

CLASSIFICAÇÃO DOS PADRÕES SINÓTICOS ASSOCIADOS AOS EVENTOS DE  
CHUVAS EXTREMAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO UTILIZANDO  
MAPAS AUTO-ORGANIZADOS

Pedro Jourdan

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em Meteorologia  
da Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do título de mestre em  
meteorologia.

Orientadores: Edilson Marton

Luiz Cláudio Gomes Pimentel


Rio de Janeiro  
Julho de 2015

CLASSIFICAÇÃO DOS PADRÕES SINÓTICOS ASSOCIADOS AOS EVENTOS DE  
CHUVAS EXTREMAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO UTILIZANDO MAPAS  
AUTO-ORGANIZADOS


Pedro Jourdan


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM METEOROLOGIA.

Avaliada por:

  
Prof. Edilson Marton, D.Sc.  
(Orientador – IGEO/UFRJ)

  
Prof. Luiz Cláudio Gomes Pimentel, D.Sc.  
(Orientador – IGEO/UFRJ)

  
Prof. Claudine Pereira Dereczynski D.Sc.  
IGEO/UFRJ

  
Prof. Wallace Figueiredo Menezes, D.Sc.  
IGEO/UFRJ

  
Prof. Lúcio Silva de Souza, D.Sc.  
UERJ

Rio de Janeiro  
Julho de 2015



Jourdan, Pedro

Classificação dos padrões sinóticos associados aos eventos de chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro utilizando mapas auto-organizados / Pedro Jourdan. -- Rio de Janeiro, 2015.

Xiii, 108f.: il.; 31cm

Orientador: Edilson Marton.

Coorientador: Luiz Cláudio Gomes Pimentel.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2015.

1. Classificação sinótica. 2. Eventos extremos. 3. Rio de Janeiro. I. Marton, Edilson, orient. II. Gomes Pimentel, Luiz Cláudio, coorient. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus orientadores Edilson Marton e Luiz Cláudio Gomes Pimentel pelas discussões e sugestões, pela motivação, pela disponibilidade e pela paciência ao longo dos anos de graduação e mestrado, pelos momentos de descontração e pela orientação acadêmica no sentido amplo da atividade.

Agradeço aos meus pais e minha família pelo amor, incentivo, educação e pelo exemplo de vida que cada um representa para mim.

Agradeço à minha esposa pelo amor, carinho, compreensão, cumplicidade e pelo apoio tanto nos momentos de alegria como nos momentos de tensão e apreensão que existiram ao longo desta etapa.

Agradeço aos amigos do NCQAR pelo companheirismo, em especial ao William Cossich pelas opiniões, ajudas e socorros computacionais e pela sua prestatividade característica.

Agradeço ao Sistema Alerta Rio pela oportunidade de fazer parte desta organização, pela convivência com pessoas e profissionais exemplares, por toda experiência e conhecimento adquirido no ambiente operacional durante minha passagem pela instituição e, além disso, pela disponibilização dos dados utilizados nesta dissertação.

Agradeço aos amigos, professores e funcionários do Departamento de Meteorologia pela convivência ao longo destes anos.

Finalmente, agradeço à Natureza pela oportunidade de estar presente, vivenciá-la, experimentá-la e, de certa forma, apreendê-la.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGM/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

CLASSIFICAÇÃO DOS PADRÕES SINÓTICOS ASSOCIADOS AOS EVENTOS DE CHUVAS EXTREMAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO UTILIZANDO MAPAS AUTO-ORGANIZADOS

Pedro Jourdan

Julho/2015

Orientadores: Edilson Marton e Luiz Cláudio Gomes Pimentel

Um cenário no qual as dimensões e frequências de eventos meteorológicos extremos tendem a ser ampliadas demanda ações de adaptação da cidade. Dentre as medidas voltadas para redução dos riscos são fundamentais os sistemas de monitoramento e previsão da precipitação. Identificar condições favoráveis à ocorrência de eventos severos é essencial para veiculação adequada de avisos e adoção antecipada de estratégias que eliminem ou minimizem os impactos negativos destes fenômenos. Considerando a potencialidade da classificação sinótica no reconhecimento prévio de padrões atmosféricos relevantes para ocorrência de precipitação intensa, foi elaborada a classificação sinótica dos eventos extremos de chuva no Município do Rio de Janeiro, de forma a auxiliar as atividades operacionais de previsão de tempo na cidade. Dados históricos de precipitação do Sistema Alerta Rio e dados de reanálises, em formato de grade de variáveis meteorológicas, foram utilizados para confecção de mapas auto-organizados, ou *Self-organizing Maps* (SOM), retratando quatro diferentes padrões sinóticos associados a 46 eventos extremos de precipitação, identificados no período entre 1997 e 2014. Os resultados são coerentes com resultados anteriores de outros autores e permitem verificar a potencialidade dos mapas auto-organizados no auxílio da análise de grandes quantidades de campos sinóticos. As principais características sinóticas, a frequência de ocorrência, os volumes médios diários de chuva e a distribuição espacial da precipitação associada a cada padrão sinótico pode ser revelada. O padrão sinótico 1 é caracterizado por uma típica situação frontal, sugerindo relevante advecção de umidade do mar para o continente em direção ao Rio de Janeiro, e responde por 36% do volume total de precipitação associada a todos os dias de eventos extremos. O padrão sinótico 2 está relacionado à presença de uma zona de convergência de massa e umidade na baixa troposfera, com valores elevados de água precipitável. Já o padrão sinótico 3 está associado à convergência de massa e umidade em baixos níveis provocada pela atuação de um cavado baroclínico em altitude. Finalmente, o padrão sinótico 4 é caracterizado pelo deslocamento oceânico do ramo frontal frio de um ciclone extratropical ao largo da Região Sudeste, atuando como gatilho para o disparo da convecção.

Palavras-chave: Classificação sinótica; eventos extremos; Rio de Janeiro.

Abstract of dissertation presented to PPGM/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

CLASSIFICATION OF SYNOPTIC PATTERNS ASSOCIATED WITH EXTREME  
RAINFALL EVENTS IN RIO DE JANEIRO CITY USING SELF-ORGANIZING  
MAPS

Pedro Jourdan

July/2015

Advisors: Edilson Marton e Luiz Cláudio Gomes Pimentel

A scenario in which dimensions and frequency of extreme weather events are likely to increase demand adaptation of the city. Among the measures aimed at reducing the risks, the monitoring systems and forecasting of rainfall are essential. Identify favorable conditions for the occurrence of severe events is crucial for issuing warnings and early adoption of strategies which eliminate or minimize the negative impacts of these phenomena. Considering the potential of the synoptic classification in the prior recognition of relevant weather patterns for the occurrence of heavy rainfall, the synoptic classification of extreme rainfall events in the city of Rio de Janeiro was done in order to assist the operational activities of weather forecasting in the city. Historical precipitation data from Alerta Rio System and reanalysis data from meteorological variables in grid format was used for making self-organizing maps (SOM), representing four different synoptic patterns associated with 46 extreme precipitation events identified between 1997 and 2014. These results are consistent with previous results of other authors and help determine the capability of self-organizing maps to aid analysis of large amounts of synoptic data. The main synoptic features, the frequency of occurrence, average daily volumes of rain and spatial distribution of rainfall associated with each synoptic pattern can be revealed. The synoptic pattern 1 is characterized by a typical frontal and post-frontal situation, suggesting relevant sea moisture advection to mainland toward Rio de Janeiro, accounts for 36% of total rainfall associated with all extreme events. The synoptic pattern 2 is related to the presence of a mass and humidity convergence zone in the lower troposphere, with high values of precipitable water. The synoptic pattern 3 is associated with the mass and moisture convergence at low levels caused by the action of a baroclinic trough in altitude. Finally, the synoptic pattern 4 is characterized by the displacement of an oceanic cold front associated to an extratropical cyclone off the coast of the Southeast Region of Brazil, acting as a trigger for the convection.

Key-words: Synoptic classification; extreme events; Rio de Janeiro.

# SUMÁRIO

	Páginas
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 - Precipitação e eventos extremos	8
2.1.1 – Tempestades Severas	8
2.1.2 - Precipitação no Município do Rio de Janeiro	10
2.1.3 - Eventos Históricos de Chuva no Município do Rio de Janeiro	15
2.2 – Mapas Auto-organizados	19
2.2.1 – Fundamentação Teórica	19
2.2.2 – Aplicações do SOM	24
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	32
3.1 – Dados de Precipitação e Definição de Eventos de Chuva Extrema	32
3.2 - Classificação dos Padrões Sinóticos	34
CAPÍTULO IV - RESULTADOS	42
4.1 - Definição das Datas dos Eventos Extremos de Precipitação	42
4.2 – Classificação dos Padrões Sinóticos com Aplicação do SOM	49
4.2.1- Padrão Sinótico 1	57
4.2.2- Padrão Sinótico 2	68
4.2.3- Padrão Sinótico 3	79
4.2.4- Padrão Sinótico 4	88
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO 1 – CAMPOS SINÓTICOS DOS EVENTOS EXTREMOS (em CD-ROM)	109



## LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1.1 - Representação esquemática de estratégia operacional para previsão de eventos meteorológicos severos. Fonte: adaptado de Nascimento (2005).	3
Figura 2.2 - Total médio anual de precipitação (mm) entre janeiro de 1997 e dezembro de 2013 observado na rede de estações do Sistema Alerta Rio. As áreas sombreadas representam a topografia. Fonte: figura elaborada pelo autor com dados de precipitação do Sistema Alerta-Rio obtidos no seguinte endereço <a href="http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796">http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796</a> .	12
Figura 2.2 - Máximos de precipitação acumulada (mm) em 1 hora entre janeiro de 1997 e dezembro de 2013 observados na rede de estações do Sistema Alerta Rio. As áreas sombreadas representam a topografia. Fonte: figura elaborada pelo autor com dados de precipitação do Sistema Alerta-Rio obtidos no seguinte endereço <a href="http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796">http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796</a> .	13
Figura 2.3 - Máximos de precipitação acumulada (mm) em 24 horas entre janeiro de 1997 e dezembro de 2013 observados na rede de estações do Sistema Alerta Rio. As áreas sombreadas representam a topografia. Fonte: figura elaborada pelo autor com dados de precipitação do Sistema Alerta-Rio obtidos no seguinte endereço <a href="http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796">http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796</a> .	15
Figura 2.4 - Exemplos de diferentes formas de mapas: formato de grade (a) e formatos cilíndrico (b) e toroidal (c) para acomodar dados circulares. Adaptado de Vesanto <i>et al.</i> (2000).	20
Figura 2.5 - Processo de correção/modificação do BMU e seus vizinhos em direção à amostra de entrada X. As linhas sólidas e pontilhadas correspondem respectivamente a situação anterior e posterior ao processo de correção. Adaptado de Vesanto <i>et al.</i> (2000).	22
Figura 2.6 - Exemplo de topologia retangular da vizinhança de um neurônio. O polígono central corresponde ao valor 0 do fator de vizinhança, o segundo polígono corresponde ao fator 1 e o maior corresponde ao fator 2. Adaptado de Vesanto <i>et al.</i> (2000).	22
Figura 3.1 - Localização das estações telepluviométricas e seus respectivos números de identificação (tabela 1.1). Fonte: Sistema Alerta Rio. Imagem Google Earth.	33
Figura 3.2 - Esquema representativo do pré-processamento necessário para utilização do SOM Toolbox. Adaptado de Richardson <i>et al.</i> (2003).	35
Figura 3.3 - Ilustração dos elementos envolvidos no cálculo do Coeficiente de Silhouette, onde a amostra n pertence ao grupo A. Adaptado de Rousseeuw (1987).	36
Figura 3.4 - Esquema representativo do processamento e pós-processamento para confecção dos mapas auto-organizados. Adaptado de Richardson <i>et al.</i> (2003).	38

Figura 3.5 - Fluxograma representativo das etapas da metodologia envolvidas na determinação dos padrões sinóticos.	40
Figura 3.6 - Fluxograma representativo das etapas da metodologia envolvidas na determinação de Regiões Pluviométricas Homogêneas (RPH).	41
Figura 4.1 - Curva de permanência da precipitação média acumulada em 24 horas na rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio no período entre 1997 e 2014.	44
Figura 4.2 - Distribuição anual das ocorrências de 46 eventos extremos registradas na rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio no período entre 1997 e 2014.	45
Figura 4.3 - Distribuição mensal das ocorrências de 46 eventos extremos registradas na rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio no período entre 1997 e 2014.	45
Figura 4.4 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva identificados, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth	48
Figura 4.5 - Campos médios de pressão ao nível médio do mar (PNMM) para cada um dos quatro padrões sinóticos obtidos.	51
Figura 4.6 - Campos médios de altura geopotencial em 500hPa para cada um dos quatro padrões sinóticos obtidos. A linha vermelha tracejada marca o eixo dos cavados.	53
Figura 4.7 - Campos médios de água precipitável para cada um dos quatro padrões sinóticos obtidos.	54
Figura 4.8 - Número de ocorrências de cada padrão sinótico acumuladas em todos os meses ao longo do ano.	56
Figura 4.9 - Campos médios do padrão sinótico 1, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.	58
Figura 4.10 - Número de ocorrências do padrão sinótico 1 acumuladas por meses do ano.	58
Figura 4.11 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 18/03/2013 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (mgp).	60
Figura 4.12 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 2013.	61
Figura 4.13 - Imagens do satélite GOES13 do dia 17/03/2013 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água). Fonte: <a href="http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html">http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html</a>	62
Figura 4.14 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 1, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.	65

Figura 4.15 - Valores máximos horários e diários de precipitação (mm) registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 1.	66
Figura 4.16 - Campos médios do padrão sinótico 2, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.	69
Figura 4.17 - Número de ocorrências do padrão sinótico 2 acumuladas em todos os meses do ano.	70
Figura 4.18 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 09/01/1998 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (mgp).	72
Figura 4.19 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 1998.	73
Figura 4.20 - Imagens do satélite GOES8 do dia 08/01/1998 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água). Fonte: <a href="http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html">http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html</a>	74
Figura 4.21 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 2, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.	76
Figura 4.22 - Valores máximos horários e diários de precipitação (mm) registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 2.	77
Figura 4.23 - Campos médios do padrão sinótico 3, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.	80
Figura 4.24 - Número de ocorrências do padrão sinótico 3 acumuladas em todos os meses do ano.	81
Figura 4.25 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 25/10/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (mgp).	83
Figura 4.26 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 2007.	84
Figura 4.27 - Imagens do satélite GOES10 do dia 24/10/2007 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água). Fonte: <a href="http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html">http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html</a>	84
Figura 4.28 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 3, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.	86
Figura 4.29 - Valores máximos horários e diários de precipitação (mm) registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 3.	87

Figura 4.30 - Campos médios do padrão sinótico 4, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.	89
Figura 4.31 - Número de ocorrências do padrão sinótico 4 acumuladas em todos os meses do ano.	89
Figura 4.32 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 24/10/2005 às 00 UTC, sendo (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (mgp).	91
Figura 4.33 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 2005.	92
Figura 4.34 - Imagens do satélite GOES12 do dia 23/10/2005 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água). Fonte: <a href="http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html">http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html</a>	93
Figura 4.35 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 4, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth	94
Figura 4.36 - Valores máximos horários e diários registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 4.	96

## LISTA DE TABELAS

### Páginas

Tabela 2.1 -	Número e nome das estações, valores máximos de precipitação acumulada (mm) em 1 hora e 24 horas para cada estação do Sistema Alerta Rio (incluindo estações já desativadas). Destaque em azul para os maiores valores em 1 hora e 24 horas. Fonte: <a href="http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796">http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796</a> .	14
Tabela 4.1 -	Datas dos eventos extremos selecionados com precipitação média diária superior a 50 mm, precipitação acumulada média diária de cada evento e o respectivo percentil.	43
Tabela 4.2 -	Informações dos parâmetros finais de configuração do algoritmo SOM para determinação de Regiões Pluviométricas Homogêneas.	47
Tabela 4.3 -	Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva identificados.	48
Tabela 4.4 -	Informações dos parâmetros finais de configuração do algoritmo SOM para classificação dos padrões sinóticos.	49
Tabela 4.5 -	Informações sintetizadas dos quatro padrões sinóticos associados a eventos extremos. A cor verde indica o maior valor de cada linha.	56
Tabela 4.6 -	Informações sintetizadas do padrão sinótico 1 associado a eventos extremos.	59
Tabela 4.7 -	Parâmetros finais de configuração do algoritmo SOM para determinação de Regiões Pluviométricas Homogêneas dos 4 padrões sinóticos.	64
Tabela 4.8 -	Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 1.	65
Tabela 4.9 -	Informações sintetizadas do padrão sinótico 2 associado a eventos extremos.	71
Tabela 4.10 -	Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 2.	76
Tabela 4.11 -	Informações sintetizadas do padrão sinótico 3 associado a eventos extremos.	82
Tabela 4.12 -	Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 3.	86
Tabela 4.13 -	Informações sintetizadas do padrão sinótico 4 associado a eventos extremos.	90
Tabela 4.14 -	Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 4.	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANE	- Água de Neve Equivalente
AO	- <i>Arctic Oscillation</i>
ASAS	- Alta Subtropical do Atlântico Sul
BMU	- Neurônio Vencedor ou <i>Best Matching Unit</i>
CS	- Coeficiente de Silhouette
ECMWF	- European Centre for Medium-range Forecasts
ENSO	- El Niño-South Oscillation
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
NCAR	- <i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	- <i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCP	- <i>North Sea–Caspian Pattern</i>
NAO	- <i>North Atlantic Oscillation</i>
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
PCA	- <i>Principal Component Analysis</i>
PNMM	- Pressão ao nível médio do mar
RNA	- Redes Neurais Artificiais
RPH	- Região Pluviométrica Homogênea
SOM	- <i>Self-organizing Maps</i>
SWIC	- <i>Severe Weather Information Centre</i>
UTC	- Horário Universal
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Quando eventos naturais extremos atingem áreas ocupadas ou utilizadas pelo homem, resultando em danos materiais e humanos e prejuízos socioeconômicos, que excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade atingida em conviver com o impacto, estes são considerados desastres naturais. Estes desastres naturais causados por eventos hidrometeorológicos extremos podem ocorrer em diversas partes do planeta, uma vez que os fenômenos atmosféricos extremos acontecem em qualquer continente. Entretanto, existem diferenças regionais dos impactos desses desastres devido à heterogeneidade espacial na frequência e na intensidade dos fenômenos atmosféricos e também na vulnerabilidade do sistema social (NETO, 2012).

De acordo com Marcelino (2007), a maioria dos desastres naturais no Brasil (mais de 80%) está associada às instabilidades atmosféricas severas, que são responsáveis pelo desencadeamento de inundações, vendavais, tornados, granizos e escorregamentos de terra. Com exceção das inundações graduais, são fenômenos súbitos e violentos que causam grande mortandade e destruição, pois não há tempo hábil para as pessoas se deslocarem para áreas seguras, procurarem abrigos ou salvarem parte dos bens.

Segundo Neto (2012), no Brasil os extremos meteorológicos são a principal causa de desastres naturais, sendo que em um período de mais de um século (1900 – 2006), mais de 70% dos desastres naturais foram causados por eventos extremos de precipitação.

