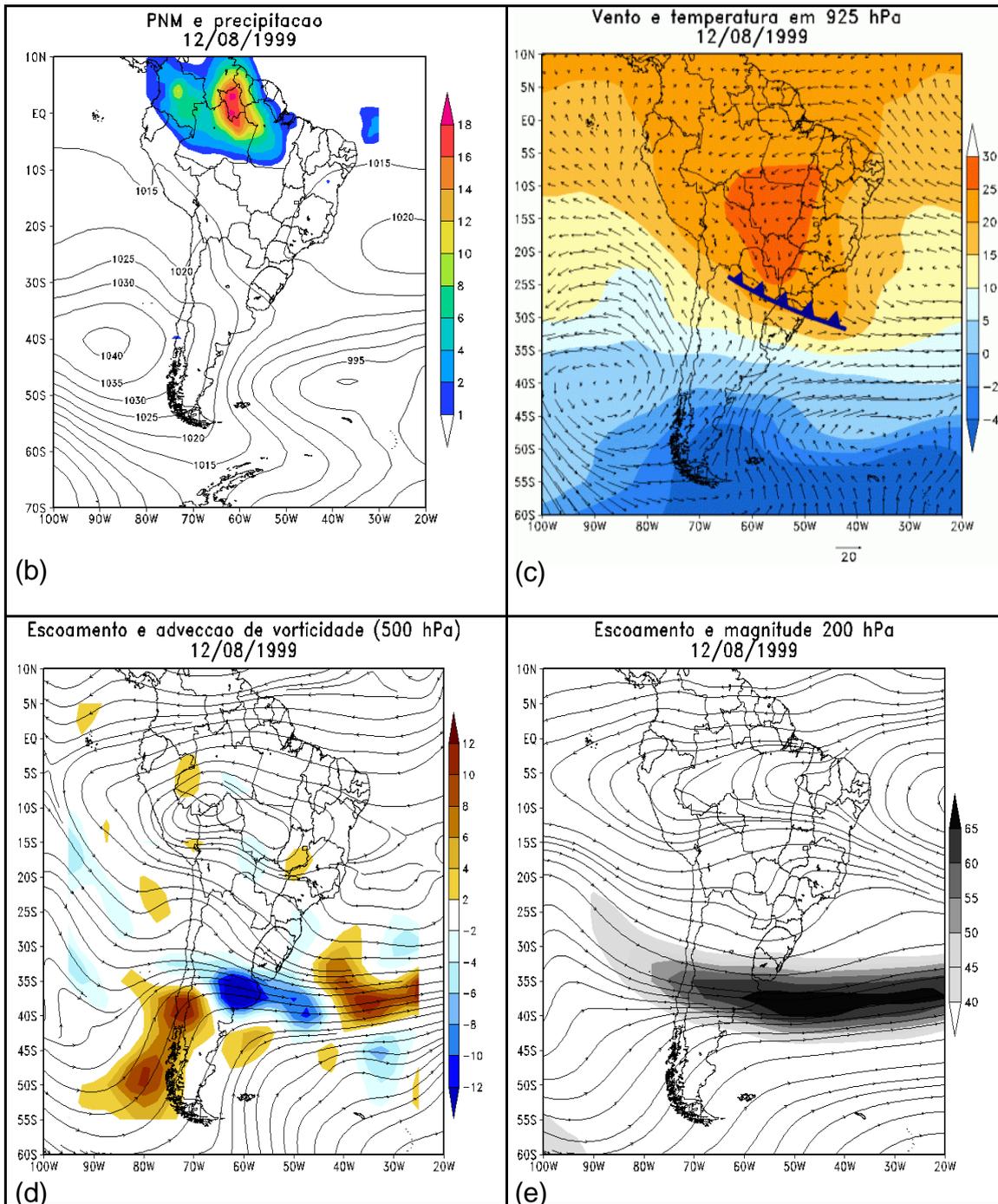


FIGURA 5.10 – Continuação

(continua)

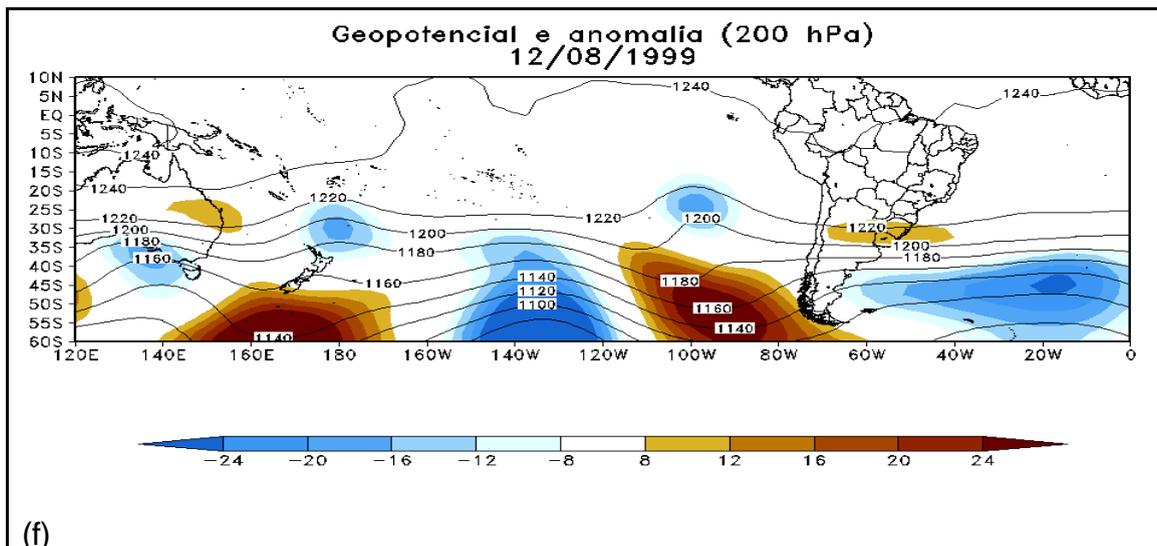


FIGURA 5.10 – Conclusão.

No dia 13/08/1999 a frente chega ao Estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul, como pode ser visto, através da confluência do vento (Figura 5.11 c), e conseqüentemente a alta pressão no Atlântico Sul se afasta ainda mais para leste. Observa-se que neste dia, devido ao ar frio mais intenso sobre o continente, a frente adquire uma inclinação maior e avança mais pelo interior que pelo litoral. O anticiclone pós-frontal desloca-se para leste e atinge parte da Argentina e Rio Grande do Sul. Na Região Sul observa-se a queda de temperatura, bem como no Uruguai e na Argentina. Nota-se também ventos intensos de sul com orientação bem meridional até o Paraguai e sul da Bolívia. Em médios e altos níveis observa-se o cavado associado à frente fria bastante inclinado e o jato mais intenso sobre o oceano, ainda devido ao forte gradiente de temperatura resultante da forte massa de ar frio. Nota-se neste dia, através da Figura 5.11 f, que a região com anomalia positiva de geopotencial a oeste do Chile avança para leste e se intensifica, bem como o cavado sobre o Atlântico, onde pode-se notar a forte advecção de vorticidade negativa associada a frente fria (Figura 5.11 d).

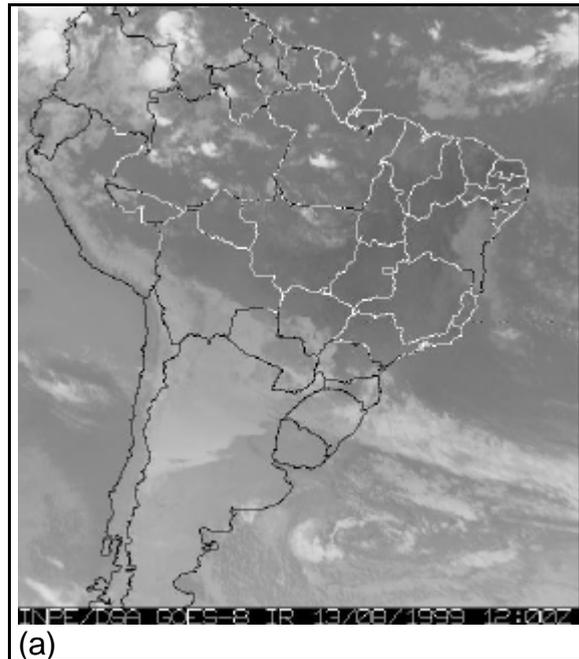


FIGURA 5.11 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 13/08/1999.

