



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

**VÓRTICE CICLÔNICO HÍBRIDO EMBEBIDO NA
ZCAS ASSOCIADO A UM CASO DE CHUVA
INTENSA NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Camila Silva Brasiliense

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

VÓRTICE CICLÔNICO HÍBRIDO EMBEBIDO NA ZCAS ASSOCIADO A UM CASO DE CHUVA INTENSA NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

CAMILA SILVA BRASILIENSE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

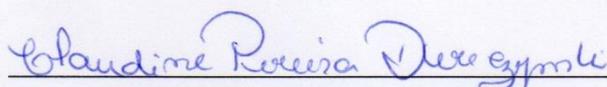
Orientadora: D.Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

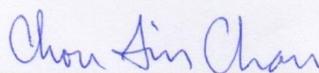
**VÓRTICE CICLÔNICO HÍBRIDO EMBEBIDO NA ZCAS ASSOCIADO A UM
CASO DE CHUVA INTENSA NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Camila Silva Brasiliense

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ)
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).



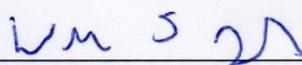
Prof. Dra. Claudine Pereira Dereczynski (Orientadora)



Prof. Dra. Chou Sin Chan



Prof. Dr. Isimar de Azevedo Santos



Prof. Dr. Wallace Figueiredo Menezes

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2016

BRASILIENSE, Camila Silva

Vórtice Ciclônico Híbrido Embebido na ZCAS Associado a um Caso de Chuva Intensa na Bacia do Rio Paraíba Do Sul / Camila Silva Brasiliense.

Rio de Janeiro: UFRJ/CCMN/IGEO/PPGM, 2016.

xv, 98f.: il.

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – UFRJ/CCMN/IGEO/
Programa de Pós Graduação em Meteorologia, 2016.

Referências Bibliográficas: f. 89-98.

1. Eventos de Chuva Intensa. 2. Zona de Convergência do Atlântico Sul. 3. Bacia do rio Paraíba do Sul. 4. Ciclone Subtropical. 5. Região Sudeste do Brasil.
I. Dereczynski, Claudine Pereira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO/CCMN, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A presença de uma força divina, que acompanha a nossa jornada aqui na Terra, nos permitindo o dom da vida.

À minha família, pelo apoio incondicional em todos momentos, em especial nos mais difíceis. Agradeço imensuravelmente a minha querida mãe, uma grande amiga, à quem eu dedico toda e qualquer vitória alcançada, porque sem a ajuda dessa mulher eu não seria metade do que sou hoje. Um muito obrigada! Ao meu pai (*in memoriam*) por todo amor, confiança e orgulho que ele tinha da família que ele ajudou a construir. E a minha irmã, que está sempre do meu lado, me motivando e torcendo pelo meu sucesso.

Ao Bernardo, meu namorado, amigo e grande companheiro. Que acredita na minha capacidade e me ajuda a buscar os meus sonhos, me incentivando e me ajudando nos momentos em que mais preciso dele.

À minha orientadora e amiga Claudine Dereczynski que esteve sempre presente, me ajudando, acreditando no meu potencial, me ensinando e me tornando uma profissional mais capacitada, bem como uma pesquisadora mais curiosa. Aos professores Prakki Satyamurty e Chou Sin Chan que contribuíram na realização deste trabalho, com seu conhecimento e apoio na elaboração do artigo. Ao Dr. Robert Hart da Universidade da Flórida, que forneceu os diagramas aqui analisados, contribuindo para os resultados finais desta dissertação.

À todos meus amigos, em especial aos da Meteorologia, que estão sempre comigo tanto na vida acadêmica, quanto nos plantões, congressos e festas. Em especial: Alice Sayão, Ariane Campani, Caio Souza, Fellipe Romão e Jéssica Panisset. Além desses, aos que contribuíram para a conclusão de mais uma etapa, como Renata Calado, Victor Rander, Pedro Regoto e Carolina Veiga, ajudando na elaboração de figuras e na finalização deste documento. Aos colegas de trabalho do Centro de Operações Rio, em especial aos do Alerta Rio, que me apoiaram e incentivaram a finalizar este ciclo, torcendo e dando força nos momentos de desespero.

Agradeço também, ao CNPq pelo apoio através do Projeto FNDCT No.400071/2014-2) e ao PPGM/UFRJ pela oportunidade de realizar o Mestrado e pelo apoio financeiro nas viagens necessárias para apresentação de trabalhos.

Enfim, um obrigada a todos pelo apoio! E por fazerem a minha vida mais leve, divertida e feliz com a presença de vocês.

RESUMO

VÓRTICE CICLÔNICO HÍBRIDO EMBEBIDO NA ZCAS ASSOCIADO A UM CASO DE CHUVA INTENSA NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Camila Silva Brasiliense

ORIENTADORA: Claudine Pereira Dereczynski

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Este trabalho objetiva analisar as características de um evento de chuva intensa, associado a inundações, ocorrido na Bacia do Rio Paraíba do Sul, no sudeste brasileiro, no início do ano 2000. Além disso, elabora-se uma climatologia de temperatura do ar e precipitação na bacia, no período de 1961 a 1990. Dados observacionais de precipitação e temperatura do ar, imagens de satélite e dados da Reanálise CFSR/NCEP foram utilizados neste estudo. Após a chegada de uma frente fria em São Paulo no dia 01/01/2000, configurou-se o primeiro episódio de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) do ano, atuando até 8 de janeiro de 2000. Um padrão de bloqueio do tipo dipolo sobre Rio Grande do Sul e Uruguai, com ciclone de núcleo frio e um anticiclone de núcleo quente em altos níveis, enfraqueceu o escoamento de oeste no Pacífico, favorecendo o lento deslocamento da ZCAS. Intensos fluxos de umidade, provenientes do sul da Amazônia e do Atlântico Sul tropical, confluíram fornecendo a umidade necessária nos primeiros dias de janeiro/2000. O destaque deste evento foi o desenvolvimento de um Vórtice Ciclônico Embebido na ZCAS (VCEZ) no Oceano Atlântico, com núcleo quente na baixa troposfera e frio em altos níveis, que atuou intensificando a chuva na região. Após o enfraquecimento do bloqueio, a partir de 4 de janeiro, o VCEZ deslocou-se para sudeste no Atlântico. Através de sua simetria e condições do gradiente térmico pode-se dizer que o sistema possuiu características subtropicais nos primeiros dias e posteriormente se tornou um ciclone extratropical.

Palavras Chaves: Eventos de Chuva Intensa, Zona de Convergência do Atlântico Sul, Bacia do rio Paraíba do Sul, Ciclone Subtropical, Sudeste do Brasil.

Rio de Janeiro
Dezembro/2016

ABSTRACT

HYBRID CYCLONIC VORTEX EMBEDDED IN SACZ ASSOCIATED WITH A CASE OF INTENSE RAINFALL EVENT IN THE PARAÍBA DO SUL RIVER BASIN

Camila Silva Brasiliense

ORIENTADORA: Claudine Pereira Dereczynski

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

This work aims to analyze the characteristics of intense rainfall event, associated with floods, occurred in the Paraíba do Sul River Basin, southeastern Brazil, early 2000. In addition, a climatology of air temperature and precipitation of the study area was elaborated from 1961 to 1990. Observational data of rainfall and air temperature, satellite images and datasets of CFSR/NCEP Reanalysis were employed. After the arrival of a cold front in the state of São Paulo on 1 January, the first episode of the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) of the year was established, lasting for eight days. A dipole blocking pattern over the state of Rio Grande do Sul and Uruguay, with a cold core cyclone and a warm core anticyclone in the upper troposphere, weakened the westerly flow from the Pacific, favoring slow displacement of the SACZ. Intense moisture fluxes from the southern Amazon and tropical South Atlantic, converged over Southeast Brazil providing copious amounts of moisture for convective activity during the first four days of January 2000. The most notable aspect of this event was the development of a Cyclonic Vortex Embedded in SACZ (CVES) in the Atlantic Ocean, with a warm core in the lower troposphere and a cold core at higher levels, which intensified rain in the study region. After the weakening of the blocking on 4 January, the CVES moved southeastward in the Atlantic. The symmetry of the CVES and conditions of the thermal gradient in the lower and higher troposphere suggest that the system presented subtropical characteristics during the first few days and became an extratropical cyclone later.

Key-words: Intense rainfall event, SACZ, subtropical cyclone, Southeast Brazil

Rio de Janeiro
Dezembro/2016

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1 Introdução	1
2 Sistemas Meteorológicos Associados à Precipitação na Região Sudeste do Brasil	5
2.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	6
2.2 Ciclones	11
2.2.1 Ciclones Subtropicais.....	13
2.2.1.1 Espaço de Fase do Ciclone	18
2.3 Estudos de Casos de Eventos Extremos de Precipitação na América do Sul 21	
3 Metodologia e Dados	30
3.1 Elaboração da Climatologia da Bacia do rio Paraíba do Sul.....	30
3.2 Elaboração do Estudo de Caso	34
3.2.1 Campos Construídos a partir da Reanálise CFSR.....	34
3.2.2 Mapas de Precipitação do Merge	36
3.2.3 Imagens de Satélite.....	36
3.2.4 Dados de Precipitação das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) do CPTEC/INPE	36
3.2.5 Diagramas de Fase de Ciclones.....	37
4 Principais Características da Bacia do Rio Paraíba do Sul	42
4.1 Climatologia da Bacia do Rio Paraíba do Sul	45
5 Estudo de Caso - Janeiro de 2000	59
5.1 Campos Médios Durante Atuação da ZCAS.....	60

5.2	Precipitação Observada	61
5.3	Análise Sinótica.....	66
5.3.1	Análise Sinótica do VCEZ.....	82
6	Conclusões	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Informações sobre as 23 estações meteorológicas do INMET utilizadas para construir a climatologia de temperatura da Bacia do rio Paraíba do Sul.31

Tabela 3.2 – Informações sobre as 71 estações pluviométricas do INMET, ANA e DAEE utilizadas para construção da climatologia de precipitação da BRPS. 32

Tabela 3.3 –Informações sobre as PCDs do CPTEC/INPE utilizadas neste estudo.
..... 36

Tabela 5.1 - Acumulados diários de precipitação (mm/dia) das estações do INMET, DAEE e das PCDs do CPTEC/INPE no período de 1 a 5 de janeiro de 2000. (Os valores em negrito destacam estações que registraram precipitação maior que 100 mm em 24h)..... 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Bacia do rio Paraíba do Sul distribuída pelos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, na Região Sudeste do Brasil. A localização das estações do INMET e PCDs do INPE cujos dados de precipitação são utilizadas no estudo de caso, aparecem em destaque na figura. 2

Figura 2.1 – Diferença entre a altura geopotencial máxima e mínima ($Z_{max} - Z_{min}$) ao longo da transição extratropical do furacão Floyd em 1999: (a) fase tropical, (b) fase híbrida e (c) fase extratropical. Fonte: Evans e Hart (2003). 14

Figura 2.2 – Diagrama esquemático de diferentes tipos de ciclones indicando a ocorrência de transições tropicais e extratropicais. TT - transição tropical e ET - transição extratropical. Fonte: Adaptado de Beven (1997). 15

Figura 2.3 - Espaço de Fase tridimensional. Cada lado do cubo representa um parâmetro para caracterização da fase do ciclone. (Fonte: Mathias, 2012). 19

Figura 2.4 - Diagramas de fase com os parâmetros (a) B e $-V_T^L$ (b) $-V_T^L$ e $-V_T^U$ resumando as principais categorias de ciclones. Fonte: Adaptado de Hart (2003). 20

Figura 2.5 - (a) Convergência de umidade média no período de 1-6 de janeiro de 2000 sobre América do Sul. Intervalo de isolinhas: $10^{-7} s^{-1}$. (b) Função frontogênica média no período de 1-6 de janeiro de 2000 em 850 hPa sobre a região de América do Sul. Intervalo de isolinhas: $10^{-11} C m^{-1} s^{-1}$. Fonte: Satyamurty et al. (2002). 22

Figura 2.6 – Imagem de satélite no canal IR e análises de superfície (PNMM) e geopotencial em 500 hPa para o caso de chuva intensa nos dias 11 e 12 de abril/1992. Imagens para (a) 12 UTC de 10 abril/1992 (dia D-1) e (b) 12 UTC de 11 de abril/1992 (dia D0), e altura geopotencial em 500 hPa (sombreado) e pressão ao nível médio do mar (contornos) para dias (c) D-1 e (d) D0. A linha tracejada ao longo de $22.5^{\circ}S$ em (c) é usada para seção vertical na Figura 2.7c. (Fonte: Teixeira e Satyamurty, 2007). 24

Figura 2.7 - (a) Convergência do fluxo de umidade (sombreado, $10^{-7} s^{-1}$), transporte de umidade (vetores, $10^{-2} kg.m.kg^{-1}.s^{-1}$), e advecção térmica (contornos, $10^{-4} K.s^{-1}$) em 850 hPa; (b) magnitude do vento (sombreado, $m.s^{-1}$) em 250 hPa, ômega (contornos, $Pa.s^{-1}$) em 500 hPa, e transporte de umidade ($10^{-2} kg.m.kg^{-1}.s^{-1}$) em 850 hPa; (c) perfil vertical de umidade específica (sombreado, $g.kg^{-1}$), linhas de corrente, e vento

meridional (contornos, $m.s^{-1}$) em 25°S para D-1 (10 Abr/1992); a topografia é mostrada em sombreado escuro. (d) magnitude do vento (sombreado, $m.s^{-1}$) em 250 hPa, ômega (contornos, $Pa.s^{-1}$) em 500 hPa, e transporte de umidade ($10^{-2}.kg.m.kg^{-1}.s^{-1}$) em 850 hPa. (Fonte: Teixeira e Satyamurty, 2007)..... 25

Figura 2.8 – Distribuição espacial do percentil 95 da precipitação diária (mm/dia) em cada ponto de grade (resolução de 2° de latitude/longitude horizontal) sobre o Brasil. Pontos de grade com precipitação acima do percentil de 95 realçados. (Fonte: Carvalho et al. 2004). 26

Figura 3.1 – Estações meteorológicas do INMET localizadas na Bacia do rio Paraíba do Sul, cujos dados foram utilizados para a elaboração da climatologia de temperatura do ar.31

Figura 3.2 – Estações pluviométricas localizadas na Bacia do rio Paraíba do Sul, utilizadas para a realização da climatologia de precipitação.32

Figura 3.3 – Esquemas para o hemisfério norte de (a) ciclone extratropical e (b) ciclone tropical, com isolinhas de espessura entre 900 e 600 hPa, limitados por envoltório de 500 km de raio. Fonte: Hart (2003).38

Figura 3.4 – As linhas contínuas indicam a altura geopotencial, as linhas pontilhadas mostram a anomalia de geopotencial em relação à média zonal e os gráficos a direita de cada figura mostram o perfil vertical da perturbação de altura geopotencial (ΔZ) para (a) ciclone tropical e (b) ciclone extratropical. As barras verticais limitam o raio de 500 km. Fonte: Hart (2003).41

Figura 4.1 – Mapa político e administrativo da Bacia do rio Paraíba do Sul (Fonte: COPPETEC, 2006).43

Figura 4.2 – Distribuição espacial das climatologias (1961-1990) das temperaturas médias anuais (°C) do ar, a partir das 23 estações do INMET listadas na Tabela 3.1: (a) Temperatura máxima diária, (b) Temperatura média compensada e (c) Temperatura mínima diária.47

Figura 4.3 – Ciclos anuais das temperaturas (°C) máxima, média compensada e mínima para o período 1961-1990 em: (a) Santo Antônio de Pádua e Campos, (b)

Teresópolis (Parque Nacional) e Nova Friburgo e (c) São José dos Campos e Taubaté.	49
Figura 4.4 – Precipitação anual (mm) na Bacia do rio Paraíba do Sul elaborado a partir das estações do INMET listadas na Tabela 3.2.	52
Figura 4.5 – Distribuição espacial da climatologia sazonal (1961-1990) da precipitação (mm) para as seguintes estações: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, (d) primavera.....	54
Figura 4.6 – Ciclos anuais da precipitação mensal (mm) climatológica no período 1961-1990 para as estações de Barra Mansa (RJ), Cachoeira Paulista (SP), Cruzeiro (SP) e São José do Barreiro (SP), com suas respectivas altitudes (m), com destaque para os valores da climatologia mensal de janeiro. Fonte: ANA e DAEE.	58
Figura 5.1 – Área alagada na cidade de Barra do Piraí no Rio de Janeiro durante o evento de chuvas intensas ocorrido no início de Janeiro de 2000.	59
Figura 5.2 Campos médios para o período 01 a 08 de janeiro de 2000: Campos médios para o período 01 a 08 de janeiro de 2000: (a) divergência de umidade (valores negativos a cada $10^{-5} \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) em 925 hPa e linhas de corrente em 850 hPa; (b) temperatura potencial equivalente (K) e linhas de corrente em 500 hPa (c) altura geopotencial (m) e linhas de corrente em 250 hPa.	61
Figura 5.3 - Mapas de precipitação observada (mm/dia), entre 12 UTC do dia anterior até 12 UTC do dia em questão, elaborados a partir do <i>Merge</i> : (a) 01/01/2000 – 12 UTC, (b) 02/01/2000 – 12 UTC, (c) 03/01/2000 – 12 UTC, (d) 04/01/2000 – 12 UTC, (e) 05/01/2000 – 12 UTC e (f) 06/01/2000 – 12 UTC. O contorno da Bacia do rio do Paraíba do Sul aparece em destaque.....	64
Figura 5.4 – Acumulados de precipitação observada nas PCDs do CPTEC/INPE a cada 3 horas, em Cruzeiro/SP, São José do Barreiro/SP, Cachoeira Paulista/SP e Barra Mansa/RJ.	65
Figura 5.5 – Imagens do canal infravermelho do satélite GOES-8: Imagens do canal infravermelho do satélite GOES-8: (a) 28/12/1999 – 12 UTC, (b) 29/12/1999 – 12 UTC, (c) 30/12/1999 – 12 UTC, (d) 31/12/1999 – 00 UTC, (e) 01/01/2000 – 00	

UTC, (f) 02/01/2000 – 00 UTC, (g) 03/01/2000 – 18 UTC, (h) 04/01/2000 – 00 UTC, (i) 05/01/2000 – 03 UTC, (j) 06/01/2000 – 12 UTC, (k) 07/01/2000 – 15 UTC e (l) 08/01/2000 – 12 UTC. A localização do VCEZ encontra-se em destaque dentro do retângulo preto. Fonte: CPTEC/INPE. 66

Figura 5.6 – Campos de Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa nas datas: (a) 01/01/2000 - 00 UTC, (b) 01/01/2000 - 06 UTC, (c) 01/01/2000 - 12 UTC, (d) 01/01/2000 - 18 UTC, (e) 02/01/2000 - 00 UTC, (f) 02/01/2000 - 06 UTC, (g) 02/01/2000 - 12 UTC, (h) 02/01/2000 - 18 UTC, (i) 03/01/2000 - 00 UTC, (j) 03/01/2000 - 06 UTC, (k) 03/01/2000 - 12 UTC, (l) 03/01/2000 - 18 UTC. 69

Figura 5.7 – Pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) e espessura 500-1000 hPa (sombreado, mgp): (a) 01/01/2000 - 00 UTC, (b) 01/01/2000 - 12 UTC, (c) 02/01/2000 - 00 UTC, (d) 02/01/2000 - 12 UTC, (e) 03/01/2000 - 00 UTC, (f) 03/01/2000 - 12 UTC, (g) 04/01/2000 - 00 UTC, (h) 04/01/2000 - 12 UTC, (i) 05/01/2000 - 00 UTC, (j) 05/01/2000 - 12 UTC. 71

Figura 5.8 – Altura geopotencial (sombreado, mgp) e linha de corrente em 250 hPa (linhas): (a) 01/01/2000 - 00 UTC, (b) 01/01/2000 - 12 UTC, (c) 02/01/2000 - 00 UTC, (d) 02/01/2000 - 12 UTC, (e) 03/01/2000 - 00 UTC, (f) 03/01/2000 - 12 UTC, (g) 04/01/2000 - 00 UTC, (h) 04/01/2000 - 12 UTC, (i) 05/01/2000 - 00 UTC, (j) 05/01/2000 - 12 UTC. 73

Figura 5.9 – Umidade específica (sombreado, g.kg^{-1}) em 925 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC. 76

Figura 5.10 – Fluxo de umidade verticalmente integrado (sombreado, $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) entre 1000 e 300 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC. 76

Figura 5.11 – Divergência de vento (sombreado, valores negativos a cada 10^5 s^{-1}) e linha de corrente em 850 hPa (linhas) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC. 77

Figura 5.12 – Movimento vertical (sombreado, $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) em 500 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC.....	78
Figura 5.13 - Altura geopotencial (sombreado, mgp) em 850 hPa (a, b), 700 hPa (c, d), 500 hPa (e, f) e 300 hPa (g, h) e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) nos dias 02/01/2000 às 12 UTC (coluna da esquerda) e 03/01/2000 às 12 UTC (coluna da direita).....	78
Figura 5.14 – PNMM (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa no dia 1º de janeiro de 2000 às 18 UTC. A área delimitada em (a) representa a faixa latitudinal onde foi realizado o corte vertical de vorticidade relativa (sombreado, $10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$), umidade específica (linha contínua, g/kg) e velocidade vertical (linha tracejada, $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$), apresentado em (b).	81
Figura 5.15 – Semelhante à Figura 5.14, exceto para o dia 2 de janeiro de 2000 às 12 UTC.	81
Figura 5.16 – Semelhante às Figuras 5.14 e 5.15, exceto para o dia 3 de janeiro de 2000 às 12 UTC.....	82
Figura 5.17 – Diagrama de Fase do VCEZ no período de 01 a 06/01/2000 obtida a partir da Reanálise do CFSR/NCEP: (a) Simetria térmica e (b) Estrutura térmica vertical.	83
Figura 5.18 – Ampliação do Diagrama de Fase do VCEZ apresentado na Figura 5.17: (a) Simetria térmica e (b) Estrutura térmica vertical. Os números de 1 a 20 representam os passos de tempo do VCEZ a cada 6 horas, desde 01/01/2000 às 06 UTC (tempo 1) até 06/01/2000 às 00 UTC (tempo 20).....	85

1 Introdução

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes, uma vez que seus impactos afetam diversos setores da sociedade. Quando as chuvas são escassas podem resultar em secas que afetam os setores produtivos, econômicos, social e ambiental de uma região. Quando as chuvas ocorrem em excesso podem ocasionar enchentes, alagamentos, inundações e deslizamentos, provocando um colapso de serviços de infraestrutura ou, até mesmo, causando perdas de vidas humanas, devido a acidentes ou propagação de doenças de veiculação hídrica. Além dos danos à saúde humana, existem os danos à saúde psicológica da população, devido ao “stress” causado pelas situações enfrentadas nos momentos das enchentes (Souza *et al.* 2012).

Os eventos extremos de chuva são os principais deflagradores de inundações bruscas e movimentos de massa no Brasil. Muitos desses eventos quando atingem áreas ocupadas, especialmente aglomerados urbanos, causam acidentes, desastres e catástrofes, que podem ser definidos como impactos negativos ao sistema socioeconômico. Geralmente eventos de chuvas intensas provocam mortes e grandes prejuízos materiais, por isso o crescente interesse em seu estudo, sua frequência e impactos provocados por esses em determinadas localidades consideradas como áreas de risco, sendo uma atividade muito importante para a prevenção e mitigação de desastres. De acordo com o *Emergency Events Database* (EM-DAT <http://www.emdat.be/database>) apenas entre 2000 e 2015 ocorreram no Brasil 72 desastres naturais relacionados às chuvas intensas, deixando um total de 2642 mortos e mais de 7 milhões de afetados.

O Brasil, com seu extenso território, possui diferentes climas que são influenciados por vários fenômenos meteorológicos. A Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS), região de estudo deste trabalho (Figura 1.1), localiza-se na Região Sudeste do Brasil, onde sistemas meteorológicos como frentes frias, ciclones, zonas de convergência e sistemas convectivos de mesoescala normalmente atuam provocando chuvas que costumam ser intensas, principalmente no verão. Ademais, localmente o relevo acidentado da área em estudo promove o aumento da convecção a partir do levantamento do ar úmido e liberação de calor latente. Somam-se aos fatores meteorológicos, os motivos básicos para as inundações em diversos rios brasileiros: invasão da calha principal dos cursos d'água pelas construções ribeirinhas, que

geração de energia hidrelétrica. Em seu leito estão localizados importantes reservatórios de usinas hidrelétricas, como Paraibuna, Santa Branca e Funil. Além disso, a bacia tem importante papel na geração de energia e abastecimento de cerca de 15 milhões de pessoas. Através de um intrincado e complexo conjunto de estruturas hidráulicas existentes nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul e Guandu, que interliga as duas bacias, ocorre um desvio das águas do rio Paraíba do Sul para a bacia hidrográfica do rio Guandu, com a finalidade de geração de energia e abastecimento de cerca de nove milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

Por ser uma região de grande importância econômica e social, e devido ao seu histórico de frequentes desastres naturais, a BRPS foi selecionada para estudo. Um evento de chuva intensa associado a inundações na BRPS, ocorrido em janeiro de 2000, com registros de sérios transtornos à população, é investigado neste trabalho.

Satyamurty *et al.* (2002) também estudaram o episódio de ZCAS que é investigado neste trabalho, ocorrido nos primeiros dias do ano 2000, que provocou chuvas intensas, inundações, deslizamentos de terra e bloqueios de estradas entre as duas principais cidades do Brasil, Rio de Janeiro e São Paulo. Os autores relatam que esse caso foi uma das calamidades naturais que mais prejudicou a população da região do Vale do Paraíba do Sul desde a década de 1970, onde as chuvas fortes duraram cerca de 5 dias desde a noite de 31 de dezembro 1999 até o dia 06 de janeiro de 2000.

De acordo com Sugahara *et al.* (2010), considerando-se o total pluviométrico acumulado em 5 dias, este evento de janeiro de 2000 pode ser classificado como muito raro, com probabilidade de ocorrência em um ano variando entre 0,0086% e 2,3%. Os autores ressaltam que em Pindamonhangaba foram acumulados 522 mm de chuva nos 5 primeiros dias do ano, sendo portanto, tal evento mais extremo em termos da precipitação acumulada em 5 dias do que por sua precipitação diária.

O objetivo principal deste trabalho é analisar o evento de janeiro de 2000, identificando as características dos sistemas meteorológicos em escala sinótica e subsinótica, responsáveis pelos elevados acumulados de chuva na BRPS nos primeiros dias do ano 2000. A expectativa é de que o entendimento das características dos sistemas meteorológicos envolvidos possa colaborar para o aperfeiçoamento da previsão de tempo de tais eventos, de forma a reduzir a vulnerabilidade da população. Além disso,

destaca-se como objetivo específico a elaboração de uma climatologia da temperatura do ar e da precipitação na BRPS.

No próximo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os sistemas meteorológicos que afetam a Região Sudeste do Brasil, com destaque para a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Ciclones, além de resultados de pesquisas relacionadas a eventos de precipitação intensa. A metodologia e os dados utilizados neste trabalho são abordados no Capítulo 3. No Capítulo 4 são apresentadas as principais características da BRPS e sua climatologia. No Capítulo 5 estão as análises sinóticas do estudo de caso ocorrido no início de janeiro de 2000 e finalmente no capítulo 6 apresentam-se as conclusões.

2 Sistemas Meteorológicos Associados à Precipitação na Região Sudeste do Brasil

Satyamurty *et al.* (1998) ressaltam que o estudo do tempo e clima da América do Sul (AS) envolve o entendimento das características tropicais, subtropicais e extratropicais decorrentes da vasta extensão meridional desse continente, que se estende de 10°N até 60°S. Cercado pelos oceanos Atlântico e Pacífico, a meteorologia deste continente sofre influência desses grandes oceanos, assim como da extensa Cordilheira dos Andes e da vasta e úmida floresta Amazônica localizada no norte da AS, que ocupa cerca de 35% da sua área total continental e 65% de sua área tropical.

Ainda em Satyamurty *et al.* (1998) foi elaborada uma revisão da literatura sobre os principais sistemas sinóticos que atuam na AS. A Região Sudeste do Brasil, onde está localizada a BRPS, é fortemente influenciada pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que garante condições de céu claro ou com pouca nebulosidade (estabilidade termodinâmica), ventos de direção nordeste de fraca intensidade e temperaturas amenas durante todo o ano. Tais condições são frequentemente observadas durante o inverno, época de maior intensidade do ASAS e período do ano mais seco no Sudeste brasileiro. De acordo com os pesquisadores, no verão o ASAS apresenta menor intensidade, afasta-se do continente, predominando, na maior parte dos trópicos e subtropicais da América do Sul, condições mais úmidas, típicas da estação chuvosa. À medida que o ASAS migra para sul no início do verão, a convecção se desenvolve na maior parte do Brasil, formando uma banda alongada de alta atividade convectiva, orientada no sentido noroeste-sudeste, originada na Amazônia e estendendo-se em direção ao sul no Oceano Atlântico, conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Com relação aos sistemas transientes descritos por Satyamurty *et al.* (1998), destacam-se os sistemas frontais e os sistemas convectivos de mesoescala que também atingem a área de estudo. As frentes frias são os sistemas transientes mais comuns sobre o continente sul americano. Os ciclones de latitudes médias vindos do Pacífico cruzam os Andes e Argentina, ao sul de 35°S, tomam um curso leste-sudeste no Atlântico, enquanto a frente fria associada ao centro de baixa pressão move-se para nordeste. À medida que a frente fria avança sobre a parte leste do continente, a atividade convectiva é disparada sobre Argentina, Bolívia, Brasil e leste do Peru. A região do Paraguai, norte da Argentina, Uruguai e sul do Brasil experimentam os efeitos do desenvolvimento

rápido dos sistemas convectivos de mesoescala (SCMs). Tais sistemas em geral se iniciam nas primeiras horas do dia e tem um ciclo de vida curto, menor do que um dia. Os SCMs são possivelmente disparados pela brisa de montanha numa atmosfera instável. Próximo e em torno da interseção do escoamento de baixos níveis com o jato subtropical nos altos níveis, a instabilidade é máxima e nessa região são disparados os SCMs. O escoamento de baixos níveis a leste do Andes fornece o transporte de umidade necessário para a formação das nuvens e da precipitação nos SCMs. Tais sistemas movem-se para leste a partir de sua região de origem no norte da Argentina e Paraguai causando intensa precipitação em seu caminho. Em diversas ocasiões, esses SCMs, em seus deslocamentos para norte, atingem a região Sudeste, causando chuvas na área.

Vera *et al.* (2006) relatam que a Região Sudeste do Brasil é uma região úmida no verão devido ao sistema de monção da AS e seca no inverno, com um total anual de precipitação de 1500 mm. Reboita *et al.* (2010) comentam que os eventos de chuva que ocorrem na Região Sudeste do Brasil são devido aos sistemas frontais e ciclones subtropicais/extratropicais que conseguem se sobrepor ao ASAS, além dos sistemas como linhas de instabilidade pré-frontais, Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), bloqueios atmosféricos e brisas, que também atuam nessa região.

Observa-se que diversos sistemas e fenômenos atmosféricos são capazes de influenciar significativamente as condições de tempo na região da BRPS. Neste capítulo apresenta-se a revisão da literatura desta dissertação, dividida em três seções: a primeira e a segunda apresentam detalhes de dois dos sistemas meteorológicos responsáveis por grande parte da precipitação na Região Sudeste do Brasil, a ZCAS e os Ciclones, e a terceira trata dos resultados de pesquisas relacionadas a eventos extremos de precipitação na América do Sul.

2.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A climatologia da precipitação sobre os trópicos e subtropicais da América do Sul apresenta um ciclo anual regular. A atividade convectiva começa no início de agosto no oeste da bacia Amazônica e marcha nos meses subsequentes em direção ao sudeste do Brasil. O início da estação chuvosa sobre a Região Sudeste do Brasil geralmente ocorre na segunda quinzena de outubro, atingindo seu máximo entre dezembro e fevereiro, decaindo em meados de março e início de abril, quando a atividade convectiva profunda enfraquece sobre a região tropical (Cavalcanti *et al.*, 2009).

Acompanhando o ciclo anual da chuva observa-se uma das características mais marcantes do clima tropical da América do Sul durante o verão: a presença de uma banda de nebulosidade e precipitação persistente com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde o sul e leste da Amazônia até o Sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o Oceano Atlântico Subtropical (Kodama 1992, 1993; Satyamurty *et al.*, 1998; Liebmann *et al.*, 2001; Carvalho *et al.*, 2002, 2004). Convencionou-se chamar de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) essa característica, pois está associada a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera.

A ZCAS é o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas sobre as Regiões Sul e Sudeste do Brasil durante os meses de primavera e verão. Em suas características gerais a ZCAS possui forte indício de confluência entre o ar do ASAS e o ar oriundo de latitudes mais altas. Destaca-se durante a sua atuação, a convergência de umidade na baixa troposfera e a presença de um cavado a leste da Cordilheira dos Andes, orientado na direção noroeste-sudeste em 850 hPa e, além disso, há o transporte de umidade em baixos níveis, que mantém a convecção através da convergência de umidade na baixa e média troposfera e alto contraste de umidade (Kodama, 1992).

Em relação ao efeito local dos Andes sobre a ZCAS, Figueroa *et al.* (1994) mostraram, por experimentos numéricos, que o posicionamento adequado desse sistema depende da inclusão da topografia nas simulações. Entretanto, um aspecto interessante é que, simulações sem a inclusão da topografia, conseguem reproduzir um padrão de divergência (convergência) alongada em altos (baixos) níveis, com orientação semelhante à da ZCAS (Figueroa *et al.*, 1994; Gandu e Geisler, 1991; Kalnay *et al.*, 1986). Assim, embora os Andes não tenham um papel preponderante na gênese da ZCAS, aparentemente intensificam o escoamento em baixos níveis, auxiliando assim a alimentação da convergência do ar úmido da região Amazônica.

Embora as características da ZCAS estejam presentes na maior parte dos verões, são observadas variações na sua localização espacial ao longo de cada estação, na sua frequência de ocorrência ao longo dos anos, na configuração da circulação atmosférica em cada ocorrência e na intensidade da chuva e sua distribuição sobre a região afetada. Muitos eventos severos que resultaram em inundações e deslizamentos de encostas sobre o continente estão associados às ocorrências de ZCAS e, em anos com a

descaracterização desse sistema, ou mesmo sua ausência, foram observados longos períodos de secas ou má distribuição das chuvas sobre a Região Sudeste do Brasil, tais como ocorrido nos verões de 2014 e 2015 (Nobre *et al.*, 2016).

Kodama (1992) realizou um estudo observacional que mostrou diversas características comuns entre a ZCAS, a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a Zona Frontal de Baiu, chamadas, de uma forma geral, de Zonas de Convergência Subtropical (ZCST). Essas características comuns seriam: i) Estendem-se para leste, nos subtropicais, a partir de regiões tropicais específicas de intensa atividade convectiva; ii) Formam-se ao longo de jatos subtropicais em altos níveis e a leste de cavados semi-estacionários; iii) São zonas de convergência em uma camada inferior úmida, espessa e baroclínica e iv) Estão localizadas na fronteira de massas de ar tropical úmida, em regiões de forte gradiente de umidade em baixos níveis, com geração de instabilidade convectiva por processo de advecção diferencial. Especificamente em relação à ZCAS, esses resultados foram também confirmados por Quadro (1994).

Em relação ao posicionamento da ZCAS, Quadro (1994) mostra que a mesma localiza-se predominantemente sobre a Região Sudeste, Brasil Central, norte do Paraná e o sul do estado da Bahia. O autor ressalta ainda que dentro de uma mesma estação, a ZCAS pode apresentar variações na sua localização, posicionando-se em regiões mais ao norte do continente durante o mês de dezembro e recuando mais para o sul até o fim do verão.

As características mais marcantes, observadas por Quadro (1994), nos campos analisados são: i) Convergência de umidade em baixos e médios níveis na região de estabelecimento da ZCAS; ii) No escoamento em 500 hPa, a presença de um cavado sobre a costa leste da América do Sul (AS) orientado na mesma direção que a ZCAS. Esse cavado, por sua vez, encontra-se associado a uma faixa de movimento vertical ascendente também com orientação NW/SE e localizada na média troposfera; iii) Campo de temperatura potencial equivalente (Θ_e), em 500 hPa, caracterizado pela presença de uma crista na região da ZCAS e um intenso gradiente de Θ_e ao sul da faixa de nebulosidade convectiva. Tal gradiente define a separação entre a massa quente e úmida oriunda dos trópicos e a massa fria e seca procedente das latitudes médias e altas e iv) Uma faixa de movimento anticiclônico em altos níveis caracterizando as regiões típicas para a manifestação do fenômeno.

Os mecanismos que originam e mantêm a ZCAS não estão ainda totalmente compreendidos, porém, estudos observacionais e numéricos indicam que esse sistema sofre influências tanto de fatores remotos quanto locais. Aparentemente as influências remotas, tal como a convecção na ZCPS, modulam o início, duração e localização da ZCAS, enquanto os fatores locais são determinantes para a ocorrência desse fenômeno, ou seja, sem eles o sistema provavelmente não existiria (Climanálise, 1996).

Casarim e Kousky (1986) mostraram que, em relação aos fatores remotos, a convecção na região centro-oeste do Pacífico, especificamente na ZCPS, implica numa posterior intensificação da ZCAS, sugerindo um mecanismo de propagação do tipo oscilação 30-60 dias. A simulação de uma onda estacionária associada ao padrão definido pela ZCPS/ZCAS, com um modelo de circulação geral da atmosfera (Kalnay *et al.*, 1986), mostrou que a existência dessa onda estava vinculada à convecção na região tropical e nas próprias Zonas de Convergência.