O aglomerado urbano do Município do Rio de Janeiro convive há tempos com problemas tais como a instabilização das encostas, as cheias repentinas das calhas dos rios e córregos, alagamento de áreas de planícies litorâneas e destruição e avarias da infraestrutura urbana. A cidade do Rio de Janeiro figura entre as maiores megalópoles do mundo e desponta como uma metrópole de elevado desenvolvimento social e econômico. Isso atribuiu a esta cidade responsabilidades que tem se avolumado nos últimos anos.

De acordo com Dereczynski *et al.* (2011 e 2013), o clima no Município do Rio de Janeiro está se tornando mais úmido e quente. Dias e noites quentes estão se tornando mais frequentes, totais pluviométricos anuais estão em elevação e eventos de chuvas intensas têm ocorrido com maior frequência. Brasiliense *et al.* (2012) analisando dados de quase 40 anos de radiossondagens realizadas no Aeroporto do Galeão identificaram

que a tendência do comportamento dos índices de instabilidade observados evidencia um aumento nas condições de instabilidade atmosférica local nos últimos anos.

A maior parte da ocupação urbana do Município do Rio de Janeiro se concentra em planícies litorâneas e encostas. Esta configuração dá origem a uma enorme quantidade de micro e pequenas bacias hidrográficas, sujeitas a enchentes e escorregamentos. Os efeitos orográficos dos maciços montanhosos, que delimitam parte destas bacias hidrográficas tendem a intensificar o regime de precipitação.

As incidências de chuvas intensas ou muito prolongadas no ambiente urbano-florestal-montanhoso resultam em ocorrências de deslizamentos catastróficos, pois segundo Coelho Netto *et al.* (2007) a própria conformação do substrato geológico e dos solos associados são suscetíveis aos processos de movimentos de massa.

Um cenário no qual as dimensões e frequências desses eventos meteorológicos extremos tendem a ser ampliadas demanda ações de adaptação da cidade. Dentre as medidas voltadas para redução dos riscos são fundamentais os sistemas de monitoramento e previsão da precipitação, visando principalmente a emissão de alertas para população.

Diante deste cenário, o conhecimento e aperfeiçoamento das técnicas de previsão dos sistemas atmosféricos que desencadeiam condições propícias para ocorrência de eventos extremos são indispensáveis para a segurança da população, dos bens materiais e propriedades e um desafio para a comunidade científica.

Um sistema de alerta efetivo utiliza previsões meteorológicas que determinam quando, onde e qual o risco em potencial que determinada população corre, dado um evento meteorológico relevante. Há, no entanto, vários aspectos a se considerar com relação à abrangência e ao alcance desses sistemas de alerta. A primeira questão é qual dado meteorológico é relevante para cumprir determinado objetivo. Há, notadamente, um claro compromisso entre o grau de precisão da previsão meteorológica e as escalas temporais e espaciais nas quais se pretende trabalhar.

Um sistema de alerta deve, portanto, ter o grau de conservadorismo ótimo para que resulte em ações efetivas e factíveis, identificando com precisão áreas e comunidades que correm risco iminente e os alertando a tempo de tomar as medidas cabíveis de proteção de suas vidas e propriedades. Para isso, tal sistema deve recorrer a uma



combinação de ferramentas de previsão meteorológica que englobe escalas temporais e espaciais variadas.

De acordo com Nascimento (2005), uma estratégia operacional para previsão de eventos meteorológicos severos pode ser representada por três níveis temporais principais da previsão operacional, com as respectivas ferramentas e procedimentos envolvidos em cada passo (Figura 1.1). No nível 1 são feitos os reconhecimentos de padrões atmosféricos de grande escala conducentes a tempo severo e a identificação preliminar das regiões mais ameaçadas. O reconhecimento de padrões sinóticos e de grande escala propícios ao desenvolvimento de eventos meteorológicos severos é uma abordagem muito útil, especialmente para identificação com dias de antecedência de situações atmosféricas potencialmente severas. No nível 2 ocorre a confirmação das regiões mais ameaçadas e quantificação preliminar do potencial de severidade. Finalmente no nível 3 são feitas a confirmação do potencial de severidade e o monitoramento do evento em tempo real ou previsão em curtíssimo prazo.

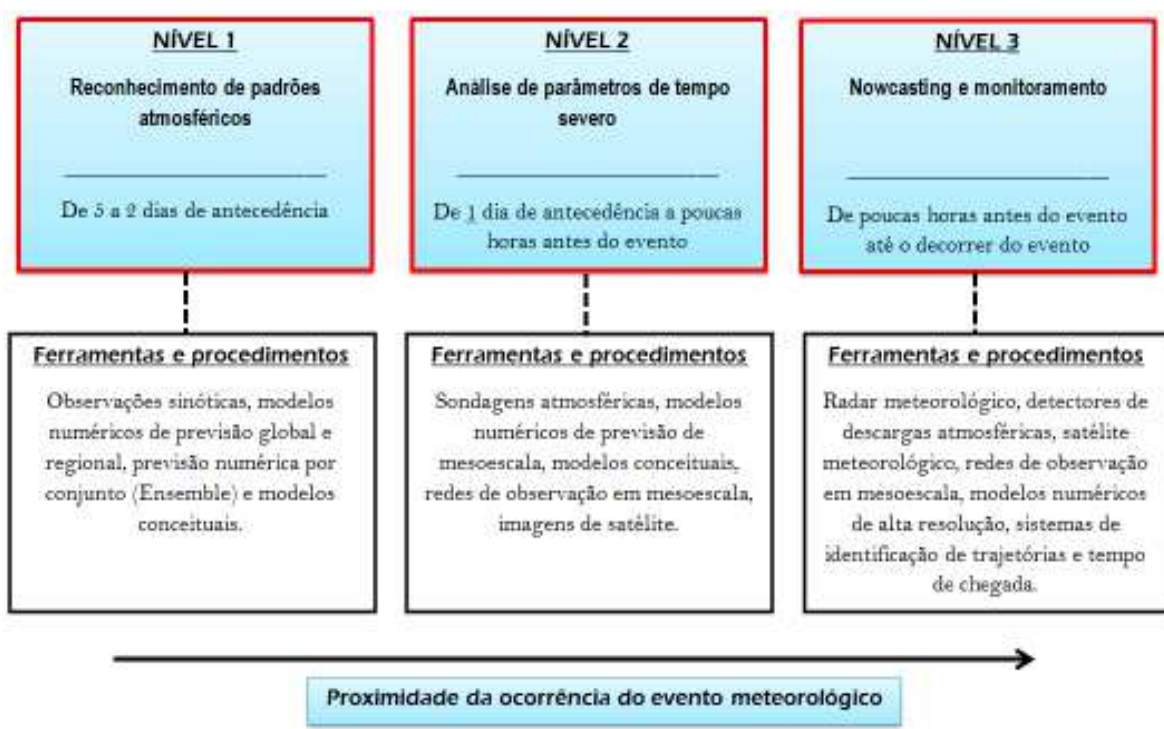


Figura 1.1 - Representação esquemática de estratégia operacional para previsão de eventos meteorológicos severos. Fonte: adaptado de Nascimento (2005).

Considerando o nível 1 da estratégia operacional para previsão de eventos meteorológicos severos proposta por Nascimento (2005), o reconhecimento de padrões atmosféricos pode ser feito através da aplicação de abordagens, técnicas e ferramentas diversas. A definição de padrões atmosféricos gera e consolida conhecimento sobre modos de circulação atmosférica relevantes que poderiam permanecer dispersos na ausência destas definições.

Michaelides *et al.* (2007) esclarecem que através da experiência, os meteorologistas procuram identificar padrões espaciais específicos de determinadas variáveis atmosféricas e relacioná-los a um comportamento distinto da atmosfera. Esses padrões são comumente referidos como padrões sinóticos.

Uma das maneiras de se definir os padrões atmosféricos relevantes para determinada região é a elaboração de classificações ou climatologias sinóticas, onde a circulação em escala sinótica é relacionada com um clima, uma condição meteorológica ou uma resposta ambiental local relevante.

A abordagem mais comum para climatologia sinótica é dividir o estado atmosférico em grandes categorias similares e relacionar essas categorias sinóticas com variáveis meteorológicas locais (HEWITSON e CRANE, 2002). Os estados atmosféricos representados por uma mesma categoria podem ser considerados situações meteorológicas análogas.

De acordo com Lorenz (1969), por análogos podemos considerar dois estados da atmosfera os quais sejam semelhantes. Cada estado pode então ser encarado como o equivalente para o outro estado adicionando-se diferenças razoavelmente pequenas.

Para Van den Dool (1989), a ideia de que os análogos podem ser utilizados para a previsão de tempo futuro é de fato muito antiga. A premissa para o uso de análogos na previsão é bastante consistente, pois se considera que se dois estados atmosféricos distintos são muito semelhantes no início, eles devem permanecer semelhantes por algum tempo no futuro. No entanto, Van den Dool (1989) destaca que o problema com previsões feitas através de análogos é que nós não parecíamos ser capazes de identificar quaisquer estados atmosféricos passados que pudessem ser considerados bons resultados para o padrão presente do escoamento em grande escala.

Hewitson e Crane (2002) relatam que as abordagens mais antigas usaram classificação manual para definir tipos sinóticos. Embora eficazes estas técnicas manuais são extremamente trabalhosas. Michaelides *et al.* (2007) observam que técnicas manuais de classificação sinótica foram posteriormente seguidas por várias abordagens automatizadas baseados em tipos de correlação e agrupamento.

Em todos os casos, a ideia de generalizar a circulação atmosférica em modos ou padrões sinóticos necessita de um bom equilíbrio entre a produção de um pequeno e suficiente número de padrões para visualização e classificação e o cuidado para que o grau de generalização não anule a relação existente com a variável meteorológica local.