(continua)

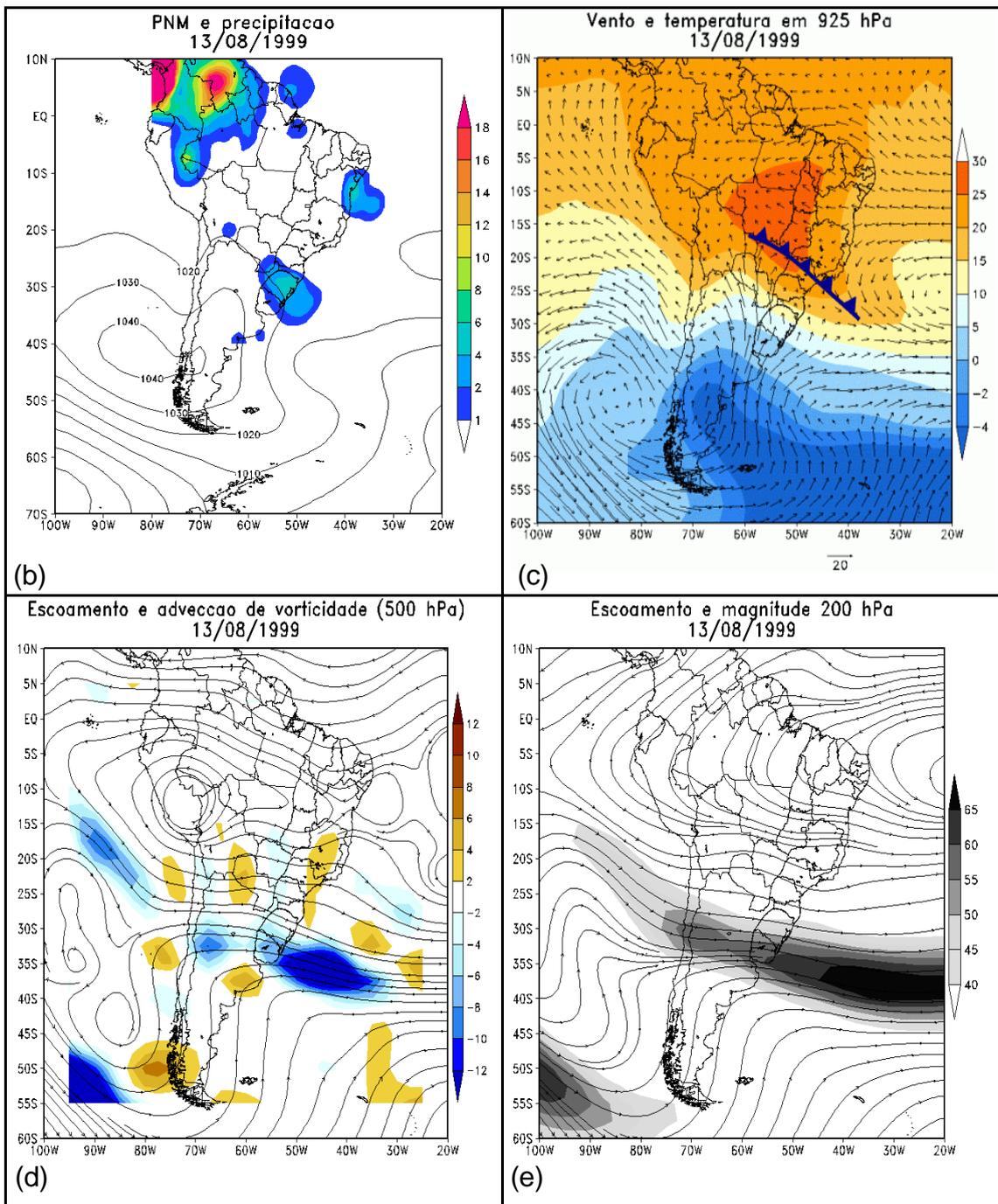


FIGURA 5.11 – Continuação

(continua)

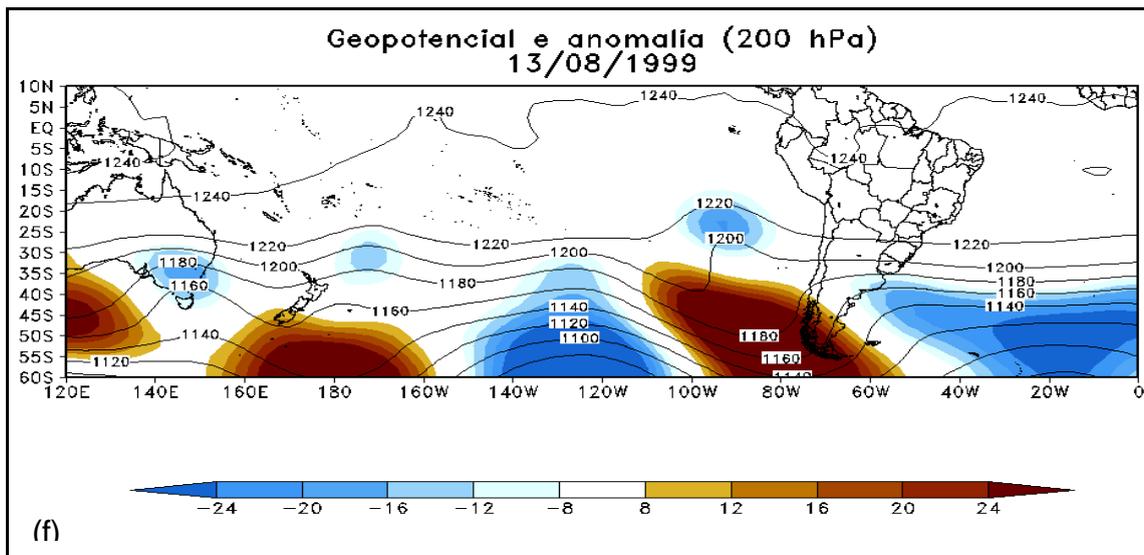


FIGURA 5.11 – Conclusão.

No dia 14/08/1999 o centro de alta pressão de 1040 hPa está sobre a Argentina e o ramo norte atingindo o sul de Mato Grosso, Figura 5.12 b. Essa configuração da alta pressão também foi notada em diversos trabalhos sobre incursões de ar frio como Marengo et. al, 1997, Garreaud, 2000, Seluchi e Marengo, 2000. A forte advecção de vorticidade positiva, Figura 5.12 d, até o Paraguai favorece o aumento da pressão nessas áreas. A frente fria tem um deslocamento bem continental e o ar frio na retaguarda deste sistema atinge latitudes mais ao norte pelo interior que pelo litoral, devido ao escoamento em médios e altos níveis. Neste dia também pode-se notar a intensificação do cavado associado ao sistema frontal através das Figuras 5.12 d-f. A anomalia positiva de geopotencial avança mais para leste e atua no centro-sul da Argentina e do Chile e anomalia negativa abrange uma área extensa do Atlântico Sul. Essa configuração em altos níveis é favorável ao avanço do sistema frontal, uma vez que o sistema em superfície encontra suporte em níveis altos da atmosfera. Na Figura 5.12 observa-se que o jato começa a ter uma orientação NW-SE. No entanto, o jato polar começa a ganhar intensidade sobre o Pacífico e sul da América do Sul. A intensificação desse jato faz com que haja aumento de vorticidade anticiclônica ao norte da região de vento

máximo favorecendo assim a ocorrência de um núcleo fechado observado em médios e altos níveis sobre a costa oeste do Chile.

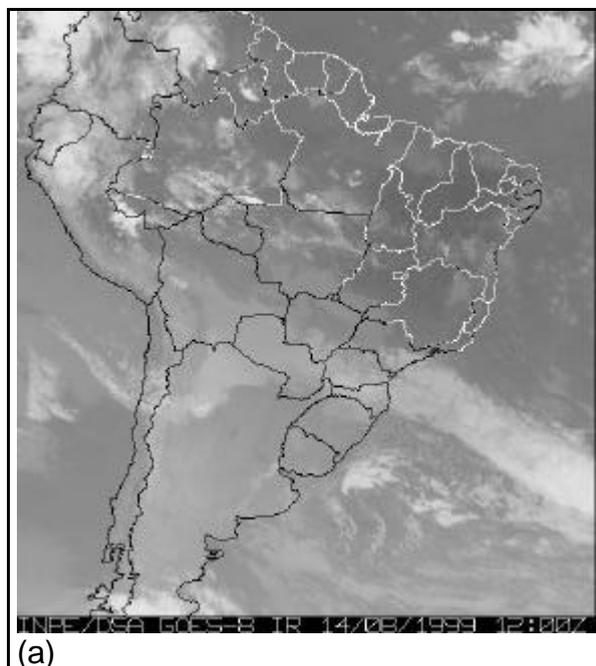


FIGURA 5.12 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1} / \text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 14/08/1999.