Diversos podem ser os fatores locais, porém, o único consenso parece ser quanto ao papel da convecção na região Amazônica. Em um estudo observacional das Zonas de Convergência Subtropicais, Kodama (1993) mostrou que essas zonas aparecem somente quando duas condições de grande escala são satisfeitas: i) Escoamento de ar quente e úmido, em baixos níveis, em direção às altas latitudes ao longo da borda oeste dos anticiclones subtropicais e ii) Um jato subtropical (JST) em altos níveis fluindo em latitudes subtropicais. O escoamento em baixos níveis intensifica a convergência de umidade enquanto, combinado com o JST, intensifica a frontogênese no campo da temperatura potencial equivalente, gerando instabilidade convectiva. O estabelecimento desse padrão de circulação está claramente associado à atividade convectiva na Amazônia e Brasil Central, intensificando o JST em altos níveis, em um processo de conversão de energia cinética divergente em energia cinética rotacional (Hurrell e Vincent, 1991). Enquanto que em baixos níveis a convecção também contribui na intensificação da Baixa do Chaco, fortalecendo a convergência de ar úmido sobre a região.

Quadro (2012) investigou o comportamento de Vórtices Ciclônicos de Mesoescala (VCMs) associados a episódios de ZCAS. De acordo com o autor, os VCMs são gerados dentro de um ambiente estratiforme na região da ZCAS, absorvendo a umidade e acelerando os ventos na vertical, promovendo intensa precipitação e, como

consequência, afetando drasticamente as regiões atingidas. Através de um sistema automático de detecção de vórtices embebidos na ZCAS, Quadro (2012) elabora uma estatística de ocorrência de tais vórtices para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período 2000-2009, considerando a região da ZCAS dividida em três sub-regiões: ZCAS Continental Amazônica (ZCA), ZCAS Continental Costeira (ZCC) e ZCAS Oceânica (ZOC). Nos seus resultados, o autor observa que os vórtices encontrados, em cada uma das regiões estudadas, estão embebidos na região de confluência e de movimento ascendente do ar ao longo da ZCAS. Dentre os demais resultados encontrados pelo autor, 300 VCMs úmidos foram detectados na baixa troposfera, localizados no sudoeste da ZCC, enquanto que na média e alta troposfera foram detectados 277 VCMs. Ressalta-se que vórtices úmidos continentais são caracterizados pela vorticidade ciclônica até a média troposfera, com máximos entre 875 e 850 hPa. A estrutura térmica desses vórtices apresenta núcleo frio abaixo do máximo de vorticidade e uma taxa de aquecimento em direção à média e alta troposfera. Já os vórtices sobre o oceano apresentam valores de vorticidade relativa e anomalia de temperatura potencial aproximadamente uma ordem de grandeza menor que os vórtices continentais. Conclui-se que na baixa troposfera a maioria dos VCMs se localiza na região ZCC. Outras características marcantes dos VCMs são que uma pequena parte do total pluviométrico associado a eles é de origem convectiva e os vórtices mais intensos (maior taxa de rotação ciclônica) localizam-se na baixa troposfera. Verificou-se também nesse trabalho uma concordância entre as regiões de máxima vorticidade ciclônica e os extremos de precipitação.

Quadro *et al.* (2016) analisam as condições termodinâmicas durante a atuação de um Vórtice Ciclônico de Mesoescala (VCM) embebido na ZCAS em janeiro de 2009 através de simulações numéricas com o modelo BRAMS. Os autores relatam que os VCMs encontram-se na baixa e média troposfera, com ciclo de vida menor que 24 h, escala espacial de aproximadamente 200 km e com deslocamento do sistema na mesma direção do escoamento na baixa troposfera. Outra característica dos VCMs encontrados em Quadro *et al.* (2016) é o predomínio de vorticidade ciclônica em praticamente todos os níveis da troposfera. No presente trabalho, o Vórtice Ciclônico Embebido na ZCAS (VCEZ) não pode ser considerado um sistema de mesoescala, pois sua duração foi de alguns dias e seu diâmetro superior a 1000 km, o que o caracteriza como um sistema sinótico, ou ainda um sistema típico da escala meso α de Orlanski (1975).

Kodama *et al.* (2012) estudaram o papel do Planalto Brasileiro (PB), definido pelos autores entre 12-25°S/40-50°W, na manutenção da ZCAS, através de análises estatísticas e simulações numéricas. Seus resultados mostraram que a ZCAS é mais intensa quando se localiza sobre o PB devido à circulação ciclônica de mesoescala nos baixos níveis, que aparece sobre a parte sudoeste do planalto, por eles denominada de circulação ciclônica do Planalto Brasileiro (*Brazilian Plateau Cyclonic Circulation – BPC*). Tal centro ciclônico forma um escoamento de oeste, que intensifica a convergência de baixos níveis ao longo da ZCAS, com o escoamento de nordeste proveniente da Amazônia e escoamento de norte da borda oeste da circulação do ASAS. Os autores também concluíram, através do balanço de vorticidade da região, que a precipitação sobre o PB acompanha o prolongamento da ZCAS, mantendo a circulação ciclônica. Seus experimentos de sensibilidade usando um modelo atmosférico regional indicam que a precipitação sobre o PB desempenha um papel dominante como uma fonte de calor atmosférico na manutenção da circulação ciclônica e da ZCAS. Nos experimentos onde a chuva é interrompida em torno do PB, mas a topografia é mantida, nota-se que a circulação ciclônica desaparece e a ZCAS é deslocada para sul da sua posição original. Por outro lado, nos experimentos onde o PB é removido e a topografia é suavizada, a precipitação sobre o PB é enfraquecida, mas a ZCAS permanece deslocada para sul de sua posição no experimento controle. Kodama *et al.* (2012), concluem que o PB tem um efeito âncora na ZCAS, como sugerido anteriormente por Grimm *et al.* (2007), ou seja, a precipitação é intensificada devido a topografia acidentada do PB.

2.2 Ciclones

Ciclones são fenômenos severos do tempo que ocorrem dentro da escala sinótica, transportando calor e umidade em sua trajetória. Desempenham um papel importante dentro do sistema climático terrestre, onde regulam os contrastes de temperatura entre o equador e os pólos, além de manter os ventos de oeste nas latitudes médias contra a dissipação friccional (Hakim, 2003).

A classificação dos ciclones é realizada de acordo com a sua área de formação, seu ciclo de vida e a fonte de energia pela qual se mantêm, sendo assim são divididos basicamente em dois tipos principais: extratropicais e tropicais. Os ciclones extratropicais formam-se nas latitudes médias devido aos gradientes de temperatura e

cisalhamento do vento encontrado nessa região, e decaem à medida que a instabilidade é removida com a oclusão (Bjerknes e Solberg, 1922; Charney, 1947). Já os ciclones tropicais se formam sobre as águas quentes e se intensificam a partir da evaporação gerada pela ação do vento sobre a superfície do mar, com a liberação de calor latente, decaindo sobre águas mais frias ou sobre áreas continentais (Charney e Eliassen, 1964).

Segundo Ahrens (2000), os ciclones extratropicais retiram sua energia dos contrastes horizontais de temperatura existentes, associados à grande energia potencial, enquanto os ciclones tropicais obtêm sua energia das águas quentes e do calor latente de condensação.

Entretanto, estudos mais recentes mostram que a maioria dos ciclones não pertence aos tipos clássicos tropicais ou extratropicais, mas sim apresentam comportamentos diferenciados em sua evolução, transitando entre esses dois extremos de forma contínua ou até mesmo surgindo com uma configuração e terminando com o tipo extremo oposto. Nesse âmbito, pesquisadores como Beven (1997) começaram a classificar esses tipos de ciclones como híbridos, podendo apresentar transições durante seu ciclo de vida (apud Hart, 2003 e Pezza, 2008).

Estudos de Gan e Rao (1991) e Guia (2011) mostram que, na climatologia de ciclones na região do Atlântico Sul, há regiões preferenciais de formação próximo à Bacia do Prata e da Patagônia Argentina ao longo do ano. Em Reboita *et al.* (2009), os autores relatam a grande importância da umidade na ciclogênese na Região Sudeste do Brasil e que os ciclones formados na costa sul/sudeste do Brasil deslocam-se para leste ou sudeste, com velocidade média de 9 m/s, percorrendo distâncias de aproximadamente de 2700 km e possuem tempo de vida médio de 3 dias.

Da Rocha *et al.* (2016) estudaram os padrões de circulação atmosférica associados aos ciclones no Atlântico Sul, próximos ao litoral das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, e seus resultados mostraram que a combinação de difluência no escoamento em altos níveis, associada a um cavado em médios níveis e a presença de anomalias positivas do vento zonal são favoráveis à formação de ciclones nessa região. Além disso, a convergência do escoamento em baixos níveis é decisiva para estimular a ciclogênese na região.

O avanço tecnológico das imagens e perfis atmosféricos obtidos pelos satélites permitiu o conhecimento da transição dos ciclones de um tipo para outro. Evidências de ciclones com características tropicais e extratropicais, de forma simultânea, ou que evoluem de um tipo para outro, foram documentadas por diversos autores. Estudos relacionados à essa transição vêm sendo analisados separadamente por aproximadamente um século (Hart e Evans, 2001). Além disso, estudos buscando as definições de cada tipo, bem como um limite teórico separando esses fenômenos têm aumentado durante o século XXI.

Estudos, como de Hart e Evans (2001), Hart (2003) e Evans e Hart (2003), mostram que esse limite rígido não existe e propõem que poucos ciclones podem ser considerados totalmente baroclínicos ou totalmente barotrópicos. De acordo com os pesquisadores o que existe é um espectro contínuo, onde o ciclone evolui ao longo do tempo. Sendo assim, Hart (2003) propôs o Espaço de Fase do Ciclone (EFC) para caracterizar a fase e a estrutura dos ciclones, onde eles podem ser representados a partir do seu comportamento no campo de geopotencial e na sua estrutura térmica através da variação do vento térmico com a altura. A partir desses parâmetros, o EFC indica a estrutura térmica vertical (núcleo quente ou frio) e a simetria térmica (frontal ou não-frontal) do ciclone.

2.2.1 Ciclones Subtropicais

Palmén (1958) foi um dos primeiros autores a realizar estudos sobre ciclones com comportamento anômalo. Em seu artigo, o autor analisou a passagem e o desenvolvimento do furacão Hazel, que atingiu a costa Leste dos EUA em outubro de 1954. Essa tempestade ficou conhecida na comunidade acadêmica porque a mesma não decaiu ao se deslocar sobre o continente, como acontece com a maioria dos furacões. Pelo contrário, ela transformou-se em um intenso ciclone extratropical quando foi absorvida por uma onda frontal que se deslocava entre os EUA e Canadá.

No estudo de Gray (1968), o autor identificou a formação de ciclones híbridos localizados no noroeste dos Oceanos Atlântico e Pacífico, entre as latitudes de 25°N e 35°N. Tais ciclones possuíam, simultaneamente, características baroclínicas de latitudes médias e barotrópicas tropicais em seu desenvolvimento. Esses ciclones não apresentaram intensa atividade convectiva em seus núcleos e seus ventos máximos encontravam-se distantes do centro de baixa pressão.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define ciclone subtropical como um sistema de baixa pressão não frontal, com ambas as características de ciclone tropical e extratropical. Jarvinen *et al.* (1984) acrescentaram que tais ciclones se desenvolvem inicialmente em uma circulação baroclínica sobre águas subtropicais.

Segundo Hart (2003), os ciclones subtropicais são não frontais e normalmente apresentam núcleo frio nos altos níveis e uma fraca estrutura de núcleo quente na baixa troposfera, resultante da falta de convecção sustentada próximo ao centro do ciclone. O deslocamento da convecção do centro do ciclone geralmente é resultado de uma fraca estrutura frontal dentro do ciclone subtropical, forçando a ascensão em mesoescala longe do núcleo. Esses ciclones possuem uma grande área de ventos máximos, que é mais típico de ciclones extratropicais fracos do que de ciclones tropicais, onde os ventos mais intensos concentram-se em torno do seu núcleo, numa área menor. A transição de um ciclone subtropical em um completo ciclone tropical requer o desenvolvimento de convecção próximo ao núcleo desse ciclone.

Evans e Hart (2003) estudaram o ciclo de vida da transição extratropical de 61 ciclones no Atlântico Tropical entre os anos de 1979 e 1993. Os autores definiram que a transição extratropical ocorre quando o ciclone apresenta uma assimetria constante, através da diferença nos valores da espessura entre 600 e 900 hPa no centro do ciclone (raio de 500 Km). Tal processo foi exemplificado a partir da estrutura vertical em três momentos da transição extratropical do Furacão Floyd (1999), como pode ser observado a Figura 2.1.

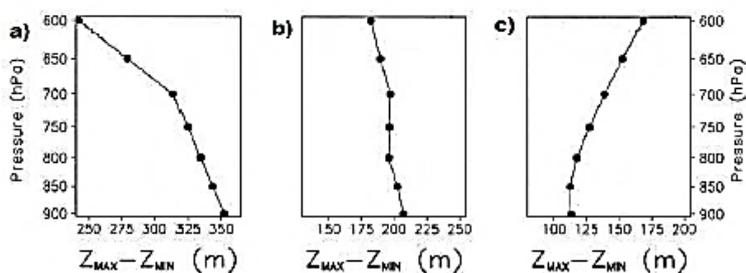


Figura 2.1 – Diferença entre a altura geopotencial máxima e mínima ($Z_{max} - Z_{min}$) ao longo da transição extratropical do furacão Floyd em 1999: (a) fase tropical, (b) fase híbrida e (c) fase extratropical. Fonte: Evans e Hart (2003).

De acordo com Evans e Guishard (2009) os ciclones híbridos apresentam núcleo frio em altos níveis e quente em baixos níveis, possuem estruturas e/ou origem ambíguas e, além disso, possuem tempo de vida similar ao de um ciclone tropical. Tais

ciclones se formam pela intrusão de um cavado nos altos níveis sob uma troposfera subtropical com instabilidade nos baixos níveis (temperatura da superfície do mar elevada e fraca estabilidade estática).

O estudo da estrutura dos ciclones iniciou-se através de um espaço de fases proposto por Beven (1997). O autor definiu tal espaço a partir de dois parâmetros: temperatura do núcleo (quente ou frio) e a sua natureza frontal, que está relacionada à simetria do sistema em termos de alturas geopotenciais (Figura 2.2).

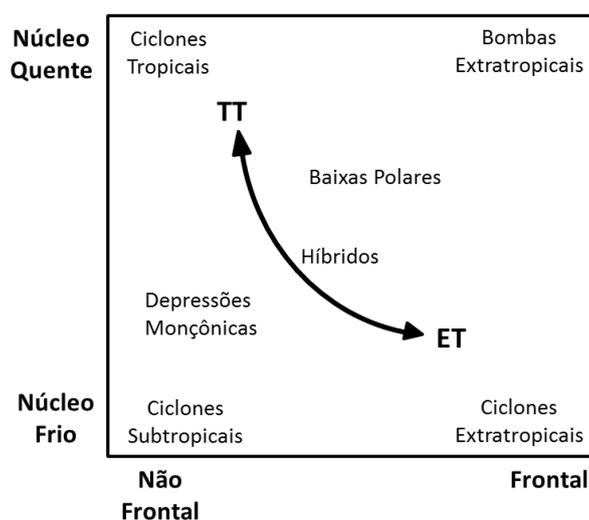


Figura 2.2 – Diagrama esquemático de diferentes tipos de ciclones indicando a ocorrência de transições tropicais e extratropicais. TT - transição tropical e ET - transição extratropical. Fonte: Adaptado de Beven (1997).

Dutra (2012) investigou os processos sinóticos, dinâmicos e termodinâmicos de dois ciclones subtropicais no Atlântico Sul a partir de algoritmos de rastreamento de máximos de vorticidade ciclônica e da classificação do ciclo de vida dos ciclones. Além disso, realizou uma análise automatizada dos diagramas de fase dos ciclones ocorridos em sua área de estudo entre os anos de 2008 e 2010. Seus resultados indicaram ventos máximos acima de 15 m/s em 925 hPa por várias horas e um pico de advecção horizontal quente em altos níveis, enquanto nos baixos níveis a advecção horizontal apresentou fraca intensidade. Durante a fase híbrida, o termo diabático indicou tendências de aquecimento em baixos níveis, enquanto na fase de transição extratropical, o mesmo termo mostrou resfriamento em baixos níveis devido à inversão do sentido dos fluxos turbulentos. Já nos altos níveis foram encontradas regiões com valores positivos do termo diabático da equação da termodinâmica relacionadas a regiões com intensos resíduos negativos da equação da vorticidade.

Mathias (2012) analisou e classificou três ciclones ocorridos no Atlântico Sul a partir da metodologia dos diagramas de fase adotados por Hart (2003). Seu objetivo foi apresentar os diagramas de fase, fomentando sua importância como ferramenta na previsão do tempo operacional, relacionando as diferentes fases existentes dos ciclones. A partir das análises dos diagramas elaborados pela *Florida State University* (FSU) foram detectados: i) a transição parcial do ciclone Catarina, ocorrido em março/2004, da fase extratropical para a tropical; ii) um caráter subtropical no ciclone Arani ocorrido em março/2011 e iii) o surgimento de um aprisionamento quente de um ciclone extratropical de desenvolvimento explosivo em julho/2007. Mathias (2012) ressalta também que as análises desse diagrama em tempo real durante a operação, auxiliariam na identificação das mudanças de fase dos ciclones, contribuindo na previsão da intensidade e comportamento dos referidos ciclones.

Dias Pinto *et al.* (2011 e 2013) realizam uma análise sinótica e dinâmica do ciclone Anita e sua potencial Transição Tropical (TT) em março de 2010, próximo à costa da Região Sul do Brasil no Oceano Atlântico. Anita iniciou-se como um ciclone subtropical, depois evoluiu para uma condição favorável à TT e mais tarde desenvolveu uma estrutura de núcleo frio, transformando-se em um ciclone extratropical. No início do seu desenvolvimento foi observada a ocorrência de um padrão de bloqueio tipo dipolo, similar ao Furacão Catarina em 2004 (Mc-Taggart Cowan *et al.*, 2006; Veiga *et al.*, 2008) que enfraqueceu o escoamento zonal em médios e altos níveis, reforçando o movimento ascendente e a atividade convectiva. Porém, tais condições não foram suficientes para a TT e por outro lado a interação posterior com os sistemas de latitudes médias favoreceu o aumento do cisalhamento do vento na vertical, permitindo à ocorrência de uma transição extratropical.

Gozzo (2014) apresenta uma climatologia dos ciclones subtropicais sobre o Sudoeste do Atlântico Sul a partir de dados de duas reanálises (ERA Interim e NCEP-NCAR) entre os anos de 1979 a 2011. Em seu estudo, o autor propõe um novo critério de identificação de ciclones mais rasos e fracos (com ventos máximos inferiores ao valor de 17 m.s^{-1} em 925 hPa), menos restritivo que o critério adotado na literatura. Nos seus resultados foi encontrada uma média de sete ciclones subtropicais por ano formados sobre o Atlântico Sul, sendo mais frequentes na costa do sul/sudeste do Brasil nos meses de verão. Através da análise dos campos sinóticos nota-se que a formação desses ciclones subtropicais geralmente está associada a um padrão de bloqueio do tipo

dipolo em altos níveis (circulação ciclônica a norte e uma anticiclônica a sul), com cisalhamento vertical do vento reduzido acima da baixa pressão em superfície. Observa-se também que a circulação ciclônica em altos níveis está associada a uma região de anomalia negativa de vorticidade potencial posicionada a oeste do ciclone em superfície, que induz o movimento ascendente e o aprofundamento da baixa. Já em médios níveis nota-se uma baixa fria despreendida alinhada verticalmente com o ciclone em superfície, favorecendo a instabilidade da coluna atmosférica e aprofundando ainda mais os ciclones. Além disso, Gozzo (2014) analisou as fontes de umidade e observou que grande parte da umidade presente no desenvolvimento dos ciclones origina-se numa região afastada, a nordeste dos ciclones, sendo transportada pelo ASAS até a costa sul/sudeste do Brasil. O autor conclui que tais resultados facilitam na compreensão da ocorrência dos ciclones subtropicais naquela região, onde a temperatura da superfície do mar é relativamente baixa.

Gozzo *et al.* (2014) sintetizaram aspectos climatológicos no desenvolvimento dos ciclones subtropicais no Oceano Atlântico Sul e analisaram um caso de formação de um ciclone raso na região de estudo. Os autores usaram dados das reanálises do ERA Interim e do NCEP-NCAR, entre os anos de 1979 a 2011, para construção da climatologia, e mostraram que ambas reanálises apresentam bons resultados quanto à intensidade, distribuição geográfica e variabilidade sazonal dos ciclones. Compostos anômalos da formação dos ciclones subtropicais mostram que tal ciclogênese ocorre sob um padrão de bloqueio do tipo dipolo em altos níveis, a leste do mínimo de vorticidade potencial em 250 hPa, na região de redução do cisalhamento vertical do vento e divergência de massa no ar superior, e costumam ocorrer no período do verão austral (54% dos casos). Por outro lado, os autores observam que durante o outono ocorrem os ciclones subtropicais mais intensos devido ao ambiente mais “tropical” na região de estudo. A maior parte dos ciclones subtropicais formados nessa região surge após o desenvolvimento do padrão de bloqueio Rex (Rex, 1950) em médios e altos níveis, que reduz o cisalhamento vertical do vento e minimizando o deslocamento para leste dos ciclones. Essa anomalia de circulação na ciclogênese subtropical durante o verão no Oceano Atlântico Sul é semelhante ao padrão apresentado nos compostos por Evans e Braun (2012) na mesma estação. Em relação à vida útil dos ciclones subtropicais selecionados, o autor descobre que eles têm menor distância percorrida e velocidade mais lenta em comparação com os extratropicais, permitindo uma maior interação com

o ambiente instável no qual se desenvolvem, provocando um impacto ainda maior sobre o clima do litoral da América do Sul.

Devido aos diversos ciclones com estrutura e desenvolvimento não convencionais, a comunidade meteorológica vem usando uma abordagem mais flexível na direção de uma classificação da natureza tridimensional da estrutura do ciclone. A separação entre os tipos clássicos deixa de ser discreta e rígida, para ser contínua, onde em um extremo fica o ciclone extratropical e no outro o ciclone tropical; e entre eles fica a fase híbrida (Hart, 2003).

Quando um ciclone extratropical (tropical) passa para a fase tropical (extratropical) diz-se que houve uma transição de fase completa. O nome da transição refere-se ao estado final do ciclone. Por exemplo, a transição tropical refere-se a um ciclone inicialmente extratropical que se transforma em um ciclone tropical, enquanto a transição extratropical refere-se ao mecanismo oposto, isto é, quando um ciclone tropical transforma-se em um ciclone extratropical através das mudanças térmicas e de simetria do sistema. Ciclones que estão no processo de transição podem ser chamados de ciclones híbridos (Pezza, 2008).

Dessa forma, ciclones híbridos são ciclones que oscilam entre diferentes fases e apresentam características parciais de origem tropical e/ou extratropical. Isso ocorre quando ciclones extratropicais ou subtropicais adquirem características tropicais, como núcleo quente resultante da convecção sustentada próxima ao centro do ciclone, estrutura empilhada mostrando fraca baroclinia, manutenção de sua estrutura e queda de pressão em superfície devido à liberação de calor latente, etc. E também ocorre quando ciclones tropicais adquirem características extratropicais, como o deslocamento da convecção para a periferia do sistema, resultando uma estrutura frontal formada a partir do seu deslocamento para as latitudes altas (devido aos fortes gradientes de temperatura).

2.2.1.1 Espaço de Fase do Ciclone

O Espaço de Fase do Ciclone (EFC) apresentado em Hart (2003) é construído a partir de parâmetros que caracterizam a fase do ciclone ao longo do seu ciclo de vida. Inicialmente, este espaço de fase é tridimensional (Figura 2.3) e é definido por três parâmetros:

B: refere-se à simetria térmica do ciclone, indicando se o mesmo tem a característica frontal ou não frontal;

$-V_T^L$: refere-se à estrutura térmica nos baixos níveis (900 e 600 hPa);

$-V_T^U$: refere-se à estrutura térmica nos altos níveis (600 e 300 hPa).

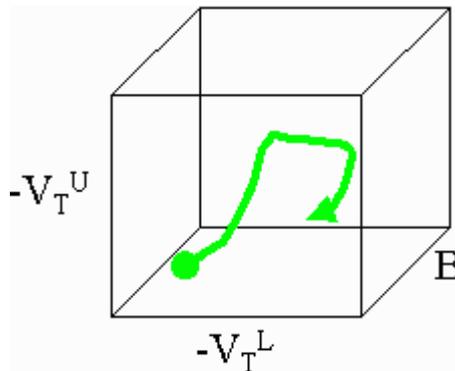


Figura 2.3 - Espaço de Fase tridimensional. Cada lado do cubo representa um parâmetro para caracterização da fase do ciclone. (Fonte: Mathias, 2012).

Para facilitar a análise desses parâmetros, o espaço de fase é dividido em dois diagramas de fase bidimensionais, transversais aos lados do cubo. O primeiro diagrama apresenta as variáveis B e $-V_T^L$ e o segundo as variáveis $-V_T^L$ e $-V_T^U$. Mathias (2012) analisa tais diagramas para três casos ocorridos no Atlântico Sul, entre eles o conhecido ciclone Catarina ocorrido em março de 2004.

Os ciclones analisados operacionalmente por Hart (2003) são selecionados automaticamente através da metodologia proposta pelo autor, onde se define um ciclone como um mínimo local de pressão à superfície, menor que 1020 hPa, com gradiente de pressão de no mínimo 2 hPa dentro de um retângulo de 5° de latitude x 5° de longitude e que persista por no mínimo 24 horas. O tamanho escolhido para o retângulo elimina os sistemas de baixa pressão em mesoescala, enquanto o tempo de vida elimina os mínimos de pressão espúrios. O critério do gradiente de pressão é usado para eliminar os fracos centros de baixas pressões localizados nos trópicos.

Ainda em Hart (2003) foram analisados mais de 17.000 ciclones entre 1980 e 1999 através dos dados da reanálise do NCEP com resolução espacial de 2,5° de latitude x 2,5° de longitude. A partir de seus resultados, o autor sintetizou as principais categorias dos ciclones ocorridos nos seus diagramas de fase (Figura 2.4).

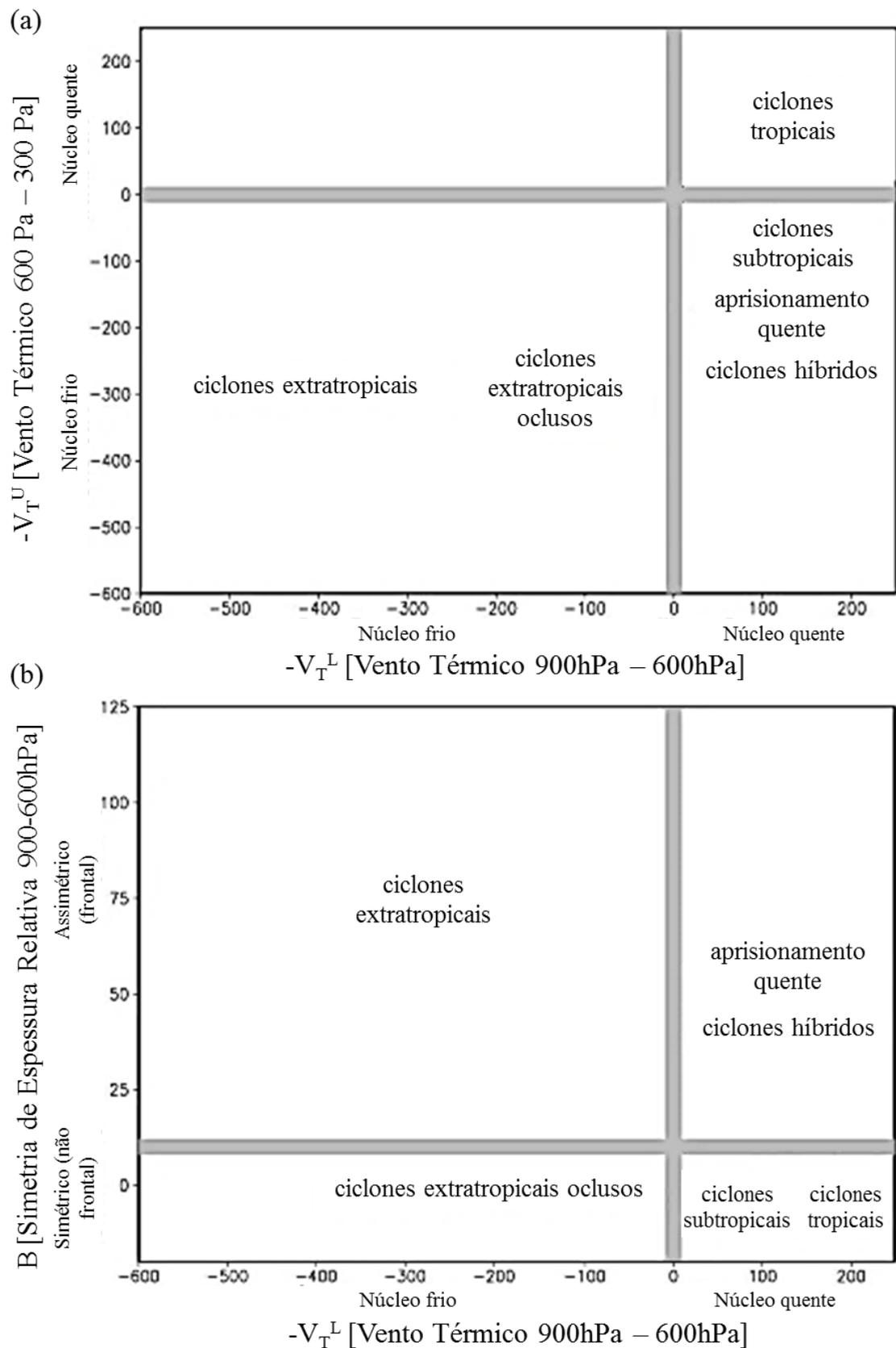


Figura 2.4 - Diagramas de fase com os parâmetros (a) B e $-V_T^L$ (b) $-V_T^L$ e $-V_T^U$ resumando as principais categorias de ciclones. Fonte: Adaptado de Hart (2003).

2.3 Estudos de Casos de Eventos Extremos de Precipitação na América do Sul

A maior parte da região tropical e subtropical da América do Sul recebe mais de 50% do total anual de precipitação no verão austral na forma de chuva convectiva com forte variação diurna (Figuroa e Nobre, 1990).

A identificação de eventos extremos de chuva tem sido feita nos últimos anos, utilizando-se diferentes técnicas estatísticas. Destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Xavier *et al.* (2002), Souza (2011) e Farias *et al.* (2012) que utilizaram as técnicas dos Quantis para análise dos extremos. Outros trabalhos aplicaram diferentes técnicas estatísticas e analisaram os impactos provocados pelos extremos de chuva (Gonçalves, 1992, Vicente, 2005, Teixeira e Satyamurty, 2007, Batista e Rodrigues, 2010, Brito e Silva, 2012 e Souza *et al.*, 2012).

Satyamurty *et al.* (2002) investigaram as situações meteorológicas favoráveis às chuvas extremas durante o evento e concluíram que a aproximação de uma frente fria pelo litoral próximo a São Paulo na noite de 31 de dezembro de 2000 gerou uma forte advecção quente sobre o sul da BRPS e o oceano adjacente, propiciando a formação de um centro de baixa pressão fraco, com núcleo relativamente quente, no oceano Atlântico próximo ao litoral de São Paulo e Rio Grande do Sul, fortalecendo a convecção na região da ZCAS. Os autores mostraram também que o campo de divergência de umidade média apresentava valores da ordem de 10^{-7} s^{-1} equivalente a 30 mm por dia (Figura 2.5a) e que os campos médios de divergência de escoamento em 850 e 250 hPa apresentavam forte convergência em baixos níveis e forte divergência em altos níveis, respectivamente, corroborando com os episódios de ZCAS expostos em Kodama (1992). Entre outros resultados, Satyamurty *et al.* (2002) destacam que o movimento vertical de grande escala durante esse evento esteve ligado à função frontogenética (Figura 2.5b) que manteve a ZCAS aproximadamente por uma semana, sendo um forte diagnóstico nos casos de chuvas na forma de bandas largas, e que a energia potencial disponível durante esse episódio foi convertida em energia cinética da perturbação às custas da baroclinia existente.

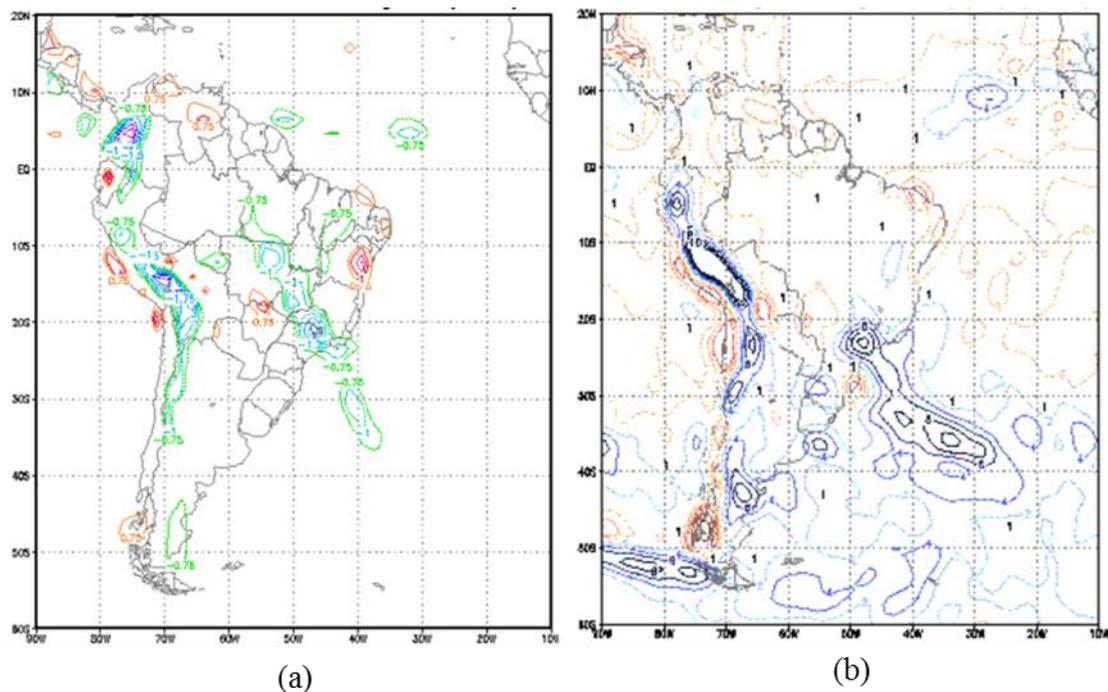


Figura 2.5 - (a) Convergência de umidade média no período de 1-6 de janeiro de 2000 sobre América do Sul. Intervalo de isolinhas: 10^{-7} s^{-1} . (b) Função frontogenética média no período de 1-6 de janeiro de 2000 em 850 hPa sobre a região de América do Sul. Intervalo de isolinhas: $10^{-11} \text{ C m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Fonte: Satyamurty *et al.* (2002).

Seluchi e Chou (2009) produziram uma climatologia sinótica de episódios de chuvas intensas responsáveis por deslizamentos e mortes na região da Serra do Mar utilizando dados da Reanálise do NCEP/NCAR no período de 1995 a 2005 (de novembro a abril). Do total de 39 casos ocorridos no período analisado, 6 casos foram associados a convecção isolada, 15 com eventos de ZCAS e 18 com sistemas frontais. Para os casos de ZCAS os resultados mostram em 850 hPa anomalias positivas de umidade específica (em torno de 1,5 g/kg) e anomalias ciclônicas desde São Paulo até a região Amazônica. O ASAS apresenta aspectos típicos de condições de bloqueio (centro quente e eixo inclinado para direita com altura) e estendendo-se para sul. Em 500 hPa, uma onda curta no campo de anomalia de temperatura é observada sobre São Paulo. Tais configurações mostram que os deslizamentos ocorrem em ambientes barotrópicos sobre o Atlântico quando uma onda curta (baroclínica) interage com a ZCAS. Nas 24 horas anteriores aos eventos de deslizamento, a precipitação se concentra ao sul da região de interesse e se desloca para norte no dia do evento, seguindo a perturbação de onda curta nos níveis altos. Nos altos níveis, a divergência é maior do que a climatologia.

Teixeira e Satyamurty (2007) descrevem as características dinâmicas e sinóticas associadas à episódios de precipitação intensa na Região Sul do Brasil, no período de 1991 a 2001. Além disso, desenvolvem um estudo de caso para o evento mais extremo encontrado no período estudado, ocorrido entre os dias 11 e 12 de abril de 1992, cujos campos estão apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7. Nesse evento, as chuvas intensas ocuparam uma área bastante extensa, com a isoietas de 100 mm/dia estendendo-se por uma área superior a 10.000 km². De acordo com os pesquisadores, a chuva foi provocada pela atuação de uma frente fria, cuja aproximação intensificou a atividade convectiva no sul do Brasil. No norte da Argentina houve a formação de um centro de baixa pressão e ao mesmo tempo a intensificação de um cavado na média troposfera. A advecção de vorticidade ciclônica ajudou o desenvolvimento na superfície no norte da Argentina. O gradiente de pressão leste-oeste acelerou os ventos de norte que transportaram umidade e calor para o sul do Brasil. No dia anterior ao evento (D-1) um forte transporte de umidade a partir do norte-noroeste e nordeste provocou forte convergência do fluxo de umidade e advecção quente no sudoeste do sul do Brasil. Tal aspecto nos baixos níveis, junto com condições nos níveis médios e superiores no sul do Brasil, ajudaram na intensificação da baixa a superfície sobre o norte da Argentina. A partir de um corte vertical ao longo de 25°S (Figura 2.7c), os autores mostram uma camada de umidade profunda que se estende da superfície até 650 hPa (>3 g/kg) e uma camada até mais profunda de vento de norte da superfície até a média troposfera. Tais ventos de norte e alto conteúdo de umidade, junto com o aumento do movimento ascendente, agem para instabilizar a troposfera média-inferior e, acompanhando o forte transporte vertical de umidade, causaram os grandes acumulados de chuva. Os pesquisadores ressaltam ainda que a precipitação intensa ocorreu no lado equatorial do centro do jato nos altos níveis. A circulação a leste do jato é anticiclônica, o que promove a divergência nos níveis superiores sobre o sul do Brasil.