Os principais problemas com esta abordagem são devido ao grau de variabilidade interna de cada padrão ou modo. Também é comum que os dias pertencentes ao mesmo padrão sinótico possam ser frequentemente associados com respostas locais diferentes, ou que a mesma resposta local possa ser obtida a partir de diferentes padrões sinóticos.

Dolif e Nobre (2012) destacam que a questão chave se resume ao fato de que os padrões sinóticos conhecidos por desempenhar um papel importante nos eventos de chuva forte poderiam ser usados objetivamente para ajudar centros de previsão meteorológica a emitir avisos prévios sobre esses eventos.

Nyshiyama *et al.* (2007) admitem que a identificação de padrões atmosféricos favoráveis à ocorrência de chuva intensa é uma fonte útil de informação para a tomada de decisão de meteorologistas e/ou usuários finais que estejam envolvidos com atividades de prevenção e combate à desastres provocados por chuvas fortes em uma área específica.

Sheridan e Lee (2011) informam que os *Self-organizing Maps* (SOM) são uma ferramenta recente utilizada em classificação sinótica. Os SOMs são relativamente novos na climatologia sinótica e o método somente começou a ser utilizado nesta área em torno da última década. Estes podem ser usados de maneira muito similar à maioria dos outros métodos de agrupamento.

Um dos diferenciais dos SOMs, quando comparados aos resultados discretos dos métodos mais tradicionais, é que estes oferecem uma abordagem alternativa para climatologia sinótica, proporcionando um mecanismo para a visualização da distribuição complexa de estados sinóticos e tratando os dados como um *continuum*. Além disso, os SOMs permitem novas possibilidades de visualização para grandes conjuntos de dados,

uma vez que os padrões espaciais resultantes podem ser prontamente compreendidos quando apresentados no formato de mapas auto-organizados. Estes aspectos têm conduzido os SOM a se tornarem cada vez mais uma ferramenta popular em várias áreas de pesquisa, como pode ser constatado no trabalho de revisão bibliográfica feito por Kohonen *et al.* (2002).

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma classificação dos padrões atmosféricos de escala sinótica associados a eventos de chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro, investigando assim a possível existência de modos preferenciais para ocorrência destes eventos extremos e buscando caracterizar o padrão de circulação atmosférica.

Desta forma, busca-se com esta investigação gerar resultados que auxiliem as atividades operacionais de previsão de tempo na cidade do Rio de Janeiro. Para realizar esta tarefa dados históricos de precipitação do Sistema Alerta Rio e dados em formato de grade de variáveis meteorológicas são utilizados para confecção de mapas auto-organizados, ou *Self-organizing Maps* (SOM), que deverão retratar os diferentes padrões sinóticos associados a eventos extremos de precipitação. Portanto, os objetivos específicos desse trabalho são:

- 1** -Realizar identificação de todos os eventos chuvosos extremos ocorridos no Município do Rio de Janeiro, segundo o critério utilizado pelo *Severe Weather Information Centre* (SWIC) da Organização Meteorológica Mundial (OMM) (<http://severe.worldweather.org/rain/>), registrados na rede de pluviômetros do Alerta Rio entre o período de janeiro de 1997 a abril de 2014.
- 2** -Elaborar uma classificação dos padrões sinóticos associados aos eventos extremos de precipitação no Município do Rio de Janeiro, incluindo a caracterização dos padrões em superfície e em altitude, com intuito de gerar conhecimento sobre as características atmosféricas deste tipo de evento.
- 3** -Calcular a frequência associada a cada padrão sinótico, buscando identificar padrões mais raros e padrões mais frequentes que promovam condições potenciais para ocorrência de eventos extremos.

- 4** -Calcular o volume médio de precipitação e sua variabilidade associada a cada padrão sinótico mapeado, buscando identificar possíveis separações entre modos ainda mais favoráveis à ocorrência de volumes extremos de chuva e taxas de precipitação elevadas.
  
- 5** -Investigar a existência de Regiões Pluviométricas Homogêneas (RPH) para cada um dos padrões sinóticos de eventos extremos que forem encontrados.

## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Precipitação e Eventos Extremos

Neste item são discutidos aspectos relacionados à classificação de tempestades severas, são analisadas as principais características da distribuição da precipitação na região de estudo e apresentados os principais eventos históricos de chuva no Município do Rio de Janeiro.

#### 2.1.1 - Tempestades Severas

Tempestades severas podem ser consideradas tempestades capazes de gerar fenômenos com significativo impacto social e econômico. Os serviços nacionais de meteorologia dos Estados Unidos da América (*National Weather Service* - <http://www.weather.gov/>) e da Austrália (*Australian Bureau for Meteorology* - <http://www.bom.gov.au/index.php>) definem que tempestade severa é uma tempestade capaz de gerar pelo menos um dos seguintes fenômenos: tornado(s), ventos intensos em superfície com velocidade igual ou superior a 90 km/h (Austrália) e 92 km/h (EUA) e granizo chegando à superfície com tamanho igual ou superior a 2 cm (Austrália) e 1,9 cm (EUA). A única diferença significativa entre as duas definições é a adição de um critério qualitativo associado à taxa de precipitação (ocorrência de taxas muito altas de precipitação, causando inundações) por parte do serviço meteorológico australiano.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) não possui uma definição formal para tempestades severas, no entanto, o SWIC da OMM (<http://severe.worldweather.org/rain/>) utiliza o limiar de 50 mm/24h para classificar um evento severo de precipitação.

Atualmente não existe uma definição brasileira para classificação de tempestades severas, no entanto a definição australiana é a que mais se aproxima da nossa realidade. Tempestades típicas de verão no Brasil, que geram altas taxas de precipitação, grandes volumes de chuva acumulada e inundações repentinas, não apresentando necessariamente correntes verticais tão intensas para produzir ventos, tornados e/ou granizo, são capazes

de produzir volumes de água que superam a capacidade social de resposta, resultando em impactos negativos que causam prejuízos e por vezes perdas de vida humana.

Para Teixeira e Satyamurty (2007) chuva forte é um termo subjetivo e sua definição varia significativamente. Por vezes, é definido com referência à precipitação de uma única estação e em outras vezes com referência a uma média de uma área razoavelmente grande. No entanto, em geral, refere-se a um curto período de tempo, variando de algumas horas a 1 dia. Em muitos episódios desastrosos de chuvas intensas tanto a intensidade quanto a duração da chuva tendem a ser grandes.

Oliveira *et al.* (2013) utilizaram o critério dos percentis para definir eventos de chuva forte no litoral nordeste do Brasil e investigar os ambientes sinóticos associados. A definição dos eventos foi feita através do cálculo dos percentis da chuva acumulada diária considerando apenas os dados com chuva acumulada superior à zero. Os eventos de chuva forte foram definidos como os eventos onde o valor de precipitação ficou acima do percentil 95%, sendo que este percentil foi calculado para cada um dos pluviômetros individualmente.

Assim como o termo chuva forte é subjetivo e sua definição varia significativamente, os termos chuva severa ou chuva extrema também não possuem uma definição única. Moura e Escobar (2011), tendo como base o banco de dados diários de precipitação da Fundação Geo-Rio no período de 1997 até 2010, fizeram uma classificação sinótica de sequências de campos de pressão ao nível médio do mar (PNMM) associados a 149 eventos de chuva extrema no Município do Rio de Janeiro. Para definição dos eventos extremos foi utilizado o percentil de 95% como limiar dos casos a serem analisados. Os resultados mostraram que dois tipos de padrões sinóticos representam aproximadamente 50% da variância total dos casos de chuva extrema na cidade do Rio de Janeiro durante o período de 1997-2010. O padrão dominante mostra a passagem de frentes frias com trajetória predominantemente zonal e provavelmente associada com episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante a estação chuvosa. Já o segundo padrão está relacionado ao ingresso de frentes frias polares, acompanhadas de intensos anticiclones pós-frontais. Ambos os padrões sinóticos contribuem com o aumento da convergência de umidade sobre o litoral fluminense

Recentemente Polifke (2014), através da utilização do método do percentil 99% nos acumulados diários e horários de chuva e do critério de continuidade da precipitação

por pelo menos 12 horas, selecionou 15 eventos de chuva severa entre 1997-2008 nos acumulados diários e horários de precipitação do Sistema Alerta Rio. Estes eventos foram utilizados para estabelecer limiares para indicadores atmosféricos nos dias de ocorrência de chuvas severas no Município do Rio de Janeiro.

Neto (2012) utilizou os dados de precipitação do Sistema Alerta Rio no período entre 2000 e 2010 e o critério para evento extremo do SWIC, estabelecendo assim que para um episódio de chuva ser considerado extremo era necessário que fosse produzido precipitação média nos 32 pluviômetros acumulada em 24 horas maior do que 50 mm. Desta forma, foram identificados 32 eventos extremos de chuva no Município do Rio de Janeiro. Deste total, 47% estavam associados à frentes frias, 37% a atuação da ZCAS e 5% não possuíam sistemas sinóticos associados, tendo sido provocados exclusivamente por sistemas convectivos de mesoescala.

A ocorrência de elevadas taxas pluviométricas estão associadas a eventos meteorológicos extremos, que podem ter sua origem associada a sistemas atmosféricos de mesoescala e microescala frequentemente embebidos em sistemas de escala sinótica. Atualmente sabe-se que eventos extremos de chuva na Região Sudeste do Brasil estão associados a condições anômalas na escala sinótica provocadas principalmente por dois sistemas meteorológicos distintos, os sistemas frontais e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (CARVALHO *et al.*, 2002; SELUCHI *et al.*, 2009; DERECHYNSKI *et al.*, 2009; VASCONCELOS *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2009).