(continua)

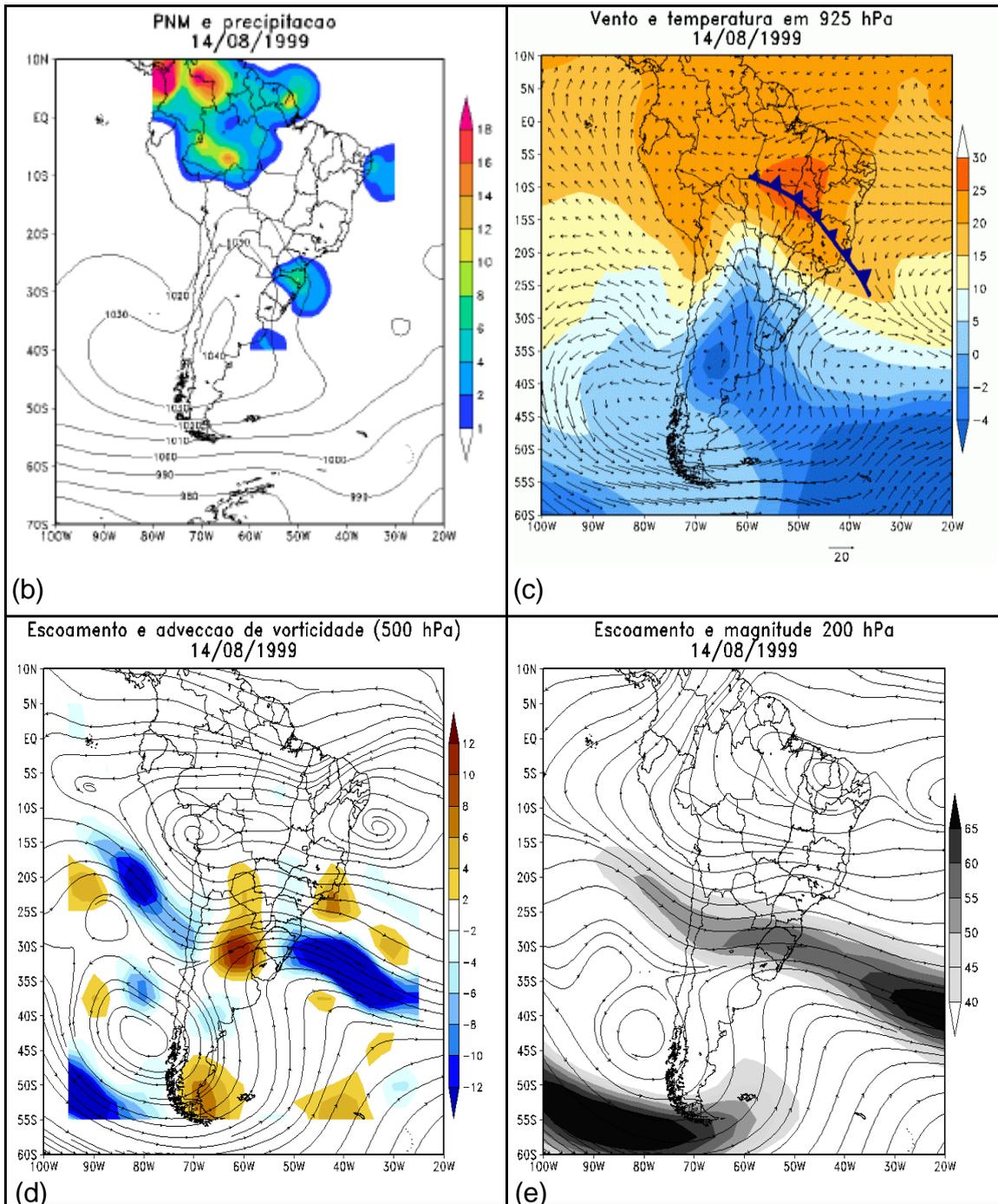


FIGURA 5.12 – Continuação

(continua)

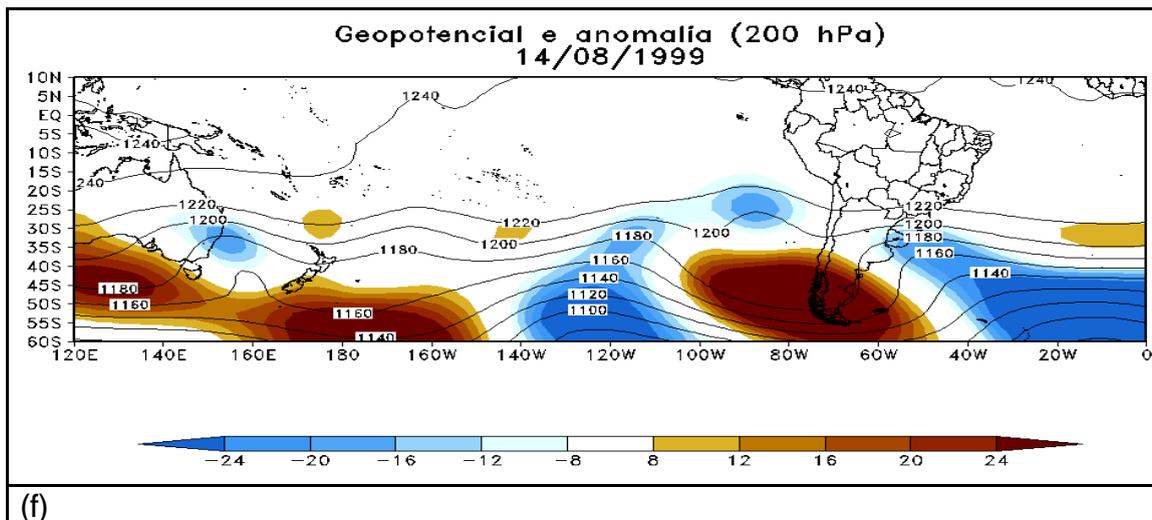


FIGURA 5.12 – Conclusão.

No dia 15/08/1999, observa-se que o anticiclone desloca-se para leste e no campo de pressão há pressões de até 1020 hPa atingindo o sul do Estado de Rondônia. Nota-se na Figura 5.13 c o ar frio sobre o sul da Região Amazônica, evento conhecido como “friagem”. Em 500 hPa, Figura 5.13 d, observa-se uma intensificação na advecção de vorticidade negativa na região do sistema frontal, o que favorece a intensificação da baixa pressão em superfície. O jato em altos níveis associado à frente fria começa a perder intensidade e posiciona-se no sentido NW/SE (Figura 5.13 e). O cavado em altos níveis que no dia anterior posicionava-se sobre o Pacífico aproximadamente em 20°S, Figura 5.13 f, parece entrar em fase com o cavado já existente sobre o Atlântico. A amplificação do cavado pode ser notado através da anomalia negativa de geopotencial que se estende desde o oceano até o Sudeste do Brasil.

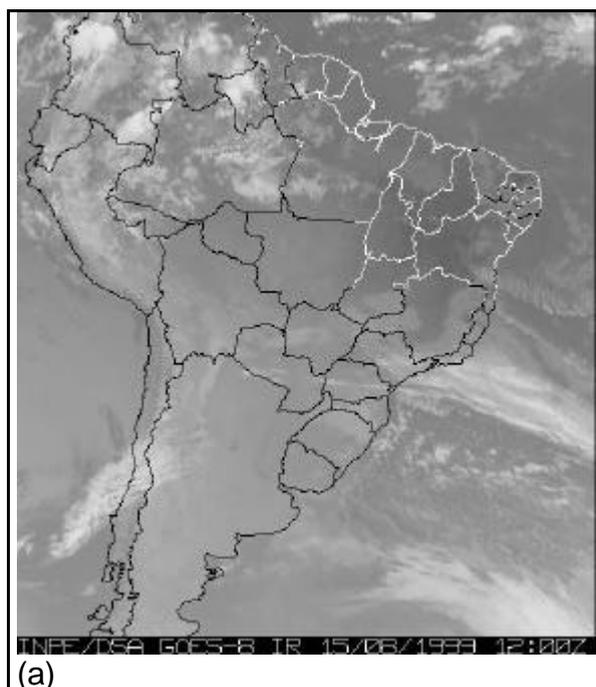


FIGURA 5.13 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 15/08/1999.

(continua)