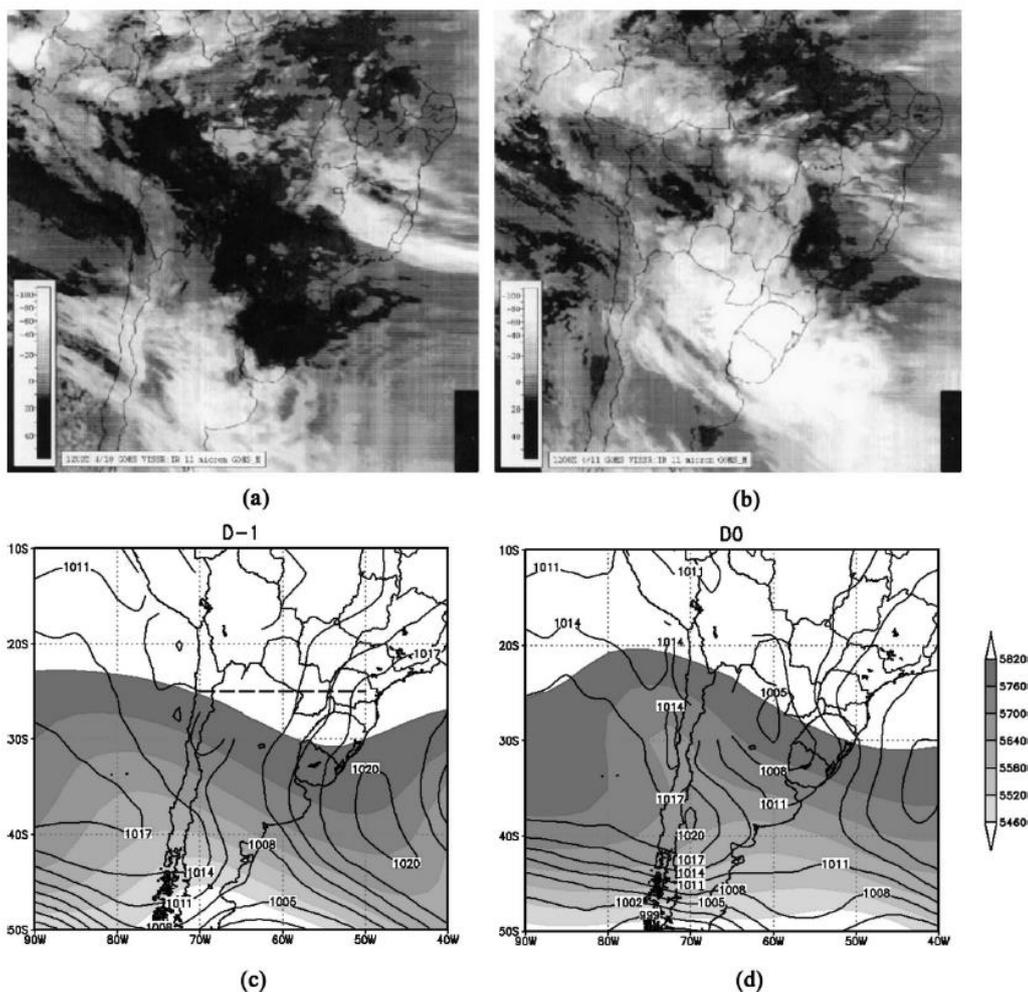


Figura 2.6 – Imagem de satélite no canal IR e análises de superfície (PNMM) e geopotencial em 500 hPa para o caso de chuva intensa nos dias 11 e 12 de abril/1992. Imagens para (a) 12 UTC de 10 abril/1992 (dia D-1) e (b) 12 UTC de 11 de abril/1992 (dia D0), e altura geopotencial em 500 hPa (sombreado) e pressão ao nível médio do mar (contornos) para dias (c) D-1 e (d) D0. A linha tracejada ao longo de 22.5°S em (c) é usada para seção vertical na Figura 2.7c. (Fonte: Teixeira e Satyamurty, 2007).

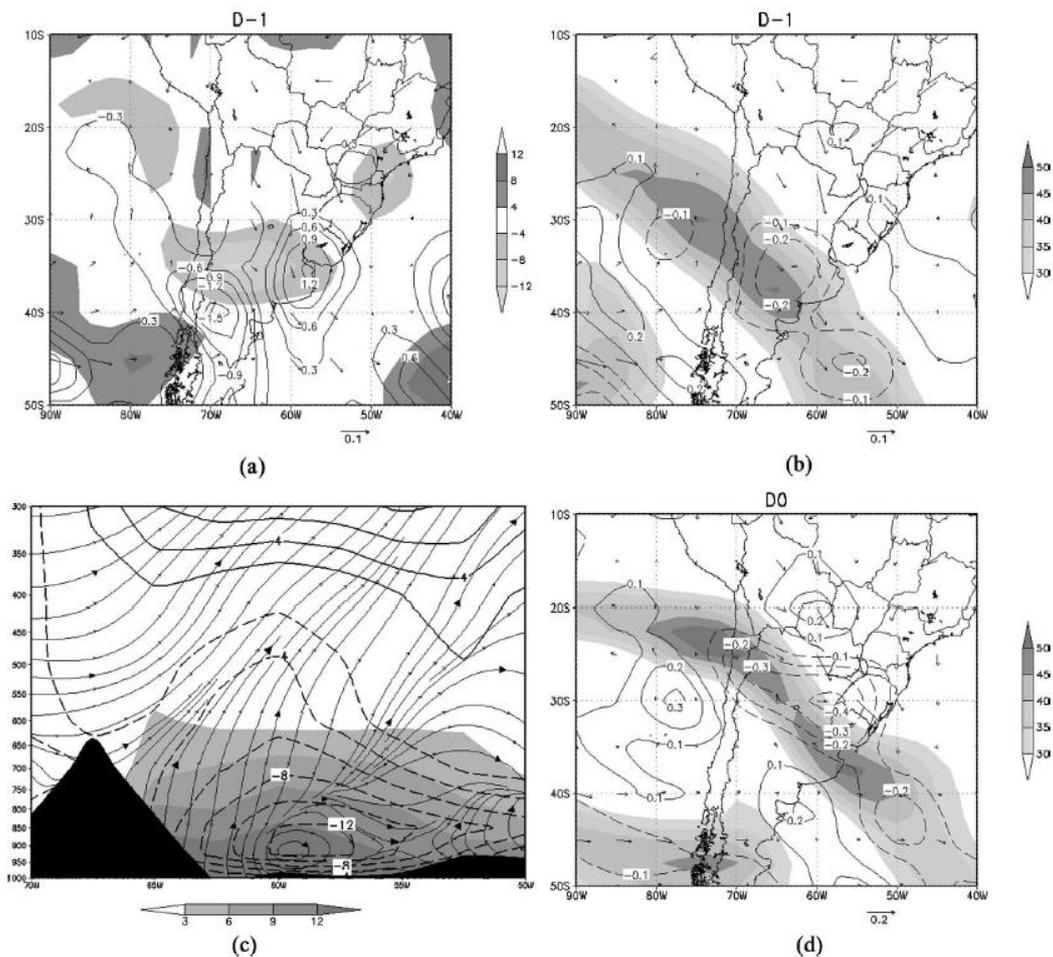


Figura 2.7 - (a) Convergência do fluxo de umidade (sombreado, 10^{-7} s^{-1}), transporte de umidade (vetores, $10^{-2} \text{ kg.m.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$), e advecção térmica (contornos, 10^{-4} K.s^{-1}) em 850 hPa; (b) magnitude do vento (sombreado, m.s^{-1}) em 250 hPa, ômega (contornos, Pa.s^{-1}) em 500 hPa, e transporte de umidade ($10^{-2} \text{ kg.m.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) em 850 hPa; (c) perfil vertical de umidade específica (sombreado, g.kg^{-1}), linhas de corrente, e vento meridional (contornos, m.s^{-1}) em 25°S para D-1 (10 Abr/1992); a topografia é mostrada em sombreado escuro. (d) magnitude do vento (sombreado, m.s^{-1}) em 250 hPa, ômega (contornos, Pa.s^{-1}) em 500 hPa, e transporte de umidade ($10^{-2}.\text{kg.m.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) em 850 hPa. (Fonte: Teixeira e Satyamurty, 2007).

Carvalho *et al.* (2002) mostraram que a ocorrência de eventos de precipitação extremas na estação do verão no sudeste do Brasil, no caso do estado de São Paulo, está intimamente relacionada com a atividade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Foi definido que episódios de chuva extrema ocorrem quando a precipitação diária em uma determinada estação encontra-se acima de 16% da média de precipitação total sazonal. Nos seus resultados, cerca de 65% dos casos ocorrem durante ZCAS intensa e 35% durante casos fracos. Os autores demonstraram também que a variabilidade espacial da chuva extrema depende tanto da intensidade, quanto da forma da ZCAS (aspectos continentais ou oceânicos). Eles também sugeriram que os

mecanismos dinâmicos distintos podem modular a intensidade e a forma da ZCAS e, conseqüentemente, os aspectos regionais da precipitação extrema.

Mais tarde, em Carvalho *et al.* (2004) busca-se investigar a importância da ZCAS em modular as características espaciais da precipitação extrema sobre o Brasil. Eventos extremos de precipitação foram definidos como aqueles em que o total diário está acima do percentil 95 e foram calculados a partir da precipitação de séries temporais em cada ponto de grade. O percentil 95 do verão (DJF) é de 21 mm/dia, mostrado na Figura 2.8, e segue aproximadamente as características espaciais da precipitação média com o máximo sobre a Amazônia central diminuindo em direção nordeste do Brasil. Os autores ressaltam que o aumento da razão entre as categorias oceânica e continental da ZCAS certamente tem uma importante implicação para a precipitação sazonal sobre o sudeste da América do Sul e Brasil central. A ZCAS oceânica aumenta a precipitação em DJF sobre o sudeste do Brasil, particularmente sobre o Rio de Janeiro, sudeste de Minas Gerais e nordeste de São Paulo. A ZCAS oceânica estacionária provoca frequentemente enchentes e inundações, particularmente em áreas de topografia acentuada e alta concentração de habitantes.

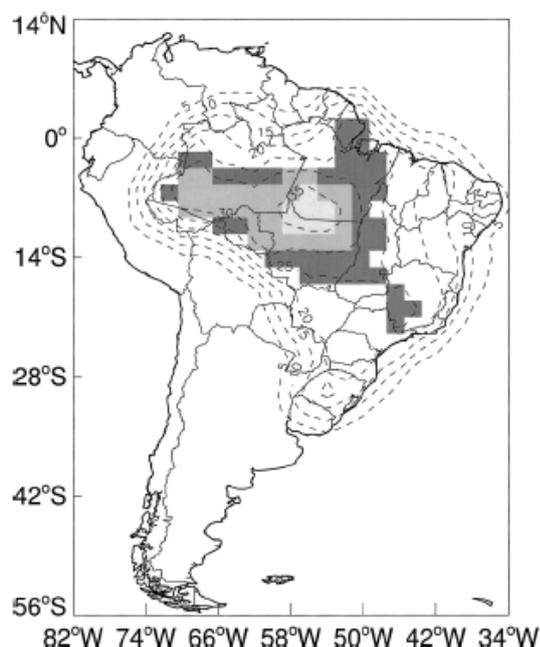


Figura 2.8 – Distribuição espacial do percentil 95 da precipitação diária (mm/dia) em cada ponto de grade (resolução de 2° de latitude/longitude horizontal) sobre o Brasil. Pontos de grade com precipitação acima do percentil de 95 realçados. (Fonte: Carvalho *et al.* 2004).

Liebmann *et al.* (2001) investigaram a climatologia e variabilidade interanual dos eventos extremos de precipitação no Estado de São Paulo a partir de totais pluviométricos diários no período 1947 a 1995. Os pesquisadores definem um evento extremo quando o total pluviométrico diário ultrapassa certo limiar do total pluviométrico anual ou sazonal. Os resultados indicam que os eventos extremos ocorrem principalmente de outubro a março, apresentando grande variabilidade interanual. A correlação entre totais pluviométricos mensais e número de eventos extremos não é óbvia, por exemplo, não se pode afirmar se em um determinado verão a ZCAS estiver mais ativa, ocorrerão mais eventos extremos. No período de verão (outubro a março) o número de eventos extremos em todo o estado de São Paulo é positivamente correlacionado com anomalias de temperatura da superfície do mar (ATSM) na região do Pacífico desde a linha da data até a costa oeste da América do Sul. Da mesma forma, a frequência de eventos extremos próximo à costa do Atlântico correlaciona-se positivamente com ATSM no Oceano Atlântico próximo à latitude de SP. Contudo, em ambos os casos a relação entre ATSM e precipitação média é fraca.

Tavares e Mota (2012) caracterizaram as condições termodinâmicas da atmosfera durante os eventos de precipitação extrema na estação chuvosa de Belém (PA), no período de 1987 a 2007. Para determinar os eventos extremos de chuva, os autores estabeleceram o percentil 90 (67,1 mm/dia) de uma série de dados de precipitação diária em Belém. Para a análise das condições termodinâmicas, foram calculados os índices termodinâmicos (Cape, K, TT e LI) a partir dos dados das radiossondagens que foram realizadas diariamente em Belém, nos horários das 00 e 12 Z. De acordo com os resultados, as precipitações extremas, em sua maioria (56%) apresentam um ambiente precursor com forte instabilidade, indicada pelos altos valores de CAPE (acima de 1000 J/kg) e valores significativos dos índices de instabilidade. Os índices K, TT e LI apresentaram uma boa representação do ambiente, prognosticando as tempestades com chuvas fortes, sendo os índices K e LI os mais expressivos, analisados individualmente para a região de estudo. Logo, observou-se que as condições termodinâmicas de forte instabilidade são necessárias, mas não são as únicas responsáveis pela formação da convecção úmida profunda com precipitações extremas na estação chuvosa na região de Belém.

Marengo *et al.* (2003) realizaram um estudo sobre as abundantes chuvas que causaram enchentes e um enorme prejuízo social na costa norte da Venezuela em

dezembro de 1999, sendo considerado o maior desastre natural ocorrido na história recente daquele país, com mais de 30.000 mortos. Foram avaliados os campos oceânicos e atmosféricos que antecederam os eventos de chuvas durante o período de 13 a 17 de dezembro de 1999. Os resultados indicaram que os eventos foram relacionados com interações entre anomalias de TSM no Oceano Atlântico Norte e no mar do Caribe, que combinados com um alto grau de desmatamento nas encostas da montanha Avila e com o solo saturado, produziram avalanches na seção norte da cidade de Caracas, causando tamanha destruição. Análises das condições de temperatura da superfície do mar, e as circulações em níveis superiores e baixos da atmosfera, indicaram que os remanescentes de uma frente fria que se deslocou do Caribe e o cavado associado a ela, em conjunto com a convergência de ar úmido e quente que se deslocou sobre o oceano Atlântico tropical anormalmente aquecido próximo à região afetada, determinaram o desenvolvimento de forte atividade convectiva, produzindo chuvas intensas e abundantes, suficientes para gerar tais enchentes. Assim, observou-se que as condições atmosféricas analisadas forneceram suporte suficiente para a ocorrência de eventos de chuva forte, como já ocorrido no passado, porém, destaca-se que parte dos danos foi agravado devido ao desenvolvimento urbano sem planejamento, numa área de alto risco a adversidades do tempo.

Souza *et al.* (2012) determinaram e classificaram limiares de intensidade para a chuva diária a partir da técnica dos quantis, assim como, avaliaram os impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes dos desastres associados as chuvas em Recife/PE, visto que praticamente em todos os anos são comuns tais desastres principalmente durante o principal período chuvoso. Foram utilizados dados de precipitação diária referente à estação climatológica de Recife, no período entre 1967 e 2008. Em relação aos dados de desastres, foram obtidas informações relacionadas aos desastres na Coordenadoria de Defesa Civil do Recife (CODECIR) e na Coordenadoria de Defesa Civil do Estado de Pernambuco (CODECIPE), entre os anos de 1995 e 2008. Determinou-se que chuvas com intensidade acima do limiar da Chuva Muito Forte (maior que 55,3 mm/dia) seriam consideradas eventos extremos de chuvas e os resultados mostraram que quando há registros de precipitação dentro das classes de Chuva Muito Forte e Forte, sempre há escorregamentos e muitos pontos de alagamentos. Apesar dos eventos extremos de chuvas intensas serem observados principalmente entre os meses de março e julho, tais eventos podem acontecer em outras

épocas do ano. Foi observada a alta frequência de ocorrência de escorregamentos e alagamentos, associada à falta de infraestrutura, aliado às condições sociais e econômicas da população. Com isso, nota-se a vulnerabilidade da população, principalmente na ocorrência de eventos extremos, uma vez que chuvas de tal magnitude provocam alagamentos, encharcamento dos solos das encostas que deslizam morro abaixo, gerando consequências principalmente à população mais pobre que reside em áreas mais vulneráveis à ocorrência destes desastres.

Duarte *et al.* (2015) identificaram os eventos extremos de chuva e os impactos provocados por esses em Ipojuca/PE. Foram utilizados dados anuais e mensais de precipitação fornecidos pela Usina Ipojuca no período de 1941 a 2013 e os dados diários de chuva foram disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac), entre os anos de 1957 a 1978 e 1991 a 2013. Os autores aplicaram a técnica dos quantis nos dados de precipitação e os resultados foram comparados com as Anomalias na Temperatura da Superfície do Mar no Pacífico (ATSM) e do Oceano Atlântico tropical (AT). Os resultados finais foram comparados com as informações de eventos significativos do Sistema Integrado de Informações de Desastres (S2ID) e para os principais eventos foram verificadas fotografias, reportagens, bem como relatos da população sobre os principais impactos causados em Ipojuca. De acordo com os resultados, foi observada uma predominância de anos secos entre 1940 e 1960 que pode ter sido uma combinação do fenômeno El Niño, com a fase positiva do Dipolo do Atlântico. Entre 1962 e 1975, houve uma maior ocorrência de anos chuvosos, podendo ser consequência de eventos de La Niña, combinados com a fase negativa do Dipolo do Atlântico. Em anos de El Niño em conjunto com a fase negativa do Dipolo do Atlântico, as chuvas mostraram-se mais concentradas, sendo verificados episódios de eventos extremos, devido às águas mais quentes do Oceano Atlântico Tropical Sul que intensificaram os sistemas meteorológicos atuantes, principalmente no período chuvoso. A análise dos extremos mensais mostrou que os meses com mais chuvas extremas foram abril, maio, junho e julho. Já a análise dos dados diários estabeleceu o limiar de 53 mm/dia para considerar como chuva extremamente forte, sendo junho o mês mais representativo. Em geral, as análises dos extremos anual, mensal e diário mostram que os eventos de precipitação que provocam transtornos à população, não necessariamente precisam ocorrer em anos considerados chuvosos ou exatamente no período chuvoso.

3 Metodologia e Dados

Neste capítulo apresentam-se os dados convencionais e os dados gerados por modelagem numérica utilizados no trabalho. Além disso, as metodologias utilizadas para elaboração da climatologia da BRPS e para elaboração do estudo de caso de chuva intensa associado a inundações na área de estudo são apresentadas.

3.1 Elaboração da Climatologia da Bacia do rio Paraíba do Sul

O levantamento da climatologia da BRPS foi feita através dos dados de temperatura do ar e precipitação. Os mapas de distribuição espacial dessas variáveis foram construídos para todo o ano e também sazonalmente. Considerou-se para o verão o trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, para o outono março-abril-maio, para o inverno junho-julho-agosto e para primavera o trimestre setembro-outubro-novembro.

A climatologia da temperatura do ar foi feita considerando os dados climatológicos das temperaturas máxima, mínima e média compensada, do período de 1961-1990, para 23 estações meteorológicas do INMET (Figura 3.1 e Tabela 3.1) obtidas em INMET (2009). Ressalta-se que apesar das estações Barbacena e Mogi das Cruzes localizarem-se fora dos limites da bacia, seus municípios integram a BRPS, como será apresentado na Figura 4.1. Apenas a estação de Avelar - Paty do Alferes (RJ) não possui a normal climatológica de 1961 a 1990 por ser uma estação mais nova do que as demais. Dessa forma, foi elaborada uma climatologia a partir dos dados mensais disponíveis da estação Avelar - Paty do Alferes entre os anos de 1985 e 2015 (31 anos).

A temperatura média compensada (TM_c), é calculada a partir da Equação 3.1:

$$TM_c = \frac{T_{max} + T_{min} + T_{12Z} + 2T_{24Z}}{5} \quad (\text{Equação 3.1})$$

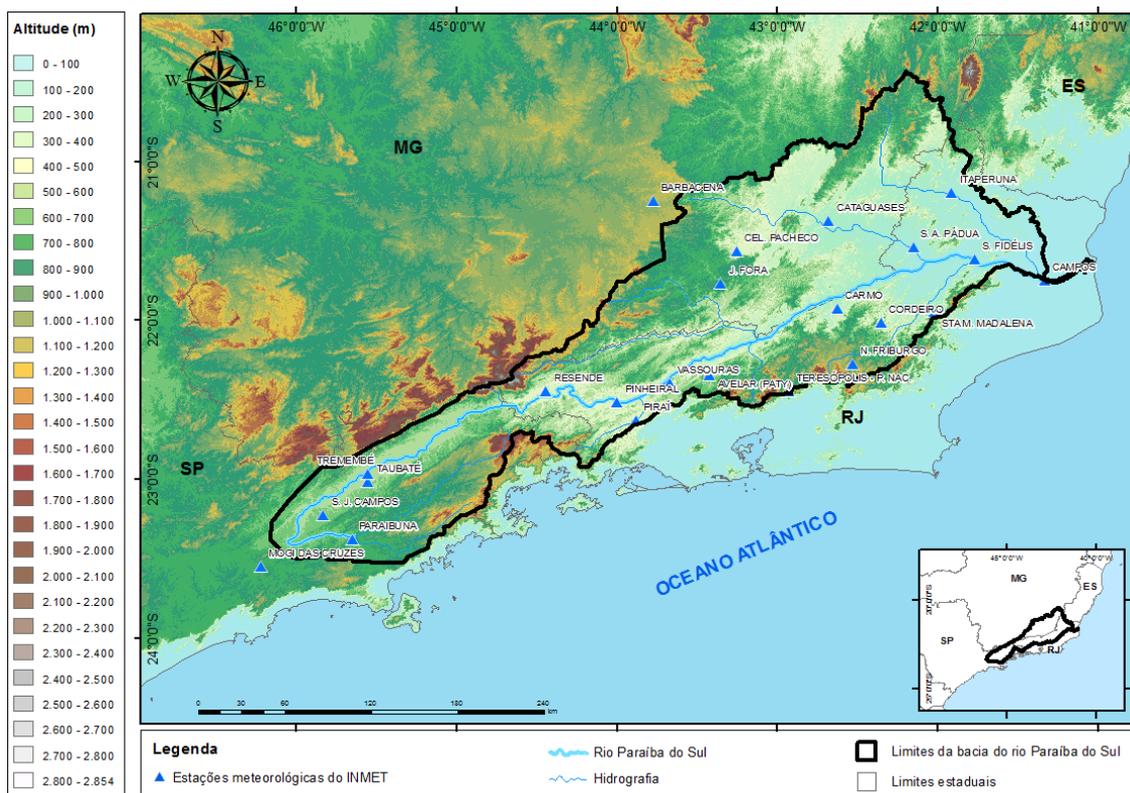


Figura 3.1 – Estações meteorológicas do INMET localizadas na Bacia do rio Paraíba do Sul, cujos dados foram utilizados para a elaboração da climatologia de temperatura do ar.

Tabela 3.1 – Informações sobre as 23 estações meteorológicas do INMET utilizadas para construir a climatologia de temperatura da Bacia do rio Paraíba do Sul.

Nome Estação	Estado	Período da climatologia	Latitude (grau)	Longitude (grau)	Altitude (m)
Avelar - Paty do Alferes	RJ	1985-2015	-22,35	-43,42	507
Campos dos Goytacazes	RJ	1961-1990	-21,75	-41,33	11
Carmo	RJ	1961-1990	-21,93	-42,62	344
Cordeiro	RJ	1961-1990	-22,02	-42,35	506
Itaperuna	RJ	1961-1990	-21,2	-41,91	124
Nova Friburgo	RJ	1961-1990	-22,28	-42,53	857
Pinheiral	RJ	1961-1990	-22,52	-44	385
Piraí	RJ	1961-1990	-22,63	-43,88	545
Resende	RJ	1961-1990	-22,45	-44,44	440
Santa Maria Madalena	RJ	1961-1990	-21,95	-42,02	620
Santo Antônio de Pádua	RJ	1961-1990	-21,54	-42,15	70
São Fidélis	RJ	1961-1990	-21,62	-41,77	74
Teresópolis – Parque Nacional	RJ	1961-1990	-22,45	-42,93	959
Vassouras	RJ	1961-1990	-22,4	-43,67	437
Mogi das Cruzes	SP	1961-1990	-23,55	-46,22	775
Paraibuna	SP	1961-1990	-23,38	-45,65	649
São José dos Campos	SP	1961-1990	-23,23	-45,83	643
Taubaté	SP	1961-1990	-23,02	-45,55	577

Tremembé	SP	1961-1990	-22,97	-45,55	546
Barbacena	MG	1961-1990	-21,25	-43,77	1171
Cataguases	MG	1961-1990	-21,38	-42,68	168
Coronel Pacheco	MG	1961-1990	-21,57	-43,25	435
Juiz de Fora	MG	1961-1990	-21,77	-43,35	940

A climatologia da precipitação da BRPS foi elaborada a partir de totais pluviométricos médios mensais de 71 estações pluviométricas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Agência Nacional das Águas (ANA) e do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE), localizados dentro da bacia (Figura 3.2, Tabela 3.2), em sua maior parte no período de 1961-1990.

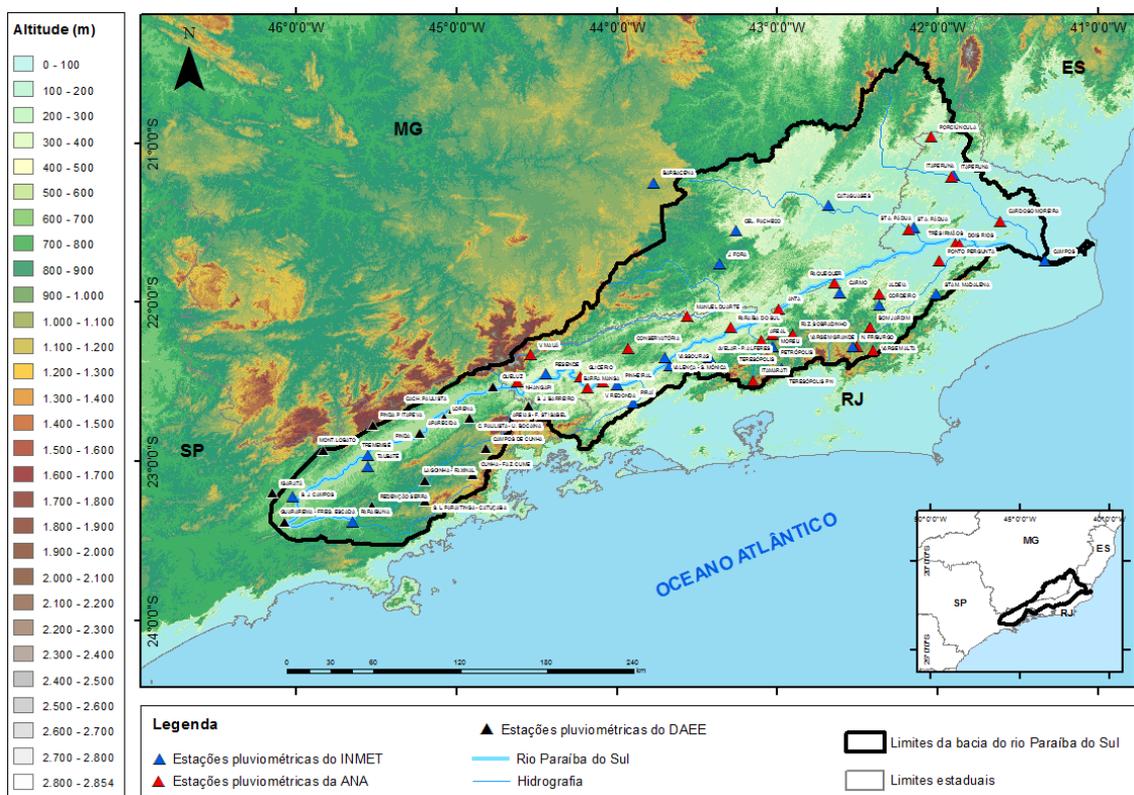


Figura 3.2 – Estações pluviométricas localizadas na Bacia do rio Paraíba do Sul, utilizadas para a realização da climatologia de precipitação.

Tabela 3.2 – Informações sobre as 71 estações pluviométricas do INMET, ANA e DAEE utilizadas para construção da climatologia de precipitação da BRPS.

Órgão	Nome da Estação	Estado	Latitude (grau)	Longitude (grau)	Altitude (m)
ANA	Aldeia	RJ	-21,95	-42,36	376
ANA	Anta	RJ	-22,04	-42,99	230
ANA	Areal	RJ	-22,24	-43,1	450
INMET	Avelar - Paty do Alferes	RJ	-22,35	-43,42	507
ANA	Barra Mansa	RJ	-22,54	-44,18	376
ANA	Bom Jardim	RJ	-22,16	-42,42	530

INMET	Campos dos Goytacazes	RJ	-21,75	-41,33	11
ANA	Cardoso Moreira	RJ	-21,49	-41,61	20
INMET	Carmo	RJ	-21,93	-42,62	344
ANA	Conservatória	RJ	-22,29	-43,93	550
INMET	Cordeiro	RJ	-22,02	-42,35	506
ANA	Dois Rios	RJ	-21,64	-41,86	50
ANA	Fazenda Sobradinho	RJ	-22,2	-42,9	650
ANA	Glicério	RJ	-22,47	-44,23	390
ANA	Itamarati	RJ	-22,49	-43,15	1085
INMET	Itaperuna	RJ	-21,2	-41,91	124
ANA	Itaperuna	RJ	-21,21	-41,91	110
ANA	Manuel Duarte	RJ	-22,09	-43,56	396
ANA	Moreli	RJ	-22,2	-43,03	600
INMET	Nova Friburgo	RJ	-22,28	-42,53	857
ANA	Nhangapi	RJ	-22,5	-44,62	440
ANA	Paquequer	RJ	-21,88	-42,64	150
ANA	Paraíba do Sul	RJ	-22,16	-43,29	300
INMET	Petrópolis	RJ	-22,28	-43,03	980
INMET	Pinheiral	RJ	-22,52	-44	385
INMET	Piraí	RJ	-22,63	-43,88	545
ANA	Ponto de Pergunta	RJ	-21,74	-41,99	61
ANA	Porciúncula	RJ	-20,96	-42,04	188
INMET	Resende	RJ	-22,45	-44,44	440
INMET	Santa Maria Madalena	RJ	-21,95	-42,02	620
INMET	Santo Antônio de Pádua	RJ	-21,54	-42,15	96
ANA	Santo Antônio de Pádua	RJ	-21,54	-42,18	70
INMET	Teresópolis	RJ	-22,42	-42,97	874
ANA	Três Irmãos	RJ	-21,63	-41,89	42
ANA	Visconde de Mauá	RJ	-22,33	-44,54	1030
ANA	Volta Redonda	RJ	-22,5	-44,09	360
INMET	Valença (Santa Mônica)	RJ	-22,35	-43,7	367
ANA	Vargem Alta	RJ	-22,3	-42,4	1100
ANA	Vargem Grande	RJ	-22,28	-42,5	680
INMET	Vassouras	RJ	-22,4	-43,67	437
DAEE	Aparecida	SP	-22,82	-45,23	520
DAEE	Areias – Fazenda de Santa Isabel	SP	-22,77	-44,7	1580
DAEE	Bananal	SP	-22,68	-44,32	460
DAEE	Cachoeira Paulista	SP	-22,67	-45,02	520
DAEE	Cachoeira Paulista - Usina Bocaina	SP	-22,73	-44,92	560
DAEE	Campos de Cunha	SP	-22,92	-44,82	1020
DAEE	Cruzeiro	SP	-22,58	-44,98	540
DAEE	Cruzeiro - Túnel	SP	-22,5	-45,02	1040
DAEE	Cunha - Fazenda Cume	SP	-23,08	-44,9	900
DAEE	Guararema - Freguesia Escada	SP	-23,38	-46,07	580
DAEE	Igaratá	SP	-23,2	-46,15	780

DAEE	Lagoinha - Faxinal	SP	-23,12	-45,2	840
DAEE	Lorena	SP	-22,73	-45,08	540
DAEE	Mont. Lobato	SP	-22,93	-45,83	680
DAEE	Natividade Serra	SP	-23,38	-45,45	720
INMET	Paraibuna	SP	-23,38	-45,65	649
DAEE	Pindamonhangaba	SP	-22,9	-45,43	528
DAEE	Pindamonhangaba – Pico do Itapeva	SP	-22,77	-45,52	1840
DAEE	Piquete - Represa	SP	-22,6	-45,22	860
DAEE	Queluz	SP	-22,53	-44,77	500
DAEE	Redenção Serra	SP	-23,28	-45,53	740
DAEE	São José do Barreiro	SP	-22,65	-44,55	530
INMET	São José dos Campos	SP	-23,23	-45,83	643
DAEE	São Luís do Paraitinga - Catuçaba	SP	-23,25	-45,2	830
DAEE	Silveiras	SP	-22,67	-44,85	620
INMET	Taubaté	SP	-23,02	-45,55	577
INMET	Tremembé	SP	-22,97	-45,55	546
INMET	Barbacena	MG	-21,25	-43,77	1171
INMET	Cataguases	MG	-21,38	-42,68	168
INMET	Coronel Pacheco	MG	-21,57	-43,25	435
INMET	Juiz de Fora	MG	-21,77	-43,35	940

3.2 Elaboração do Estudo de Caso

Para a análise do estudo de caso foi utilizado o conjunto de dados do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)* (Saha *et al.*, 2010), proveniente do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*, disponíveis em http://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/cmd_pgbh/. As variáveis diagnósticas do CFSR (cujos nomes dos arquivos são iniciados por “pgbhnlgdas”) utilizados neste trabalho possuem resolução horizontal de 0,5° e resolução temporal de 6 horas (00, 06, 12 e 18Z). Tais dados foram gerados para um período de 32 anos (1979 a 2010) e estendidos até os dias atuais em sua versão 2 (Saha *et al.*, 2014).

3.2.1 Campos Construídos a partir da Reanálise CFSR

Os campos meteorológicos são construídos para o período do evento de chuva intensa, entre os dias 1 e 5 de janeiro de 2000. As variáveis utilizadas são: Pressão atmosférica ao Nível Médio do Mar (PNMM), temperatura do ar, componentes zonal e meridional do vento, movimento vertical (ômega), altura geopotencial e umidade específica nos níveis de pressão de 1000, 850, 700, 500, 300 e 250 hPa. A partir de tais dados foram elaborados campos de: i) Pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa); ii) Vento em 850 hPa (m/s); iii) Umidade específica (g/kg) em 925 hPa; iv) Altura

geopotencial (m_gp) nos níveis de 850, 700, 500, 300 e 250 hPa; v) Espessura (m_gp) da camada 1000 – 500 hPa; vi) Fluxo de umidade verticalmente integrado (kg.m⁻¹.s⁻¹) na camada 1000-300 hPa; vii) Divergência de massa em 850 hPa; viii) Linha de corrente em 850, 500 e 200 hPa e ix) Movimento vertical (Pa. s⁻¹).

Campos médios de divergência de umidade em 925 hPa e linhas de corrente em 850 hPa, temperatura potencial equivalente (K) e linhas de corrente em 500 hPa, e altura geopotencial (m_gp) e linhas de corrente em 250 hPa para o período do evento foram elaborados a fim de obter uma análise geral em baixos, médios e altos níveis no período de atuação da ZCAS. Além disso, cortes verticais de umidade específica, vorticidade relativa e movimento ascendente foram construídos em latitudes selecionadas (núcleo do ciclone) para complementar as análises descritas anteriormente.

3.2.1.1 Cálculo do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado

Para o cálculo do fluxo de umidade verticalmente integrado foi usada a função VINT do GrADS, que considera o seguinte cálculo:

$$\frac{f}{g} \times \sum (expr \times \Delta(level))$$

Onde $f=100$ e $g=9,8 \text{ m.s}^{-2}$ (aceleração da gravidade) são fatores de escala, *expr* é a expressão a ser integrada verticalmente e *Delta (level)* é a diferença entre o nível do topo e da superfície em hPa, com isto, a unidade do fluxo de umidade verticalmente integrado é kg.m⁻¹.s⁻¹.

No exemplo do script a seguir, as componentes zonal e meridional do vento e a umidade específica, respectivamente *ugrdprs*, *vgrdprs* e *spfhprs*, foram usadas para cálculo do fluxo de umidade verticalmente integrado entre os níveis 1000 e 300 hPa.

```

´set lev 1000 300´
´define qu=spfhprs*ugrdprs´
´define qv=spfhprs*vgrdprs´
´set lev 1000´
´qui=vint(const(qu,1000),qu,300)´
´qvi=vint(const(qv,1000),qv,300)´
´d mag(qui,qvi)´
´d qui;qvi´

```

3.2.2 Mapas de Precipitação do *Merge*

Mapas com os totais pluviométricos diários, a partir dos dados gerados por Rozante *et al.* (2010), por eles denominado *Merge*, foram utilizados neste trabalho. Tal conjunto de dados, gerado para o período de 1998 a 2016, possui resolução temporal de 3 horas e resolução espacial de 25 km, e inclui dados observados de precipitação e dados do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) para toda a América do Sul e oceano adjacente.

3.2.3 Imagens de Satélite

Neste trabalho foram utilizadas também as imagens de satélites nos canais visível, infravermelho e vapor d'água do GOES-8, obtidos no sítio do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://satelite.cptec.inpe.br/home/novoSite/index.jsp>).