### **2.1.2 - Precipitação no Município do Rio de Janeiro**

O relevo acidentado e diversificado do Município do Rio de Janeiro contribui para a grande variabilidade espacial e temporal da precipitação. O município é delimitado a leste pela Baía de Guanabara, a oeste pela Baía de Sepetiba e possui três principais maciços montanhosos, sendo eles o do Gericinó-Mendanha, ao norte, onde se encontram as Serras do Mendanha e de Gericinó, com o Pico do Guandú localizado a 964 m; o maciço da Tijuca, a leste, com o Pico da Tijuca localizado a 1022 m de altitude e o maciço da Pedra Branca, a oeste, onde se localiza o ponto mais elevado da cidade, o Pico da Pedra Branca a 1025 m de altitude.



Apesar da presença marcante dos maciços montanhosos, a forma de relevo mais típica da cidade é a planície, que representa 64% do território municipal, possuindo uma variação de altitude que não ultrapassa os 20 metros acima do nível médio do mar (DERECZYNSKI *et al.*, 2009).

Ocupações de áreas marginais aos cursos d'água e também as situadas em cotas topográficas muito baixas ao longo do processo histórico de desenvolvimento da cidade, são identificados como fatores agravantes das cheias na região para Miguez *et al.* (2011). As construções e arruamentos aumentam a impermeabilização e o escoamento superficial, que associados à ocupação das planícies de inundação por edificações faz com que picos maiores e mais rápidos de cheias passem a ocorrer de maneira mais frequente nas áreas mais baixas da cidade, mesmo com volumes pluviométricos inferiores as médias.

A influência direta dos três maciços montanhosos existentes na cidade no comportamento da precipitação pode ser acessada através do uso do histórico de dados de precipitação fornecidos pelo Sistema Alerta Rio, que é o sistema de alerta de chuvas intensas e de deslizamentos em encostas do Município do Rio de Janeiro criado em 25 de setembro de 1996. Esse Sistema tem como objetivo emitir boletins de alerta à população sempre que houver previsão de chuvas intensas que possam gerar inundações de vias públicas e/ou acidentes geotécnicos em encostas. O Sistema conta com uma rede de 33 estações pluviométricas espalhadas por todas as regiões do Município do Rio de Janeiro, e que enviam dados em tempo real, a cada 15 minutos, para a central do Alerta Rio.

Considerando-se os totais pluviométricos anuais, observa-se a presença de três máximos de precipitação associados aos três maciços montanhosos (Figura 2.1). O primeiro encontra-se junto ao maciço da Tijuca (estações pluviométricas Sumaré, Alto da Boa Vista, Rocinha, Barra/Itanhangá e Tijuca), o segundo junto à Serra do Mendanha (estação pluviométrica Mendanha) e o terceiro junto à Serra Geral de Guaratiba (estação pluviométrica Grota Funda). Nas áreas de planície a precipitação é sempre inferior aos totais registrados nas áreas de serra citadas, destacando-se um mínimo de precipitação no extremo norte da cidade, onde estão localizadas as estações pluviométricas Irajá e Penha, que chegam a apresentar totais pluviométricos médios anuais inferiores a 1000 mm.

## TOTAL MÉDIO ANUAL DE PRECIPITAÇÃO (mm)

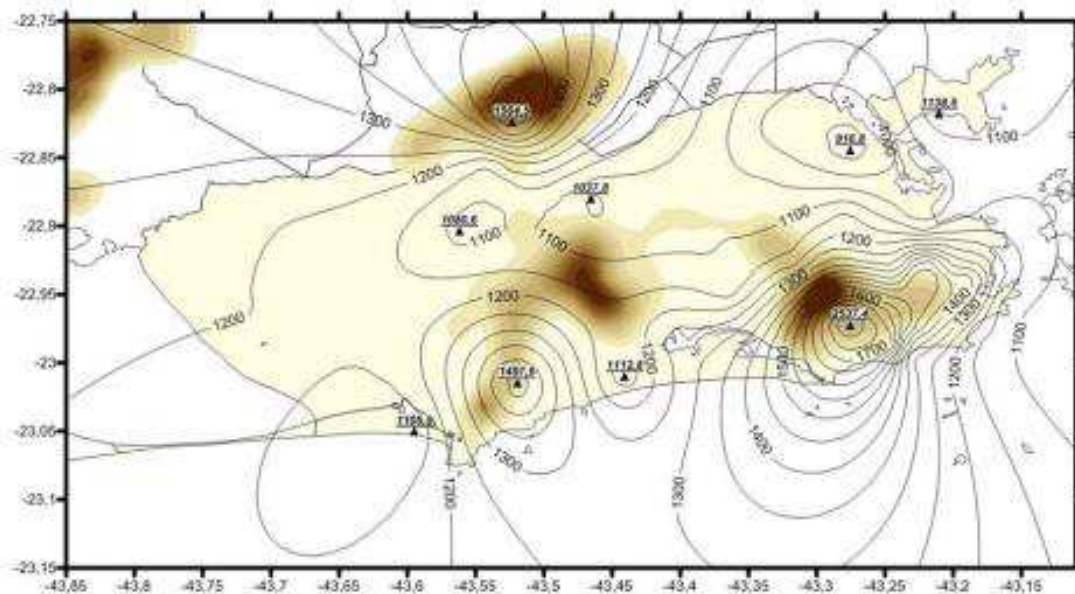


Figura 2.1 - Total médio anual de precipitação (mm) entre janeiro de 1997 e dezembro de 2013 observado na rede de estações do Sistema Alerta Rio. As áreas sombreadas representam a topografia. Fonte: figura elaborada pelo autor com dados de precipitação do Sistema Alerta-Rio obtidos no seguinte endereço [http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page\\_id=796](http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796).

Os sistemas transientes em deslocamento, em geral, de sul para norte e a presença do anteparo topográfico, representado pelas áreas de serra do município do Rio, forçam o ar úmido a ascender à barlavento das montanhas. Este ar ascendente se resfria e condensa, formando nuvens e chuva, resultando assim nos máximos de precipitação à barlavento das encostas. Após perder grande parte de sua umidade, o ar desce as encostas e é comprimido e aquecido adiabaticamente, inibindo-se a formação de nuvens e consequentemente reduzindo-se o volume de precipitação a sotavento das montanhas (DERECZYNSKI *et al.*, 2009). Além disso, o mecanismo de brisa modula o regime de vento diário sobre grande parte da cidade (PIMENTEL *et al.*, 2014) e a proximidade dos maciços montanhosos com o oceano amplifica o levantamento do ar úmido trazido pela brisa marítima.

De acordo com Derezynski *et al.* (2009), uma exceção ao menor volume de chuva geralmente observado no extremo norte da cidade ocorre durante os meses de verão (trimestre dezembro-janeiro-fevereiro). Apenas neste período a precipitação acumulada no litoral da Zona Sul (estações pluviométricas Urca, Copacabana e Vidigal) é inferior à observada na Zona Norte da cidade (estações pluviométricas Madureira,



Tabela 2.1 - Número e nome das estações, valores máximos de precipitação acumulada (mm) em 1 hora e 24 horas para cada estação do Sistema Alerta Rio (incluindo estações já desativadas). Destaque em azul para os maiores valores em 1 hora e 24 horas. Fonte: ([http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page\\_id=796](http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796)).

Estação Pluviométrica	Máximos Acumulados	
	01 hora	24 horas
1 - Vidigal	79,0	264,6
2 - Urca	68,4	177,6
3 - Rocinha	82,6	304,6
4 - Tijuca	78,1	281,9
5 - Santa Teresa	76,8	248,0
6 - Copacabana	93,6	236,0
7 - Grajaú	90,3	227,0
8 - Ilha do Governador	93,4	202,6
9 - Penha	59,6	226,2
10 - Madureira	79,2	172,6
11 - Irajá	69,4	133,3
12 - Bangu	69,0	146,6
13 - Piedade	69,9	183,8
14 - Jacarepaguá/Tanque	78,4	176,7
15 - Saúde	82,0	189,4
16 - Jardim Botânico	80,2	303,0
17 - Barra/Barrinha	58,4	84,2
18 - Jacarepaguá/Cidade de Deus	74,8	171,2
19 - Barra/Riocentro	92,6	218,6
20 - Guaratiba	65,2	195,2
21 - Est. Grajaú/Jacarepaguá	46,2	105,4
22 - Santa Cruz	79,4	179,4
23 - Grande Méier	76,0	257,8
24 - Anchieta	72,6	135,8
25 - Grotta Funda	69,2	264,2
26 - Campo Grande	116,2	274,5
27 - Sepetiba	71,8	220,8
28 - Alto da Boa Vista	87,2	184,6
29 - Av. Brasil/Mendanha	59,4	167,0
30 - Recreio dos Bandeirantes	72,5	190,8
31 - Laranjeiras	80,0	227,0
32 - São Cristóvão	72,2	213,6
33 - Tijuca/Muda	99,6	286,0
101 - Mendanha	61,0	243,2
102 - Gericinó	70,4	148,6
103 - Sumaré	103,4	360,2
104 - Barra/Itanhangá	70,6	214,5
<b>Média</b>	76,9	211,2
<b>Desvio Padrão</b>	13,6	58,7

Considerando os máximos acumulados em 24 horas de cada estação (tabela 2.1), percebe-se uma distribuição mais heterogênea e bastante concentrada sobre a região dos maciços montanhosos. A média dos máximos para esse período de acumulação é de 214 mm, o

desvio padrão de 58 mm e a estação Sumaré apresentou o maior valor máximo com 360 mm (Figura 2.3). Este comportamento indica a influência da topografia no comportamento dos sistemas precipitantes de grande escala.