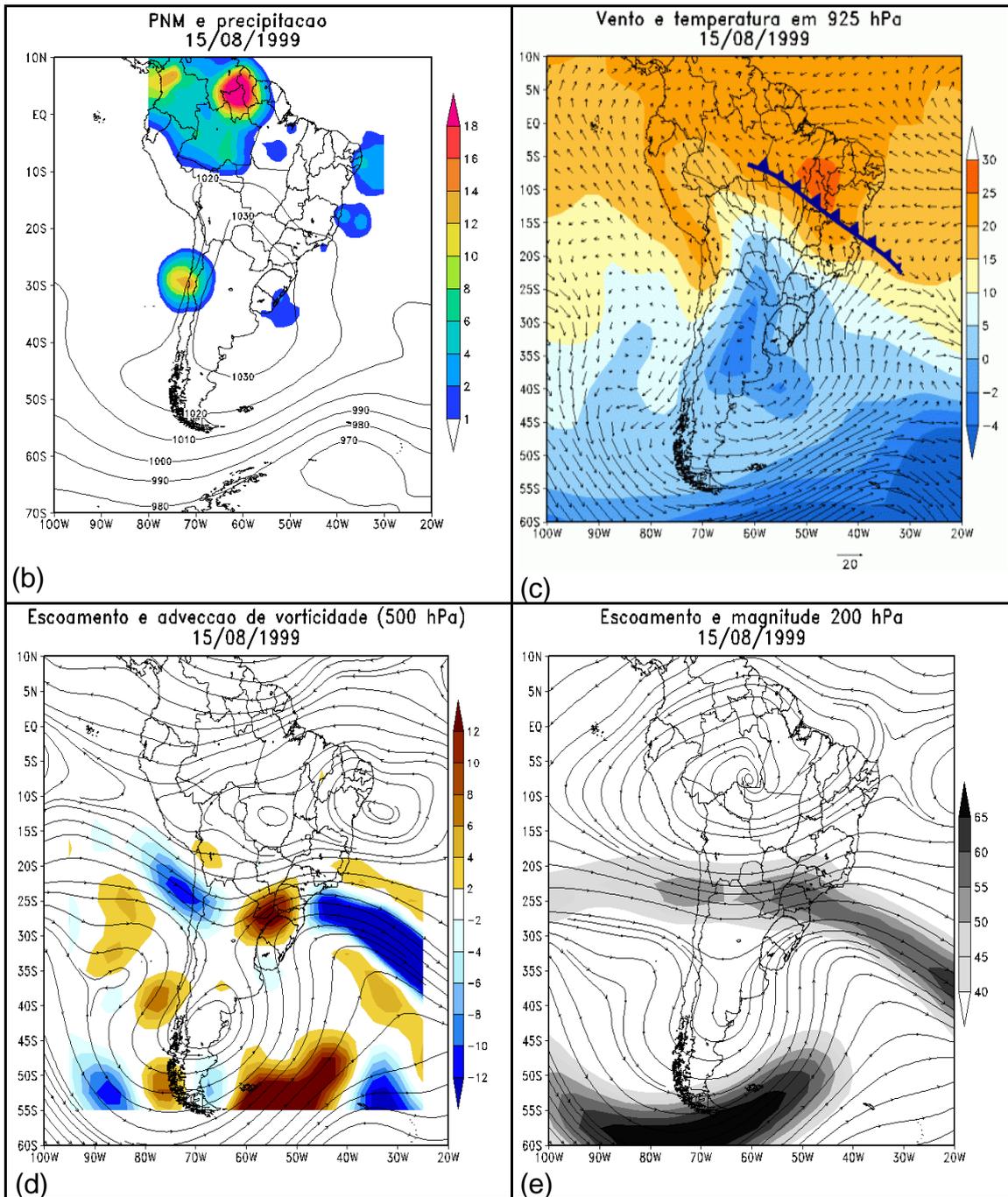


FIGURA 5.13 – Continuação

(continua)

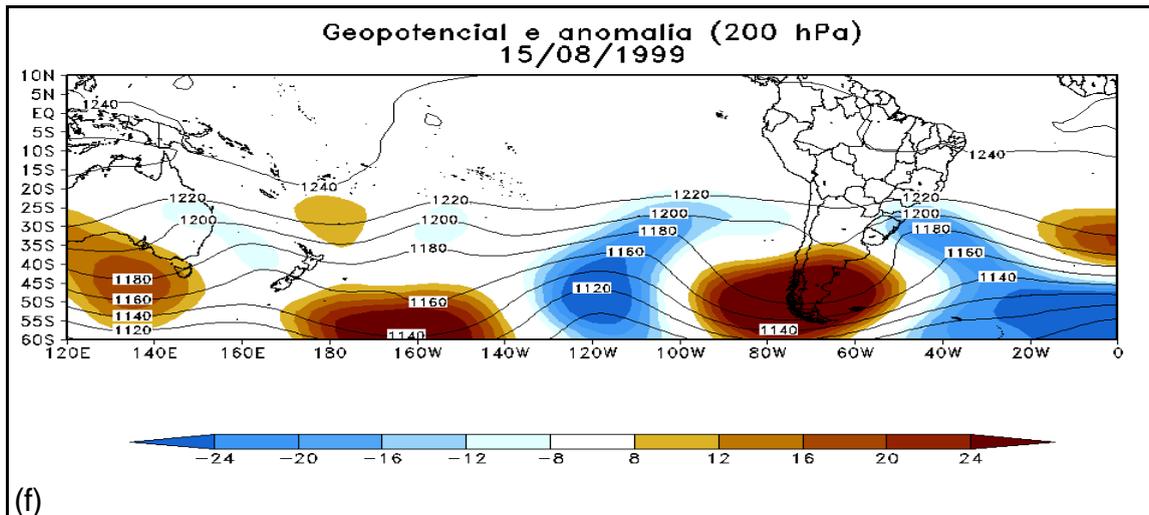


FIGURA 5.13 – Conclusão.

No dia 16/08/1999 a frente avança ainda mais e chega ao Nordeste passando também pelo Estado de Mato Grosso, Figura 5.14 c. Neste dia o ar frio associado a esta frente fria atua em todo o centro-sul e parte do Norte do Brasil, e atravessa o Equador sobre o noroeste da América do Sul. O anticiclone pós-frontal neste dia tem o seu centro localizado à leste da Região Sul, Figura 5.14 b. Este posicionamento da alta pressão favorece a entrada de ar úmido vindo do oceano sobre a faixa leste dos Estados da Região Sul e em SP. Essa entrada de ar frio e úmido foi responsável pela queda de neve na Serra Gaúcha e também contribuiu para que a umidade relativa do ar ficasse alta e a nebulosidade elevada no Sudeste, impedindo uma queda mais brusca nas temperaturas nessa Região. Por outro lado, sobre as Regiões Centro-Oeste e Norte, a entrada de ar frio e seco foi responsável pela queda significativa de temperatura nessas áreas. Nas análises notou-se que este sistema não causou muita chuva, mas causou temperaturas baixas nas áreas em que passou. Em médios e altos níveis nota-se o cavado associado à frente ainda com inclinação NW-SE e o centro-sul da América do Sul sobre o domínio de uma crista. Observa-se uma bifurcação do escoamento em altos níveis a oeste da América do Sul, característica encontrada por Algarve (1994) em casos de geada no Sul. A orientação NW/SE dos ventos em altos níveis sobre

o sul da América do Sul favorece o deslocamento dos sistemas frontais para o oceano.

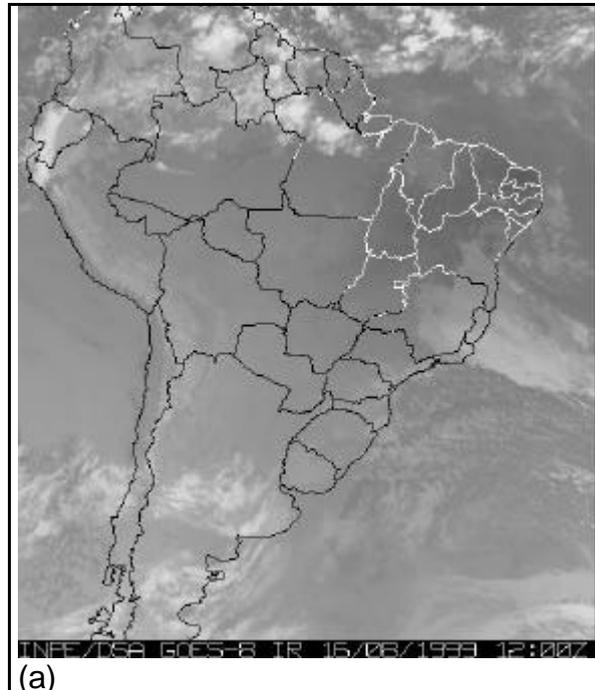


FIGURA 5.14 - (a) Imagem do satélite GOES – 12 Z; (b) pressão ao nível médio do mar (hPa) (isolinha) e precipitação acumulada diária (mm/dia) (sombreado); (c) vento (m/s) e temperatura em 925 hPa (sombreado); (d) escoamento e advecção de vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}/\text{dia}$ ) em 500 hPa (Pa/s); (e) escoamento em 200 hPa (contorno) e magnitude do vento (m/s) (sombreado); (f) geopotencial (isolinha) e anomalia zonal do geopotencial (sombreado) em 200 hPa para o dia 16/08/1999.

(continua)