3.2.4 Dados de Precipitação das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) do CPTEC/INPE

Foram utilizados acumulados de precipitação observada a cada 3 horas nas PCDs do CPTEC/INPE, localizadas na BRPS, no período do caso estudado neste trabalho. A Tabela 3.3 apresenta informações sobre as PCDs, com dados no período de 25/12/1999 a 10/01/2000. O mapa com a localização das PCDs utilizadas encontra-se na Figura 1.1.

Tabela 3.3 – Informações sobre as PCDs do CPTEC/INPE utilizadas neste estudo.

Nome Estação	Latitude (grau)	Longitude (grau)	Altitude (m)
Cachoeira Paulista	-22,675	-45,002	563
Cruzeiro	-22,575	-44,967	518
Cunha	-23,067	-44,950	950
Guaratinguetá	-22,081	-45,189	539
Monteiro Lobato	-22,953	-45,838	731
Paraibuna	-23,407	-45,588	762
São José do Barreiro	-22,640	-44,584	1372
Silveiras	-22,804	-44,839	1219
Barra Mansa	-22,536	-44,172	518
Leopoldina	-21,468	-42,723	305

3.2.5 Diagramas de Fase de Ciclones

Os diagramas de fase de ciclones apresentados neste trabalho foram elaborados pelo Professor Dr. Robert E. Hart da *Florida State University* (FSU), a partir dos dados do CFSR do NCEP, com resolução espacial de 0,5° de latitude, 0,5° de longitude e temporal de 6 horas.

Hart (2003) comenta da dificuldade em encontrar parâmetros que descrevessem simultaneamente a intensidade da estrutura de núcleo quente do ciclone tropical, bem como a estrutura de núcleo frio do ciclone extratropical, além de ao mesmo tempo descrever o estágio de desenvolvimento extratropical (formação, intensificação, oclusão e decaimento). Dessa forma, os parâmetros escolhidos teriam que levar em conta a natureza verticalmente empilhada do ciclone tropical, assim como a inclinação do ciclone extratropical, além de diagnosticar as transições na fase dos ciclones. Com isso, o autor examinou diversos parâmetros como, por exemplo, vorticidade potencial e o seu perfil vertical, vector Q, temperatura potencial equivalente e o seu perfil vertical, frontogênese e inclinação do ciclone. Após uma cuidadosa análise desses parâmetros mais complexos, identificaram dois mais simples, porém robustos, que se adequaram às medidas de estrutura geral dos ciclones: vento térmico e assimetria térmica. A seguir são apresentadas as equações dos parâmetros escolhidos por Hart (2003) para a geração dos diagramas bidimensionais.

3.2.5.1 Parâmetro B: simetria térmica do ciclone

Os ciclones extratropicais se desenvolvem a partir dos gradientes horizontais de temperatura, sendo classificados como assimétricos ou frontais, já os ciclones tropicais não necessitam desse gradiente, sendo classificados como simétricos ou não frontais.

O Parâmetro B, proposto por Hart (2003), representa a natureza frontal do ciclone e é calculado a partir do gradiente de espessura média da camada entre 600 e 900 hPa, perpendicular ao movimento do ciclone. Tal gradiente é obtido dentro de um raio de 500 km partindo do centro do ciclone em superfície (Equação 3.2, Figura 3.3).

$$B = h \left[\overline{(Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}})_D} - \overline{(Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}})_E} \right] \quad (\text{Equação 3.2})$$

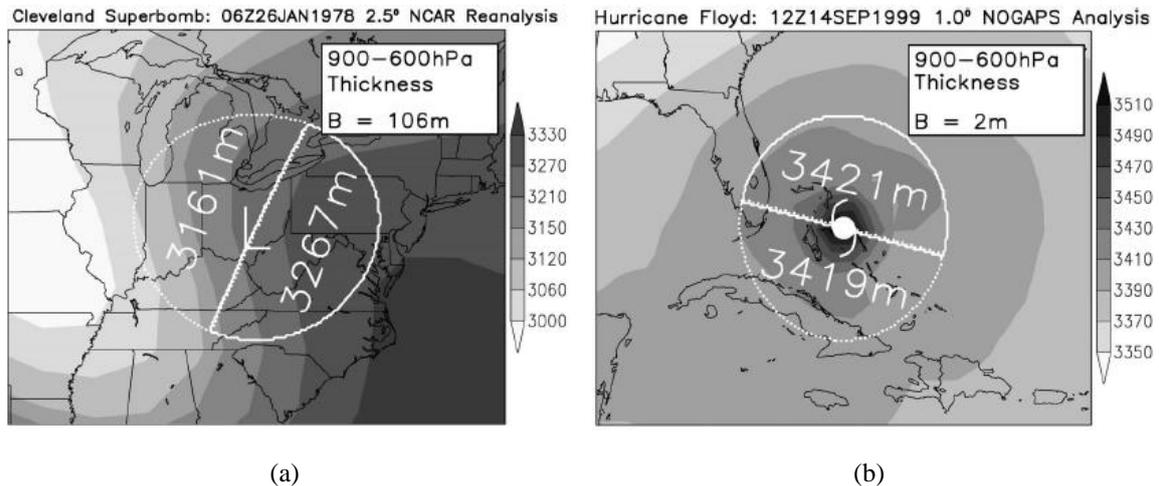
Onde:

$h = +1$ para o Hemisfério Norte (HN) -1 para o Hemisfério Sul (HS)

Z_{600} = altura geopotencial no nível de 600 hPa

Z_{900} = altura geopotencial no nível de 900 hPa

Os índices D e E representam os lados direito e esquerdo, respectivamente, do ciclone levando em conta a linha divisória marcada pelo seu vetor deslocamento.



(a) (b)
Figura 3.3 – Esquemas para o Hemisfério Norte de (a) ciclone extratropical e (b) ciclone tropical, com isolinhas de espessura entre 900 e 600 hPa, limitados por envoltório de 500 km de raio. Fonte: Hart (2003).

Nos ciclones tropicais maduros o valor de B aproxima-se de 0 metros, enquanto nos ciclones extratropicais em desenvolvimento, B apresenta grandes valores positivos. Ressalta-se que nos últimos estágios de um ciclone extratropical B apresenta pequenos valores, já que após a oclusão ocorre a elevação no setor quente e grande mistura vertical, resultando em um centro mais frio e homogêneo.

Evans e Hart (2003) através do estudo de 61 transições extratropicais no oceano Atlântico Norte entre 1979 e 1993 definiram empiricamente um valor limite para B. A análise desses ciclones, através de dados de reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) com resolução de 1,25° de latitude x 1,25° de longitude, revelou que o valor $B = 10$ metros é o mais adequado para distinguir um ciclone não-frontal de um ciclone ligeiramente frontal.

3.2.5.2 Parâmetros $-V_T^L$ e $-V_T^U$: vento térmico do ciclone (núcleo quente x núcleo frio)

A natureza térmica do núcleo de um ciclone pode ser obtida através da análise da estrutura vertical do vento térmico próximo ao centro do ciclone. Quando a magnitude

do gradiente de geopotencial aumenta, isto é, o aumento da magnitude do vento geostrófico com a altura representa a estrutura de um ciclone de núcleo frio, já quando diminui, representa a estrutura de um ciclone de núcleo quente.

Da mesma forma que no cálculo do parâmetro B, a atmosfera abaixo de 900 hPa não é incluída no cálculo desses parâmetros para impedir a extrapolação abaixo do solo ou dentro da camada limite atmosférica. A atmosfera acima de 300 hPa também foi excluída a fim de prevenir a influência da fase estratosférica, que é frequentemente oposta à fase troposférica.

A fim de simplificar os cálculos relativos aos gradientes isobáricos de altura geopotencial dentro do ciclone, a Equação 3.3 define a perturbação de altura geopotencial do ciclone. Esse parâmetro é a diferença entre os valores máximo e mínimo de altura geopotencial de determinada superfície isobárica dentro do ciclone definido num raio de 500 km, onde se considera apenas a magnitude do gradiente e não sua orientação.

$$\Delta Z = [Z_{m\acute{a}x} - Z_{m\acute{i}n}]_p \quad (\text{Equação 3.3})$$

Ressalta-se que ΔZ é proporcional à magnitude do vento geostrófico em coordenadas isobáricas, pois representa o módulo do gradiente de altura geopotencial num dado nível. Dessa forma, a variação vertical de ΔZ , que corresponde à variação vertical do vento geostrófico, equivale ao vento térmico em determinada camada. O cálculo dos parâmetros $-V_T^L$ e $-V_T^U$ é apresentado na Equação 3.4.

$$(a) -V_T^L = \left. \frac{\partial \Delta Z}{\partial \ln p} \right|_{900hPa}^{600hPa} \quad (b) -V_T^U = \left. \frac{\partial \Delta Z}{\partial \ln p} \right|_{600hPa}^{300hPa} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Para que os parâmetros definidos por Hart (2003) determinem a natureza térmica do ciclone, são consideradas duas camadas de massas iguais: 900-600 hPa (consistente com o parâmetro B e que com ele forma um diagrama), e 600-300 hPa. Essas duas camadas representam os baixos e altos níveis atmosféricos, uma vez que todos os ciclones podem apresentar núcleos quente e frio ao mesmo tempo, dependendo da camada atmosférica examinada (Hirschberg e Fritsch, 1993).

Valores positivos de $-V_T$, em altos e baixos níveis, indicam uma camada de núcleo quente, enquanto valores negativos indicam uma camada de núcleo frio (Figura 3.2).

Num ciclone tropical de núcleo quente, ambos $-V_T^L$ e $-V_T^U$ são necessariamente positivos e o termo de baixos níveis ($-V_T^L$) possui maior magnitude. Ocorre o inverso no ciclone extratropical de núcleo frio, onde ambos os parâmetros são necessariamente negativos e o termo de altos níveis ($-V_T^U$) tem maior magnitude. Observa-se que nos ciclones híbridos ou ciclones em transição, $-V_T^L$ e $-V_T^U$ podem ter sinais opostos ou então a mesma magnitude.

Hart (2003) relata que as estruturas de núcleo frio e núcleo quente relacionam-se diretamente com a estrutura vertical da perturbação de altura geopotencial do ciclone (amplitude). Uma estrutura de núcleo frio indica uma onda ou estrutura de ciclone com maior amplitude no topo da camada que na base, com o eixo do cavado inclinando-se para oeste. Ao contrário, uma estrutura de núcleo quente (que é geralmente empilhada) apresenta uma perturbação de altura geopotencial que é maior na base do que no topo da camada, como pode ser observado na Figura 3.4.

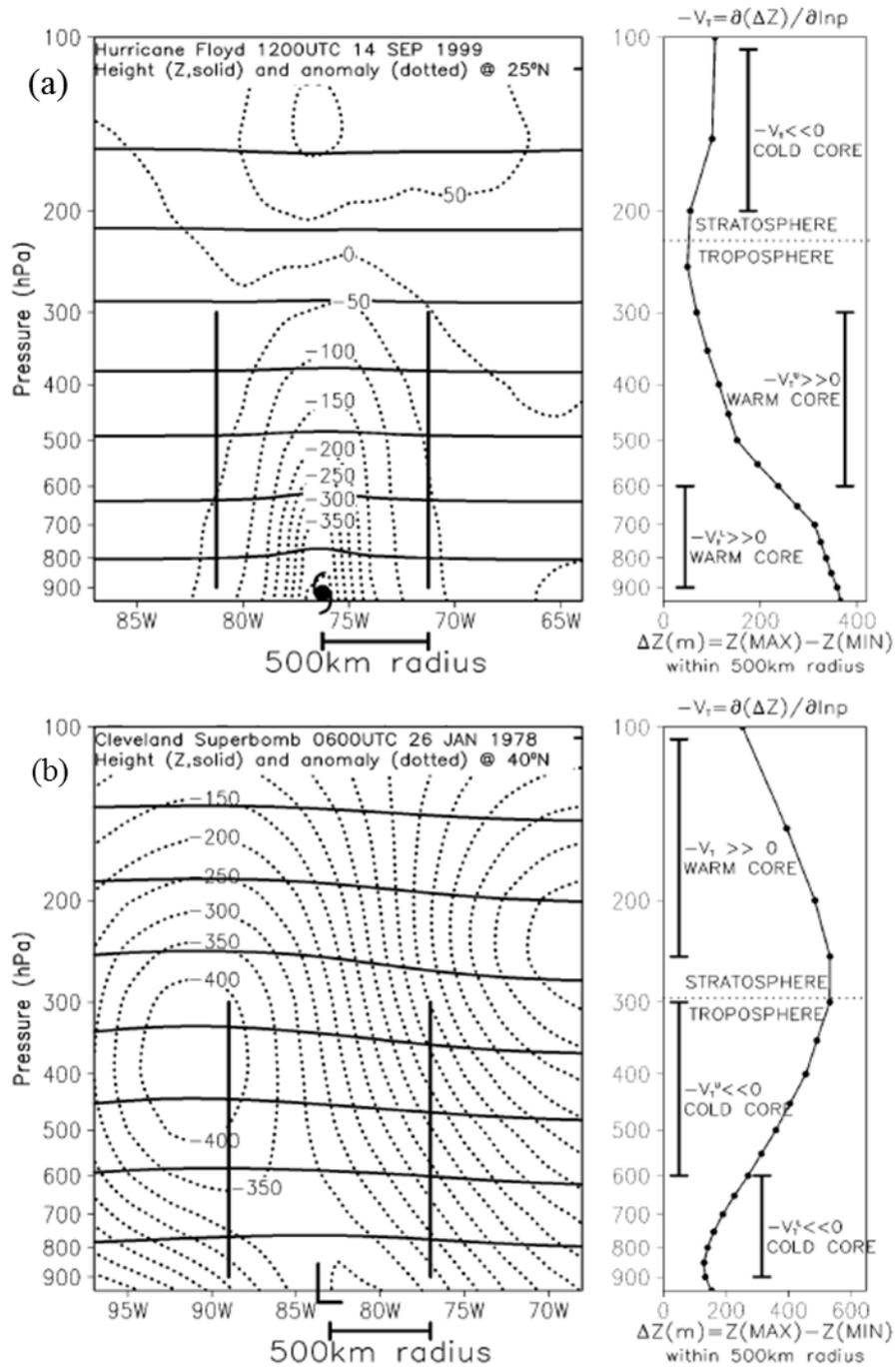


Figura 3.4 – As linhas contínuas indicam a altura geopotencial, as linhas pontilhadas mostram a anomalia de geopotencial em relação à média zonal e os gráficos a direita de cada figura mostram o perfil vertical da perturbação de altura geopotencial (ΔZ) para (a) ciclone tropical e (b) ciclone extratropical. As barras verticais limitam o raio de 500 km. Fonte: Hart (2003).

4 Principais Características da Bacia do Rio Paraíba do Sul

O rio Paraíba do Sul nasce na Serra da Bocaina, um segmento paulista da Serra do Mar, a 1800 m de altitude, e deságua no norte fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão de aproximadamente 1150 km (CEIVAP, 2001). Sua bacia possui área de drenagem com cerca de 55.500 km², compreendida entre os paralelos 20°26' e 23°00'S e os meridianos 41°00' e 46°30'W. A bacia estende-se pelos estados de São Paulo (13.900 km²), Rio de Janeiro (20.900 km²) e Minas Gerais (20.700 km²) conforme mostra o mapa político administrativo apresentado na Figura 4.1. É limitada ao norte pelas bacias dos rios Grande e Doce e pelas serras da Mantiqueira, Caparaó e Santo Eduardo e a nordeste pela bacia do rio Itabapoana. Ao sul, o limite é formado pelas Serra dos Órgãos e pelos trechos paulista e fluminense da Serra do Mar. A oeste, pela bacia do rio Tietê, da qual é separada por meio de diversas ramificações dos maciços da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira (COPPETEC, 2006).

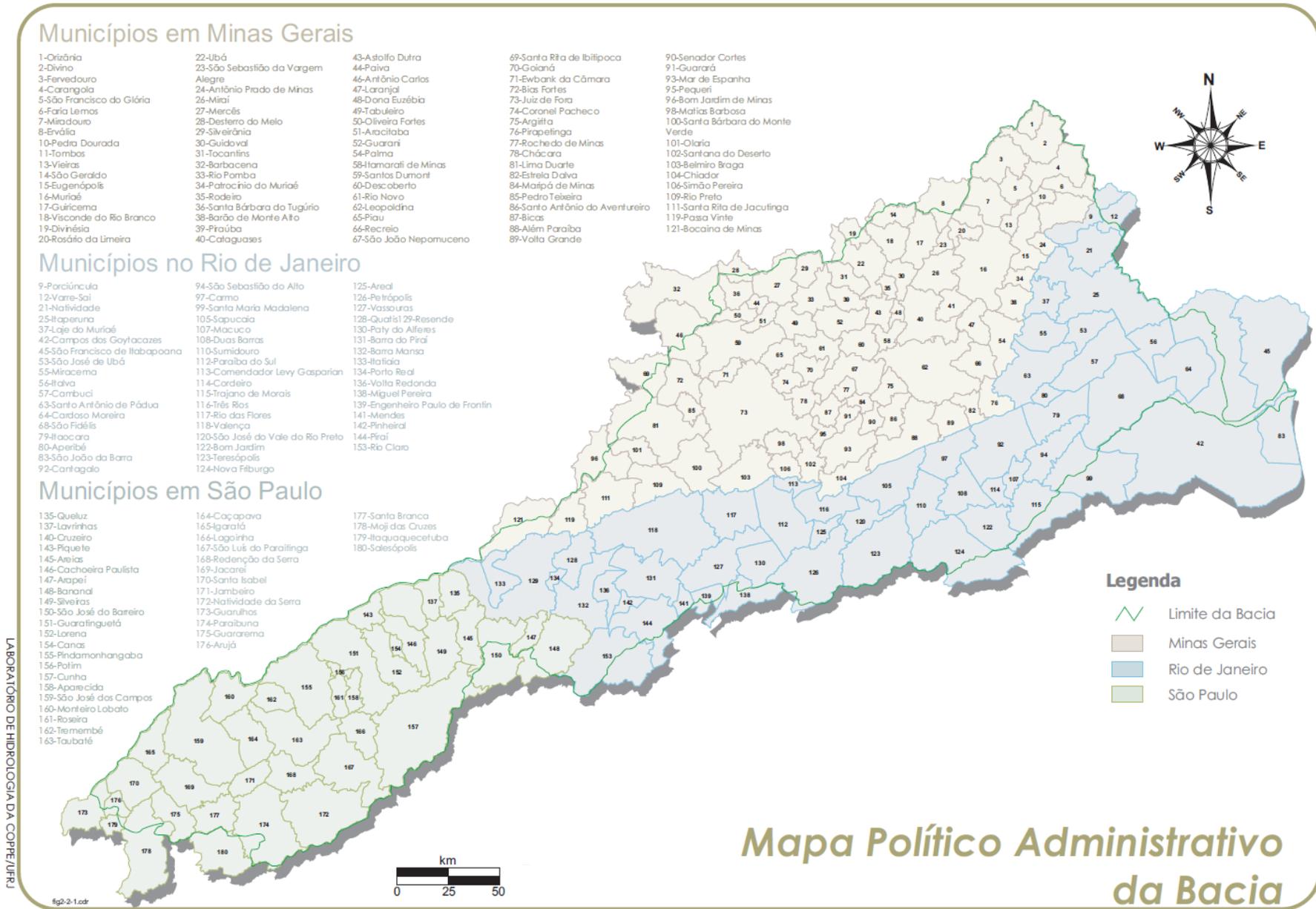


Figura 4.1 – Mapa político e administrativo da Bacia do rio Paraíba do Sul (Fonte: COPPETEC, 2006).

A BRPS tem forma alongada, com comprimento cerca de três vezes maior que a largura máxima, e distribui-se na direção leste-oeste, situando-se em uma das poucas regiões do país de relevo muito acidentado, de colinoso a montanhoso, chegando a mais de 2000 m nos pontos mais elevados, onde se destaca o Pico das Agulhas Negras no maciço do Itatiaia (Serra da Mantiqueira), ponto culminante da bacia, a 2787 m (CEIVAP, 2001).

Das poucas áreas planas existentes, cita-se o delta do Paraíba, com extensa planície flúvio-marinha, que abrange parte dos municípios fluminenses de Campos dos Goytacazes, São João da Barra e São Francisco do Itabapoana, ao longo do rio Paraíba do Sul e de alguns de seus maiores afluentes, planícies fluviais, pouco extensas, destacando-se as bacias sedimentares de Taubaté (SP) e Resende (RJ).

Ao longo de seu percurso, o rio Paraíba do Sul apresenta trechos com características físicas distintas, os quais podem ser divididos de acordo com a seguinte classificação: i) Curso superior: estende-se da nascente até a cidade de Guararema (SP), a 572 m de altitude, apresentando fortes declives e regime torrencial, com declividade média de 4,9 m/km e extensão de 317 km; ii) Curso médio superior: começa em Guararema e segue até Cachoeira Paulista (SP), onde a altitude é de 515 m. Nesse trecho, o rio é bastante sinuoso e meandrado, percorrendo terrenos sedimentares de grandes várzeas. A declividade média cai para 0,19 m/km numa extensão de 208 km; iii) Curso médio inferior: situa-se entre Cachoeira Paulista (SP) e São Fidelis (RJ), onde a altitude é de 20 m, a declividade média, de 1,0 m/km, e sua extensão, 480 km. O rio apresenta-se encaixado e com trechos encachoeirados e iv) Curso inferior: o trecho final do Paraíba do Sul estende-se de São Fidelis (RJ) à foz, com 95 km de extensão e declividade média de 0,22 m/km, atravessando a Baixada Campista, extensa planície litorânea.

Ainda de acordo com CEIVAP (2001) os reservatórios de cabeceira (Paraitinga, Paraibuna e Jaguari) no Estado de São Paulo, juntamente com o reservatório de Funil no Estado do Rio de Janeiro, proporcionam controle bastante satisfatório no que se referem a enchentes de caráter regional nos dois terços superiores do rio. Neles, as inundações urbanas são atualmente na maioria das vezes de âmbito municipal, provocadas pelo transbordamento dos cursos d'água afluentes do Paraíba do Sul, que promovem a drenagem dos núcleos urbanos. Já no terço inferior, afluentes importantes como o rio

Muriaé, que ao longo de seu curso atravessa áreas urbanas de diversos municípios, contribuem para recorrentes inundações de caráter regional na bacia, afetando no trecho fluminense, principalmente os municípios de Campos dos Goytacazes, Cardoso Moreira, Italva, Itaperuna, Natividade e Laje do Muriaé e, no trecho mineiro, os municípios de Patrocínio do Muriaé e Carangola. A cheia de janeiro de 1997 chegou a cobrir mais de 95% da área urbana do município de Cardoso Moreira, deixando quase 9 mil desabrigados.

A BRPS drena uma das regiões mais desenvolvidas do país, abrangendo parte do Estado de São Paulo, na região conhecida como Vale do Paraíba Paulista, parte do Estado de Minas Gerais, denominada Zona da Mata Mineira, e metade do Estado do Rio de Janeiro. Em toda essa extensão há atualmente 180 municípios, 36 dos quais estão parcialmente inseridos na bacia, distribuídos como mostra o mapa da Figura 4.1. A população urbana total da bacia, estimada para o ano de 2005 é de 5.258.068 habitantes, sendo que desses, 2.264.070 no Estado do Rio de Janeiro, 1.245.300 em Minas Gerais e 1.748.698 em São Paulo (COPPETEC, 2006).

4.1 Climatologia da Bacia do Rio Paraíba do Sul

A BRPS apresenta um clima muito variado, devido à sua orografia bastante acidentada, marcada pela presença das Serras do Mar e da Mantiqueira e da proximidade do Oceano Atlântico no nordeste da bacia. Nesta seção, apresenta-se o comportamento das variáveis atmosféricas mais importantes para caracterização do clima de uma região: a temperatura do ar próximo à superfície e a precipitação.

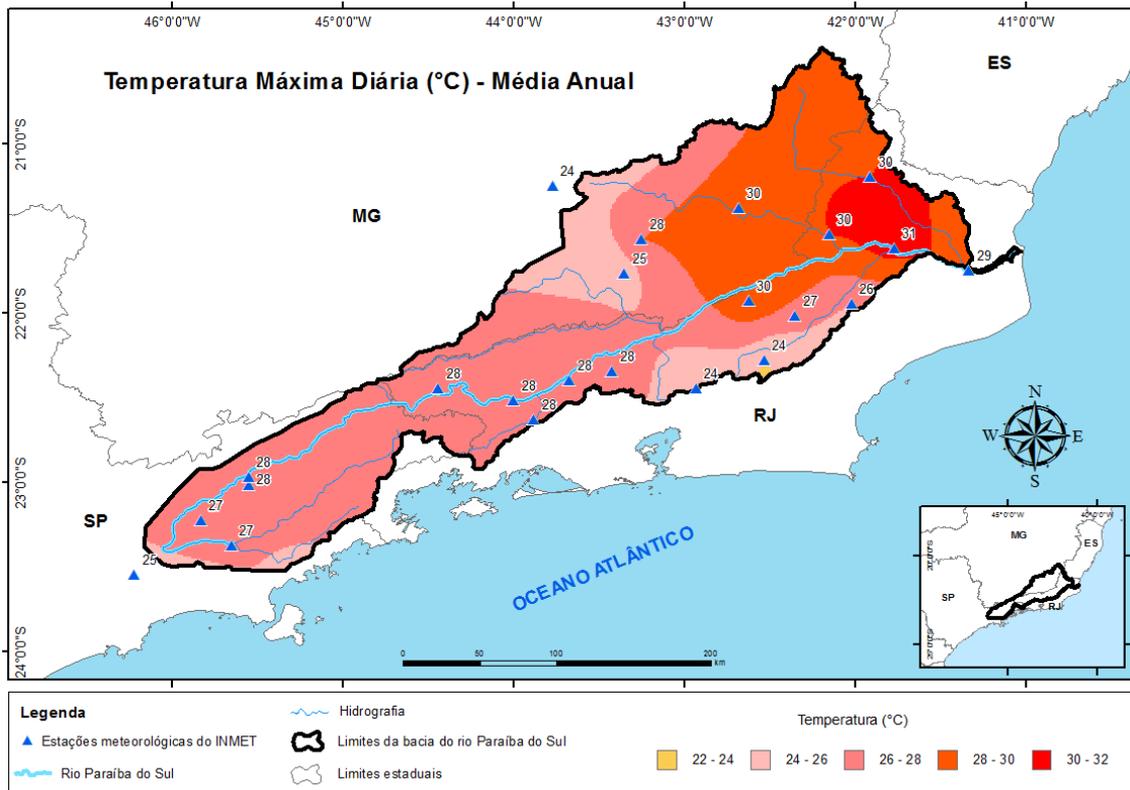
4.1.1 Temperatura do Ar

A climatologia da temperatura do ar é descrita através da análise das normais climatológicas das 23 estações do INMET localizadas na BRPS apresentadas na Figura 3.1.

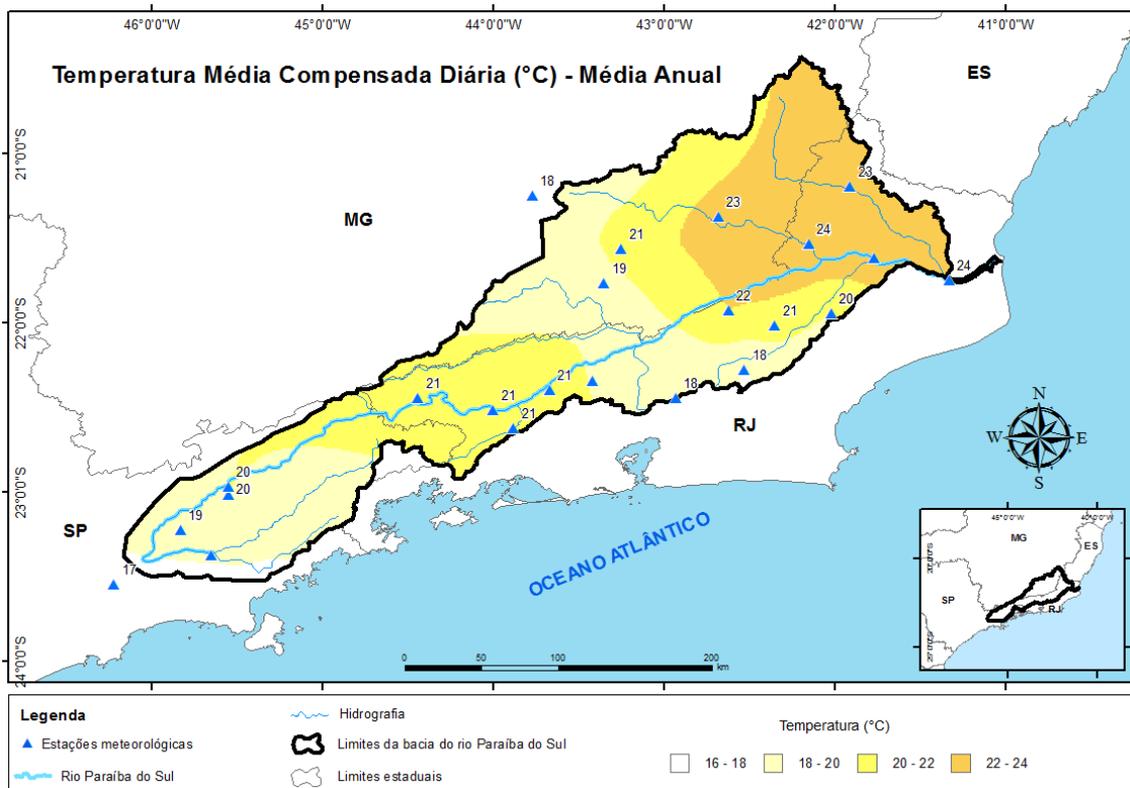
Provavelmente as menores temperaturas ocorrem no Pico das Agulhas Negras, localizado a uma altitude de 2787 m. Infelizmente dados nas proximidades dessa região só estão disponíveis para a estação do INMET no Alto do Itatiaia (83750), onde são divulgados apenas os extremos de temperatura do ar e precipitação do período 1914-1942 (INMET, 2010). De acordo com essa publicação (INMET, 2010), a menor temperatura mínima (-6,0°C) foi observada em 11/07/1918, sendo esse também o menor

valor registrado em todo o estado do Rio de Janeiro, e o maior valor de temperatura máxima (23,1°C) foi registrado nessa estação em 27/09/1916.

A Figura 4.2 apresenta a distribuição espacial das climatologias anuais das temperaturas máxima, média compensada e mínima diárias sobre a BRPS. Nota-se que a temperatura do ar é mais elevada no norte/noroeste fluminense e mais baixa na Região Serrana do Rio de Janeiro (estações Teresópolis e Nova Friburgo) e também no sul da BRPS em São José dos Campos, Paraibuna e Mogi das Cruzes e ainda em Barbacena em Minas Gerais. No norte/noroeste do Rio de Janeiro a média anual das temperaturas máximas diárias atinge 31°C em São Fidélis e 30°C em Itaperuna e Cataguases, Santo Antônio de Pádua e Carmo, enquanto a média anual das temperaturas mínimas diárias atinge 20°C em Campos dos Goytacazes e 19°C em Itaperuna e Cataguases e Santo Antônio de Pádua. Observa-se, portanto, uma amplitude térmica média anual de aproximadamente 12°C na região. Na Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ) a amplitude térmica é de aproximadamente 10°C, com máxima de 24°C e mínima de 14°C. A maior amplitude térmica na BRPS ocorre em São José dos Campos, com mínima de 13°C e máxima de 27°C, portanto uma amplitude de 14°C. Com relação à temperatura média compensada observam-se na BRPS maiores valores no norte (aproximadamente 24°C), menores valores na Região Serrana do Rio de Janeiro (18°C) e São José dos Campos (19°C) e valores entre 20 e 23°C nas demais áreas da bacia. Nota-se, portanto a forte influência da topografia sobre a temperatura, com áreas mais frias nas regiões mais elevadas. Além disso, percebe-se que mesmo a pequena variação latitudinal (entre 21°S e 24°S) pode afetar as temperaturas na região, devido a maior energia que chega nas latitudes mais baixas, no norte da bacia.

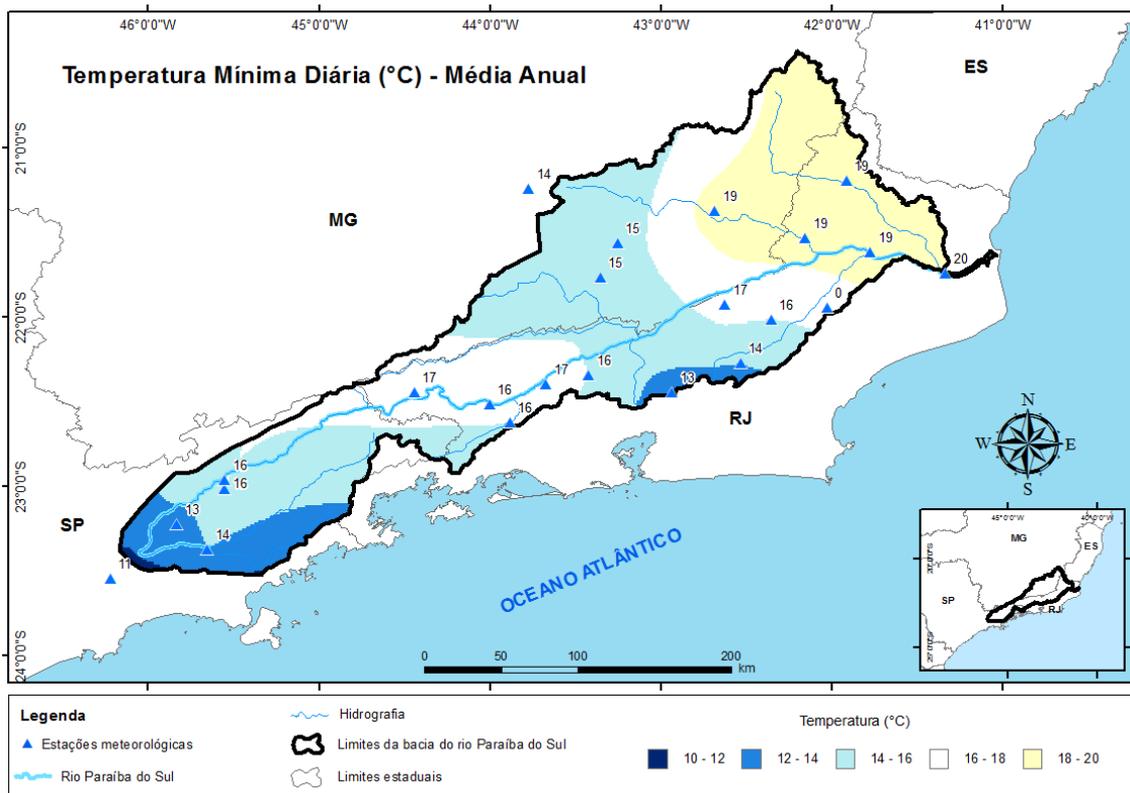


(a)



(b)

Figura 4.2 – Distribuição espacial das climatologias (1961-1990) das temperaturas médias anuais (°C) do ar, a partir das 23 estações do INMET listadas na Tabela 3.1: (a) Temperatura máxima diária, (b) Temperatura média compensada e (c) Temperatura mínima diária.



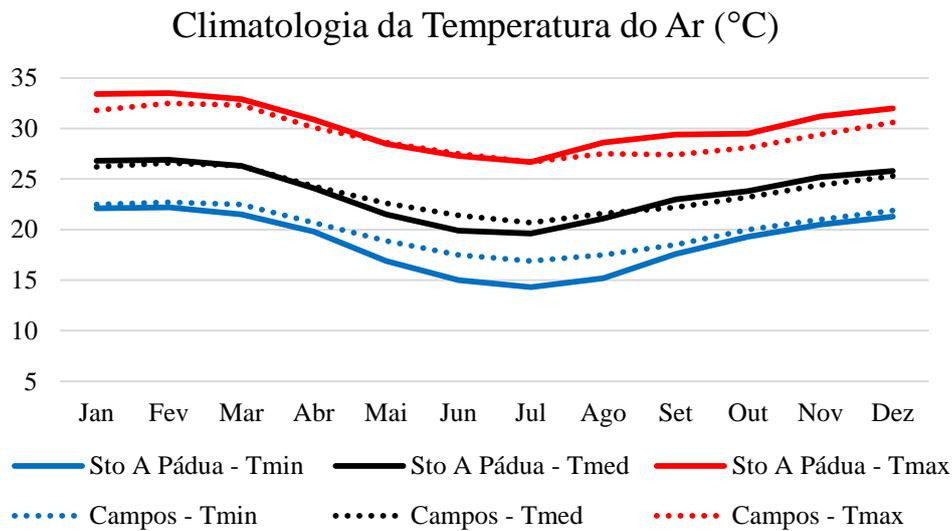
(c)

Figura 4.2 – Final.

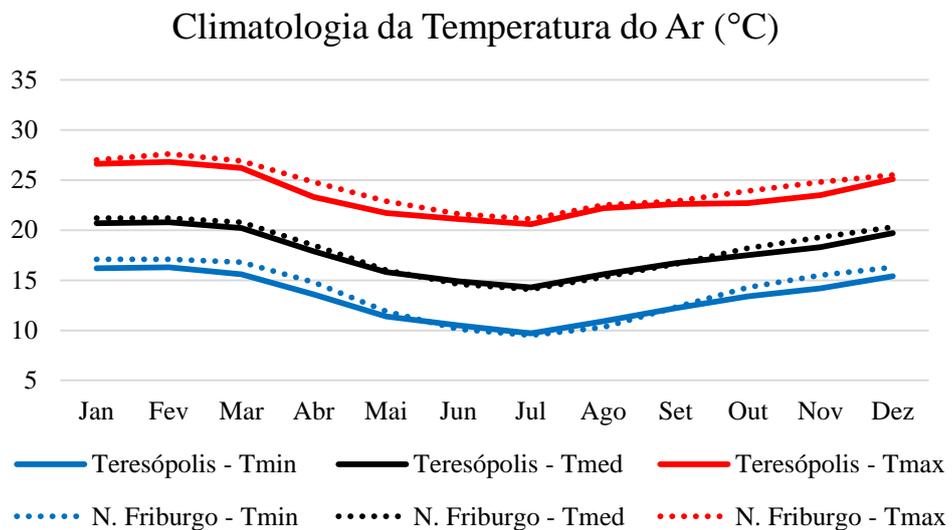
Os ciclos anuais da temperatura do ar em algumas das 23 estações do INMET localizadas na BRPS são apresentados na Figura 4.3. Observa-se que os ciclos anuais das temperaturas máxima, média compensada e mínima exibem padrão semelhante, ou seja, máximos no verão e mínimos no inverno, além de maiores diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas durante o inverno, em razão da maior estabilidade e baixa umidade do ar nessa época do ano, promovendo uma maior variação da temperatura ao longo do dia.