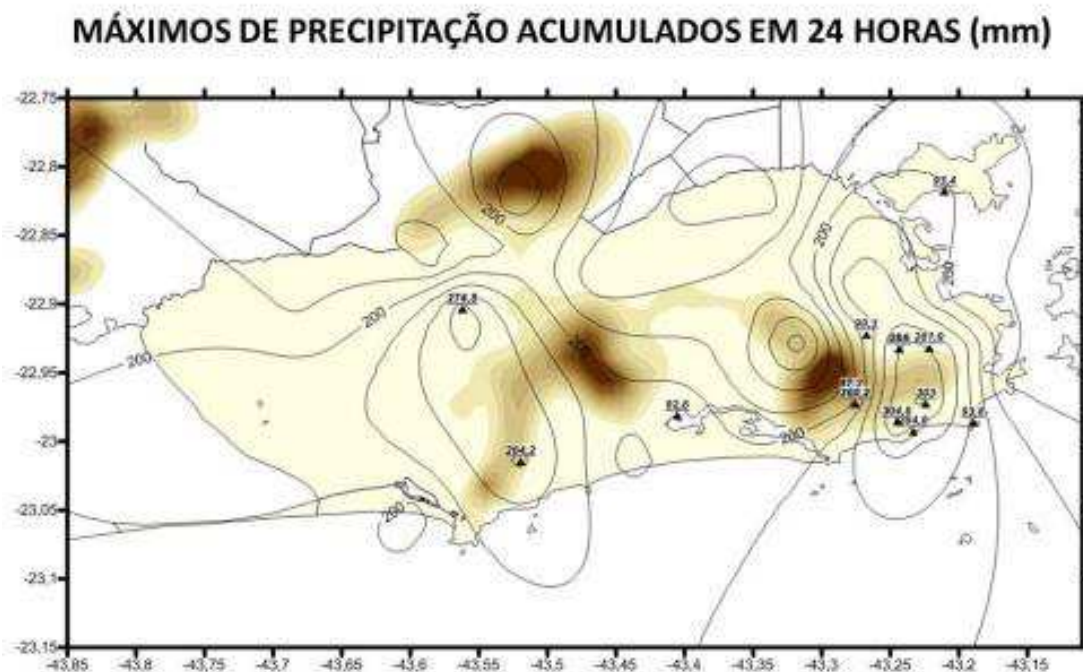


Figura 2.3 - Máximos de precipitação acumulada (mm) em 24 horas entre janeiro de 1997 e dezembro de 2013 observados na rede de estações do Sistema Alerta Rio. As áreas sombreadas representam a topografia. Fonte: figura elaborada pelo autor com dados de precipitação do Sistema Alerta-Rio obtidos no seguinte endereço [http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page\\_id=796](http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=796).

### 2.1.3 - Eventos Históricos de Chuva no Município do Rio de Janeiro

Historicamente o Rio de Janeiro, principalmente durante o verão, é atingido frequentemente por sistemas meteorológicos que causam chuvas intensas e extremas. Tais eventos causam transtornos econômicos e sociais de magnitude significativa. Alguns eventos marcaram a história do Rio de Janeiro pela sua intensidade e danos causados, tornando-se casos de estudo no meio acadêmico e motivo de registros pelos órgãos de imprensa.

No Município do Rio de Janeiro os registros pluviométricos começaram a ser feitos a partir de 1851, sendo que a densidade da rede de pluviômetros aumentou muito lentamente até 1996 (BRANDÃO, 1997). Com a criação do Sistema Alerta Rio em 1996,

os eventos de chuva passaram a ser monitorados automaticamente de maneira mais detalhada.

Em janeiro de 1966 ocorreu um temporal histórico no Rio de Janeiro. Enchentes e deslizamentos deixaram 250 mortos e 50 mil desabrigados (CALADO, 2012). Serra (1970) afirma que essa tempestade ocorrida entre os dias 11 e 12 de janeiro de 1966, com acúmulo de 245 mm de chuva em 24 horas, foi causada pela chegada de uma frente fria na cidade. Choveu forte por diversos dias seguidos o que causou colapso no sistema de transporte e na distribuição de energia elétrica na cidade. Na época, uma epidemia de leptospirose infectou mais de setenta pessoas

No dia 20 de janeiro de 1967 um temporal acarretou deslizamentos em Laranjeiras, com soterramento de uma casa e dois edifícios entre as ruas Belizário Távora e General Glicério, deixando duzentos mortos e trezentos feridos. Em todo o Estado do Rio de Janeiro houve um total de trezentos mortos e vinte e cinco mil feridos. Na estação Bangu do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a chuva atingiu 124,8 mm em 24 horas neste dia (CALADO, 2012).

Em 1988, houve sucessivos episódios de chuvas no decorrer do mês de fevereiro, culminando em um alto número de vítimas. O período crítico deste longo evento se deu entre o primeiro e o quinto dia daquele mês. Porém, além deste período, ressaltam-se também outros dois períodos de chuvas fortes: entre 10 e 13 e entre 19 e 22 de fevereiro (CALADO, 2012).

O fato de ter ocorrido tantos eventos extremos fez com que o número de vítimas fosse bastante alto. Em 12 de fevereiro de 1988 houve deslizamento no Morro Dona Marta, deixando seis mortos, quarenta feridos e trezentos desabrigados. Uma tela usada em uma obra de contenção de encosta rompeu-se sob o peso do lixo e da lama, acumulados durante uma semana de fortes chuvas. A enxurrada destruiu cerca de trinta barracos. Particularmente no dia 18 de fevereiro de 1988 um temporal de meia hora alagou vias importantes do Rio, como a Avenida Brasil, e provocou deslizamentos em morros. No bairro de Santa Teresa, a clínica para idosos Santa Genoveva foi parcialmente soterrada: dezoito pessoas morreram. Como consequências, centenas de acidentes geológicos ocorreram nas encostas cariocas e cinquenta e oito vítimas fatais foram contabilizadas. Dentre os acidentes mais graves com vítimas fatais, destacaram-se as

ocorrências no Morro da Formiga no bairro da Tijuca, no Morro Santa Marta, em Botafogo e em Santa Tereza. (CALADO, 2012)

Segundo Avelar *et al.* (2011), nos movimentos de massa ocorridos em 1988 no Município do Rio de Janeiro as ocorrências mais comuns foram de deslizamentos planares e rotacionais. Na estação Capela Mayrink, situada no maciço da Tijuca, foram observados 980 mm de chuva durante o mês de fevereiro, sendo que no dia 12 foram registrados 148 mm e no dia 13 a precipitação acumulada foi de 242 mm.

Araújo *et al.* (1996, apud CALADO, 2012) documentaram as chuvas ocorridas entre os dias 13 e 15 de fevereiro de 1996. A precipitação no período, registrada no aeroporto de Jacarepaguá foi de 301,4 mm, quando a média mensal climatológica era de 476,4 mm, e registros de precipitações superiores a 190 mm em sete horas foram observados nos bairros do Alto da Boa Vista e do Jardim Botânico. Corridas de massa ocorreram em vários trechos dos maciços montanhosos da Tijuca e da Pedra Branca, destruindo centenas de moradias e ocasionando a morte de pessoas. De acordo com Avelar *et al.* (2011), as ocorrências de movimentos de massa ocorridas em 1996 se mostraram concentradas sobre os maciços da Tijuca e Pedra Branca, apresentando principalmente deslizamentos planares e fluxos de detritos que produziram cerca de setenta e cinco vítimas fatais.

Mais recentemente, no final da tarde do dia 05 de abril de 2010, o Município do Rio de Janeiro foi atingido por uma tempestade que provocou chuvas intensas que persistiram por horas seguidas. A precipitação deste evento foi acompanhada por rajadas de ventos muito fortes que atingiram 75 km/h na estação Forte de Copacabana do INMET. Na noite do dia 05 as principais avenidas da cidade já estavam alagadas e o trânsito completamente paralisado. No dia 06 de abril a cidade amanheceu paralisada, com vários pontos de deslizamentos e inundações, árvores caídas e problemas de transmissão na rede de distribuição de energia elétrica. De acordo com a Defesa Civil, no Município do Rio de Janeiro foram registradas quarenta e três mortes, com quinhentos e quarenta e quatro desabrigados e mais de mil e quatrocentas pessoas desalojados (CALADO, 2012).

Neste evento, a rede de estações de monitoramento pluviométrico do Sistema Alerta Rio registrou os maiores valores de precipitação acumulada em 24 horas no seu histórico, totalizando aproximadamente 360 mm em 24 horas na estação Sumaré

([http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page\\_id=141](http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=141)). O aspecto mais relevante do comportamento da precipitação neste período foi sua intensidade, duração e abrangência, ocorrendo chuva intensa durante horas seguidas em todo o município. Cabe destacar que assim como no Município do Rio de Janeiro, volumes elevados de precipitação também foram observados em outros municípios do litoral Fluminense durante este evento de abril de 2010.

Para Avelar *et al.* (2011), os movimentos de massa ocorridos entre 05 e 07 de abril de 2010 no maciço da Tijuca, decorrentes do grande volume de precipitação, apresentaram uma tipologia muito similar entre si. Estes foram essencialmente movimentos de massa ligados principalmente a cortes de estrada ou cortes relacionados à implantação de edificações residenciais, acentuando assim o efeito catastrófico promovido pela interação dos fenômenos pluviométricos extremos com as áreas de expressivo uso urbano.

Calado (2012), assumindo como critério para classificação de eventos de chuva extrema os dias em que os totais pluviométricos diários superam os 100 mm, contabiliza trinta e sete eventos desde que os totais pluviométricos diários começaram a ser registrados no Município do Rio de Janeiro em 1851. A maior parte dos casos ocorreu em janeiro (doze casos) e os meses de fevereiro, março e abril, apresentaram a mesma frequência de ocorrência (sete eventos em cada um dos meses), totalizando-se 89% dos eventos no período de janeiro a abril. Os 11% restantes ocorreram em maio (dois eventos), outubro (um evento) e dezembro (um evento).