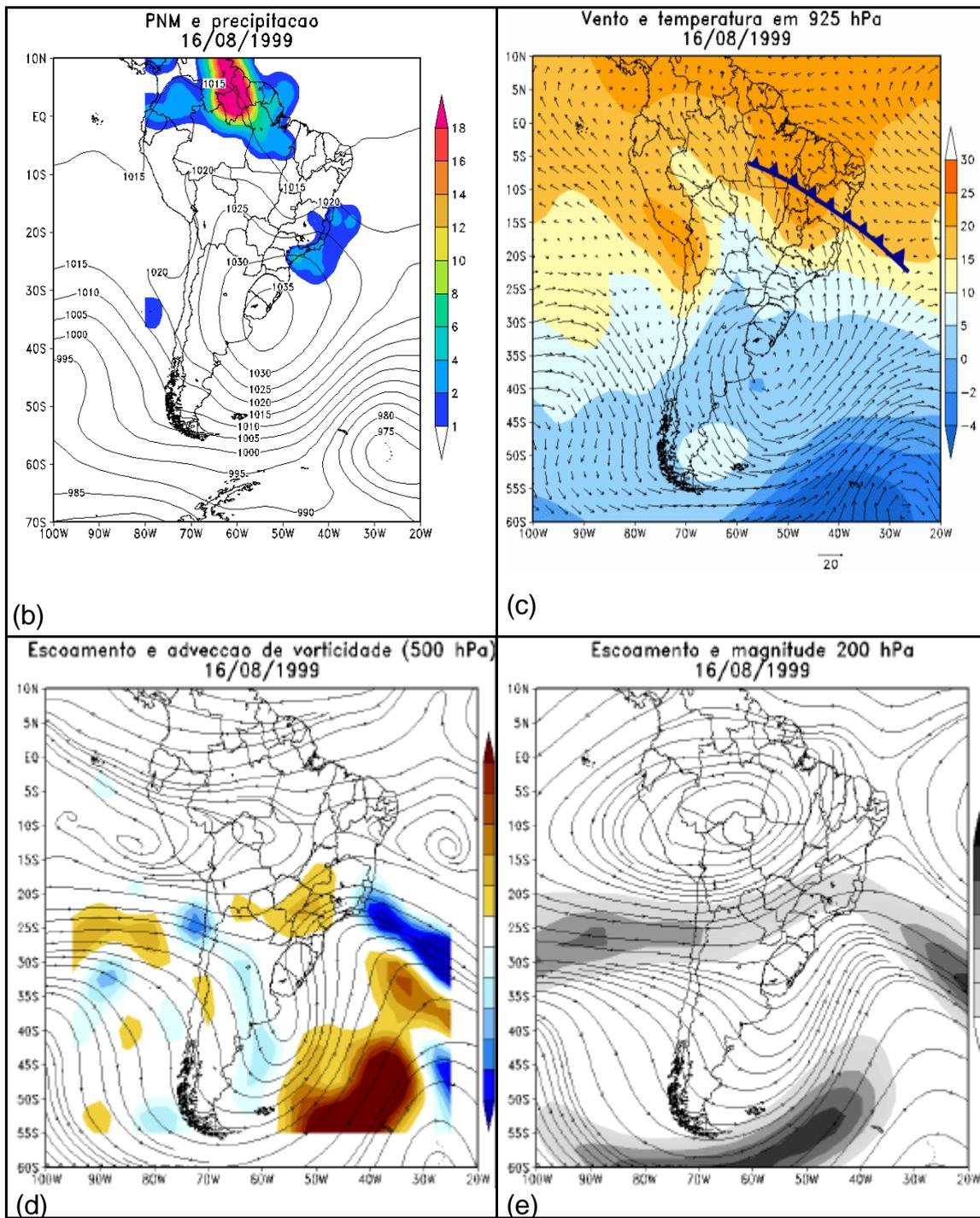


FIGURA 5.14 – Continuação

(continua)

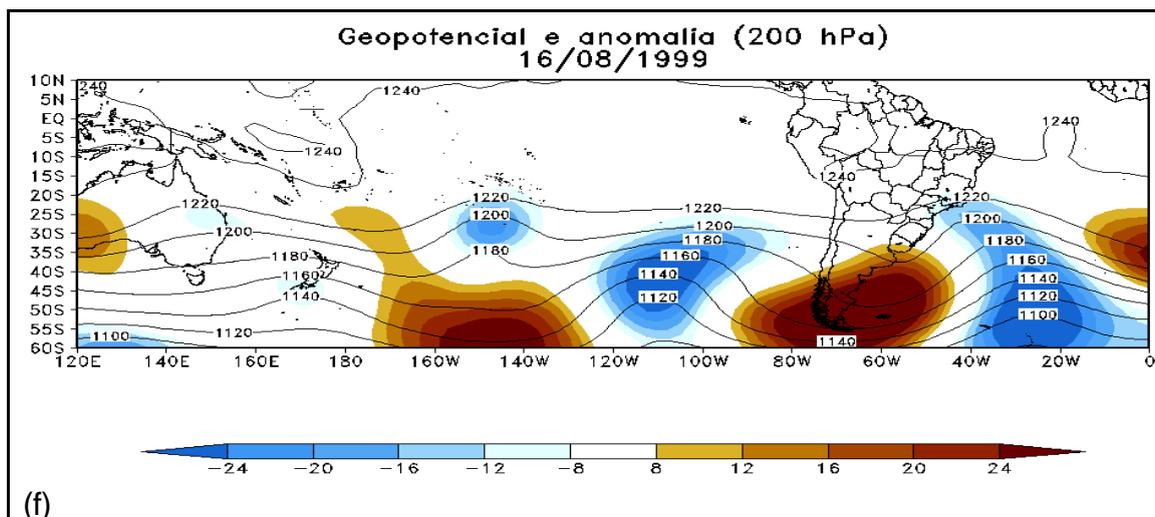


FIGURA 5.14 – Conclusão.

A Figura 5.15 mostra um diagrama Hovmoller do geopotencial em 500 hPa para longitudes de 120E-0 e latitude de 45°S. Através dessa Figura pode-se notar o deslocamento dos cavados e cristas. Nota-se 10 dias antes da entrada do ar frio, o cavado intenso associado à frente fria a leste da Nova Zelândia, em torno de 160°W. Os cavados e cristas deslocam-se para leste e no dia 11/08 ao atravessar a cordilheira do Andes o cavado desintensifica-se e vai se intensificar novamente quando estiver no continente. Nota-se que o padrão de trem de onda estende-se desde o Pacífico oeste até a América do Sul. Krishnamurti et. al. (1999) mostrou que a presença de baixa-alta-baixa no diagrama de Hovmoller sugere uma amplificação das ondas. Na região próxima a 60°W, que é a região da área 8 analisada, observa-se a crista a oeste e o cavado a leste bastante intenso, principalmente a partir do dia 14/08/1999.

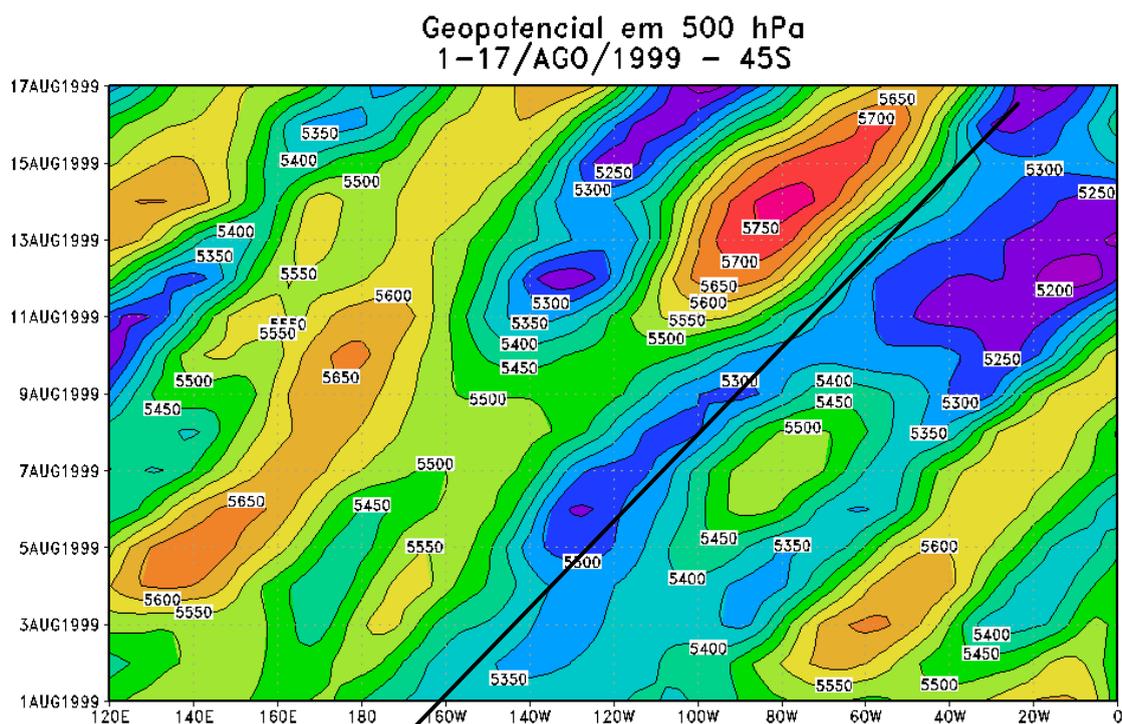


FIGURA 5.15 - Diagrama Hovmoller do geopotencial em 500 hPa na latitude de 45°S e faixa longitudinal de 120°W-0° para o período entre 01 e 17/08/1999.

Assim como em diversos trabalhos associados a eventos frios (Fortune e Kousky, Marengo et al, 1997, Krishnamurti et. al, 1999, Garreaud, 2000, Cavalcanti e Kousky, 2003), neste estudo de caso pode-se também confirmar que a circulação de grande escala em médios e altos níveis é caracterizada por uma crista na costa oeste do Pacífico e um cavado que se estende desde o Atlântico até a América do Sul. Tal padrão pode ser notado dias antes da ocorrência do evento frio, ou seja, precursor de eventos frios.