No norte/noroeste fluminense os ciclos anuais nas estações Santo Antônio de Pádua e Campos dos Goytacazes (Figura 4.3a) exibem comportamento bastante semelhante, no entanto as temperaturas mínimas em Santo Antônio de Pádua são inferiores nos meses mais frios (maio a agosto) e as temperaturas máximas são levemente mais elevadas. Como a cidade de Campos dos Goytacazes está mais próxima do litoral do que Santo Antônio de Pádua, provavelmente suas temperaturas mínimas não chegam a cair tanto no inverno e nem as máximas são tão elevadas durante o ano. Nessas estações a temperatura máxima atinge em média 33°C de janeiro a março e a temperatura mínima fica entre 14 e 17°C em julho. As estações localizadas na RSRJ (Figura 4.3b), Teresópolis e Nova Friburgo, exibem ciclo anual bastante semelhante,

com temperaturas máximas em torno de 27°C em janeiro e fevereiro e temperaturas mínimas próximas a 10°C em julho. No sul da BRPS as estações São José dos Campos e Taubaté (Figura 4.3c) mostram que ambas as estações apresentam o ciclo anual similar das demais estações da BRPS, com temperaturas máximas em torno dos 30°C entre janeiro e março e temperaturas mínimas bem baixas entre maio e agosto, atingindo 8°C em São José dos Campos e 11°C em Taubaté no mês de julho. Nota-se também que as temperaturas mínimas em São José dos Campos são menores do que em Taubaté, mas as temperaturas máximas são bem similares ao longo do ano.

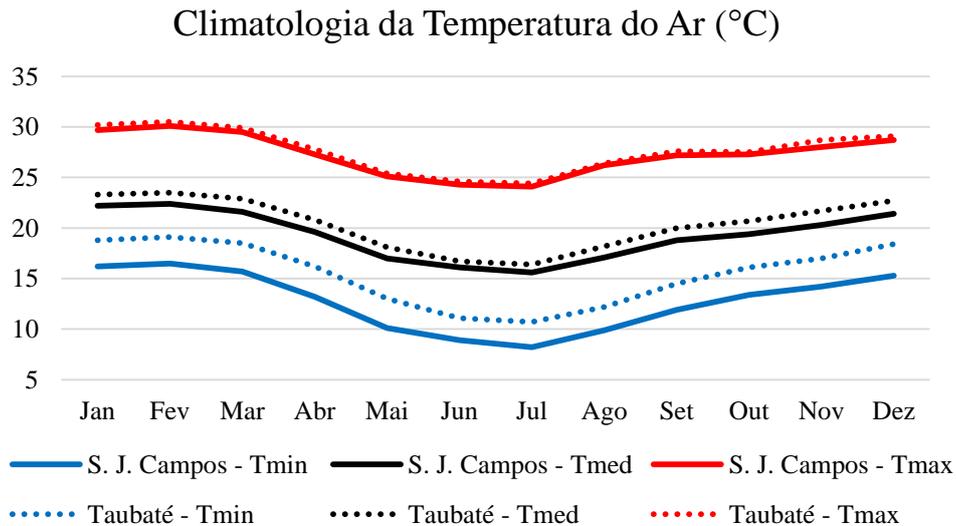


(a)



(b)

Figura 4.3 – Ciclos anuais das temperaturas (°C) máxima, média compensada e mínima para o período 1961-1990 em: (a) Santo Antônio de Pádua e Campos, (b) Teresópolis (Parque Nacional) e Nova Friburgo e (c) São José dos Campos e Taubaté.



(c)

Figura 4.3 – Final.

A distribuição espacial das temperaturas máxima e mínima para as quatro estações do ano também foram construídas para a BRPS (Figuras não apresentadas). A partir da análise sazonal percebe-se que as temperaturas de outono na bacia são ligeiramente mais elevadas do que as temperaturas na primavera (aproximadamente 1°C) e que as maiores (menores) temperaturas ocorrem no verão (inverno).

A partir dos valores absolutos encontrados nessa climatologia de temperatura máxima e mínima sazonais nota-se que a maior temperatura máxima média foi registrada na estação de Santo Antônio de Pádua, no noroeste fluminense, com 33°C no verão, enquanto que a menor temperatura mínima média foi registrada na estação de São José dos Campos, no Vale do Paraíba Paulista, com apenas 9°C no inverno. Já a menor temperatura máxima média registrada ocorreu na estação de Teresópolis (Parque Nacional), na RSRJ, com apenas 21,3°C durante o inverno, indicando a área com menores temperaturas máximas médias na BRPS, e a maior temperatura mínima média registrada aconteceu em Campos dos Goytacazes, no norte fluminense, com 22,4°C durante o verão, indicando a região onde se observam as maiores temperaturas mínimas médias na área de estudo.

Observa-se que os valores das temperaturas máximas e mínimas médias na BRPS costumam ser menores em regiões de altitude elevadas, como por exemplo, Barbacena, Juiz de Fora, Nova Friburgo e Teresópolis (Parque Nacional), onde todas as estações estão acima dos 850 m de altitude. A exceção ocorre em São José dos Campos, no Vale

do Paraíba, onde é observada a menor temperatura mínima média dentro da BRPS e a mesma encontra-se a uma altitude de 644 m.

4.1.2 Precipitação

A distribuição espacial da climatologia da precipitação anual na bacia é apresentada na Figura 4.4. Observa-se que os maiores totais pluviométricos anuais ocorrem nas regiões montanhosas da Serra da Mantiqueira, como em Visconde de Mauá (2296 mm), no Pico do Itapeva (1951 mm) e em Cruzeiro - Túnel (1766 mm), estações localizadas acima dos 1000 m de altitude.

Na região da Serra da Bocaina, entre os estados de Rio de Janeiro e São Paulo, também são encontrados elevados totais pluviométricos anuais, como por exemplo, na estação de Areias – Fazenda de Santa Isabel (1670 mm) que está localizada a 1580 m de altitude. A região do Vale do Paraíba, entre as Serras da Bocaina e da Mantiqueira, também apresenta totais pluviométricos anuais relevantes, mesmo nas estações com altitude inferiores aos 900 m, como pode ser observado nas estações de Monteiro Lobato (1741 mm) a 680 m, Cachoeira Paulista – Usina Bocaina (1725 mm) a 560 m, São José do Barreiro (1616 mm) a 530 m, Piquete – Represa (1604 mm) a 860 m e Silveiras (1577 mm) a 620 m.

No estado do Rio de Janeiro, na região da Serra do Mar (RSRJ), também são encontrados valores elevados de total pluviométrico anual, com valores que atingem 1664 mm em Teresópolis e 1586 mm em Vargem Alta. Em Minas Gerais, nas estações de Juiz de Fora e Coronel Pacheco, os totais pluviométricos anuais são altos, superiores a 1500 mm, respectivamente: 1597 e 1540 mm.

A precipitação é reduzida em direção à depressão do rio Paraíba do Sul e também em direção ao norte e noroeste fluminense. Nessas regiões algumas estações apresentam total pluviométrico anual inferior a 1000 mm, por exemplo, a estação Cardoso Moreira (908 mm) e Três Irmãos (997 mm), localizadas no norte e noroeste fluminense respectivamente. Em Campos dos Goytacazes e Itaperuna, os totais pluviométricos anuais também são relativamente baixos, respectivamente 1031 e 1135 mm. Nos estados de São Paulo e Minas Gerais, as estações de Paraibuna e Cataguases, respectivamente, também apresentam totais pluviométricos anuais baixos, inferiores a 1200 mm.

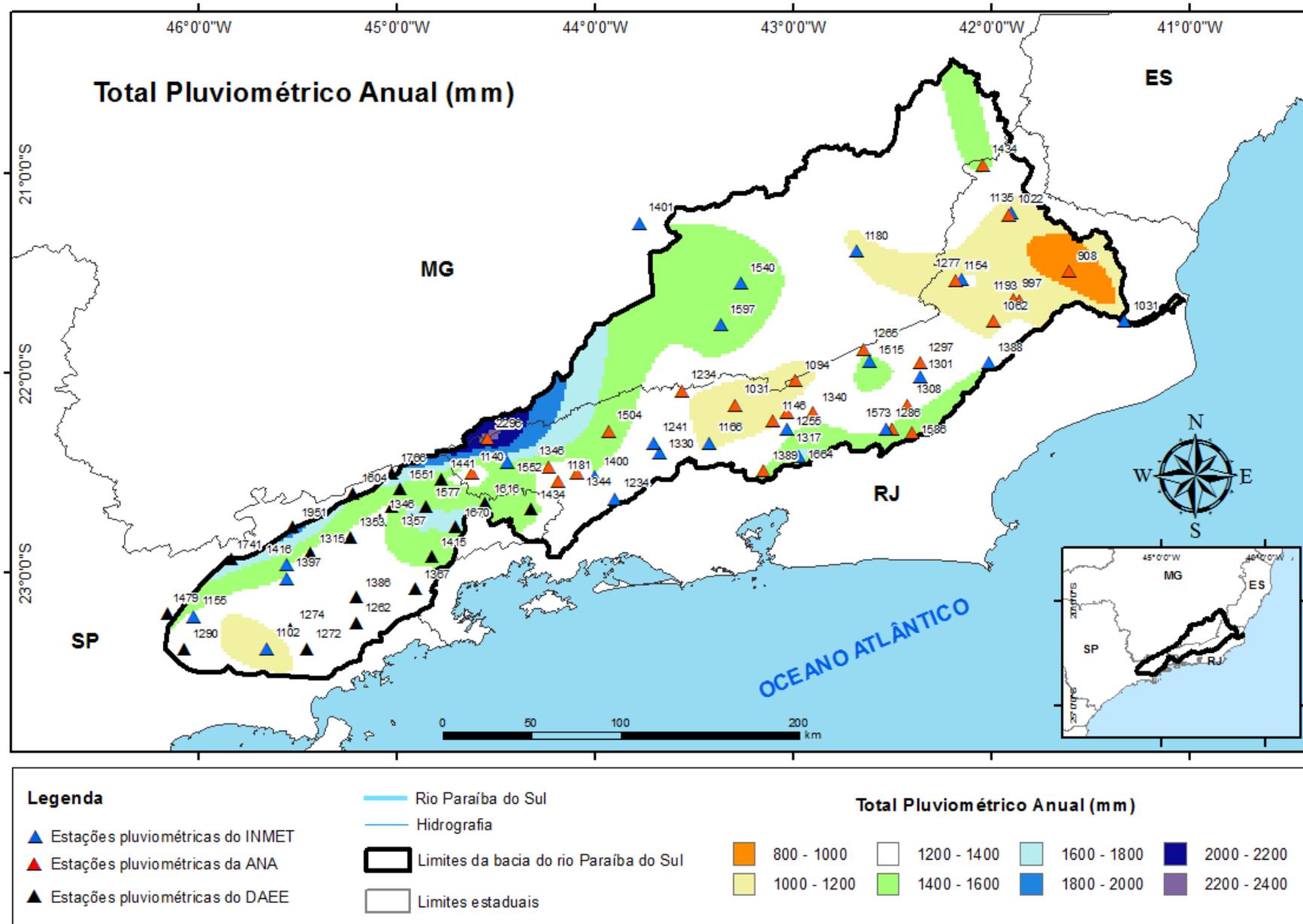


Figura 4.4 – Precipitação anual (mm) na Bacia do rio Paraíba do Sul elaborado a partir das estações do INMET listadas na Tabela 3.2.

Em relação à distribuição sazonal da precipitação climatológica (Figura 4.5), observa-se que durante as estações da primavera e do verão ocorrem os maiores volumes de chuva na região da BRPS, correspondendo em média a 73% do total de chuva anual da região, com valores entre 68 e 81% dentre as 71 estações pluviométricas utilizadas neste estudo. Considerando apenas a estação do verão, nota-se que a mesma representa, em média, 48% do total de chuva anual que incide sobre a bacia, com estações que atingem até 55% do total pluviométrico anual, como em Glicério, Vargem Grande e Aldeia, todas no Rio de Janeiro. Como esperado, o inverno é a estação onde ocorrem os menores índices pluviométricos, acumulando em média apenas 6% do total de chuva anual da BRPS. Nas estações de transição, outono e primavera, o acumulado médio é de, respectivamente, 20 e 26%, sendo a primavera mais úmida do que o outono.

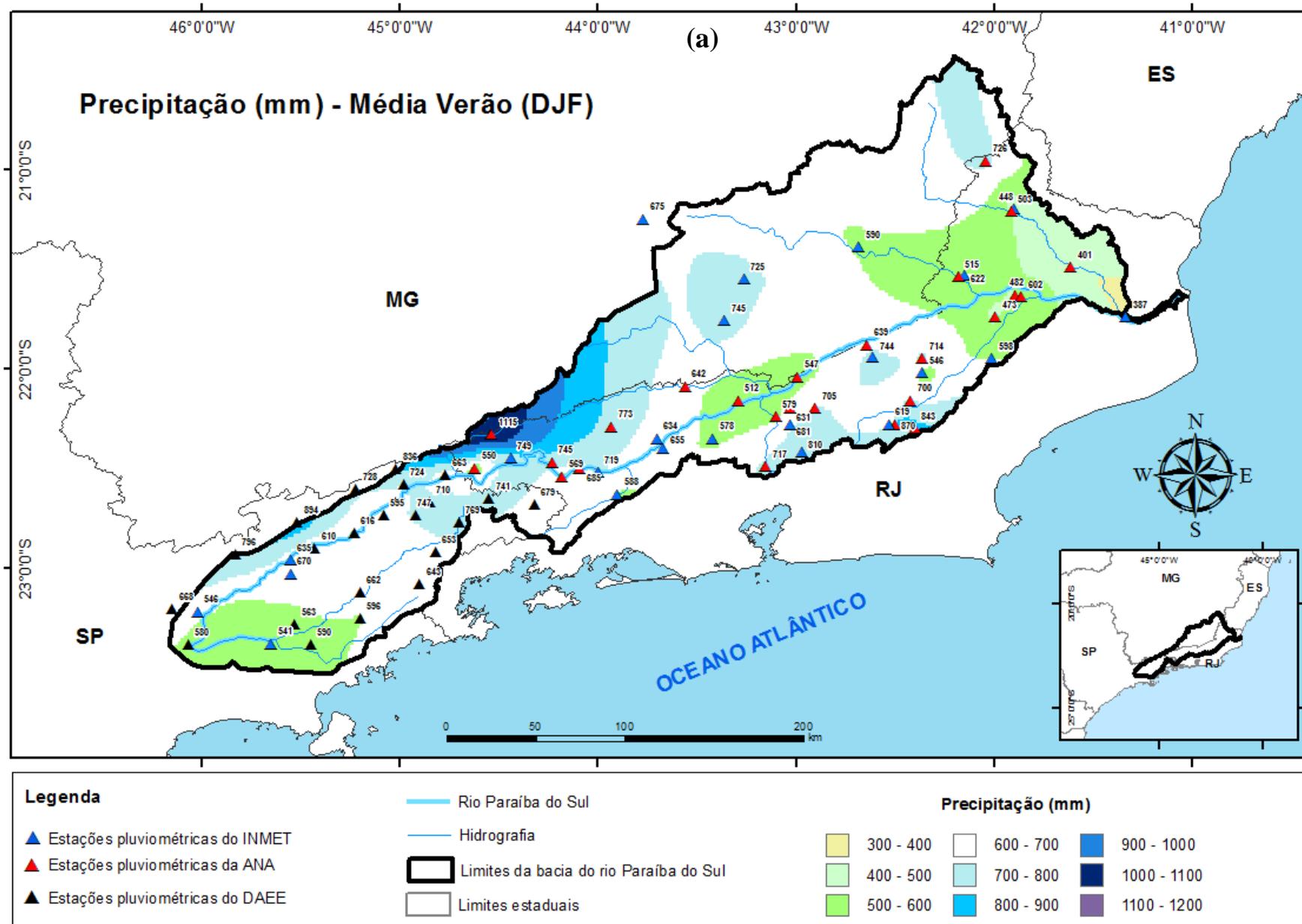


Figura 4.5 – Distribuição espacial da climatologia sazonal (1961-1990) da precipitação (mm) para as seguintes estações: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

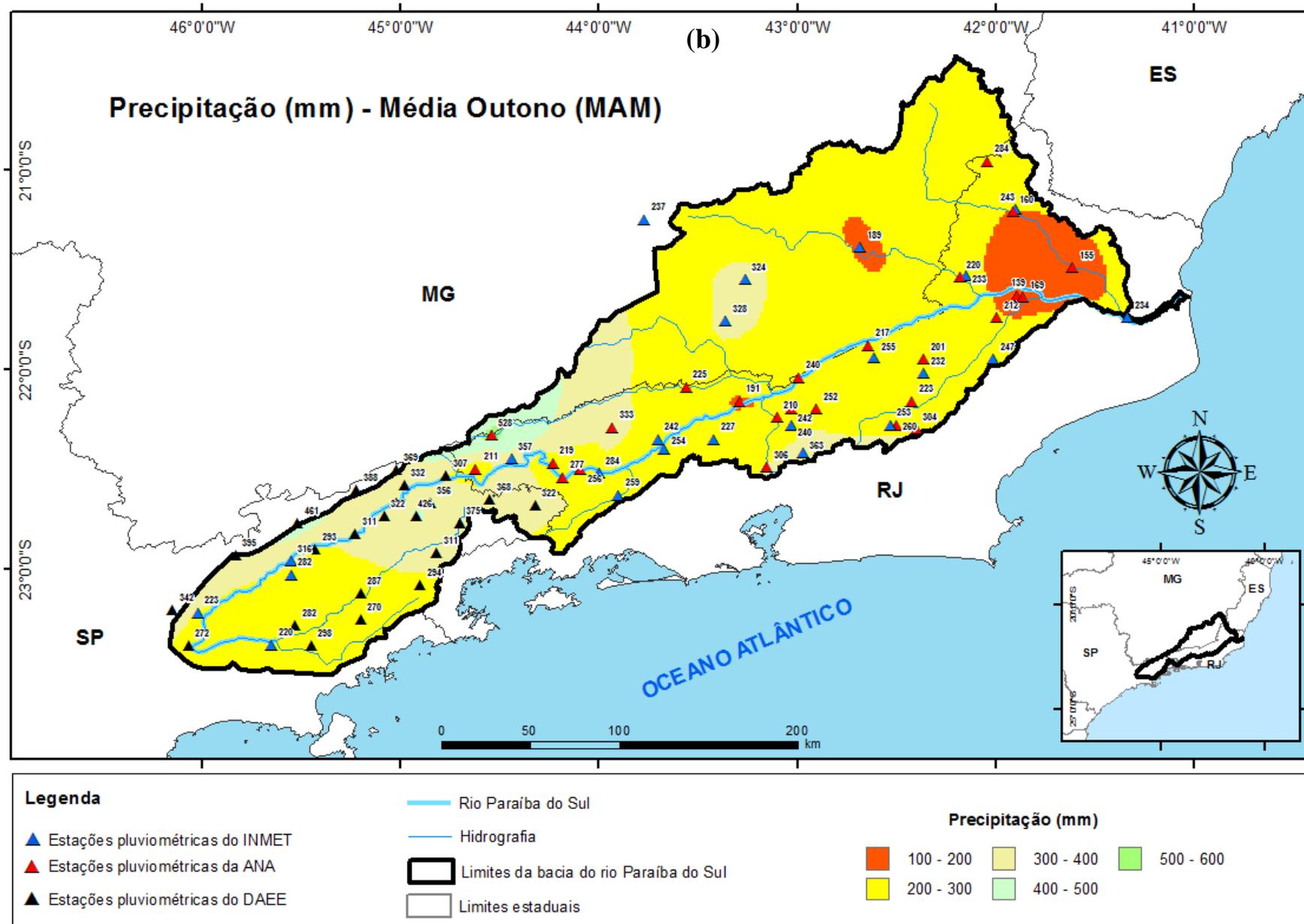


Figura 5.5 – Continuação.

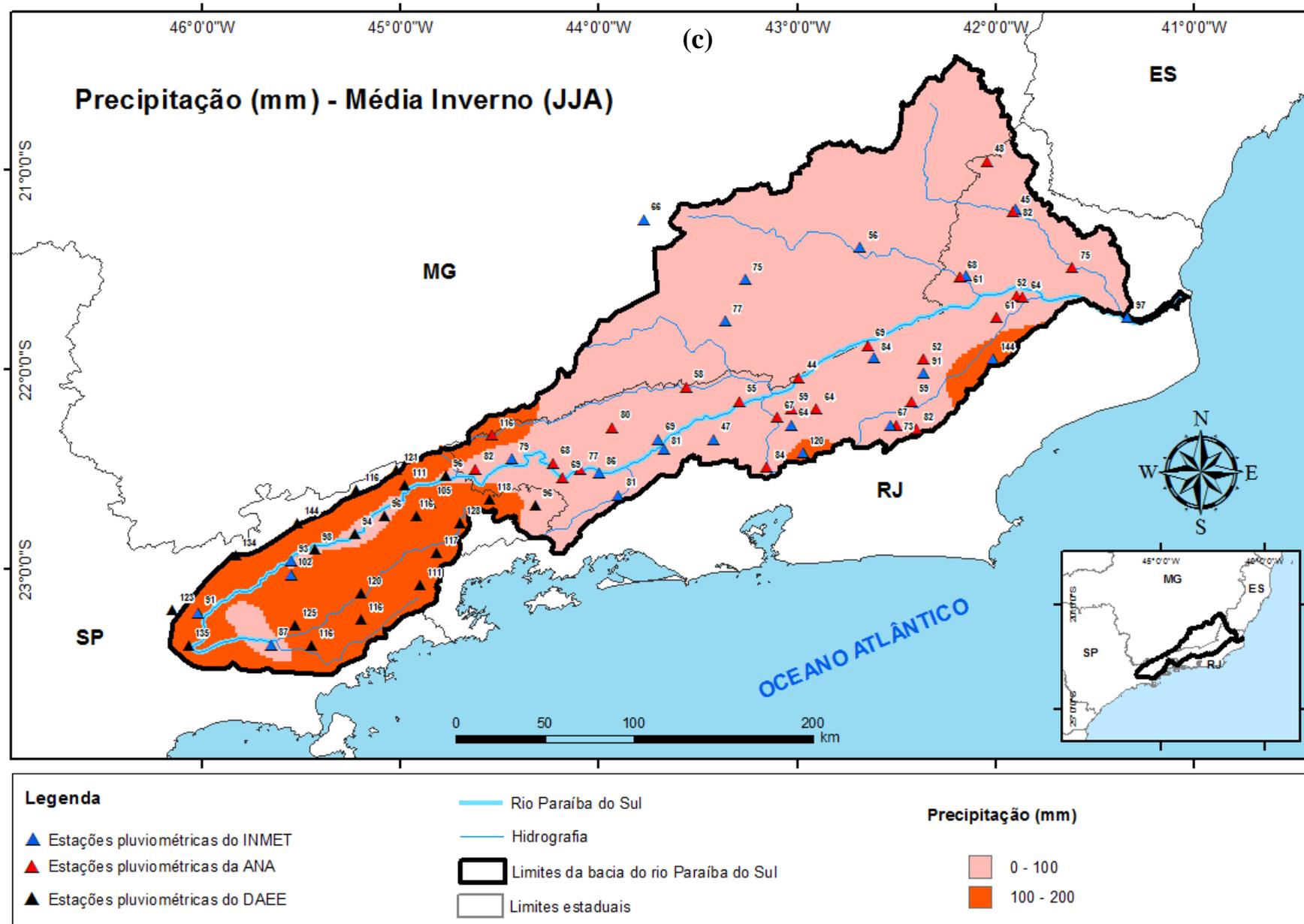


Figura 5.5 – Continuação.

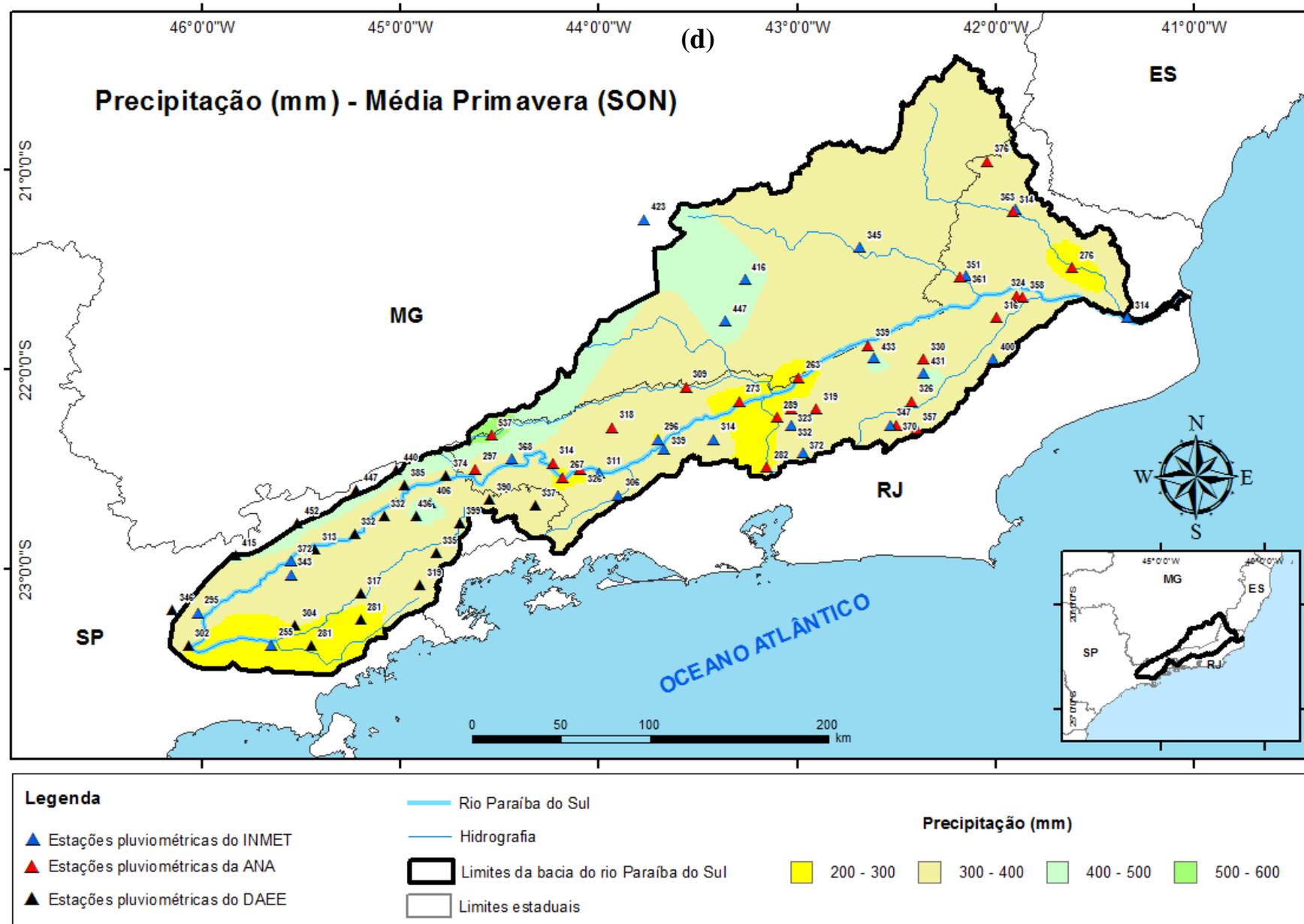


Figura 5.5 – Final.

A Figura 4.6 apresenta os ciclos anuais dos totais pluviométricos mensais climatológicos em 4 estações selecionadas na BRPS, dentre as 71 apresentadas na Tabela 3.2. Tais estações localizam-se na região do Médio Paraíba, incluindo o norte de São Paulo e sul do Rio de Janeiro, onde ocorrem os máximos acumulados de chuva diária durante o estudo de caso de janeiro de 2000 apresentado neste trabalho.

Nota-se a partir da Figura 4.6 que as chuvas são mais elevadas nos meses mais quentes do ano, entre outubro e março (79% do total pluviométrico anual), ocorrendo em geral uma queda acentuada entre abril e setembro, atingindo-se um mínimo no mês de julho, com apenas 18 mm em Barra Mansa. No mês de janeiro ocorrem os maiores acumulados mensais de precipitação (valores destacados na Figura 4.6), variando entre 196 mm em Barra Mansa e 274 mm em Cruzeiro.

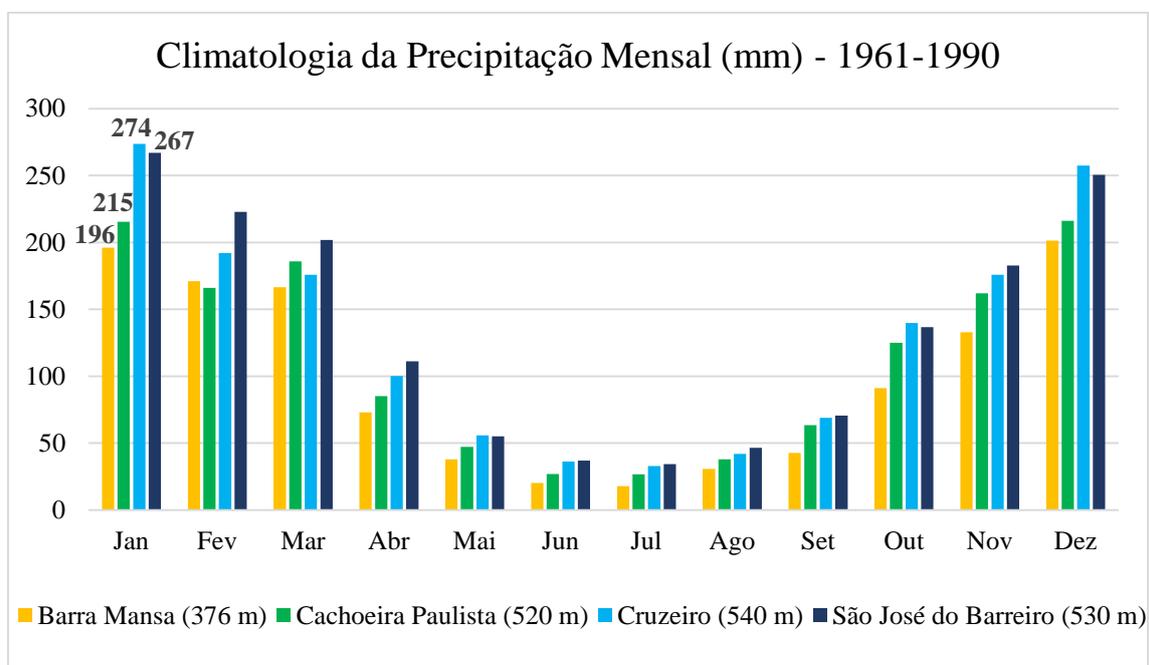


Figura 4.6 – Ciclos anuais da precipitação mensal (mm) climatológica no período 1961-1990 para as estações de Barra Mansa (RJ), Cachoeira Paulista (SP), Cruzeiro (SP) e São José do Barreiro (SP), com suas respectivas altitudes (m), com destaque para os valores da climatologia mensal de janeiro. Fonte: ANA e DAEE.

5 Estudo de Caso - Janeiro de 2000

O caso de chuvas intensas estudado neste trabalho aconteceu no período de 01 a 05 de janeiro de 2000, principalmente na porção sul da BRPS, na região do Médio Paraíba. O evento esteve associado com o primeiro episódio de ZCAS do ano, durante o qual se observou também o desenvolvimento de um ciclone no litoral da Região Sudeste do Brasil.

As chuvas que incidiram sobre as bacias hidrográficas dos afluentes do rio Paraíba do Sul no trecho fluminense provocaram uma elevação no nível do rio Paraíba do Sul acima da capacidade de sua calha, causando inundações nas áreas marginais. Em Volta Redonda, o nível d'água subiu 3 metros acima do normal. Essa situação só não foi mais grave porque a contribuição da BRPS, do trecho à montante (São Paulo) ficou retida no reservatório de Funil, que suportou o acréscimo de volume d'água, mantendo fechadas as comportas do vertedouro. As inundações em diversos cursos de água causaram problemas de trânsito e deixaram diversas cidades, como Pirai, Barra do Pirai (Figura 5.1) e Nova Friburgo, ilhadas. Na Rodovia Presidente Dutra, na altura de Resende (km 300), um alagamento na pista provocou engarrafamento de 11 km e o trânsito teve que ser desviado por Engenheiro Passos (Jornal do Brasil, 3 de janeiro de 2000).



Figura 5.1 – Área alagada na cidade de Barra do Pirai no Rio de Janeiro durante o evento de chuvas intensas ocorrido no início de Janeiro de 2000.

Segundo a Defesa Civil, o número de desabrigados na área da BRPS foi superior a seis mil pessoas, com registro de 12 óbitos, vítimas de afogamento, desabamentos e quedas de barreiras. Nas cidades de Barra Mansa e Resende, no Rio de Janeiro, foi decretado estado de calamidade pública. Nos estados de Minas Gerais e São Paulo a situação também foi grave. Em Minas Gerais, 14 prefeitos decretaram estado de

emergência, com 15 mil desabrigados e, em São Paulo, o estado de emergência foi decretado apenas nas cidades de Queluz e Cruzeiro. Na RSRJ, a chuva provocou mais de 30 deslizamentos de terra no Município de Nova Friburgo.

De acordo com Sugahara *et al.* (2010) a chuva acumulada em 5 dias foi mais importante neste caso que os totais pluviométricos diários.

5.1 Campos Médios Durante Atuação da ZCAS

Durante o evento, um episódio de ZCAS esteve configurado sobre o Brasil, influenciando também a Região Sudeste do país, entre os dias 1 e 8 de janeiro (Climanálise, 2000). A Figura 5.2 apresenta campos médios para o período de atuação da ZCAS. Nota-se na Figura 5.2a a convergência de umidade na baixa troposfera entre o ASAS e os centros de baixas pressões sobre o continente, típicos em eventos de ZCAS. Observa-se também, em baixos níveis, um padrão de dipolo com um centro anticiclônico ao sul do Uruguai, em aproximadamente 37°S/56°W e um centro ciclônico no litoral da região Sul, aproximadamente em 31°S/45°W, como também observado por Dias Pinto *et al.* (2013) e por Quadro *et al.* (2016). Em médios níveis (Figura 5.2b) nota-se a persistência da convergência entre a borda oeste do ASAS e o vórtice ciclônico no interior do continente, com valores elevados de temperatura potencial equivalente (Θ_e) sobre a região de estudo. O padrão de dipolo citado anteriormente permanece configurado em médios níveis, em uma região com valores mais baixos de Θ_e do que observado na Região Sudeste do Brasil. Nota-se também forte gradiente de Θ_e ao sul da orientação da ZCAS, indicando a separação entre a massa quente e úmida oriunda dos trópicos e a massa fria e seca procedente das latitudes médias e altas, como ressaltado também em Quadro (1994). Nos altos níveis (Figura 5.2c) destaca-se a presença da Alta da Bolívia, do Vórtice Ciclônico do Nordeste (VCN) e do cavado no interior do continente bem configurado, como destacado por Kodama (1992) e Quadro (1994), associados à ZCAS.

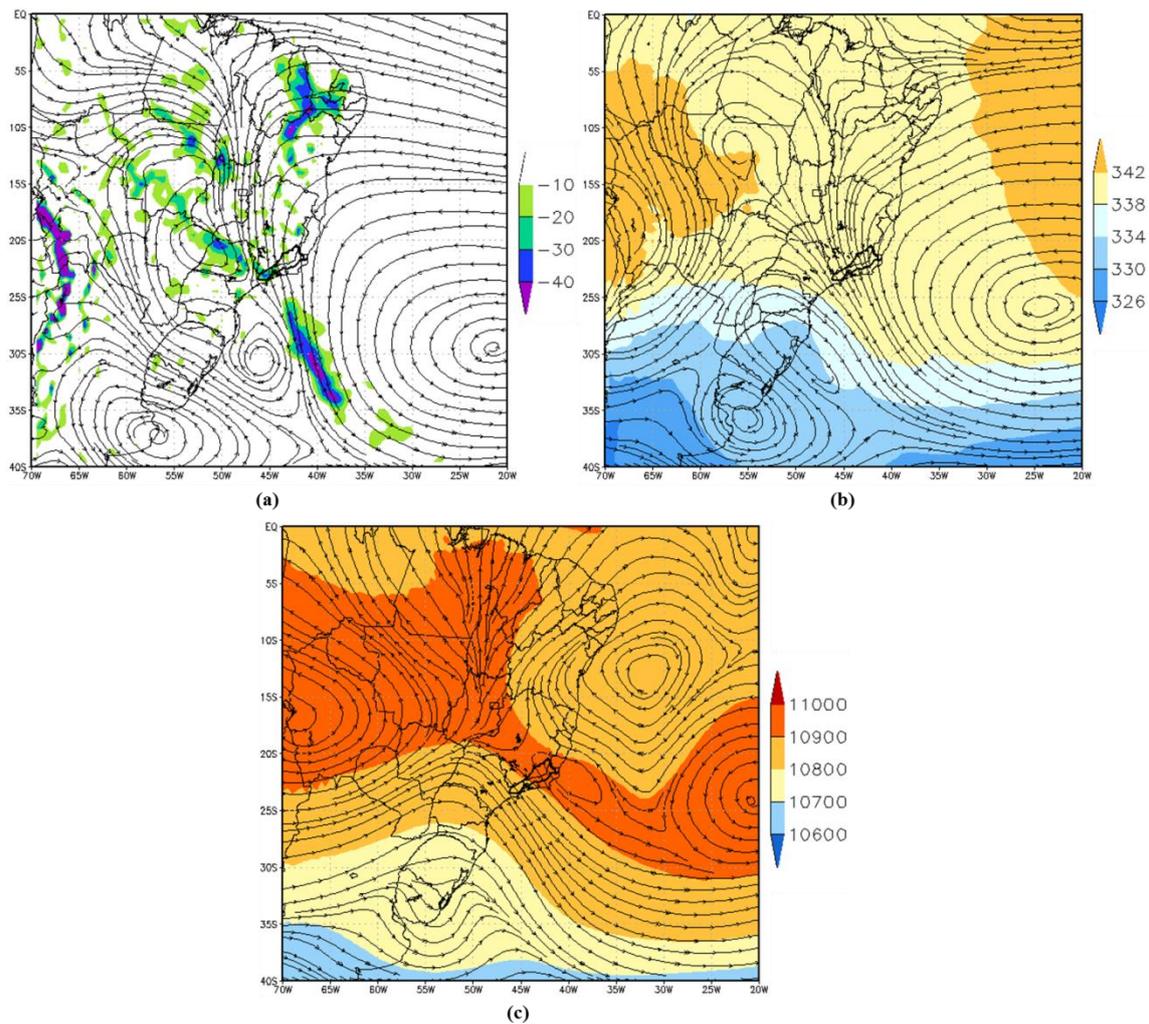


Figura 5.2 Campos médios para o período 01 a 08 de janeiro de 2000: Campos médios para o período 01 a 08 de janeiro de 2000: (a) divergência de umidade (valores negativos a cada $10^8 \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) em 925 hPa e linhas de corrente em 850 hPa; (b) temperatura potencial equivalente (K) e linhas de corrente em 500 hPa (c) altura geopotencial (m) e linhas de corrente em 250 hPa.