Desta forma, observa-se a relevância dos eventos de chuva extrema na história da cidade. A recorrência de desastres com vítimas fatais e danos ao patrimônio evidenciam a necessidade de prevenção e mitigação dos impactos locais provocados por este tipo de ocorrência. A geração de conhecimento e inteligibilidade sobre estes fenômenos e seus mecanismos e a posterior utilização destas informações no aprimoramento dos prognósticos e alertas emitidos à população motiva e justifica a pesquisa sobre este tema.



## 2.2 – Mapas Auto-organizados (SOM)

Os mapas auto-organizados, ou *self-organizing maps* (SOM), consistem em uma rede neural que gera como saída representações bidimensionais (mapas) de banco de dados de alta dimensionalidade. Estes algoritmos podem analisar dados por agrupamentos com o objetivo de descobrir estruturas e padrões multidimensionais.

### 2.2.1 – Fundamentação Teórica

Estes mapas foram consolidados como redes neurais por Kohonen em conferências e artigos no começo da década de 1980 (KOHONEN, 1990). Os mapas auto-organizados podem ser definidos como sendo redes neurais competitivas com um alto grau de interconexão entre seus neurônios e que são aptas a formar mapeamentos preservando a topologia entre os espaços de entrada e de saída. Podem ser aplicados para problemas não lineares de alta dimensionalidade, tais como: extração de características e classificação de imagens e padrões acústicos, controle adaptativo de robôs, processamento de sinais, química, medicina, economia e ciências geofísicas.

A rede auto-organizada deve descobrir semelhanças, regularidades, correlações ou categorias nos dados de entrada e incorporá-las em suas conexões da estrutura interna. Diz-se, por conseguinte, que os neurônios têm de se auto-organizar de acordo com os dados de entrada. Também pode ser considerada uma rede neural com aprendizado não supervisionado, pois não necessita de um vetor de saída conhecido como vetor alvo.

Com base no aprendizado competitivo, os neurônios de saída desta rede competem entre si para serem ativados com o resultado de que apenas um neurônio de saída será ativado em cada iteração. Um neurônio de saída que vence tal competição é chamado neurônio vencedor ou *Best Matching Unit* (BMU).

Segundo Affonso (2011), os neurônios em uma rede SOM são posteriormente ordenados e apresentados em gráficos gradeados, normalmente mono ou bidimensionais (Figura 2.4). Mapas de dimensões maiores são também possíveis, porém mais raros. Os neurônios se tornam seletivamente “ajustados” a vários estímulos (padrões de entrada) ou classes de padrões de entrada ao longo de um processo competitivo de aprendizado. A localização destes neurônios, que são os neurônios vencedores, se torna ordenada entre si

de tal forma que um sistema de coordenadas significativo é criado em uma grade de nós, para diferentes características de entrada.

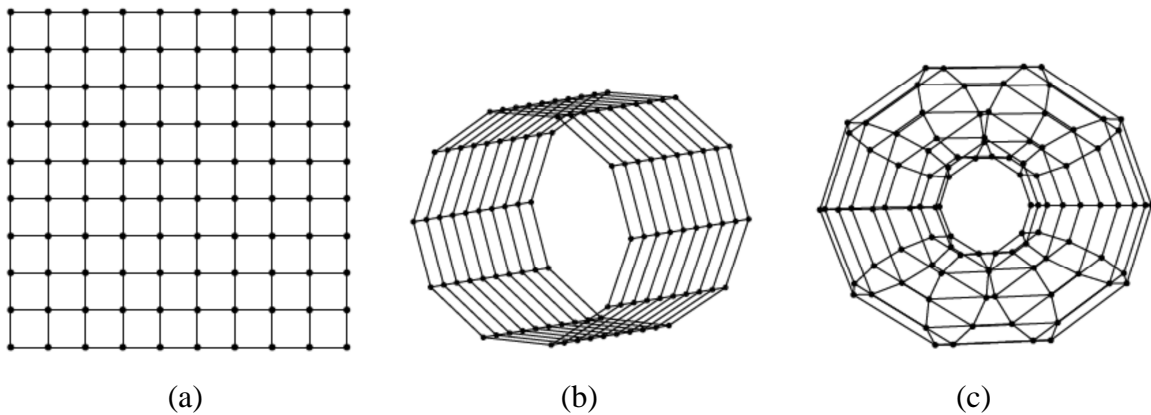


Figura 2.4 - Exemplos de diferentes formas de mapas: formato de grade (a) e formatos cilíndrico (b) e toroidal (c) para acomodar dados circulares. Adaptado de Vesanto *et al.* (2000).

O funcionamento de um SOM pode ser compreendido em etapas distintas. Segundo Hewitson e Crane (2002), o passo inicial na rotina SOM é definir uma distribuição aleatória de nós dentro do espaço de dados. Os nós são definidos por um vetor de referência com coeficientes de peso. Cada coeficiente está relacionado com uma variável particular de entrada. Se, por exemplo, o primeiro conjunto de dados é composto por uma série temporal de PNMM sobre uma matriz  $10 \times 20$ , cada nó no SOM terá um vetor de referência de 200 coeficientes de peso. Portanto, para cada nó, o *enésimo* coeficiente do vetor de referência será associado com a *enésima* variável de entrada e cada nó tem um vetor de referência igual em dimensão aos dados de entrada.

Conforme cada dado de entrada é tratado pelo SOM, a similaridade entre o dado de entrada e cada um dos vetores de referência dos nós é calculada. Nesta etapa, conhecida como etapa competitiva ou fase de ordenamento, que se define o neurônio mais adequado, ou BMU, para cada dado de entrada. A escolha da melhor correspondência entre o vetor de entrada e o vetor de referência é feita por meio do critério da menor distância (euclidiana) entre os dois vetores, representada pela equação 2.1 (AFFONSO, 2011).

$$i(x) = \arg \min \|x - w_j\| \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.1)$$

Onde  $i(x)$  é a representação do neurônio da entrada  $x$ , e  $w_j$  é o vetor referência.

De acordo com Affonso (2011) quantificar a semelhança entre os vetores de referência e o quanto eles se aproximam do vetor de dados de entrada é empregada a função da distância Euclideana (DE), definida pela equação 2.2:

$$D_E = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (2.2)$$

Onde  $x_n$  são as coordenadas dos vetores de entrada e  $y_n$  são as coordenadas dos vetores de referência com seus respectivos coeficientes de peso.

Na etapa cooperativa, conhecida também como fase de ajuste fino, o vetor de referência do nó com melhor resultado, o BMU, é corrigido/modificado de modo a reduzir a diferença com o vetor de entrada por um fator de correção definido pelo usuário.

Segundo Kohonen (1990) e Fernandes (2011), a regra de correção/modificação dos vetores de referência pode ser expressa pelas equações 2.3 e 2.4:

$$w_j(t + 1) = w_j(t) + \alpha(t)[x(t) - w_j(t)] \quad \text{para } j \in N_c(t) \quad (2.3)$$

e

$$w_j(t + 1) = w_j \quad \text{caso contrário} \quad (2.4)$$

Onde  $t$  representa o tempo. O  $x(t)$  é o vetor de entrada no tempo  $t$  correspondente ao vetor de referência definido aleatoriamente no passo inicial e  $\alpha(t)$  é o fator de correção no tempo  $t$  que deve decrescer lentamente ao longo do tempo e está definido entre 0 e 1.  $N_c$  representa a vizinhança topológica correspondente ao neurônio vencedor e é uma função que não cresce com o tempo nem com a distância entre a unidade corrigida/modificada e a unidade vencedora, definindo assim a região de influência de um dado de entrada.

A principal diferença com a maioria dos algoritmos de agrupamento é que não é apenas o nó mais próximo que é atualizado durante este processo de correção/modificação, mas todos os nós em torno também são incrementalmente ajustados para o vetor de entrada em proporção inversa à sua distância do nó inicial (Figura 2.5).

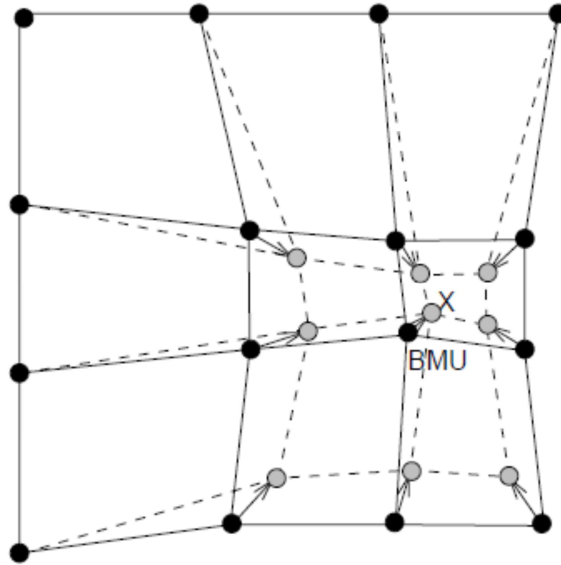


Figura 2.5 - Processo de correção/modificação do BMU e seus vizinhos em direção à amostra de entrada X. As linhas sólidas e pontilhadas correspondem respectivamente a situação anterior e posterior ao processo de correção. Adaptado de Vesanto *et al.* (2000).

Desta forma, no processo de minimização das distâncias é definido o fator de vizinhança topológica (Figura 2.6) na qual a interatividade entre os neurônios ocorrerá (um neurônio ativado tende a excitar os neurônios em sua vizinhança imediata). Sendo assim, cada um dos neurônios terá alguma influência sobre seus vizinhos.