Em relação aos compostos mostrados no Capítulo 4, nota-se que anomalias positivas de geopotencial em 200 hPa no Pacífico aproximam-se mais da América do Sul, à medida que o sistema avança para latitudes mais baixas e pelo interior, devido à ocorrência de uma região de crista bastante intensa que também está associada ao anticiclone em superfície. Em médios níveis as

regiões com advecção de vorticidade positiva e negativa também estão bastante coerentes com a análise dos compostos. Em superfície, nos compostos, o sistema de alta pressão pós-frontal não se intensificou, no entanto, também adquire uma componente para norte em direção ao Equador, devido à presença da Cordilheira dos Andes. No dia do evento, o anticiclone também se posiciona a leste da costa sul do Brasil, como observado neste estudo de caso.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES**

Neste estudo foi feita uma climatologia dos sistemas frontais em 11 áreas sobre a América do Sul, sendo 2 áreas sobre o nordeste da Argentina e Uruguai e 9 localizadas no Brasil. Foi utilizado um método objetivo para a identificação de frentes, o qual levou em conta o seguinte critério: aumento da pressão ao nível médio do mar, queda de temperatura e mudança na componente meridional do vento em 925 hPa, de um dia para o outro. Após classificar e separar os casos de frentes frias em grupos de acordo com o deslocamento dos sistemas, foram feitos compostos de algumas variáveis atmosféricas, análise de componentes principais da PNM para dois grupos específicos (Rota 1/Sul e Rota 1/Sudeste) e o estudo de dois casos extremos, um para o verão e outro para o inverno.

No estudo da climatologia foram identificados mais casos de frentes que se deslocam até latitudes mais baixas, passando por todas as áreas, no inverno. Há um número menor de frentes, aproximadamente 2 sistemas, atingindo o sul da Bahia só pelo litoral, no verão. Um número um pouco maior de frentes (4 sistemas) atinge o sul da Bahia considerando todas as áreas, litoral e interior, no verão. Nessa estação do ano ocorrem períodos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) quando as frentes que atingem as regiões SE e CO ou quando chegam ao Sudeste com trajetória litorânea interagem com a convecção tropical. Para o outono, inverno e primavera o número de sistemas que chegam até o sul da Bahia tanto pelo litoral quanto aqueles que passam por todas as áreas aumenta em relação ao verão. Ou seja, são nessas estações do ano que os sistemas atingem latitudes mais ao norte e a oeste. Os resultados da frequência, em relação à estação do ano, dos sistemas que atingem o sul da Bahia estão coerentes com os obtidos por Kousky (1979) e Oliveira (1986). Nas áreas localizadas no interior das Regiões Sul, Sudeste e

Centro-Oeste, o número de frentes é menor no verão. Em relação ao número de frentes e o posicionamento das áreas selecionadas (Figura 3.1), foi notado, assim como em outros trabalhos (Oliveira, 1986 e Lemos e Calbete, 1996), que o número de sistemas frontais diminui em direção a latitudes mais baixas. Portanto, nas caixas localizadas na Região Sul há um número maior de frentes do que naquelas localizadas no Sudeste que, por conseguinte, apresentam mais casos que no sul da Bahia e Centro-Oeste.

Para os sistemas classificados nas categorias Rota 1/Sul e Rota 1/SE observa-se que a frequência dos sistemas que deslocam-se para o oceano é maior no verão. No entanto, como nessa época do ano há a atuação da ZCAS, nota-se que os sistemas que chegam até o Sudeste atuam na manutenção da ZCAS. O fato dos sistemas também não conseguirem atingir latitudes mais ao norte, passando a região SE, pode ser devido à presença dessa zona de convergência, que pode atuar como uma barreira para o avanço dos sistemas frontais, fazendo com que estes cheguem apenas até essas regiões. Na Região Sul, nas demais estações do ano, o número de frentes que se deslocam para o oceano diminui, ficando numa média de 3 sistemas. Para o Sudeste (rota 1) há um máximo secundário na primavera, ou seja, muitas frentes frias atingem essa região e posteriormente deslocam-se para o oceano. Este resultado é coerente com o encontrado por Oliveira (1986). Em relação aos sistemas que também chegam à Região Sudeste, porém com trajetória pelo interior, a diferença entre as estações do ano não é significativa, embora a menor frequência de frentes que se deslocam para o oceano, aconteça no inverno.

No grupo SAS e oceano a frequência de sistemas que atingem essas áreas e não chegam a atingir o Brasil foi maior no verão. Isso significa que menos sistemas conseguem atingir áreas mais ao norte. Para as demais estações do ano não há diferenças significativas. No entanto, quando analisamos o número de sistemas que atingem as áreas 1 e 2 nota-se que o maior número é no

inverno, uma vez que nessa estação há mais frentes frias atingindo o Brasil, tanto pelo litoral quanto pelo interior, porém antes passam por essas áreas.

Em relação à variabilidade interanual não foi observado nesse estudo um padrão para números máximos ou mínimos de sistemas frontais em eventos de El Niño e La Niña. No entanto, ao analisar dois eventos específicos de El Niño (82/83 e 97/98) e La Niña (88/89 e 98/99) em duas áreas específicas (3 e 6) observa-se que há um ligeiro aumento no número de frentes frias no segundo semestre em anos de El Niño e no primeiro nos eventos de La Niña, consistente com Fedorova e Carvalho (2000).

Alguns padrões de circulação de grande escala no inverno e verão foram analisados para os grupos das frentes que se deslocam em direção ao oceano e não entram no Brasil, para aquelas que atingem o sul do Brasil e se deslocam para o oceano, para as que atingem o Sudeste brasileiro, pelo litoral e também pelo interior, para os que avançam por todas as áreas estudadas e para aqueles que chegam até o sul da Bahia, porém seguindo pelo oceano. No inverno as diferenças entre os grupos são maiores que no verão.

Estes padrões concordam com algumas características médias da circulação sobre a América do Sul, associadas à passagem de um sistema frontal, porém apresentam algumas características da situação sinótica distintas, com relação a posicionamento e intensidade dos sistemas de pressão, escoamento e campos derivados, bem como aquelas associadas à atividade convectiva das zonas frontais.

No inverno, observou-se que a alta pressão sobre o Pacífico é ligeiramente menos intensa, aproximadamente 2 hPa no seu centro, nos grupos dos sistemas que não conseguem atingir o Sudeste do Brasil. No entanto, no caso das frentes que não entram no continente brasileiro há sobre as Regiões Sul e Sudeste pressões ligeiramente mais altas, isóbaras de 1016 hPa atuando nessas regiões. Portanto, o domínio de uma região de alta pressão sobre o

centro-sul do Brasil impede o avanço das frentes, bem como uma alta pós-frontal mais intensa favorece o deslocamento dos sistemas frontais.

Em relação à anomalia de OLR e ao campo de omega em 500 hPa, no dia inicial nota-se que quando há menos subsidência sobre o centro-sul do Brasil as frentes podem deslocar-se até latitudes mais baixas, pelo interior. A anomalia positiva de OLR nessa região é maior nos grupos que se deslocam pelo litoral (SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/SE e Rota 1/SBA).

Em baixos níveis, a diferença significativa entre os grupos está no vento de quadrante sul que atinge parte das Regiões Centro-Oeste e sul da Amazônia, consistentes com eventos de friagem nesta época do ano. É notado também que a intensidade do escoamento de norte na região de confluência, sobre o oceano, é determinante no deslocamento dos sistemas frontais. Ou seja, ventos mais fortes vindos de norte (acima de 11m/s no inverno, e acima de 8 m/s no verão), impedem o avanço dos sistemas frontais. Em médios níveis, observa-se que a forte advecção de vorticidade positiva sobre parte da Região Sul do Brasil impede o avanço dos sistemas, devido à intensificação de uma região de crista. Para os casos em que há advecção de vorticidade negativa no dia inicial sobre parte do centro-sul do Brasil o sistema frontal consegue deslocar-se, devido à intensificação dos cavados.

Com relação ao geopotencial e anomalia zonal do geopotencial em 200 hPa observa-se que a intensidade das cristas e cavados é fundamental no deslocamento dos sistemas frontais para latitudes mais ao norte. Foi observado que quanto mais intensa e próxima a crista estava do continente sulamericano os sistemas se deslocaram para norte. A anomalia positiva de geopotencial sobre parte da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul é menos intensa nos casos em que os sistemas frontais conseguem avançar para latitudes mais ao norte, isto é, o domínio de uma região de crista intensa sobre essas regiões impede que as frentes consigam deslocar-se, empurrando-as para o oceano. Foi visto também que o posicionamento e a intensidade do jato em altos níveis

são fatores importantes para o deslocamento dos sistemas frontais. Quanto mais ao sul e mais intenso estiver o jato mais difícil será o avanço das frentes para latitudes baixas.

No verão, as principais diferenças no dia em que o sistema foi identificado (dia inicial) no campo de pressão em superfície entre os grupos que se deslocaram pelo Brasil e aqueles casos que não atingiram o continente brasileiro foram associadas à intensidade dos sistemas de alta e baixa pressão. Foram verificadas pressões mais baixas sobre o sul do Brasil, para o grupo Sul. Pressões mais baixas sobre o oceano, próximas ao litoral sudeste e sul foram observadas no grupo SE. No caso dos sistemas que chegam ao Sudeste do Brasil, porém com trajetória continental, foram notadas pressões mais baixas em todo o centro-sul do Brasil e a alta pós-frontal mais intensa. No grupo Rota 2/SE, CO e SBA observou-se uma desintensificação da alta subtropical do Atlântico e pressões mais altas no sul da América do Sul. No último grupo, Rota 1/SBA, foi notado que a baixa pressão associada à frente fria esteve mais intensa neste grupo que nos demais analisados.