5.2 Precipitação Observada

A Tabela 5.1 mostra os acumulados diários de chuva na área de estudo (ver localização na Figura 1.1) entre os dias 1 e 05 de janeiro de 2000 e o acumulado total nesses cinco dias. Nota-se que os maiores acumulados pluviométricos diários aconteceram nos dias 2 e 3 de janeiro em todas as estações, principalmente nas estações localizadas na porção sul da BRPS, na região do Médio Paraíba, incluindo o norte de São Paulo e sul do Rio de Janeiro, onde os valores estiveram acima dos 100 mm/dia (destacados na Tabela 5.1). Observa-se que o maior acumulado diário em São Paulo ocorreu na estação de Cruzeiro, com um total de 192 mm entre 12 UTC do dia 02/01 e 12 UTC do dia 03/01, representando 70% da média mensal de precipitação do mês de

janeiro (Figura 4.6). Já no Rio de Janeiro o maior acumulado diário foi em Resende com 139 mm também entre às 12 UTC do dia 02/01 e às 12 UTC do dia 03/01. Esse valor (139 mm) representa 50% da precipitação esperada para todo o mês de janeiro em Resende, de acordo com sua climatologia mensal de precipitação. Nota-se que o maior acumulado total de chuva nos primeiros cinco dias de janeiro de 2000 ocorreu na estação Pindamonhangaba (Pico do Itapeva), com 522 mm, representando 162% da climatologia de precipitação para o mês de janeiro (322 mm). Ressalta-se que esse episódio de chuva não provocou maiores desastres porque as maiores precipitações ocorreram na região próxima a Usina Hidrelétrica de Funil e o reservatório da mesma conseguiu suportar o volume extra de água, mantendo as comportas fechadas. Em Minas Gerais não foram registrados acumulados significativos de chuva nesse período devido à sua posição geográfica à norte da área de maior convecção dentro da ZCAS.

Tabela 5.1 - Acumulados diários de precipitação (mm/dia) das estações do INMET, DAEE e das PCDs do CPTEC/INPE no período de 1 a 5 de janeiro de 2000. (Os valores em negrito destacam estações que registraram precipitação maior que 100 mm em 24h).

Estação	Órgão	Precipitação diária (mm/dia)					Total
		01/01/00	02/01/00	03/01/00	04/01/00	05/01/00	
Rio de Janeiro							
Barra Mansa	CPTEC/INPE	32	70	130	14	2	248
Campos dos Goytacazes	INMET	0	7	0	0	0	7
Cordeiro	INMET	12	21	30	0	0	63
Itaperuna	INMET	22	27	7	1	0	57
Nova Friburgo	INMET	72	70	77	6	0	225
Resende	INMET	58	59	139	19	8	283
São Paulo							
Aparecida	DAEE	76	79	95	40	12	302
Bananal	DAEE	61	87	153	17	33	351
Cachoeira Paulista	CPTEC/INPE	31	86	138	26	14	295
Cruzeiro	CPTEC/INPE	30	75	192	41	14	352
Cunha	CPTEC/INPE	18	44	67	35	35	199
Guaratinguetá	CPTEC/INPE	12	41	53	16	10	132
Monteiro Lobato	CPTEC/INPE	16	60	80	44	39	239
Paraibuna	CPTEC/INPE	14	45	32	45	30	166
Pindamonhangaba (Pico do Itapeva)	DAEE	87	95	107	134	99	522
São José do Barreiro	CPTEC/INPE	35	109	143	20	29	336
Silveiras	CPTEC/INPE	19	82	93	21	18	233
Taubaté	INMET	28	91	71	55	56	301
Minas Gerais							
Barbacena	INMET	3	45	16	12	1	77
Cel. Pacheco	INMET	0	43	17	18	1	79
Juiz de Fora	INMET	2	43	20	7	0	72
Leopoldina	CPTEC/INPE	1	16	7	3	0	27

O mapa com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre parte da Região Sudeste do Brasil e o oceano adjacente pode ser visto na Figura 5.3. Com a chegada da frente fria no sudeste do Brasil, a chuva inicia no dia 1º de janeiro de 2000, com acumulados inferiores a 40 mm/dia no sul da bacia. Com o avanço desse sistema frontal, a ZCAS apresentou-se melhor configurada, contribuindo para os elevados registros de precipitação. No dia 2 de janeiro a chuva continuou no sul da BRPS, entre o norte de São Paulo, sul de Minas Gerais e sul do Rio de Janeiro e no dia 3 de janeiro foram observados os maiores acumulados de precipitação nessa mesma região, ultrapassando 120 mm em 24 horas em diversas estações. A chuva continua, porém mais fraca, entre os dias 4 e 5 de janeiro, diminuindo consideravelmente no dia 6 de janeiro. Observa-se também acumulados de chuva significativos no Oceano Atlântico próximo ao centro do Vórtice Ciclônico Embebido na ZCAS (VCEZ).

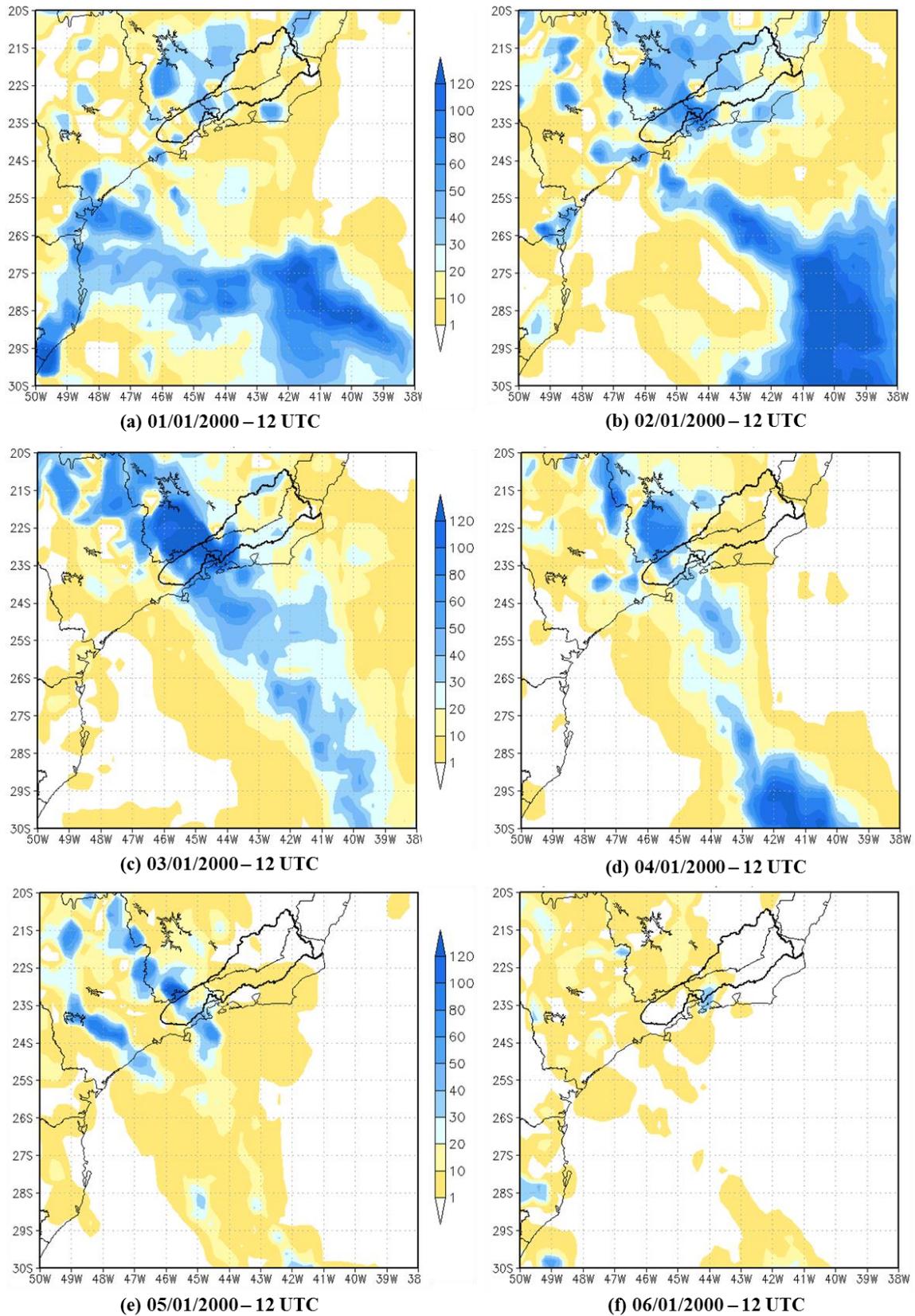


Figura 5.3 - Mapas de precipitação observada (mm/dia), entre 12 UTC do dia anterior até 12 UTC do dia em questão, elaborados a partir do Merge: (a) 01/01/2000 – 12 UTC, (b) 02/01/2000 – 12 UTC, (c) 03/01/2000 – 12 UTC, (d) 04/01/2000 – 12 UTC, (e) 05/01/2000 – 12 UTC e (f) 06/01/2000 – 12 UTC. O contorno da Bacia do rio do Paraíba do Sul aparece em destaque.

A Figura 5.4 apresenta os maiores acumulados de precipitação, a cada 3 horas, no período do caso estudado, obtidos em 4 das 10 PCDs do SINDA do CPTEC/INPE, na BRPS. Observa-se que os maiores volumes de chuva diária ocorreram nas estações localizadas no norte de São Paulo e sul do Rio de Janeiro, como em Cruzeiro/SP (192 mm no dia 03/01/2000), em São José do Barreiro/SP (109 mm no dia 02/01/2000 e 143 mm no dia 03/01/2000), em Cachoeira Paulista/SP (138 mm no dia 03/01/2000) e em Barra Mansa/RJ (130 mm no dia 03/01/2000). Em São José do Barreiro apenas em dois dias (02 e 03/01) foi acumulado quase o mesmo total climatológico mensal que é de 267 mm. Nota-se também que a precipitação mais intensa ficou concentrada entre 00 UTC do dia 02/01/2000 e 09 UTC do dia 03/01/2000 (Figura 5.4).

Em Cachoeira Paulista (SP) e Cruzeiro (SP) a chuva intensa, cerca de 35 mm/3h, começou às 21h (HL) do dia 01/01/2000, mantendo-se com caráter moderado e constante ao longo do dia 02/01/2000 e diminuindo sua intensidade a partir do dia 03/01/2000. Em São José do Barreiro (SP) observa-se essa mesma característica de chuva moderada e constante a partir do dia 01/01/2000 estendendo-se até o dia 03/01/2000. E em Barra Mansa (RJ) nota-se que a chuva mais intensa (cerca de 25 mm/3h) iniciou na madrugada do dia 02/01/2000 e manteve-se contínua e moderada até o dia 03/01/2000.

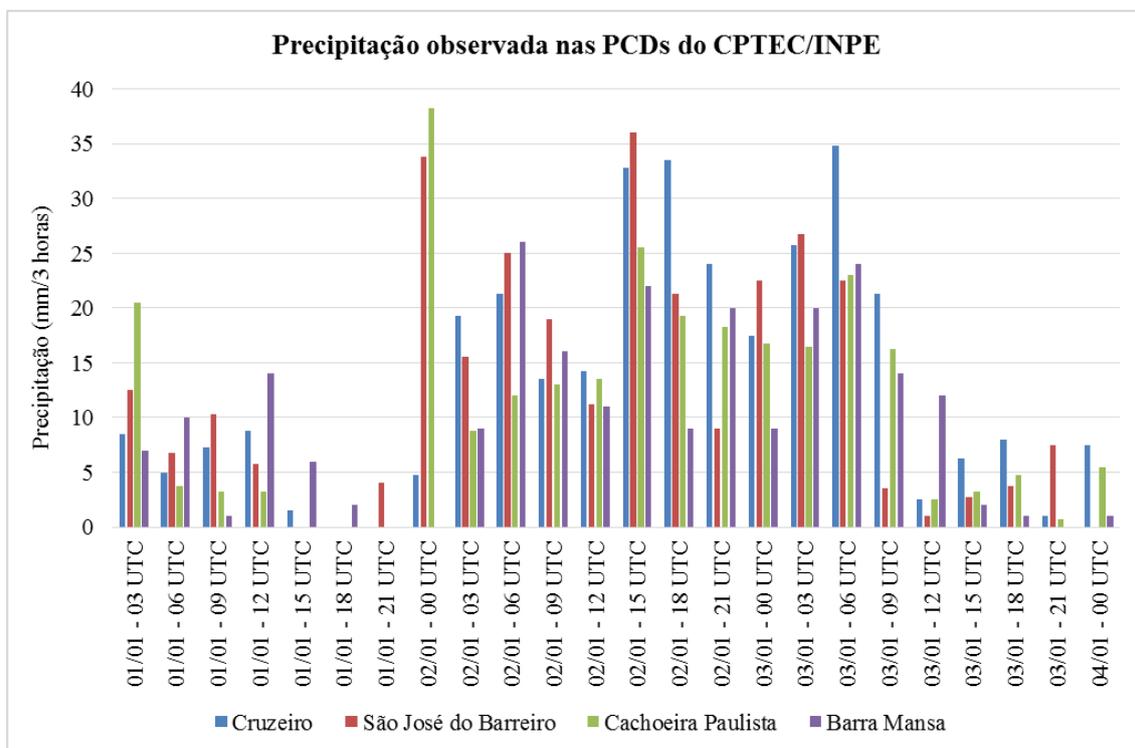


Figura 5.4 – Acumulados de precipitação observada nas PCDs do CPTEC/INPE a cada 3 horas, em Cruzeiro/SP, São José do Barreiro/SP, Cachoeira Paulista/SP e Barra Mansa/RJ.

5.3 Análise Sinótica

Através das imagens do satélite GOES-8 no canal infravermelho (Figura 5.5), nota-se a formação de uma frente fria no Rio Grande do Sul no dia 29/12/1999. Com a chegada desse sistema frontal na Região Sudeste do Brasil no dia 01/01/2000 configura-se o primeiro evento de ZCAS do ano 2000. Ressalta-se na Figura 5.5f a presença da formação de um Vórtice Ciclônico na costa, próximo ao litoral dos estados de Rio de Janeiro e São Paulo, Embebido na ZCAS, o que certamente contribuiu para os elevados acumulados pluviométricos na BRPS. A partir do dia 6 de janeiro (Figura 5.5j-l), através da diminuição da atividade convectiva nas imagens de satélite, nota-se o enfraquecimento e o deslocamento para sul da ZCAS.

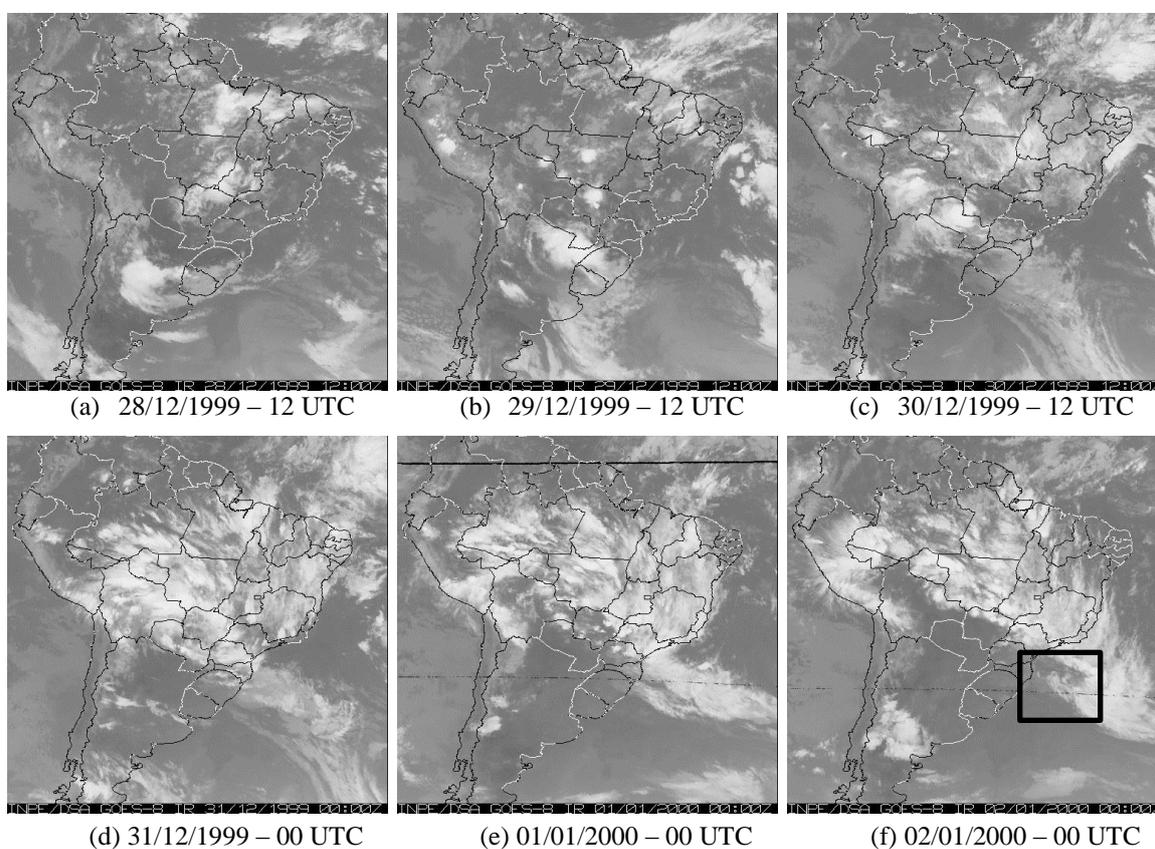


Figura 5.5 – Imagens do canal infravermelho do satélite GOES-8: Imagens do canal infravermelho do satélite GOES-8: (a) 28/12/1999 – 12 UTC, (b) 29/12/1999 – 12 UTC, (c) 30/12/1999 – 12 UTC, (d) 31/12/1999 – 00 UTC, (e) 01/01/2000 – 00 UTC, (f) 02/01/2000 – 00 UTC, (g) 03/01/2000 – 18 UTC, (h) 04/01/2000 – 00 UTC, (i) 05/01/2000 – 03 UTC, (j) 06/01/2000 – 12 UTC, (k) 07/01/2000 – 15 UTC e (l) 08/01/2000 – 12 UTC. A localização do VCEZ encontra-se em destaque dentro do retângulo preto. Fonte: CPTEC/INPE.

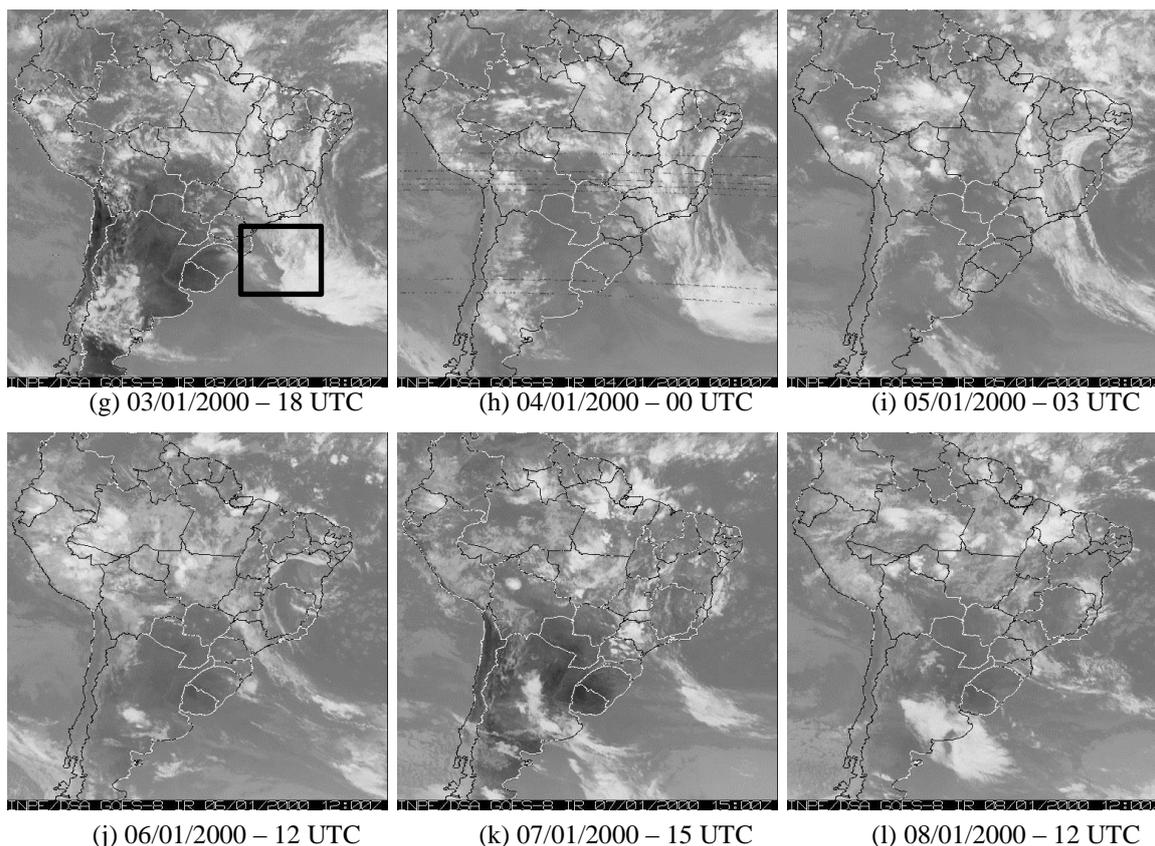


Figura 5.5 – Final.

A Figura 5.6 apresenta os campos de PNMM e vento no nível de 850 hPa para o período de 1 a 3 de janeiro de 2000, a cada 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC). Pode-se notar no dia 1º de janeiro às 00 UTC (Figura 5.6a) uma região de baixa pressão no interior do país, estendendo-se desde o oeste da Região Norte até a Região Sudeste, com orientação noroeste-sudeste coerente com o posicionamento da ZCAS. Na análise das 06 UTC do dia 1º de janeiro (Figura 5.6b) nota-se a formação de um centro de baixa pressão sobre o oceano (24°S/44°W), com 1004 hPa no campo de PNMM, originado a partir da região de baixa pressão sobre o continente. Esse centro de baixa pressão, VCEZ, se intensifica nos horários seguintes, com deslocamento para sul/sudeste. A partir de 03/01 – 06 UTC (Figura 5.6j) o VCEZ começa a deslocar-se para oeste, em direção ao continente, onde apresenta os menores valores de pressão ao NMM (1002 hPa) entre 03/01 – 18 UTC e 04/01 – 06 UTC (não mostrado). A partir de 04/01 – 12 UTC (não mostrado) o VCEZ retoma o seu deslocamento para sudeste e a pressão no seu centro aumenta, enfraquecendo-o. Ao longo do seu desenvolvimento destaca-se o forte gradiente de pressão estabelecido entre o VCEZ e o ASAS, intensificando os ventos na região. Eventos em que vórtices ciclônicos de mesoescala (VCMs), atuaram durante episódios de ZCAS, foram estudados por Quadro (2012). No presente trabalho, o VCEZ não pode

ser considerado um sistema de mesoescala, pois sua duração foi de aproximadamente 6 dias e seu diâmetro superior a 1000 km, o que o caracteriza como um sistema sinótico, ou ainda um sistema típico da escala meso α de Orlanski (1975). De acordo com Orlanski (1975), sistemas com escalas espacial entre 200 e 2000 km e temporal entre 1 e 15 dias são considerados distúrbios na escala meso α , ou tradicional escala sinótica, enquanto que distúrbios com escala espacial entre 20 e 200 km e temporal entre algumas horas até um dia estariam na escala meso β (tradicional mesoescala).

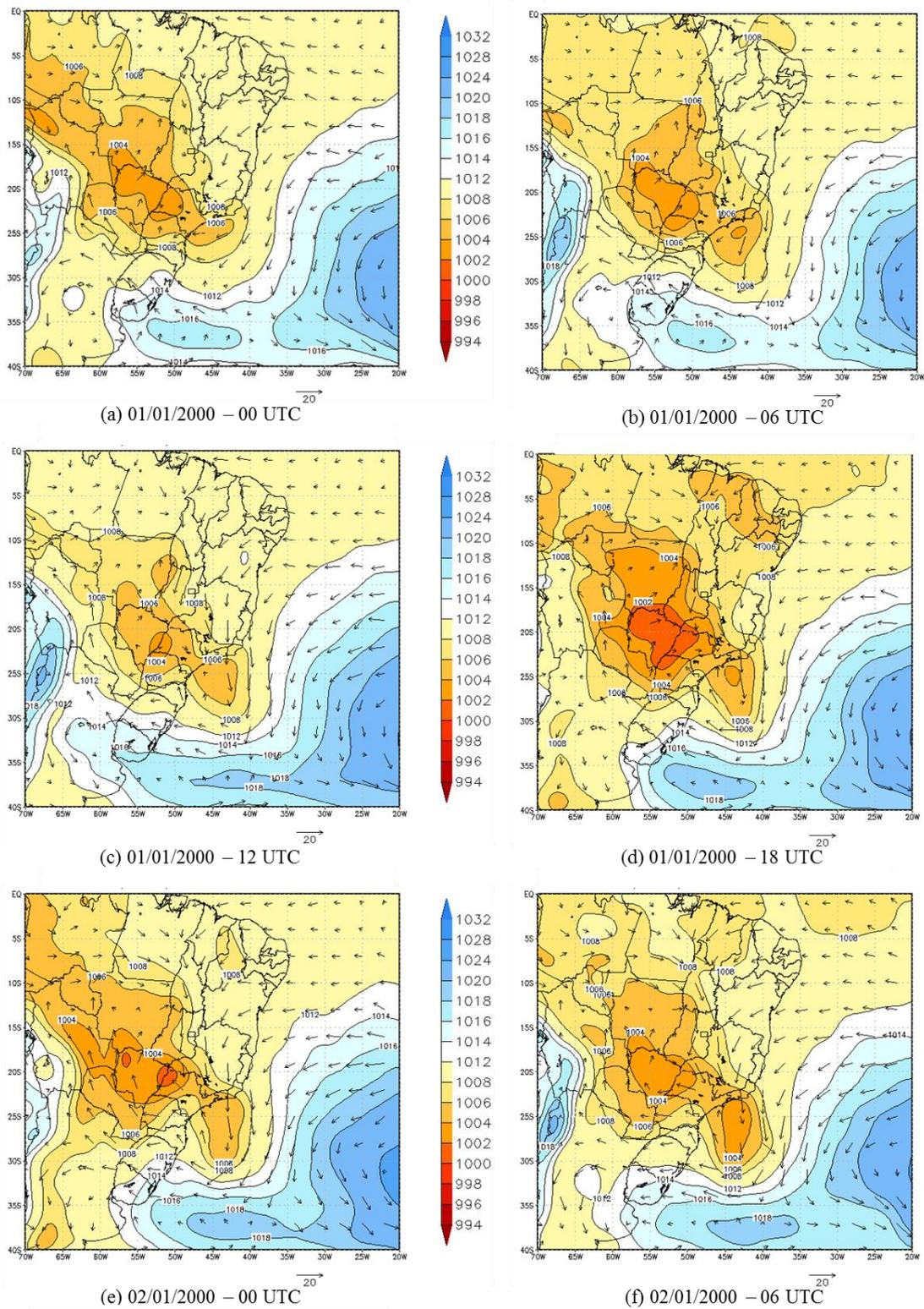


Figura 5.6 – Campos de Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa nas datas: (a) 01/01/2000 - 00 UTC, (b) 01/01/2000 - 06 UTC, (c) 01/01/2000 - 12 UTC, (d) 01/01/2000 - 18 UTC, (e) 02/01/2000 - 00 UTC, (f) 02/01/2000 - 06 UTC, (g) 02/01/2000 - 12 UTC, (h) 02/01/2000 - 18 UTC, (i) 03/01/2000 - 00 UTC, (j) 03/01/2000 - 06 UTC, (k) 03/01/2000 - 12 UTC, (l) 03/01/2000 - 18 UTC.

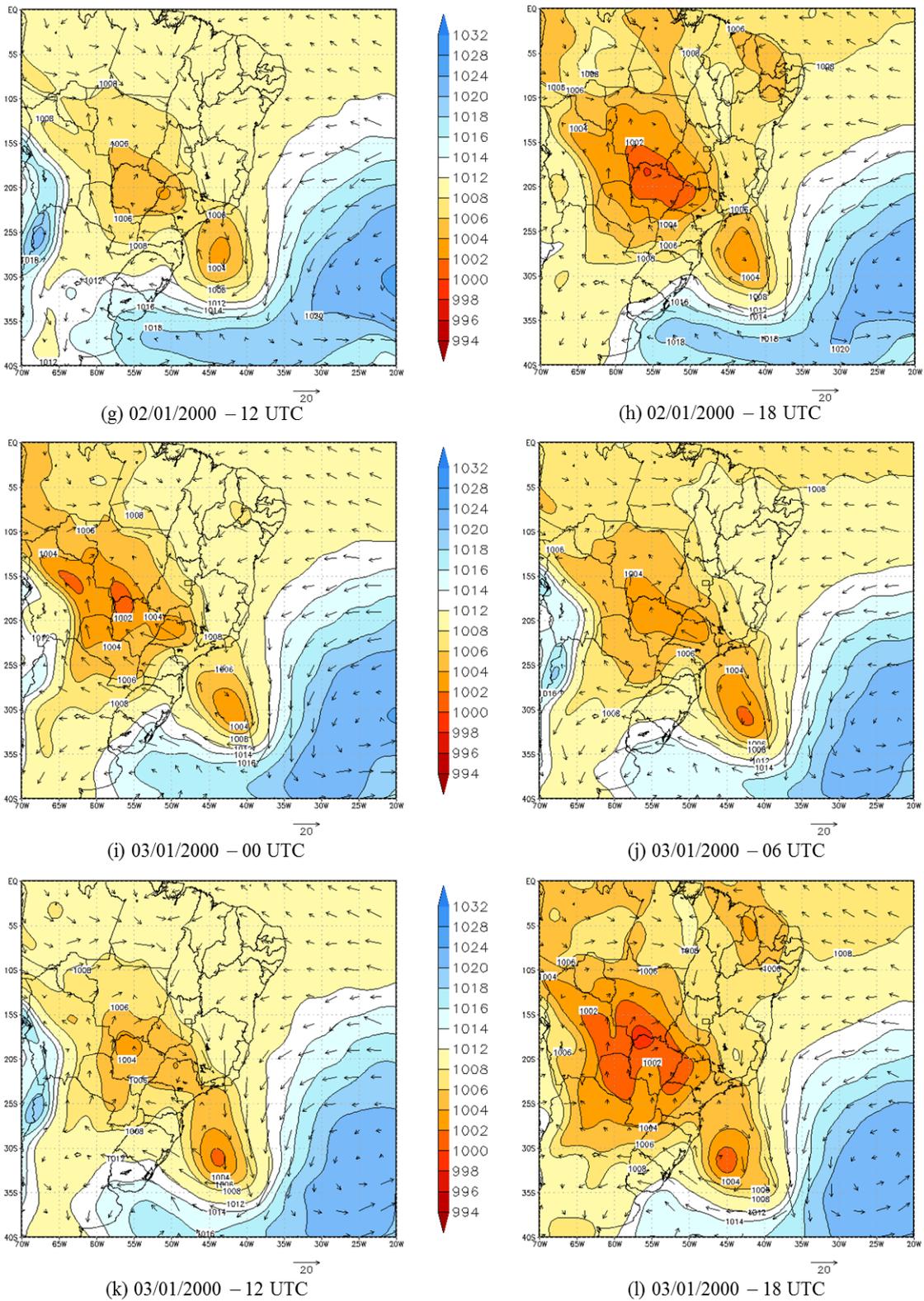


Figura 5.6 – Final.

Os campos de espessura 500-1000 hPa (mgp) e PNMM (hPa) são apresentados na Figura 5.7 a fim de se obter uma visão da temperatura do ar na camada e também da inclinação dos sistemas no decorrer deste evento de ZCAS.

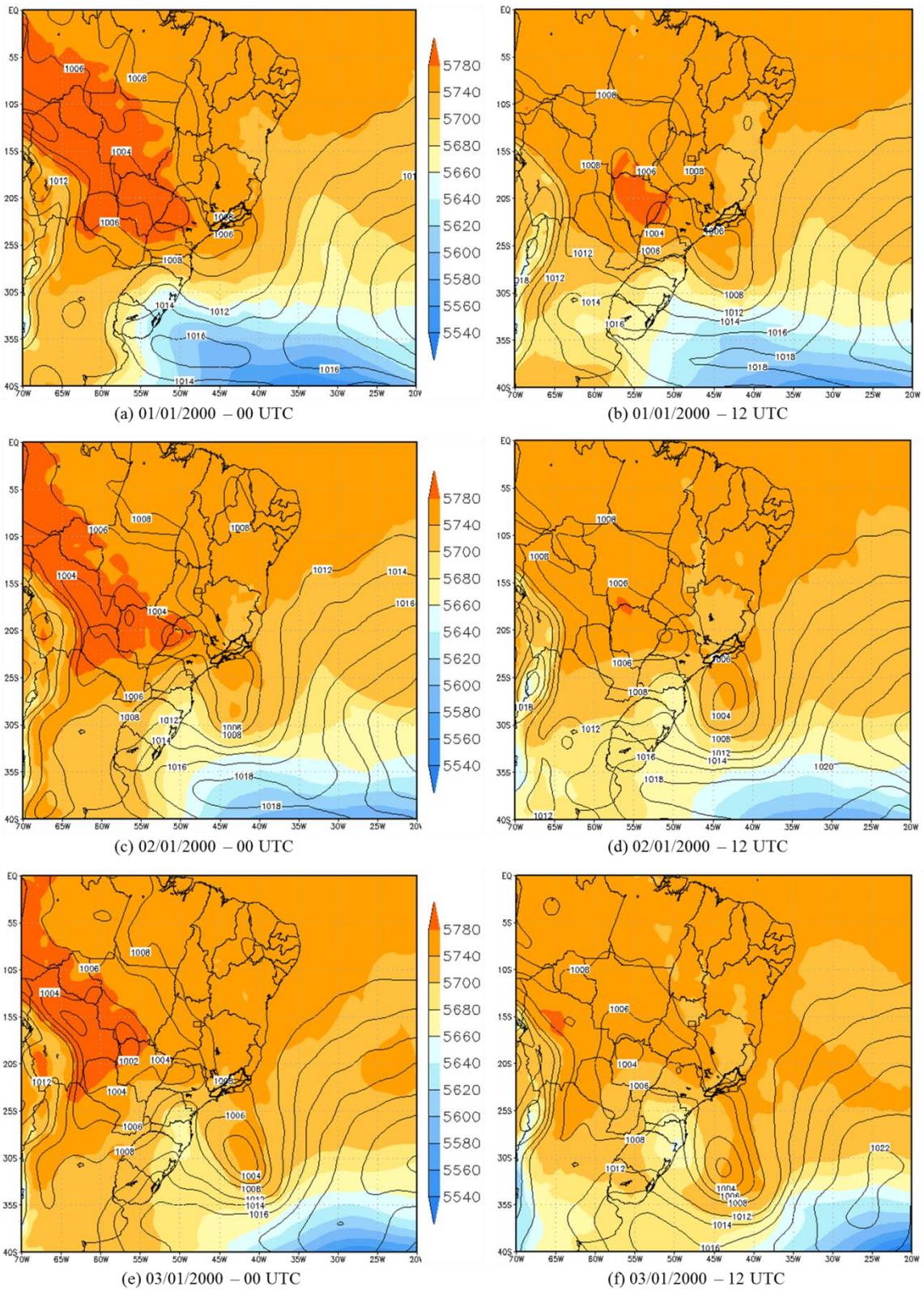


Figura 5.7 – Pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) e espessura 500-1000 hPa (sombreado, mgp): (a) 01/01/2000 - 00 UTC, (b) 01/01/2000 - 12 UTC, (c) 02/01/2000 - 00 UTC, (d) 02/01/2000 - 12 UTC, (e) 03/01/2000 - 00 UTC, (f) 03/01/2000 - 12 UTC, (g) 04/01/2000 - 00 UTC, (h) 04/01/2000 - 12 UTC, (i) 05/01/2000 - 00 UTC, (j) 05/01/2000 - 12 UTC.