Em baixos níveis, foi observado que o escoamento vindo de norte na região do jato em baixos níveis é menos intenso no grupo dos sistemas que avançam pelo Brasil passando por todas as áreas (Rota 2/SE, CO e SBA). A desintensificação desse escoamento pode estar associada à presença de um outro sistema frontal na altura da Região Sudeste. Em altos níveis no verão, fica evidente que o posicionamento da circulação associada à Alta da Bolívia e ao Cavado do Nordeste é um outro fator que favorece o deslocamento das frentes.

Em relação ao tempo que o sistema frontal demora para chegar na Região Sudeste, deslocando-se pelo litoral (Rota1/SE) e aqueles que se deslocam também pelo interior (Rota 2/SE e CO), foi notado que no verão um maior percentual de frentes chega à região especificada (Sudeste) em 3 dias para ambos os grupos. Enquanto no inverno, quando as frentes têm um

deslocamento também continental chegam em aproximadamente 2 dias, e, aquelas que deslocam-se apenas pelo litoral em 3 dias. Esse deslocamento mais rápido pelo interior no inverno pode estar associada à intensidade da alta pós-frontal e dos ventos de sul e do escoamento em altos níveis à leste da Cordilheira do Andes que empurram os sistemas mais rápido pelo interior que pelo litoral.

Na análise dos diversos grupos para as duas estações do ano, nota-se que a intensidade da baixa pressão associada ao sistema frontal, da alta pressão pós-frontal e da subtropical, o gradiente de pressão sobre o Brasil, o posicionamento do eixo do cavado associado ao sistema, a posição dos cavados e cristas em altos níveis, a advecção de vorticidade, bem como a posição do jato em altos níveis, parecem ser fatores determinantes para o posicionamento e o deslocamento do sistema frontal.

É mostrado, na Figura 6.1, um esquema ilustrativo das principais condições atmosféricas descritas acima em baixos e altos níveis para os casos dos sistemas frontais que não avançam e aqueles que avançam pelo Brasil e atingem latitudes mais ao norte.

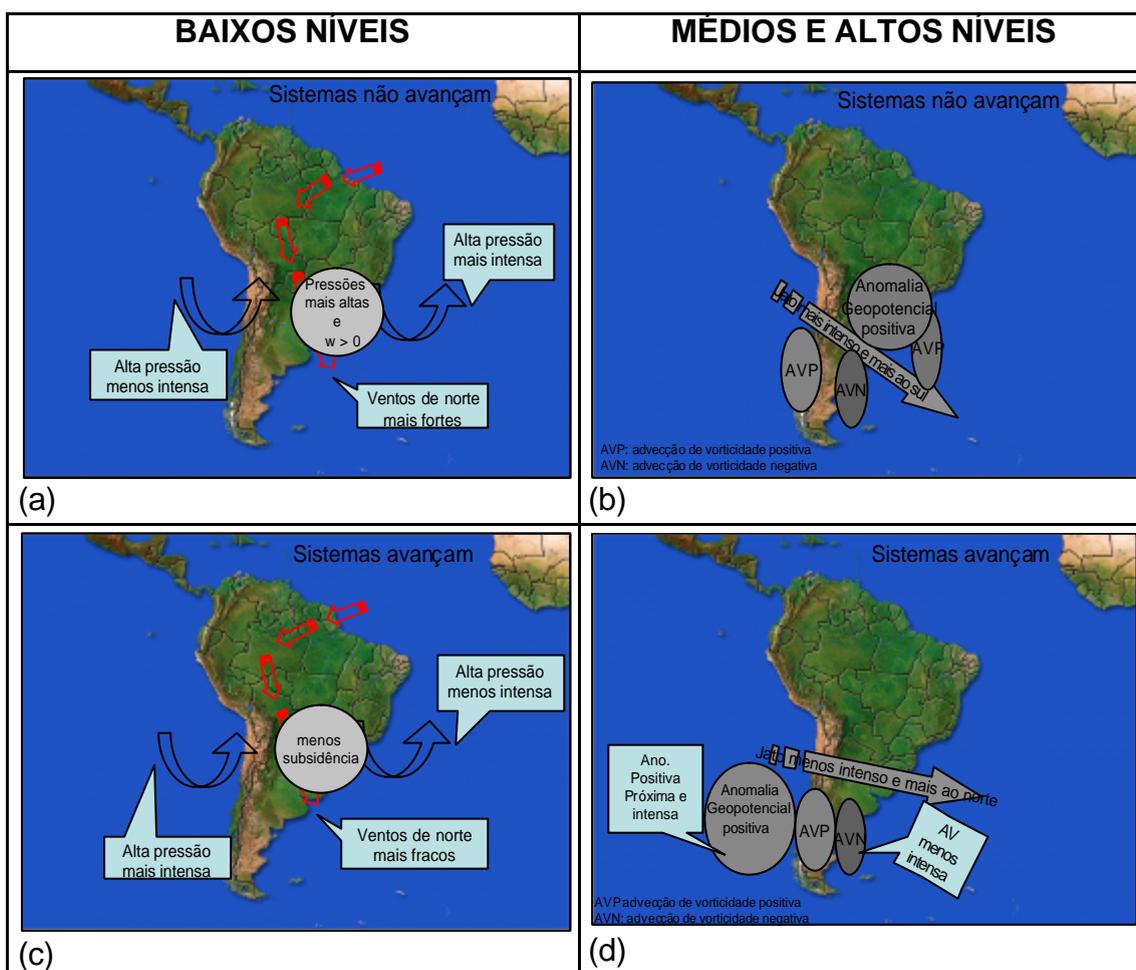


FIGURA 6.1 - Esquema ilustrativo das principais características atmosféricas em (a) baixos níveis e (b) médios e altos níveis para o grupo de sistemas frontais que não avançam pelo Brasil; e, (c) baixos níveis e (d) médios e altos níveis para o grupo de sistemas frontais que avançam pelo Brasil.

Em relação ao estudo de casos extremos no verão e inverno, pode-se concluir que, embora tenham sido selecionados casos extremos de chuva intensa no verão e queda brusca de temperatura no inverno, as características dos sistemas foram consistentes com as encontradas nos compostos. No caso selecionado para o verão, o avanço de uma frente fria pelo litoral até a Região Sudeste foi um dos fatores responsáveis para o início de um caso de ocorrência de ZCAS. Neste estudo, observou-se que a formação de uma

circulação ciclônica sobre parte do Sudeste e Centro-Oeste, com um centro de pressão baixa, juntamente com a forte divergência em altos níveis e o movimento ascendente intenso causaram precipitação intensa na região do Vale do Paraíba, sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Em altos níveis, o deslocamento da Alta da Bolívia e do cavado do Nordeste para oeste com a formação de um Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) também favoreceram a ocorrência da ZCAS. Outra característica observada neste estudo que foi consistente com a análise dos compostos foi a presença de um outro sistema frontal no dia inicial na altura da Região Sudeste. Nos compostos foi notado um mínimo relativo na pressão sobre o oceano próximo a São Paulo e anomalia negativa de OLR, coerente com a presença do sistema frontal existente no estudo de caso.

O caso extremo de passagem de frente fria pelo continente brasileiro selecionado no inverno foi associado à incursão de ar frio. Neste estudo de caso foi verificado que a intensidade do escoamento de sul associado à intensidade da alta pós-frontal foi essencial para que o sistema frontal avançasse mais pelo interior que pelo litoral. O padrão do escoamento na alta troposfera apresentou forte confluência das correntes de jato no dia da queda de temperatura no centro-sul do Brasil. Foi observada a configuração de uma crista, a oeste dos Andes e um cavado a leste. No entanto, neste estudo, não foi verificado um cavado bastante amplificado como, por exemplo, em Fortune e Kousky (1983) e Garreaud (2000). Portanto, pode-se concluir que embora o cavado não estivesse bastante amplificado a crista a oeste bem intensa favoreceu o desenvolvimento da alta pós-frontal. A configuração em baixos níveis, associada a uma alta intensa, foi fundamental para o avanço do ar frio até o Equador. Este evento frio também esteve associado a um trem de onda que pôde ser verificado sobre o Pacífico cerca de 10 dias antes da ocorrência da entrada de ar frio sobre o Brasil.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Complementar esse estudo para o outono e primavera.
- Realizar um estudo mais detalhado da evolução de sistemas frontais em casos de ocorrência de ZCAS.
- Realizar outros estudos de casos de sistemas frontais que causaram precipitação intensa ou forte queda de temperatura.
- Aplicar a metodologia utilizada para analisar as saídas dos modelos numéricos do CPTEC para verificar o comportamento dos modelos em relação á previsibilidade dos sistemas frontais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Algarve, V.R. **Características da circulação atmosférica associadas à ocorrência de geadas no sul do Brasil**. 1994. 128p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.
- Alves, J.M.B; Diniz, F.A. Sistemas atmosféricos atuantes no Estado do Ceará. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., São Paulo, 1992. **Anais...** São Paulo: SBMET, 1992. v.2, p.680-684.
- Bjerknes, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikationer**, v.1, n.2, p.1-8, 1919.
- Browning, K.A. Conceptual models for precipitation systems. **Meteorological Magazine**, v.114, n.1359, p.293-319, Oct. 1985.
- Calbete, N.O; Gan, M; Satyamurty, P. Vórtices ciclônicos da alta troposfera que atuam sobre a Região Nordeste do Brasil. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178). Disponível em: <<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/dock.html>>. Acesso em: 20 maio 2002.
- Carlson, T.N. **Mid-latitude weather systems**. London: Harper Collins Academic, 1991. 50p.
- Carvalho, L.M.V.; Jones, C.; Liebmann, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v.15, p.2377-2394, Sept. 2002.