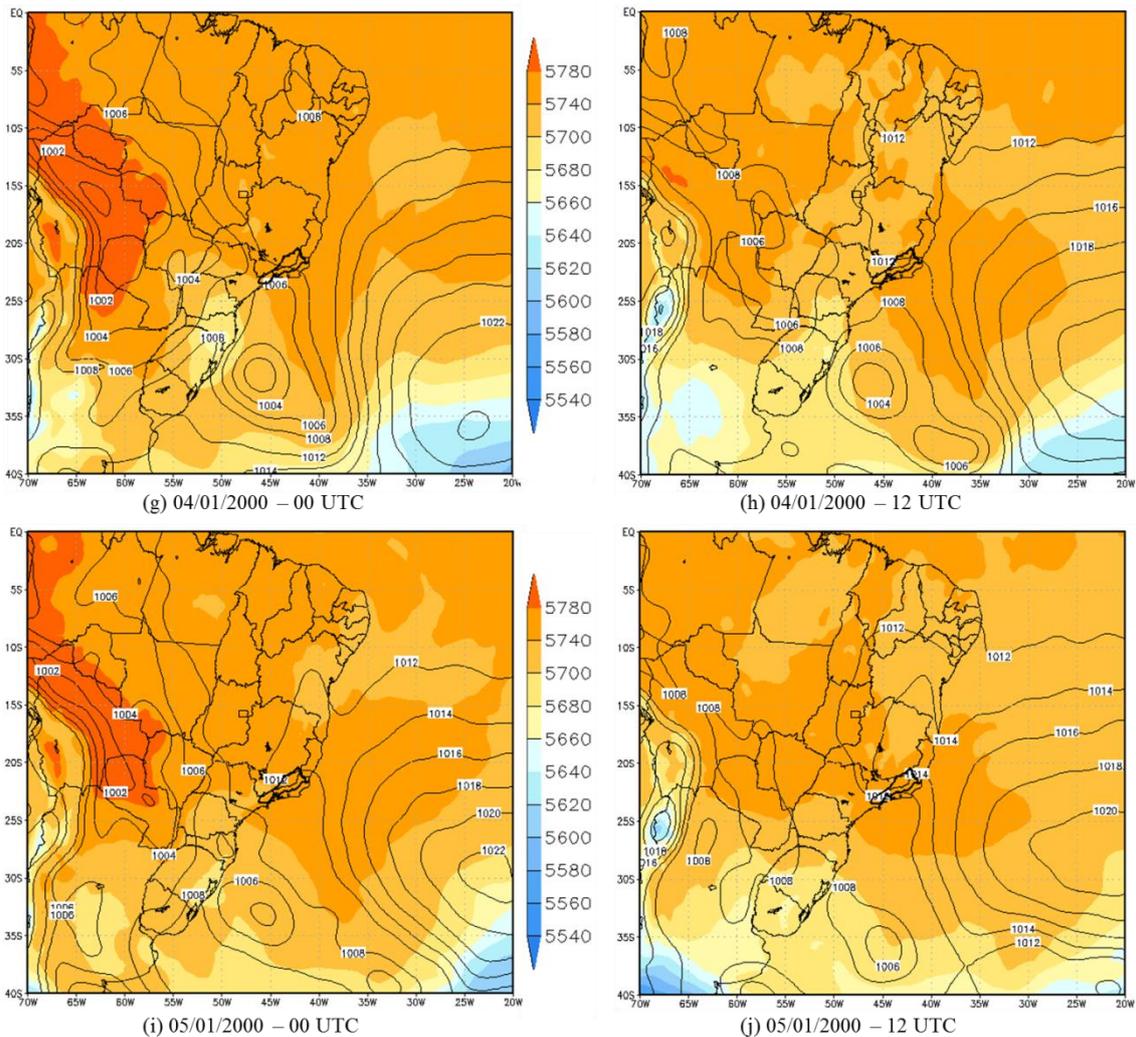


Figura 5.7 – Final.

Observa-se no campo de espessura 500-1000 hPa a amplificação de um cavado a oeste do VCEZ em superfície (Figura 5.7b-f) dando suporte a esse sistema. É notável também o forte gradiente térmico em 850 hPa no início da atuação da ZCAS, com ar mais quente sobre o continente e mais frio sobre o oceano ao sul de 30°S. Percebe-se que o VCEZ apresenta núcleo quente entre 1000 e 500 hPa e inclina-se com a altura em direção ao ar frio à oeste, indicando a baroclinia existente durante sua evolução. A partir do dia 4 de janeiro de 2000 às 12Z (Figura 5.7h) evidencia-se o enfraquecimento do VCEZ, através da mistura do ar quente e frio ao longo da estrutura do mesmo.

Os campos compostos de altura geopotencial (m_gp) e linha de corrente em 250 hPa são mostrados na Figura 5.8 a fim de fornecer uma análise do comportamento atmosférico em altos níveis durante o evento da ZCAS.

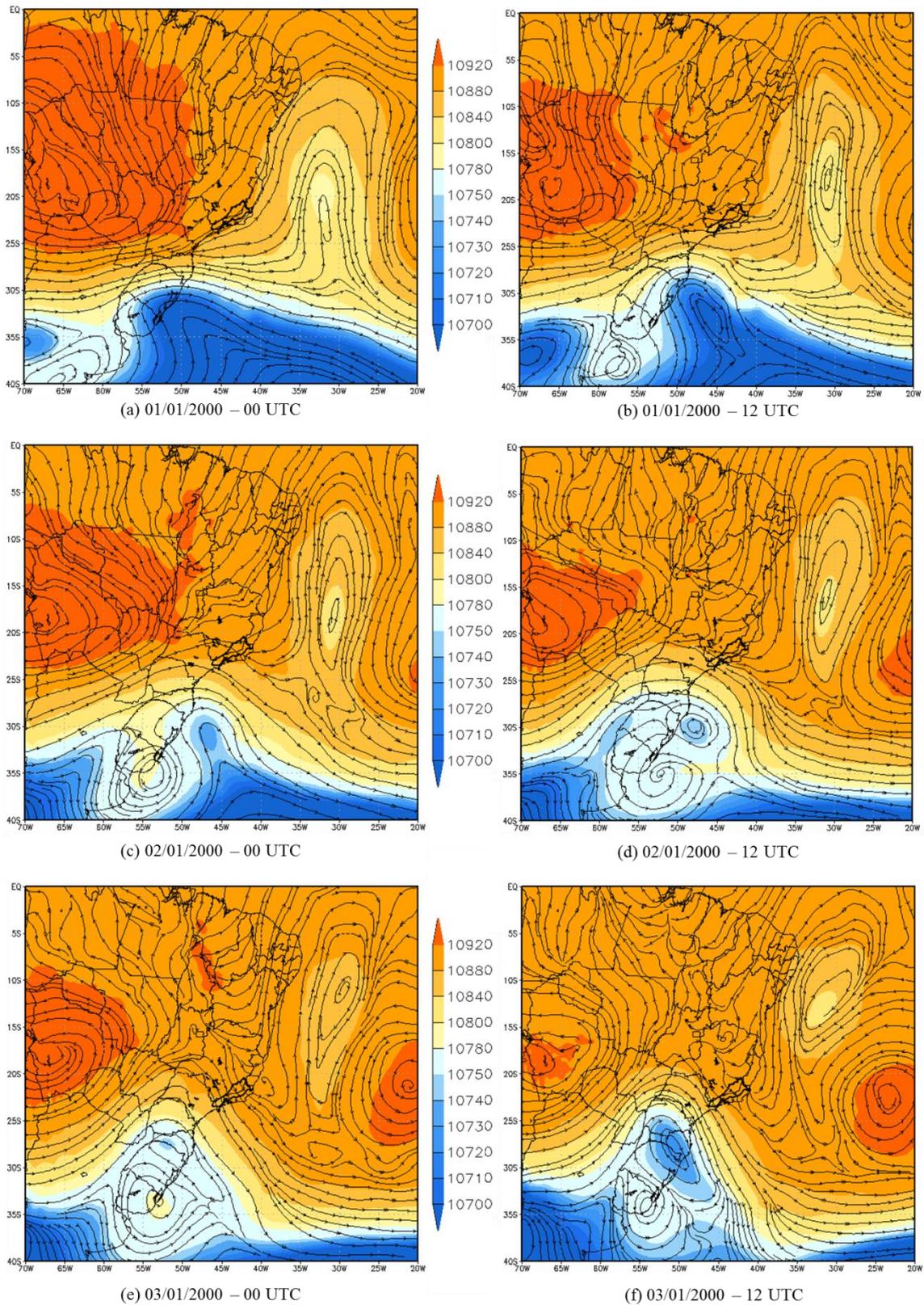


Figura 5.8 – Altura geopotencial (sombreado, m) e linha de corrente em 250 hPa (linhas): (a) 01/01/2000 - 00 UTC, (b) 01/01/2000 - 12 UTC, (c) 02/01/2000 - 00 UTC, (d) 02/01/2000 - 12 UTC, (e) 03/01/2000 - 00 UTC, (f) 03/01/2000 - 12 UTC, (g) 04/01/2000 - 00 UTC, (h) 04/01/2000 - 12 UTC, (i) 05/01/2000 - 00 UTC, (j) 05/01/2000 - 12 UTC.

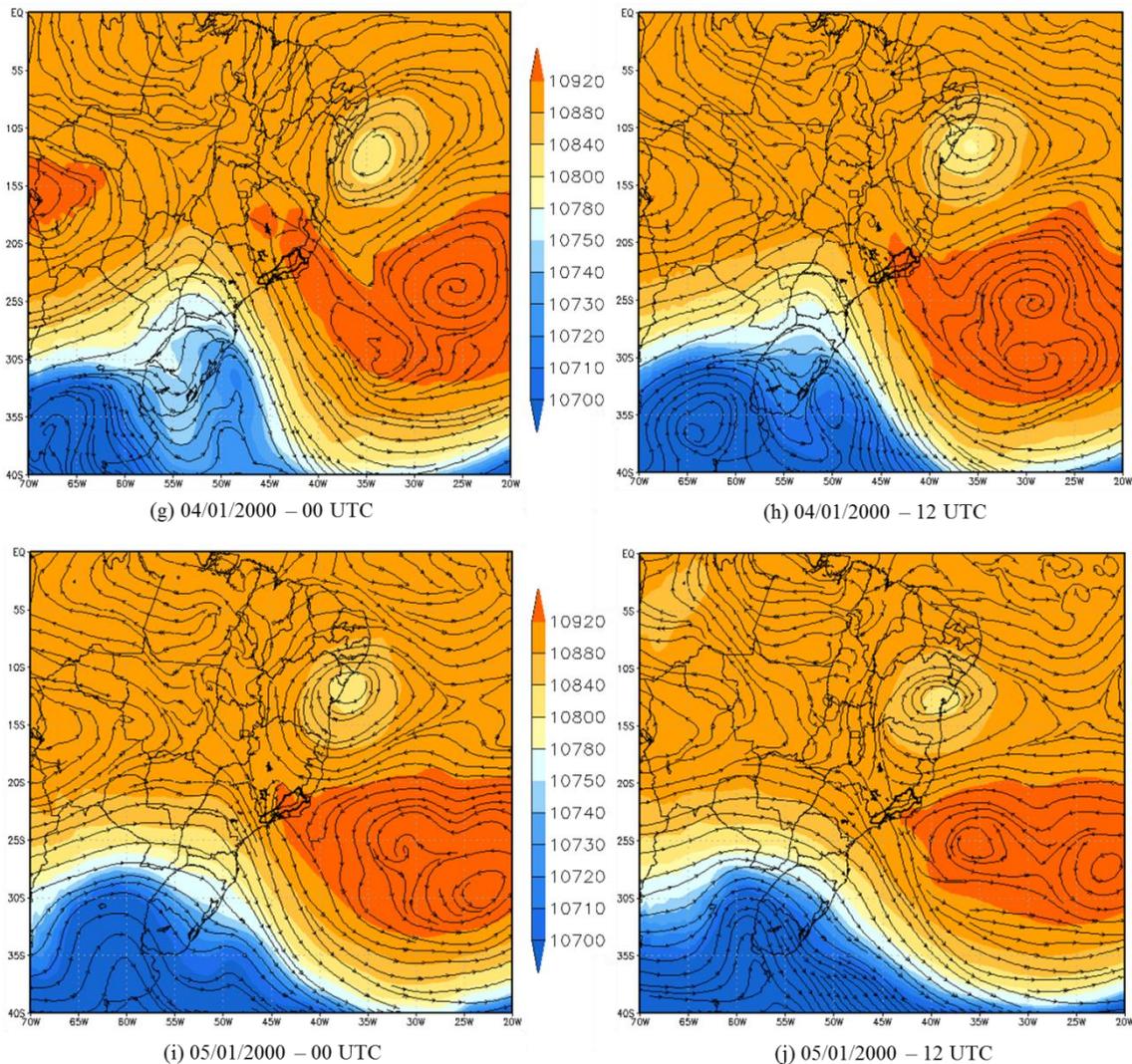


Figura 5.8 – Final.

Nota-se na Figura 5.8 a presença da Alta da Bolívia (AB) e do Vórtice Ciclônico do Nordeste (VCN), fenômenos característicos durante o verão austral. O VCN atua predominantemente sobre o oceano, penetrando no continente apenas a partir de 04/01 – 12 UTC. Entre 02/01 – 00 UTC e 03/01 – 12 UTC (Figura 5.8c-f) é notável a formação de um padrão de bloqueio do tipo dipolo sobre Rio Grande do Sul e Uruguai, formado por uma alta de núcleo relativamente quente e uma baixa de núcleo relativamente frio. Esse núcleo de baixa pressão em altitude representa a porção superior do VCEZ. O escoamento de oeste do Pacífico se bifurcou e enfraqueceu devido ao bloqueio. Acompanhando esse padrão de dipolo, nota-se a formação e amplificação do cavado no interior do continente, contribuindo para o desenvolvimento da convecção ao longo do eixo noroeste-sudeste da ZCAS e dando suporte ao VCEZ em superfície no oceano. O cavado em altos níveis, no interior do continente, ficou estacionário por dois dias e se

amplificou, fazendo com que o VCEZ passasse a se deslocar para oeste a partir de 03/01 – 12 UTC (Figura 5.6k), se aproximando do litoral do Rio Grande do Sul às 06 UTC do dia 04/01 (Figura não apresentada), quando apresentou características barotrópicas. A partir do dia 5 de janeiro de 2000 - 00 UTC (Figura 5.8i-j) a AB desloca-se para oeste e o cavado no interior do continente começa a se desconfigurar, indicando o enfraquecimento da ZCAS nos dias posteriores.

Visto que os maiores volumes de chuva ocorreram entre os dias 2 e 3 de janeiro de 2000, relacionado provavelmente a evolução do VCEZ, foram realizadas análises de diversos campos meteorológicos com foco na evolução do mesmo. Alguns campos meteorológicos selecionados apenas para os horários 12 UTC de 02/01 e 00 UTC de 03/01 são apresentados a seguir.

A Figura 5.9 mostra o campo de umidade específica em 925 hPa e pressão ao nível médio do mar nos dias 02/01 – 12 UTC e 03/01 – 00 UTC. Observa-se uma região com bastante umidade no interior do continente, com valores superiores a 15 g/kg. Essa região de valores elevados de umidade específica estende-se até o Oceano Atlântico ao longo da orientação NW-SE da ZCAS, passando inclusive sobre a porção sul da BRPS, onde foram registrados os maiores volumes de chuva deste evento. Essa extensa região úmida demarca a convergência entre o ASAS e toda a região de baixa pressão no interior do Brasil, transportando a umidade proveniente da região Amazônica e contribuindo para a alimentação do VCEZ no oceano. Ressalta-se a importância dos elevados valores de umidade na geração de atividade convectiva e posterior liberação de calor latente, que contribuem na intensificação do VCEZ.

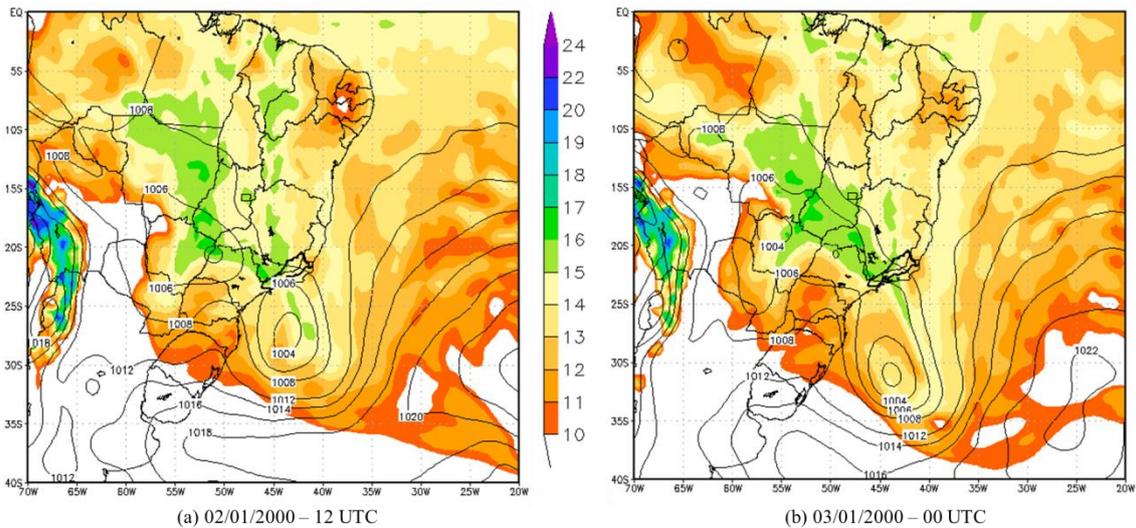


Figura 5.9 – Umidade específica (sombreado, g.kg^{-1}) em 925 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC.

A Figura 5.10 apresenta os campos de PNMM e o fluxo de umidade verticalmente integrado entre as camadas de 1000/300 hPa. Observa-se uma intensa convergência de umidade na região central do Brasil, tendo origem na região Amazônica, passando pelo Centro-Oeste e Sudeste brasileiro, incluindo a BRPS, e estendendo-se até o Oceano Atlântico (característico de episódios de ZCAS), confluindo com os ventos da borda oeste do ASAS e com os ventos do VCEZ no oceano. O fluxo de umidade verticalmente integrado entre 1000 e 300 hPa chegou a valores superiores a $900 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

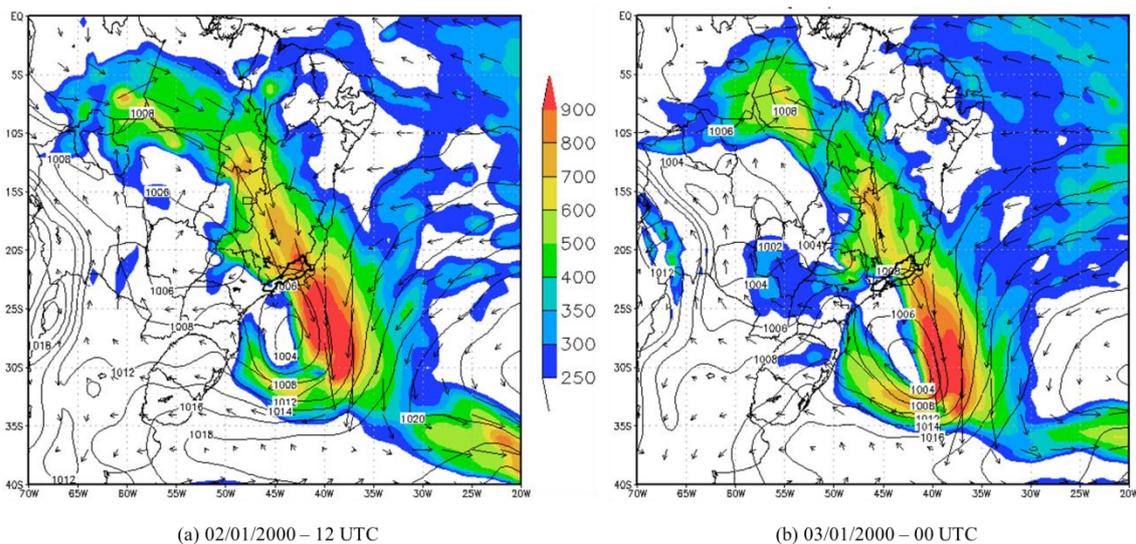


Figura 5.10 – Fluxo de umidade verticalmente integrado (sombreado, $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) entre 1000 e 300 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC.

Observa-se um forte fluxo de umidade na Região Sudeste do Brasil (Figura 5.10), onde se localizam as Serras do Mar e da Mantiqueira. Tais resultados concordam com aqueles apresentados por Grimm *et al.* (2007) que sugerem que ambas as serras devem exercer um papel importante na intensificação de precipitação orográfica durante os episódios de ZCAS, contribuindo para os máximos de precipitação em tais eventos.

Na Figura 5.11 são apresentados os campos de divergência de vento e de linha de corrente em 850 hPa. Observa-se pelas linhas de corrente em 850 hPa uma convergência dos ventos no interior do continente, entre a borda oeste do ASAS e a Amazônia, confluindo sobre a Região Sudeste. No campo de divergência de vento nota-se em pontos no interior do continente e sobre toda a BRPS, convergência de massa na baixa troposfera (associada ao movimento ascendente do ar, como apresentado na Figura 5.12) que se estende até o oceano, pela borda nordeste do VCEZ no Oceano Atlântico.

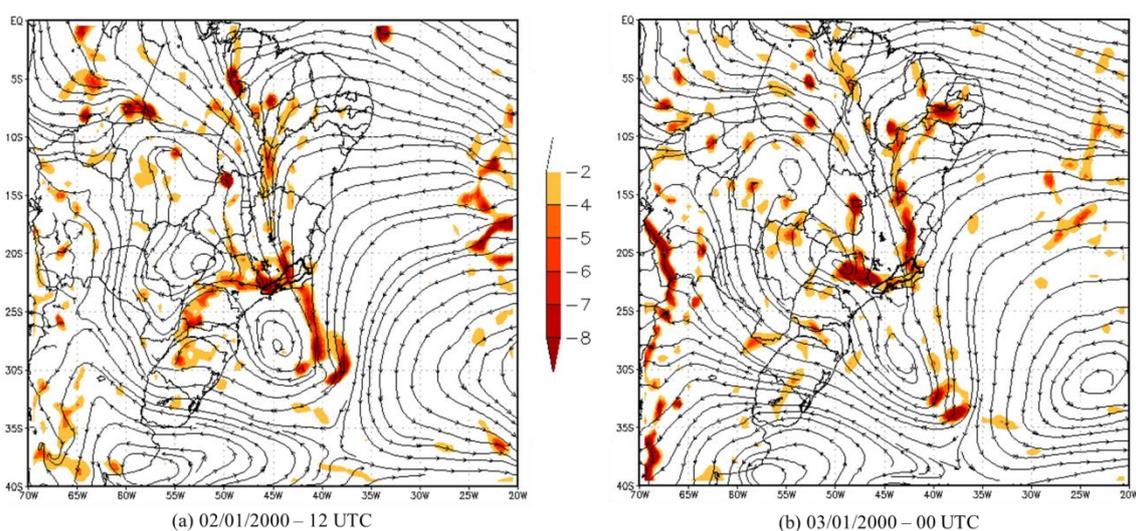


Figura 5.11 – Divergência de vento (sombreado, valores negativos a cada 10^5 s^{-1}) e linha de corrente em 850 hPa (linhas) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC.

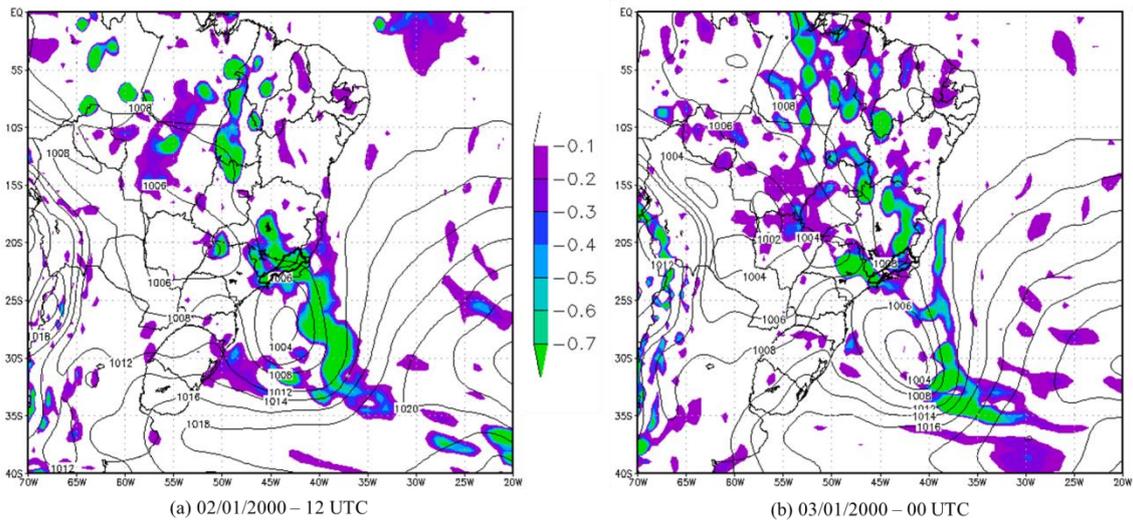


Figura 5.12 – Movimento vertical (sombreado, $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) em 500 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) em (a) 02/01/2000 às 12 UTC e (b) 03/01/2000 às 00 UTC.

A Figura 5.12 apresenta o campo de movimento vertical em 500 hPa e pressão ao nível médio do mar. Observa-se uma extensa área com movimento ascendente sobre toda a BRPS e no oceano Atlântico na borda leste do VCEZ, chegando a $-0,7 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$. No interior do continente notam-se diversos núcleos isolados de movimento ascendente, com orientação NW-SE, indicando as áreas convectivas associadas à ZCAS.

Uma análise conjunta das Figuras 5.11 e 5.12 indica que nas regiões de convergência do ar verifica-se a aceleração do movimento ascendente por continuidade de massa, sendo responsável por transportar o ar quente e úmido dos baixos níveis para os altos níveis e, conseqüentemente, formar a convecção úmida, provocando os elevados acumulados pluviométricos observados.

A Figura 5.13 apresenta a evolução em 24 horas da altura geopotencial nos níveis de 850, 700, 500 e 300 hPa combinados com a pressão ao nível médio do mar, entre os dias 2 e 3 de janeiro de 2000 - 12 UTC. Observa-se, em todos os níveis, a presença do ASAS com núcleo quente, centrada em 30°S e variando de 20 a 25°W . Nota-se também a presença do VCEZ no oceano (localizado em $27^{\circ}\text{S} / 45^{\circ}\text{W}$ no dia 02/01 e em $32^{\circ}\text{S} / 45^{\circ}\text{W}$ no dia 03/01), estendendo-se desde a superfície até 300 hPa com núcleo mais quente e nos baixos níveis e inclinando-se em direção ao ar mais frio em médios e altos níveis, através do suporte de um cavado de grande amplitude à oeste de sua localização.

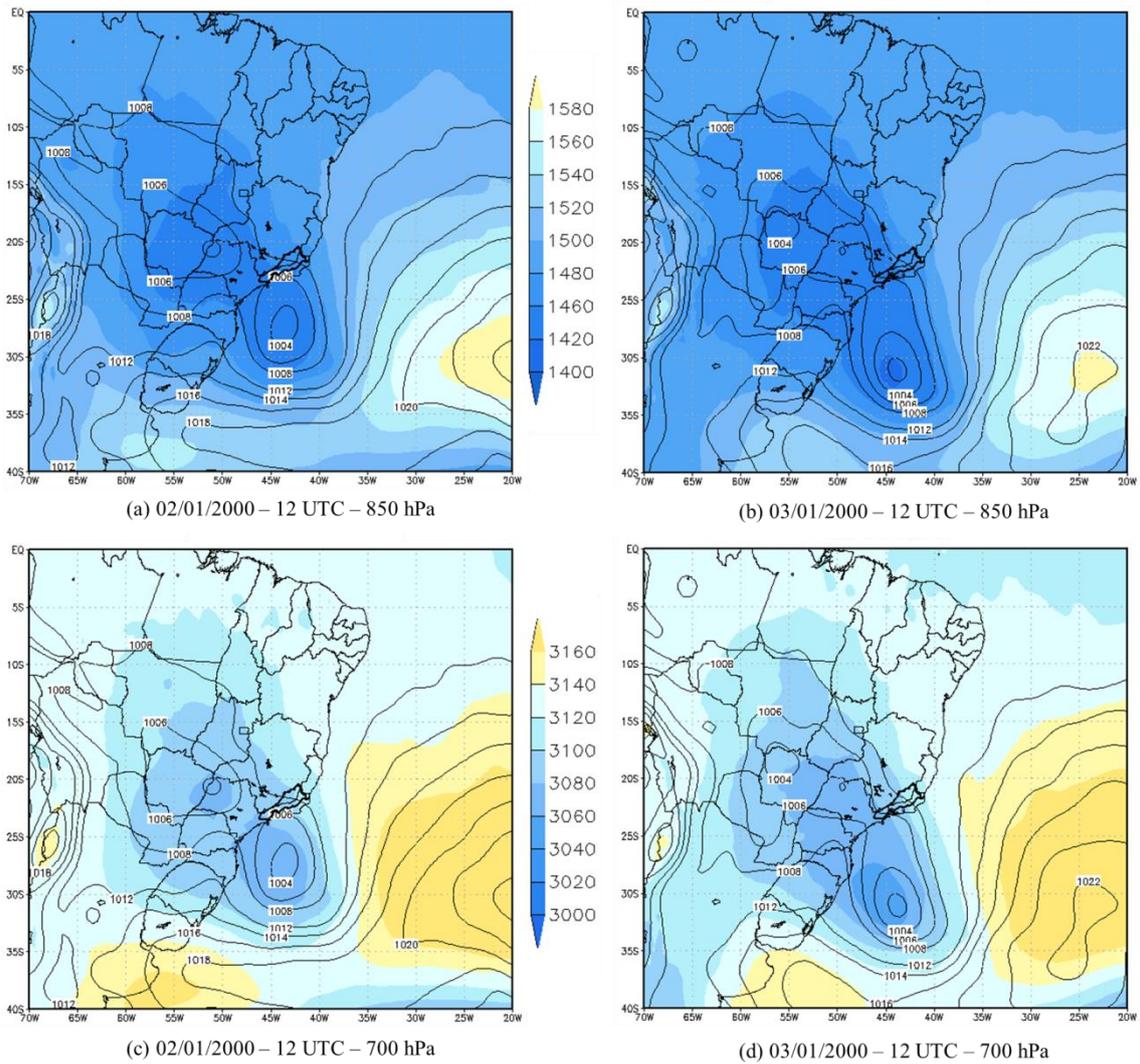


Figura 5.13 - Altura geopotencial (sombreado, mgp) em 850 hPa (a, b), 700 hPa (c, d), 500 hPa (e, f) e 300 hPa (g, h) e pressão ao nível médio do mar (linhas, hPa) nos dias 02/01/2000 às 12 UTC (coluna da esquerda) e 03/01/2000 às 12 UTC (coluna da direita).

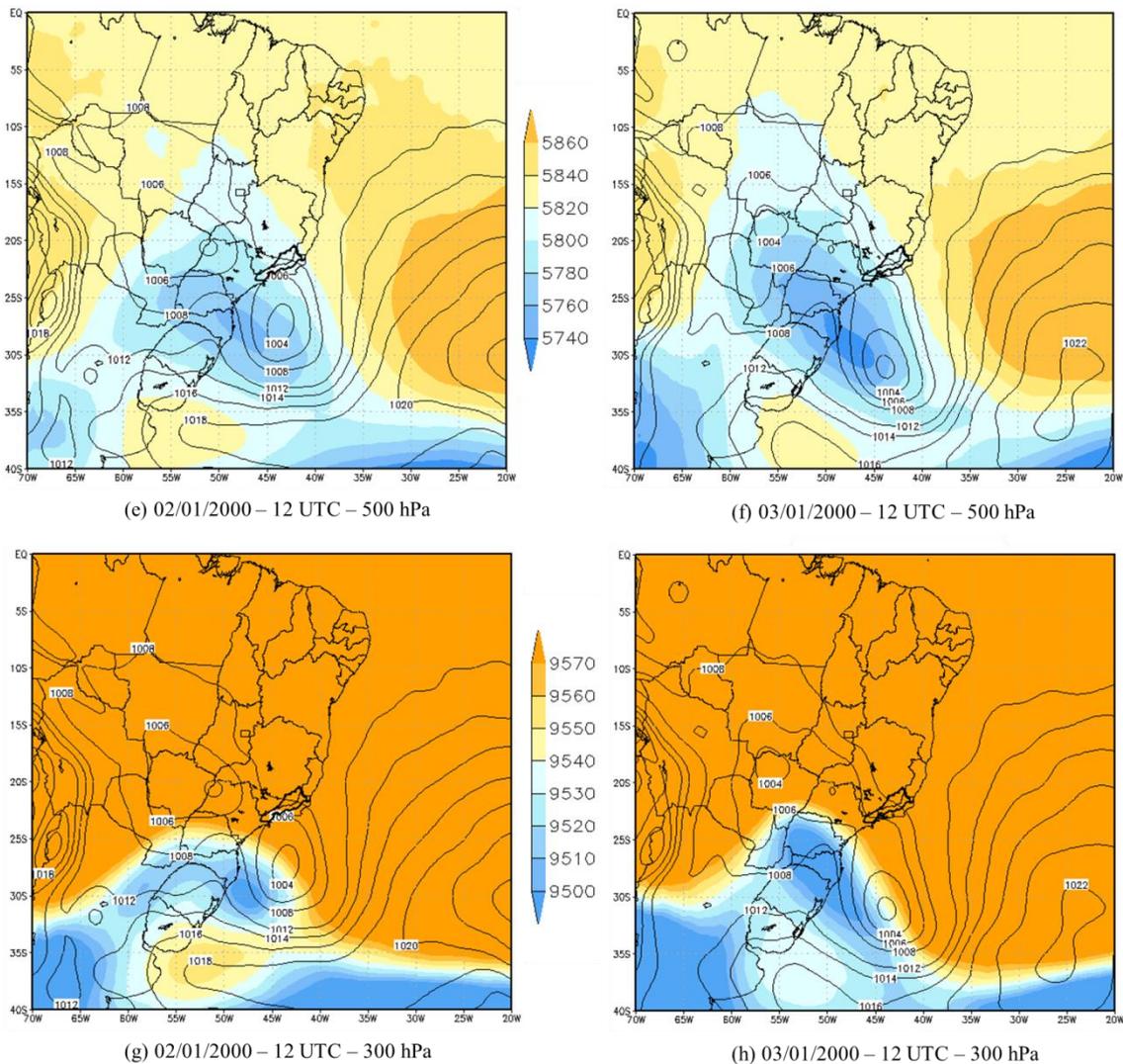


Figura 5.13 – Final.

A fim de analisar em maior detalhe a estrutura vertical do VCEZ, foram construídos perfis verticais de vorticidade relativa, umidade específica e velocidade vertical sobre o núcleo desse vórtice nos dias 1º de janeiro de 2000 às 18 UTC, 2 de janeiro de 2000 às 12 UTC e 3 de janeiro de 2000 às 12 UTC. A Figura 5.14 apresenta o corte vertical no dia 1º de janeiro de 2000 às 18 UTC, quando foi calculada as médias das variáveis citadas anteriormente, entre as latitudes de 24 e 26°S (destacada pelo retângulo preto). Observam-se em torno de 45°W (centro do VCEZ em superfície) elevados valores de vorticidade ciclônica, movimento ascendente e um ligeiro aumento nos valores de umidade específica. Percebe-se também que a região de vorticidade ciclônica estende-se até o nível de 400 hPa.

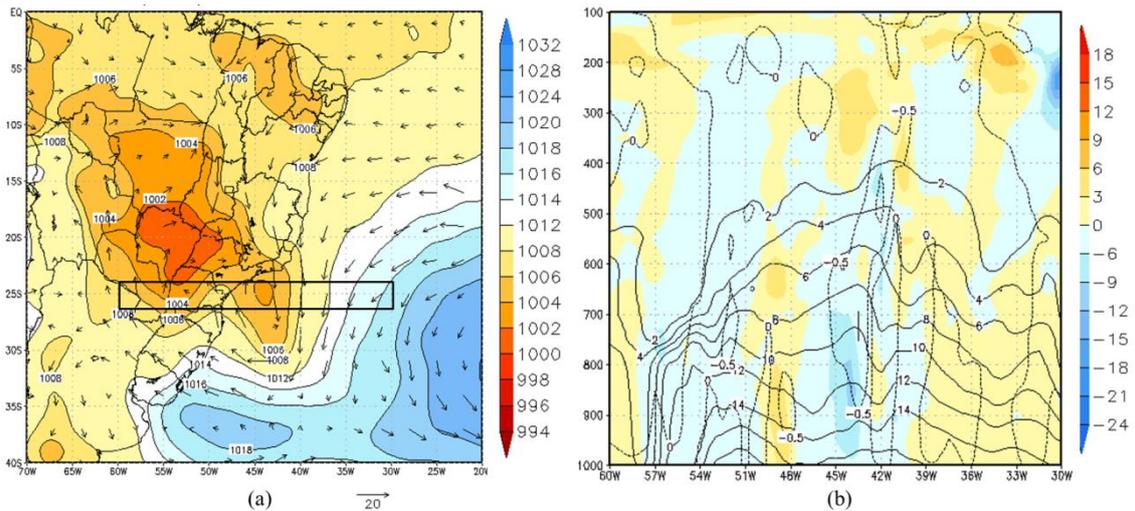


Figura 5.14 – PNMM (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa no dia 1º de janeiro de 2000 às 18 UTC. A área delimitada em (a) representa a faixa latitudinal onde foi realizado o corte vertical de vorticidade relativa (sombreado, $10^{-5}.s^{-1}$), umidade específica (linha contínua, g/kg) e velocidade vertical (linha tracejada, $Pa.s^{-1}$), apresentado em (b).

No dia seguinte, 2 de janeiro de 2000 às 12 UTC, observa-se o deslocamento do VCEZ para sul e, com isso, foi realizada uma média das mesmas variáveis entre as latitudes de 26 e 28°S (Figura 5.15). Observa-se em torno de 45°W (núcleo do VCEZ em superfície), a permanência dos altos valores de vorticidade ciclônica, do movimento ascendente e da umidade específica, pelo menos até 00 hPa. Ressalta-se a existência de uma grande área de vorticidade ciclônica em altitude à oeste do VCEZ em superfície, representando a parte superior VCEZ e dando suporte ao desenvolvimento do mesmo.

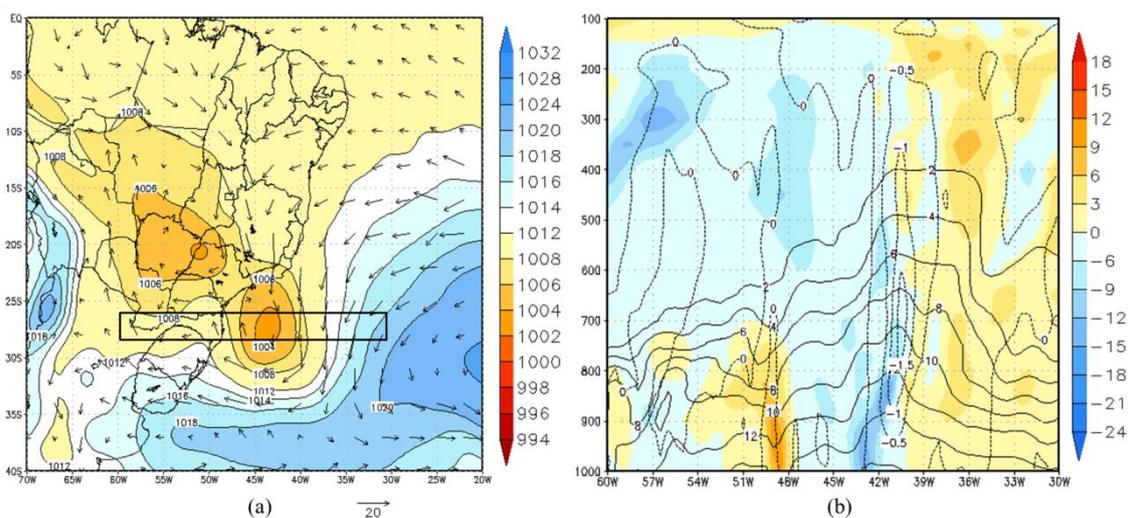


Figura 5.15 – Semelhante à Figura 5.14, exceto para o dia 2 de janeiro de 2000 às 12 UTC.

No dia 3 de janeiro de 2000 às 12 UTC, observa-se novamente o deslocamento do VCEZ mais para sul e uma intensificação do seu núcleo com 1002 hPa, e assim foi realizada uma nova média das mesmas variáveis entre as latitudes de 30 e 32°S (Figura 5.16). Nota-se o centro do VCEZ em torno de 45°W e uma permanência dos altos valores de vorticidade ciclônica empilhados na vertical desde a superfície até 500 hPa e acima desse nível com uma inclinação para oeste, dando suporte ao desenvolvimento do sistema e indicando novamente a baroclinia existente. Observa-se também a presença de movimento vertical ascendente na borda leste do VCEZ (39°W) e um aumento nos valores de umidade específica em 45 e 39°W, o que deve ter contribuído para o deslocamento do VCEZ para leste a partir do dia 4 de janeiro de 2000.

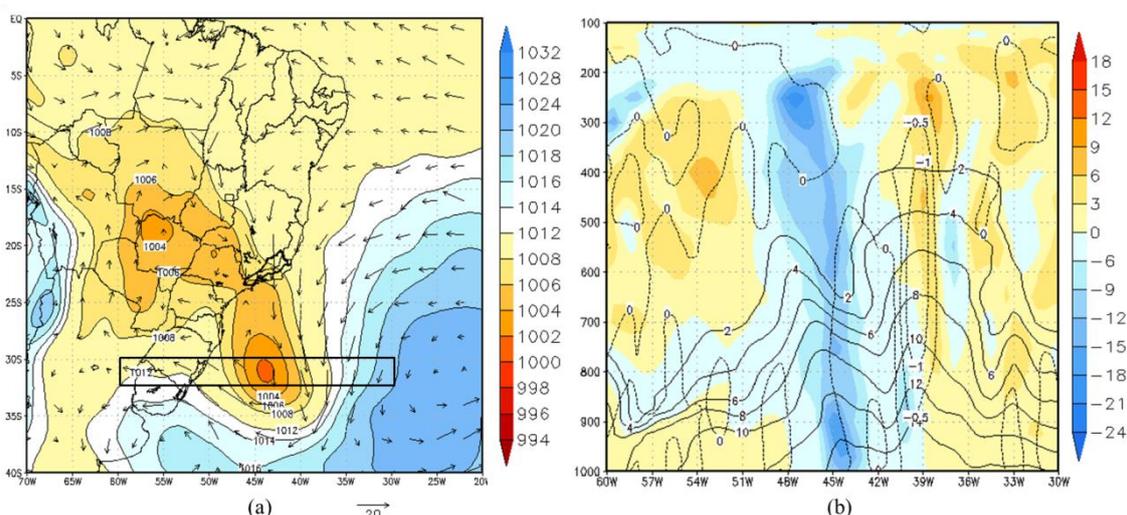


Figura 5.16 – Semelhante às Figuras 5.14 e 5.15, exceto para o dia 3 de janeiro de 2000 às 12 UTC.

5.3.1 Análise Sinótica do VCEZ

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam respectivamente o diagrama de fases de ciclone em sua escala tradicional exposto em Hart (2003), e em escala ampliada a fim de destacar os detalhes do VCEZ analisado neste trabalho. Tais diagramas foram calculados a cada 6h (20 horários) desde o dia 01/01/2000 às 06 UTC até o dia 06/01/2000 às 00 UTC. Através da análise dos diagramas de fase da Figura 5.17a observa-se que o VCEZ apresenta-se como um ciclone não frontal, por exibir valor de B inferior a 10 m. Nos baixos níveis o VCEZ não apresenta uma estrutura térmica vertical bem definida. Todavia, pode-se observar na Figura 5.17b, que em altos níveis, o VCEZ apresenta núcleo frio ao longo do seu desenvolvimento, como também observado por Satyamurty e Seluchi (2007).

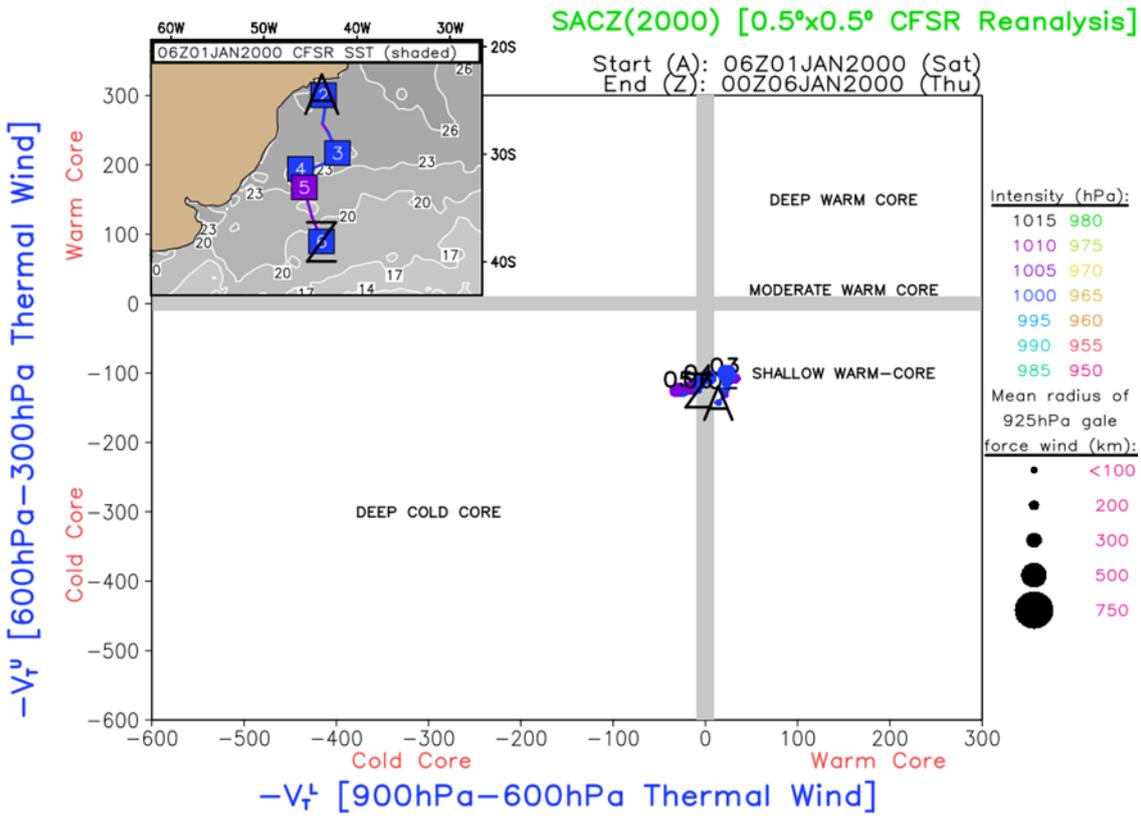
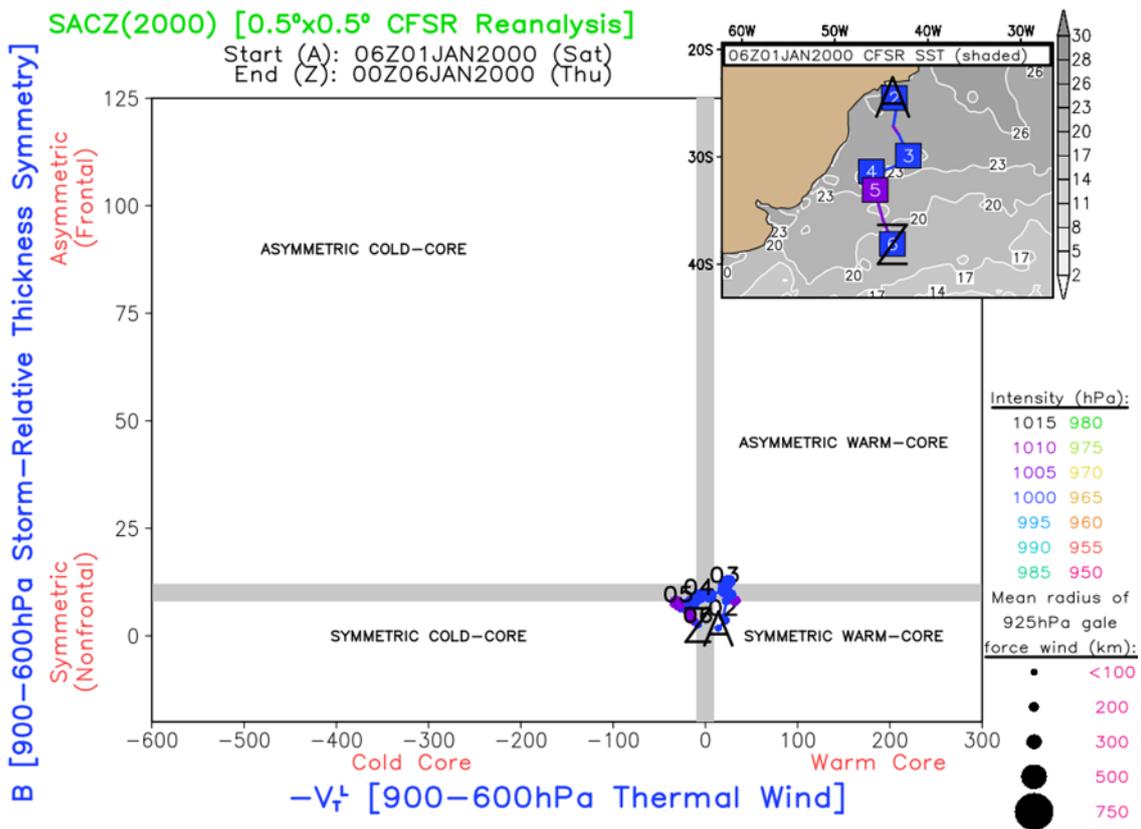


Figura 5.17 – Diagrama de fase do VCEZ no período de 01 a 06/01/2000 obtida a partir da Reanálise do CFSR/NCEP: (a) Simetria térmica e (b) Estrutura térmica vertical.

A Figura 5.18 apresenta os mesmos dados da Figura 5.17, exceto com mudança nas escalas horizontal e vertical, a fim de fornecer um detalhamento maior no desenvolvimento do VCEZ. Observa-se na Figura 5.18a, que nas primeiras 60 horas (desde 01/01/2000 às 06 UTC até 03/01/2000 às 12 UTC) o VCEZ caracterizou-se como um ciclone de núcleo quente em baixos níveis, e a partir desse horário o mesmo apresentou núcleo frio em baixos níveis, atingindo seu máximo no dia 04/01/2000 às 18 UTC (tempo 15). A partir da análise do parâmetro B na Figura 5.17a nota-se que o VCEZ apresentou característica de ciclone não frontal em praticamente todo seu desenvolvimento, com valores abaixo ou em torno de 10 m. Ressalta-se na Figura 5.18b que em altos níveis, o VCEZ apresentou núcleo frio ao longo de todo seu desenvolvimento.

Tais condições indicam que o VCEZ possuiu características de um ciclone subtropical em sua evolução. A presença de um núcleo quente em baixos níveis e núcleo frio nos altos níveis indica uma situação de maior instabilidade da coluna atmosférica. De modo geral, os resultados indicam que a formação e o desenvolvimento do VCEZ contribuíram para o aumento da precipitação que já seria elevado apenas pela atuação da ZCAS na BRPS.

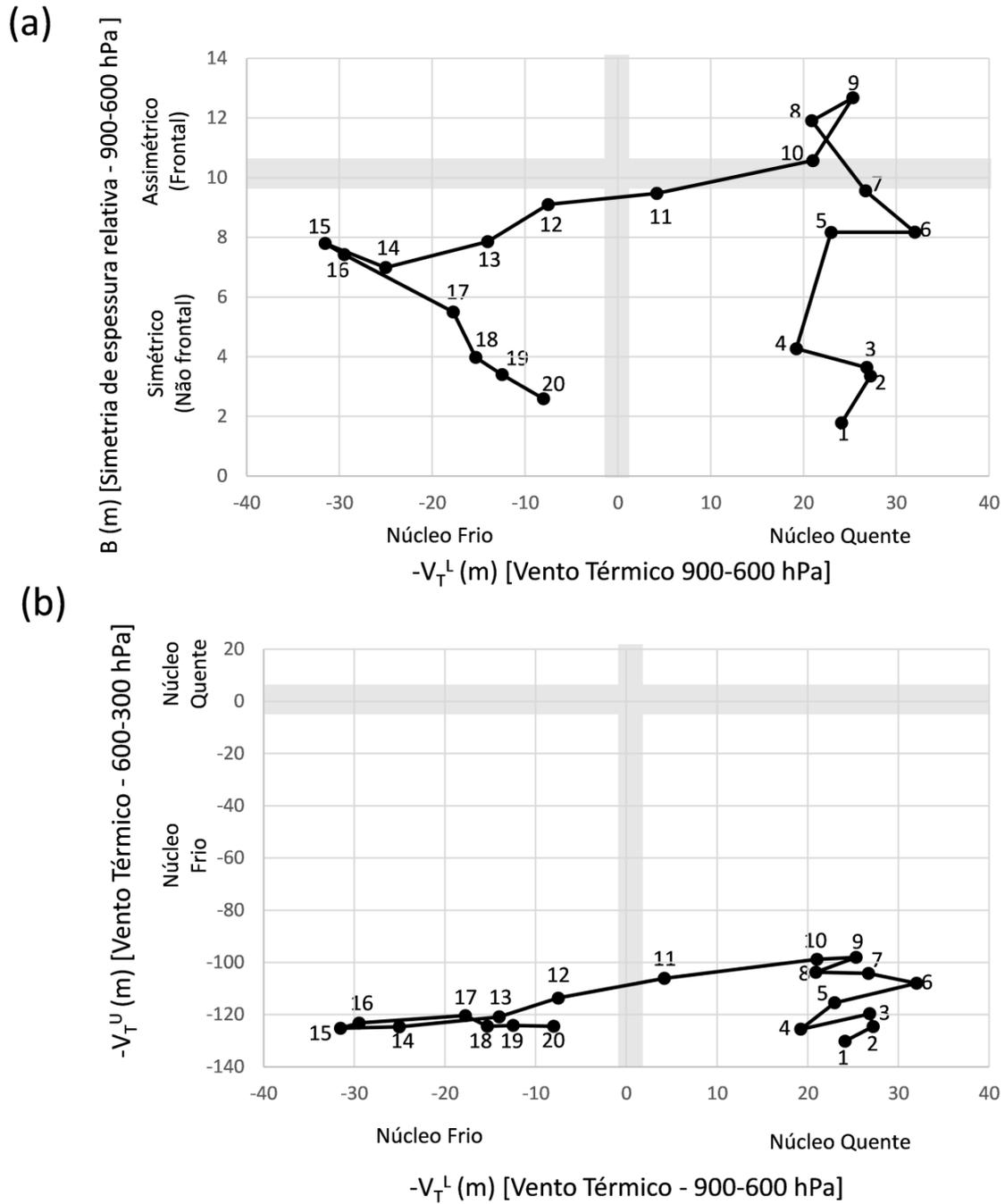


Figura 5.18 – Ampliação do Diagrama de Fase do VCEZ apresentado na Figura 5.17: (a) Simetria térmica e (b) Estrutura térmica vertical. Os números de 1 a 20 representam os passos de tempo do VCEZ a cada 6 horas, desde 01/01/2000 às 06 UTC (tempo 1) até 06/01/2000 às 00 UTC (tempo 20).

6 Conclusões

Neste trabalho realiza-se uma análise do primeiro evento de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) do ano de 2000, que provocou elevados volumes de chuva e inundações em diversas cidades da Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS), na Região Sudeste do Brasil. Além disso, elabora-se uma climatologia de temperatura do ar e precipitação da área de estudo para o período de 1961 a 1990.

A caracterização climatológica da BRPS revela que as temperaturas mais baixas e os maiores totais pluviométricos ocorrem nas estações localizadas nas Serras da Mantiqueira e do Mar. Por outro lado, as maiores temperaturas e os menores índices pluviométricos ocorrem no norte/noroeste da bacia. Em Campos dos Goytacazes, no norte fluminense, as médias anuais da máxima, da média compensada e da mínima são respectivamente: 29,4, 23,7 e 20,1°C. Em Teresópolis, localizada na Serra dos Órgãos, trecho fluminense da Serra do Mar, esses valores sofrem uma queda de aproximadamente 6°C, observando-se respectivamente para as médias anuais da máxima, da média compensada e da mínima: 23,5, 17,7 e 13,3°C. Observam-se também baixos valores de temperatura no sul da BRPS, como em Mogi das Cruzes e São José dos Campos em São Paulo e em Barbacena em Minas Gerais. Nota-se a forte influência da topografia sobre a temperatura na BRPS, com áreas mais frias nas regiões mais elevadas, e, além disso, percebe-se também a influência da proximidade do mar na variação de temperatura.

Com relação à climatologia de precipitação, nota-se que os maiores totais pluviométricos anuais ocorrem nas estações localizadas na Serra da Mantiqueira, com valores que atingem 2296 mm em Visconde de Mauá e 1951 mm no Pico do Itapeva, em Pindamonhangaba. Outros acumulados significativos de precipitação são encontrados também na região da Serra da Bocaina (SP) e da Serra do Mar (RJ), como em Areias – Fazenda de Santa Isabel (1670 mm) e em Teresópolis (1664 mm), respectivamente. A precipitação é reduzida em direção à depressão do Paraíba do Sul e também em direção ao norte e noroeste fluminense. Nessas regiões algumas estações apresentam total pluviométrico anual inferior a 1000 mm, como em Cardoso Moreira (908 mm) e em Três Irmãos (997 mm).

Durante o caso estudado, os acumulados de chuva diária foram superiores a 100 mm/dia em diversas estações nos primeiros dias do ano 2000. Após a chegada de uma

frente fria em São Paulo no dia 1° de janeiro de 2000, configurou-se o primeiro episódio de ZCAS do ano, permanecendo até o dia 8 de janeiro. Nesse período, entre os dias 2 e 3 de janeiro as chuvas foram muito intensas, com os seguintes totais pluviométricos diários: Cruzeiro/SP (192 mm), São José do Barreiro/SP (143 mm), Resende/RJ (139 mm) e Barra Mansa/RJ (130 mm). Observa-se que na estação de Cruzeiro/SP, o total pluviométrico registrado em 24 h, entre 12 UTC do dia 02/01 e 12 UTC do dia 03/01, representa 70% da média mensal de precipitação do mês de janeiro, de acordo com sua climatologia mensal de precipitação.

Ao longo do período de atuação da ZCAS destacaram-se as seguintes características: i) Em altos níveis, a presença da Alta da Bolívia (AB), do Vórtice Ciclônico do Nordeste (VCN) e do cavado no interior do continente (VCEZ em altos níveis), ii) Em baixos níveis, extensas regiões de baixa pressão, com convergência de umidade e forte movimento ascendente, típicos de eventos de ZCAS. Ademais, a presença de um padrão de bloqueio do tipo dipolo nos baixos e médios níveis, sobre Rio Grande do Sul e Uruguai, formado por uma alta de núcleo quente e uma baixa de núcleo frio teve significativa importância neste caso.

O principal destaque deste evento foi o desenvolvimento de um ciclone, na costa da Região Sudeste, denominado neste estudo Vórtice Ciclônico Embebido na ZCAS (VCEZ), que intensificou a convergência de umidade e o movimento ascendente, provocando chuvas intensas na BRPS. O VCEZ de núcleo relativamente quente em baixos níveis, estendeu-se desde a superfície até o nível de 250 hPa e inicialmente esteve inclinado em direção ao ar frio em altos níveis, indicando a sua baroclinia característica. O padrão de bloqueio do tipo dipolo sobre Rio Grande do Sul e Uruguai, formado por uma alta quente e uma baixa fria, favoreceu o enfraquecimento e a bifurcação do escoamento de oeste do Pacífico, permitindo a amplificação do cavado no interior do continente. Após essa amplificação o cavado permaneceu estacionário permitindo que o VCEZ se deslocasse para oeste, em direção ao continente, com característica barotrópica. O desenvolvimento desse cavado em altos níveis contribuiu para a convecção ao longo do eixo noroeste-sudeste da ZCAS, dando suporte ao VCEZ em superfície no oceano.

O diagrama de fase do VCEZ mostrou que o mesmo possuiu características de um ciclone subtropical ao longo do seu desenvolvimento, devido a sua característica não

frontal, com núcleo relativamente quente em baixos níveis e frio nos altos níveis, instabilizando assim a coluna atmosférica. Sistemas de baixa pressão com essa característica indicam elevado gradiente vertical de temperatura, intensificando a atividade convectiva sobre, principalmente o setor leste do ciclone, atingindo assim a BRPS. Uma climatologia sinótica de desenvolvimento de ciclones associados à ZCAS deve revelar as características dos episódios de chuvas intensas na Região Sudeste do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. D. **Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment.** 6th Ed. Pacific Grove/CA: Brooks/Cole Pub, 528 p., 2000.

Agência Nacional das Águas (ANA). Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/RioParaibadoSu1.aspx>>. Acesso em 1 de julho de 2016.

BATISTA, M.S.; RODRIGUES, R. A. **Análise Climática de Viçosa Associada à Ocorrência de Eventos Extremos Pluviométricos Extremos.** *Caminhos da Geografia*, v. 11, n. 36, p. 52-67, 2010.

BEVEN, J. L.: **A Study of three ‘Hybrid’ Storms.** In: 22nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Collins/CO. *American Meteorological Society*, p. 645-646, 1997.

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. **Life Cycle of Cyclones and the Polar Theory of Atmospheric Circulation.** *Geophysisks Publikationer*, v.3, p. 1-18, 1922.

BRITO, D. S.; SILVA, J. M. O. **Estudos dos Impactos Pluviométricos e os Eventos Extremos no Município do Crato - CE.** *Revista Geonorte*, v. 1, n. 5, p. 964-976, 2012.

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, 2002.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall.** *Journal of Climate*, v. 17, p. 88-108, 2004.

CASARIM, D. P.; KOUSKY, V. E. **Precipitation Anomalies in the Southern Part of Brazil and Variations of the Atmospheric Circulation.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 1, p. 83-90, 1986.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Frentes Frias sobre o Brasil. Tempo e Clima no Brasil.** *São Paulo: Oficina de Textos*, p. 135-145, 2009.

CEIVAP: COMITÊ DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **Bacia do rio Paraíba do Sul: livro da bacia.** *Agência Nacional de Águas – ANA*. Brasília, Brasília/DF, 2001.

CHARNEY, J. G. **The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Current.** *Journal of Meteorology*, v. 4, n. 5, p. 135-162, 1947.

CHARNEY, J. G.; A. ELIASSEN. **On the Growth of the Hurricane Depression.** *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 21, p. 68-75, 1964.

COPPETEC. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo. Diagnóstico dos Recursos Hídricos. Relatório Final. PSR-010-R0.** *Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP*, Resende, Rio de Janeiro/RJ, 2006.

CPTEC, 1996. **Climanálise: Especial - Edição Comemorativa de 10 anos.** Disponível em: < <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/>>. Acesso em 1 de julho de 2016.

CPTEC, 2000. **Climanálise**, v.15, n. 1, Janeiro/2000. Disponível em: < <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0100/zcas.html>>. Acesso em 1 de julho de 2016.

- DA ROCHA, F. P.; ARAVÉQUIA, J. A.; RIBEIRO, B. Z. **Estudo de Ciclones e de Padrões de Circulação Atmosférica no Oceano Atlântico Sul próximo à Costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil Usando Dados de Reanálise do Era-Interim.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 2, p. 141-156, 2016.
- DIAS PINTO, J. R.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P. **Synoptic and dynamical analyses of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, p. 10870-10883, 2013.
- DIAS PINTO, J. R.; ROCHA, R. P. **The Energy Cycle and Structural Evolution of Cyclones over Southeastern South America in Three Case Studies.** *Journal Geophysics Research*, v. 116, D14112, 2011.
- DUARTE, C. C.; NOBREGA, R. S.; COUTINHO, R. Q. **Análise Climatológica e dos Eventos Extremos de Chuva no Município do Ipojuca, Pernambuco.** *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 32, n.2, 2015.
- DUTRA, L. M. M. **Ciclones subtropicais sobre o Atlântico Sul: Análise da Estrutura Dinâmica de Eventos.** Dissertação (*Mestrado em Meteorologia*) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 144 p., 2012.
- EM-DAT: **Emergency Events Database.** Disponível em: <
<http://www.emdat.be/database>>. Acesso em 1 de julho de 2016.
- EVANS J. L.; BRAUN A. **A Climatology of Subtropical Cyclones in the South Atlantic.** *Journal of Climate*, v. 25, p. 7328–7340, 2012.
- EVANS, J. L.; GUISHARD, M. P. **Atlantic Subtropical Storms. Part I: Diagnostic Criteria and Composite Analysis.** *Monthly Weather Review*, v. 137, p. 2065-2080, 2009.

- EVANS, J. L.; HART, R., E. **Objective Indicators of the Life Cycle Evolution of Extratropical Transition for Atlantic Tropical Cyclones.** *Monthly Weather Review*, v. 131, p. 909-925, 2003.
- FARIAS, R. F. L; ALVES, K. M. A. S.; NÓBREGA, R. S. **Climatologia da Ocorrência de Eventos Extremos de Precipitação na Mesorregião do Sertão Pernambucano.** *Revista Geonordeste Edição Especial 2*, v. 1, n. 5, p. 930-941, 2012.
- FIGUEROA, S. N.; NOBRE C. A. **Precipitation Distribution Over Central and Western Tropical South America.** *Climanálise*, n. 5, p. 36-45, 1990.
- FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; SILVA DIAS, P. L. **Simulations of the Summer Circulation Over the South American Region with an ETA Coordinate Model.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 52, p. 1573-1584, 1994.
- GAN, M. A.; RAO, V. B. **Surface Cyclongenesis over South America.** *Monthly Weather Review*, v. 119, p. 1293-1302, 1991.
- GANDU, A. W.; GEISLER, J. E. **A Primitive Equations Model Study of the Effect of Topography on the Summer Circulation Over Tropical South America.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 48, p. 1822-1836, 1991.
- GONÇALVES, N. M. S. **Impactos Pluviais e Desorganização do espaço Urbano em Salvador – BA.** Tese (*Doutorado em Geografia Física*) - Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 1992.
- GOZZO, L.F. **Ciclones Subtropicais Sobre o Sudoeste do Atlântico Sul: Climatologia e Fontes de Umidade.** Tese (*Doutorado em Meteorologia*) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 129 p., 2014.

- GOZZO, L.F.; DA ROCHA R.P.; REBOITA M.S.; SUGAHARA S. **Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study.** *Journal of Climate*, v. 27, p. 8543-8562, 2014.
- GRAY, WILLIAM M. **Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms.** *Monthly Weather Review*, v. 96, p. 669-700, 1968.
- GRIMM, A. M.; PAL, J. S.; GIORGI, F. **Connection Between Spring Conditions and Peak Summer Monsoon Rainfall in South America: Role of Soil Moisture, Surface Temperature and Topography in Eastern Brazil.** *Journal of Climate*, v. 20, p. 5929-5945, 2007.
- GUIA, C. V. F. **Análises das Características Sinóticas das Trajetórias dos Ciclones Extratropicais que Atuam na América do Sul e Vizinhanças.** Dissertação (*Mestrado em Meteorologia*) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/SP, 120 p., 2011.
- HACK, L. P. **O Clima Urbano de Petrópolis - RJ - Análise dos Impactos Ambientais das Chuvas de Verão nas Áreas de Riscos e nas Inundações.** In: SANT'ANNA NETO, J. L. (Org.) *Os climas das cidades brasileiras*, Presidente Prudente/SP, p. 89-114, 2002.
- HAKIM, G. J. **Cyclogenesis.** *Encyclopedia of Atmospheric Science*. Academic Press, San Diego/CA, v. 6, p. 589-594, 2003.
- HART, R. E.; EVANS, J. L. **Climatology of the Extratropical Transition of Atlantic Tropical Cyclones.** *Journal of Climate*, v. 14, p. 546-564, 2001.
- HART, R. E. **A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry.** *Monthly Weather Review*, v. 131, p. 585-616, 2003.
- HIRSCHBERG, P. A.; J. M. FRITSCH. **On Understanding Height Tendency.** *Monthly Weather Review*, v. 121, p. 2646-2661, 1993.

HURREL, J. W.; VINCENT, D. G. **On Maintenance of Short-term Subtropical Westerly Maxima in the Southern Hemisphere During SOP-1, FGGE.** *Journal of Climate*, v. 4, p. 1009-1022, 1991.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990.** Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. Brasília, DF. 465 p, CD-ROM, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 2010. **Valores extremos observados a cada mês nas estações convencionais do Estado do Rio de Janeiro.**

JARVINEN, B. R.; NEUMANN, C. J.; DAVIS, M. A. S. **A Tropical Cyclone Data Tape for the North Atlantic Basin, 1886-1983: Contents, Limitations, and Uses.** *NOAA Technical Memorandum*, NWS NHC 22, 24 p., 1984.

KALNAY, E., AND COAUTHORS. **Large-amplitude, Short-scale Stationary Rossby Waves in the Southern Hemisphere: Observations and Mechanistic Experiments to Determine their Origin.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 43, p. 252-275, 1986.

KALNAY, E. AND COAUTHORS. **The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project.** *Bulletin of America Meteorological Society*, v. 77, p. 437-471, 1996.

KODAMA, Y. **Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zones, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones.** *Journal of Meteorological Society of Japan*, v. 70, p. 813-836, 1992.

KODAMA, Y. **Large-Scale Common Features of Subtropical Convergence Zones (The Baiu Frontal Zone, The SPCZ, and the SCAZ). Part II: Conditions of the Circulation for Generating the STCZs.** *Journal of Meteorological Society of Japan*, v. 71, p. 581-610, 1993.

- KODAMA, Y.; SAGAWA, T.; ISHIDA, S. **Roles of the Brazilian Plateau in the Formation of the SACZ.** *Journal of Climate*, v. 25, p. 1745-1758, 2012.
- LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. **Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil.** *Journal of Climate*, v. 14, 2001.
- MARENGO, J. A.; BUSTAMANTE, J. F.; ROJAS, M. I.; SOARES, W. **Avaliação dos Eventos Extremos de Chuvas no Norte da Venezuela de 13-17 de Dezembro de 1999. Estudos Observacionais.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 18, n. 1, p. 43-60, 2003.
- MATHIAS, R. S. B. **Análise e Classificação de Ciclones Utilizando Diagramas de Fase: Conceito e Aplicação em Previsão do Tempo Operacional.** Dissertação (*Mestrado em Meteorologia*) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 117p. , 2012.
- MC-TAGGART-COWAN, R.; BOSART, L. F.; DAVIS, C. A.; ATALLAH, E. H.; GYAKUM, J. R.; EMANUEL, K. A. **Analysis of Hurricane Catarina (2004).** *Monthly Weather Review*, v. 134, p. 3029-3053, 2006.
- NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L.; PINHEIRO, A.; AND NOBRE, C. A. **HAND Contour: A New Proxy Predictor of Inundation Extent.** *Hydrological Processes*, v. 30, p. 320-333, 2016.
- ORLANSKI, I. **A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 56, n. 5, p. 527–534, 1975.
- PALMÉN, E. **Vertical circulation and release of kinetic energy during the development of Hurricane Hazel into an extratropical storm.** *Tellus*, v. 10, p. 1-23, 1958.

- PEZZA A. B.; SIMMONDS I. **Large-scale Factors in Tropical and Extratropical Cyclone Transition and Extreme Weather Events.** In: Trends and directions in climate research. *New York Academy of Sciences*, New York/NY, p. 189-211, 2008.
- QUADRO, M. F. L. **Estudo de Episódios de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** Dissertação (*Mestrado em Meteorologia*) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/SP, 123 p., 1994.
- QUADRO, M, F. L. **Estudo de Vórtices Ciclônicos de Mesoescala Associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul.** Tese (*Doutorado em Meteorologia*) - Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 141 p., 2012.
- QUADRO, M, F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L. **Análise de um Vórtice Ciclônico de Mesoescala Associado à ZCAS em Janeiro de 2009.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, p. 273-287, 2016.
- REBOITA, M.S.; IWABE, C.M.N.; ROSMERI, P.R.; AMBRIZZI, T. **Análise de um Ciclone Semi-estacionário na Costa Sul do Brasil Associado a Bloqueio Atmosférico.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 4, p. 407-422, 2009.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. **Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.
- REX, D. F. **Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate.** *Tellus*, 2: p. 196-211, 1950.
- ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G; VILA, D. A. **Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America.** *Weather and Forecasting*, v. 25, p. 885-894, 2010.

- SAHA, S. AND COAUTHORS. **The NCEP Climate Forecast System Reanalysis.** *Bulletin of America Meteorological Society*, v. 91, p. 1015-1057, 2010.
- SAHA, S. AND COAUTHORS. **The NCEP Climate Forecast System Reanalysis Version 2.** *Journal of Climate*, v. 27, p. 2185-2208, 2014.
- SATYMURTY, P.; NOBRE, C. A; SILVA DIAS, P. L. **South América.** *Capítulo 3 C, Meteorological Monographs*, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998.
- SATYMURTY, P.; GONÇALVES, L. G. G.; MATTOS, L. F.; CALBETE, N. O.; MACHADO, L. H. R. **Campos Diagnósticos Associados ao Episódio de Chuvas Fortes na Região da Serra de Mantiqueira do Começo do Ano 2000.** *In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Foz de Iguaçu/PR, CD-ROM e Anais, 2002.
- SATYMURTY, P.; SELUCHI, M. E. **Characteristics and Structure of an Upper Air Cold Vortex in the Subtropics of South America.** *Meteorology and Atmosphere Physisc*, v. 96, n. 3, p. 203-220, 2007.
- SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. **Synoptic Patterns Associated with Landslide Events in the Serra do Mar, Brazil.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 98, p. 67-77, 2009.
- SOUZA, W. M. **Impactos Socioeconômicos e Ambientais dos Desastres Associados as Chuvas na Cidade do Recife-PE.** Tese (*Doutorado em Recursos Naturais*) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 121 p., 2011.
- SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ARAÚJO, L. E. **Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados as Chuvas na Cidade do Recife-PE.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, n. 2, p. 250-268, 2012.

- SUGAHARA, S.; SILVEIRA, R. B.; ROCHA, R. P. **Estimativa da Probabilidade do Evento Extremo de Precipitação de Janeiro de 2000 no Vale do Paraíba Baseada na Distribuição Generalizada de Pareto.** *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, n. 2, p. 193-208, 2010.
- TAVARES, J. P. N.; MOTA, M. A. S. **Condições Termodinâmicas de Eventos de Precipitação Extrema em Belém-PA Durante a Estação Chuvosa.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, n. 2, p. 207-218, 2012.
- TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. **Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil.** *Monthly Weather Review*, v. 135, p. 598-614, 2007.
- VEIGA, J. A. P.; PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I; SILVA DIAS, P. L. **An analysis of the environmental energetics associated with the transition of the first South Atlantic hurricane.** *Geophysics Research Letters*, v. 35, 2008.
- VERA, C.; HIGGINS, W.; AMBRIZZI, T.; AMADOR, J.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C. R.; NOGUES-PAEGLE,.; SILVA DIAS, P. L; ZHANG, C. **Toward a Unified View of the American Monsoon Systems.** *Journal of Climate*, v. 19, p. 4977-5000, 2006.
- VICENTE, A. K. **Eventos Extremos de Precipitação na Região Metropolitana de Campinas.** Dissertação (*Mestrado em Geografia*) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 133 p., 2005.
- XAVIER, T. M. B. S.; SILVA, J. F.; REBELLO, E. R.G. **A Técnica dos Quantis e Suas Aplicações em Meteorologia, Climatologia e Hidrologia, com Ênfase para as Regiões Brasileiras.** *Ed. Thesaurus*, Brasília/DF, 140 p., 2002.