Cavalcanti, I.F.A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais**. 1982. 133 p. (INPE-2494-TDL/097). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982.

Cavalcanti, I.F.A. **Casos de intensa precipitação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983**. São José dos Campos: INPE, 1985. (INPE- 3743-RPE/498).

Cavalcanti, I.F.A. Episódios de El Niño/ Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178). Disponível em: <<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/nino.html>>. Acesso em: 20 maio 2002.

Cavalcanti, I.F.A.; Coura da Silva, L.H.R. **Identificação de sistemas frontais em uma simulação de 10 anos com o modelo de Circulação Geral da Atmosfera CPTEC/COLA na Região Sul e Sudeste do Brasil**. Cachoeira Paulista: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002 (Relatório PIBIC/CNPq/INPE).

Cavalcanti, I. F. A.; Kousky, V. E. Climatology of South American cold fronts. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 7., Wellington, New Zealand, 2003. **Proceedings...** New Zealand: American Meteorological Society, 2003. 1 CD-ROM.

Chaves, R. R. **Variabilidade da precipitação na região sul do Nordeste e sua associação com padrões atmosféricos**. 1999. 159p. (INPE-7294-TDL/709). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

Chaves R.R.; Cavalcanti, I.F.A. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v.129, n.10, p.2614-2626, Oct. 2001.

**Climanálise**: Boletim de Monitoramento e Análise Climática. São José dos Campos: INPE,1992-2002. Mensal.

Colquhoun, J.R.; Shepherd, D.J.; Coulman, C.E.; Smith, R.K.; McInnes, K. The southerly buster of south eastern Australia: an orographically forced cold front. **Monthly Weather Review**, v.113, n.12, p. 2090-2107, Dec. 1985.

Compagnucci, R.H.; Araneo, D.; Canziani, P.O. Principal Sequence pattern analysis: a new approach to classifying the evolution of atmospheric systems. **International Journal of Climatology**, v.21, n.2, p. 197-217, Feb. 2001.

Dapozzo, J; Silva Dias, M.A.F. Um estudo de caso da penetração do ar polar em latitudes baixas: Julho de 1988. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8., Belo Horizonte, 1994. **Anais...** Belo Horizonte: SBMET, 1994. v.1, p. 601-606.

Escobar, G. **La circulation em la troposfera asociada com irrupciones de aire frio en el centro de Argentina**. 2001. 136p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2001.

Escobar, G.; Compagnucci, R.; Bischoff, S. Sequence patterns of 1000 hPa and 500 hPa geopotencial height fields associated with cold surges over Central Argentina. **Atmósfera**, v.17, p. 69-89, 2004.

Escobar, G; Andrade, K.M. Situações meteorológicas associadas com incursões de ar frio em São Paulo durante o período de inverno. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8., Fortaleza, 2004. **Anais...** Fortaleza, CE: SBMET, 2004. 1 CD-ROM.

Fedorova, N. **Meteorologia sinótica**, Pelotas: UFPEL, 1999, v.1.

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.

Fortune, M.; Kousky, V.E. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. **Monthly Weather Review**, v.111, n.1, p.181-196, Jan. 1983.

Frank, N.L. On the energetics of the cold lows. In: Symposium on Tropical Meteorology. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1970. p.EIV -EIV 6.

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

Gan, M. A. **Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul**. 1992. 221p. (INPE-5400-TDI/479). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

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.

Guedes, R.L. **Condições de grande escala associadas a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul**. 1985. 89p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

Harrold, T.W. Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.99, n.420, p. 232-251, 1973.

Justi da Silva, M.G.A.; Silva Dias, M.A.F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11., Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. 1 CD-ROM.

Kalnay, E et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, n. 3, p. 437-471, 1996.

Kousky, V.E. Frontal influences on Northeast Brasil. **Monthly Weather Review**, v.107, n.9, p.1140-1153, Sept. 1979.

Kousky, V.E.; Ferreira, N.J. Interdiurnal surface pressure variations in Brazil: their spatial distributions, origins and effects. **Monthly Weather Review**, v.109, n.9, 1999-2008, Sept. 1981.

Kousky, V.E; Cavalcanti, I.F.A. Precipitation and atmospheric circulation anomaly patterns in the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.3, p.199-206, 1988.

Kousky, V.E; Kayano, M.T. Principal modes of outgoing longwave radiation and 250 mb circulation for the South American sector. **Journal of Climate**, v.7, n.7, p.1131-1143, July 1994.

Krishnamurti, T.N.; Tewari, M.; Chakraborty, D.; Marengo, J.; Silva Dias, P.; Satyamurty, P. Downstream amplification: a possible precursor to major freeze events over southeastern Brazil. **Weather and Forecasting**, v.14, n.2, p.242-270, Apr. 1999.

Lemos, C.F.; Calbete, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178). Disponível em:  
<<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/14.html>>. Acesso em : 20 maio 2002.

Lichtenstein, E. Some influences of Andes Cordillera on the synoptic scale circulation. In: International Conference On Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 3., Buenos Aires, Argentina, 1989. **Proceedings...** Buenos Aires: American Meteorology Society, 1989. p.146-148.

Marengo, J.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C.A.; Sea, W. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, n.11, p. 2759-2786, Nov. 1997.

Mattos, L.F. **O papel de formação horizontal na frontogênese na região sul brasileira.** 1987. 118p. (INPE-4469-TDL/322). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

Oliveira, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia.** 1986. 134p. (INPE-4008-TDL/239). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

Oliveira, L.L.; Vianello, R.L.; Ferreira, N.J. **Meteorologia Fundamental.** Erichim, RS: EDIFAPES, 2001. 432 p.

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.

Parmenter, F.C. A southern hemisphere cold front passage at the Equator. **Bulletin American Meteorological Society**, v.57, n.12, p.1435-1440, 1976.

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

Pezzi, L.P.; Rosa, M.B.; Batista, N.N.M. A corrente de jato sobre a América do Sul. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178). Disponível em:  
<<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/jatclim.html>>.  
Acesso em: 20 maio 2002.

Quadro, M.F.L. **Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 1994. 97p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

Quadro, M.F.L.; Machado, L.H.R.; Calbete, S.; Batista, N.N.M.; Sampaio, G. Climatologia de Precipitação e Temperatura. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178). Disponível em:  
<<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/chuesp.html>>.  
Acesso em: 20 maio 2002.

Reeder, M.J.; Smith, R.K. Topics: Mesoscale meteorology. **Meteorological Monographs**, v.27, n.49, p.201-243, 1998.

**Relatório Climatológico do IAG-USP**, Ago 1999. Disponível em:  
<[http://www.grec.iag.usp.br/grec\\_relatorios.html](http://www.grec.iag.usp.br/grec_relatorios.html)>. Acesso em: 20 jul. 2002.

Richman, M.B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**. v.6, p.293-335, 1986.

Ryan, B.F.; Wilson, K.J.; Garrat, J.R.; Smith, R.K. Cold Fronts Research programme: progress, future plans, and research directions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 66, n. 9, p. 1116-1122, 1985.

Satyamurty, P.; Mattos, L.F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v.117, n. 6, p. 1355-1364, June 1989.

Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P. L. Topics: South America.

**Meteorological Monographs**, v.27, n.49, p.119-139, 1998.

Satyamurty, P.; Fonseca, J.F.B.; Bottino, M.J.; Seluchi, M.E.; Lourenço, M.C.M.; Gonçalves, L.G. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. **Meteorological Applications**, v.9, n.1, p.113-128, Mar. 2002.

Seluchi, M.E.; Serafini, Y.V.; Le Treut, H. The Impact of the Andes on Transient Atmospheric Systems: a comparison between observations and GCM results. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 4, p. 895-912, Apr. 1998.

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

Severo, D. L. **Estudo de casos de chuvas intensas no estado de Santa Catarina**. 1994. 97p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

Smith, R.K.; Ridley, R.N.; Page, M.A.; Steiner, J.T.; Sturman, A.P. Southerly Change on the east coast of New Zealand. **Monthly Weather Review**, v.119, n.5, p.1259-1282, May 1991.

Taljaard, J.J. Topics: Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. **Meteorological Monographs**, v.13, n.35, p.129-213, 1972.

Trenberth, K. E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 11, p.2771-2777, 1997.

Velasco I.; Fritsch, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v.92, n.D8, p.9591-9613, Aug. 1987.

Vianello, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449p.

Vieira, P.; Silva, C.E.S.; da Silva A.C.C.; Custódio, M. A M. Estudo de caso envolvendo 13 dias de alagamento e a Zona de Convergência. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11., Rio de Janeiro, 2000. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 1 CD-ROM.

Wilks, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences:** an introduction. San Diego: Academic Press, 1995.