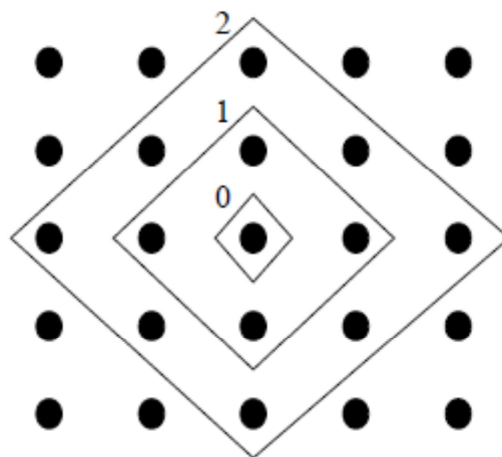


Figura 2.6 - Exemplo de topologia retangular da vizinhança de um neurônio. O polígono central corresponde ao valor 0 do fator de vizinhança, o segundo polígono corresponde ao fator 1 e o maior corresponde ao fator 2. Adaptado de Vesanto *et al.* (2000).

Cada atribuição de novos valores de correção/modificação e vizinhança topológica abrangendo toda a rede é chamada de época. Este processo continua de forma interativa durante vários ciclos ou épocas e percorre o conjunto de dados até que não haja mais alterações nos locais de nós. Neste ponto assume-se que o mapa de nós está estabilizado ou auto-organizado.

Os vetores de referência no SOM são interativamente ajustados de modo a envolver todo espaço de dados, e cada nó representa uma aproximação da posição média das amostras próximas no espaço de dados. Este procedimento efetivamente identifica pontos representativos que abrangem o contínuo dos dados.

Hewitson e Crane (2002) resumidamente explicam que o primeiro conjunto de interações de treinamento utiliza pontos aleatórios de partida para os vetores de referência. Isto produz uma primeira distribuição de nós. O segundo conjunto usa os vetores finais dos nós do primeiro conjunto como os pontos de partida e um fator de correção para refinar o mapeamento. O resultado líquido é que o SOM irá agrupar os nós em regiões do espaço de dados que possuam alta densidade de dados (onde há mais informações).

Desta forma, o SOM serve para definir uma série de pontos ou nós que sejam representativos da nuvem de dados. Poucos nós do SOM são alocados onde há dados esparsos, enquanto muitos nós são alocados para regiões do espaço de dados em que há uma maior informação. Este comportamento permite a discriminação entre as mais sutis variações. Enquanto a medida de semelhança entre os dados e o vector de referência é linear, o interativo processo de formação permite que o SOM contemple distribuições de dados não lineares.

Sheridan e Lee (2011) esclarecem que a implementação do SOM requer várias decisões distintas, tais como o fator de correção no tempo, a vizinhança topológica onde os nós adjacentes são modificados e o número de interações. A seleção inicial dos valores destes parâmetros em muitos casos é baseada em tentativa e erro. Geralmente, todo o processo é repetido duas vezes, primeiro com valores relativamente grandes para generalizar a estrutura do SOM, e em seguida com um menor raio de vizinhança para refinar os nós em áreas de alta densidade de dados.

Segundo Sheridan e Lee (2011), em alguns estudos sugere-se que as diferenças no mapeamento final provocadas pelas alterações do fator de correção e do raio da vizinhança são relativamente mínimas, fazendo com que a solução final seja bastante robusta independente de decisões subjetivas. Outras decisões do usuário são semelhantes às decisões tomadas em outros métodos de classificação sinótica, como por exemplo, qual variável mapear e qual domínio utilizar.

A decisão que recebe mais atenção na literatura sobre SOM envolve o número de nós a criar. Segundo Sheridan e Lee (2011), a maioria dos estudos geralmente utiliza uma metodologia subjetiva. Em muitos casos, várias quantidades diferentes de nós são produzidas e, em seguida, os mapeamentos resultantes são avaliados em cada caso para determinar a quantidade suficiente para representar a variabilidade dos dados da área de estudo. Uma vez que o número ideal de nós é escolhido, os diferentes parâmetros iniciais são então comparados (fator de correção no tempo, a vizinhança topológica e o número de interações), são então comparadas com o objetivo final de selecionar o mapeamento que minimiza a distância euclidiana média entre os nós e os dados de entrada.

### **2.2.2 – Aplicações do SOM**

Neste item são revistos trabalhos relevantes que utilizaram o SOM para obter resultados em diversas áreas de pesquisa. São priorizados os trabalhos que tiveram como objetivo realizar classificações e climatologias sinóticas, mas também são apresentados trabalhos com objetivos diversos para demonstrar a versatilidade e utilidade desta ferramenta.

Kohonen et al. (2002) constata que o algoritmo do SOM tem atraído um grande interesse entre pesquisadores e profissionais em uma ampla variedade de campos. Os autores reuniram uma lista de 2092 artigos científicos publicados entre os anos de 1998 e 2002 que utilizaram tal algoritmo, que se beneficiaram dele ou que contenham suas análises. A lista se destina a servir como fonte para pesquisas bibliográficas, uma vez que o SOM foi analisado extensivamente e aplicado dentro de áreas que vão desde as ciências de engenharia à medicina, biologia e economia.

Huth *et al.* (2008) revisaram os avanços recentes na classificação dos padrões de circulação dentro da climatologia sinótica e caracterizaram três grupos básicos de

classificações: subjetiva, híbrida e objetiva. No grupo específico de métodos de classificação não lineares, as redes neurais são o exemplo mais proeminente. Os autores esclarecem que os SOMs são usados exclusivamente para trabalhos de classificação e consistem basicamente de um conjunto de mapas bidimensionais que retratam padrões típicos. Os autores também destacam que a introdução dos SOMs nas ciências atmosféricas foi feita pioneiramente em trabalhos como de Hewitson e Crane (2002) e Cavazos (2000).

Sheridan e Lee (2011) fazem uma revisão dos principais desenvolvimentos e aplicações climatológicas do SOM na literatura. Os autores constatam que o SOM pode ser utilizado na análise sinótica climatológica de uma maneira similar aos métodos de agrupamento. No entanto, como os resultados do SOM geralmente são representados por uma matriz bidimensional de padrões, as categorias sinóticas na matriz representam efetivamente um continuum de classes sinóticas, ao contrário dos resultados discretos produzidos através de métodos mais tradicionais.

Liu e Weisberg (2011) elaboraram um levantamento das aplicações do SOM em meteorologia e oceanografia. Os autores fazem uma revisão dos recentes avanços nas aplicações do SOM para análise de variedades de conjuntos de dados em meteorologia e oceanografia, incluindo longas séries temporais de dados de satélite e de radar, de sensoriamento remoto e de resultados de modelo, numéricos. As vantagens e limitações do SOM são discutidas no que diz respeito aos métodos de análise de dados convencionais como o usado na comunidade científica. Sugestões também são dadas sobre como ajustar os parâmetros de SOM para o mapeamento preciso das características meteorológicas e oceanográficas. A revisão cita diversos exemplos do uso do SOM com dados meteorológicos de PNMM, altura geopotencial, temperatura do ar, umidade, vento, evaporação, precipitação e nebulosidade. Como conclusão, os autores afirmam que existem grandes oportunidades para os meteorologistas, oceanógrafos e cientistas do clima em aplicações frutíferas do SOM, pois este se apresenta como uma ferramenta matemática promissora para extração de características e reconhecimento de padrões a partir de conjuntos de dados grandes e complexos.

Astel *et al.* (2007) aplicaram três técnicas de classificação com base na análise de componentes principais, a análise de *cluster* e mapas auto-organizados a um grande conjunto de indicadores químicos de qualidade da água de rios. O estudo foi realizado

utilizando dados de monitoramento da qualidade da água a longo prazo. As vantagens do algoritmo SOM e sua capacidade de classificação e visualização de grandes conjuntos de dados ambientais foram exploradas ao máximo segundo os autores. Os resultados obtidos permitiram a detecção de agrupamentos naturais de locais de monitoramento de qualidade semelhante da água, uma vez que o SOM permite a observação simultânea de alterações espaciais e temporais. Os autores concluem que a separação objetiva poderia levar a uma otimização de redes de monitoramento de rios, melhorando o rastreamento de mudanças naturais e antrópicas ao longo do curso d'água.

Pearce *et al.* (2011), assumindo que a influência de circulações de escala sinótica na qualidade do ar é uma área de crescente interesse para a gestão da qualidade do ar, apresentam uma análise onde a gama de padrões de circulação de escala sinótica na região de Melbourne na Austrália são determinadas e ligadas à qualidade do ar regional. O algoritmo do SOM foi aplicado a dados diários de reanálise de PNMM para obter vinte padrões sinóticos de grande escala na região australiana. Uma vez determinados os padrões, estes foram empregadas no âmbito de um modelo aditivo generalizado para identificar as ligações entre a circulação sinótica e as mudanças observadas nas concentrações de poluentes atmosféricos. Os autores concluem que a abordagem unificada do SOM com o emprego de modelagem fornece um conjunto complementar de ferramentas capazes de identificar toda a gama de padrões sinóticos de circulação de uma determinada região e quantificar como elas influenciam a qualidade do ar local.

Wang *et al.* (2013) observam que dados de séries temporais em formato de pontos de grade estão cada vez mais disponíveis para a pesquisa climatológica. A geração de imagens de Água de Neve Equivalente (ANE) feita com uso de micro-ondas e acumuladas em base diária por mais de duas décadas representam grandes desafios para a exploração e interpretação. Sendo assim, os autores introduziram o uso de diversas abordagens na série de dados em pontos de grade combinando com o uso do SOM para reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados. Como resultado, foi identificada uma série de padrões de ANE distintos, incluindo as regiões montanhosas, costeiras e continentais.

Richardson *et al.* (2003) explicam que muitas vezes é difícil extrair padrões interpretáveis a partir de imagens de satélite uma vez que os conjuntos de dados são grandes e geralmente não lineares. Neste trabalho metodológico, os autores descrevem o



SOM como um tipo de rede neural artificial utilizada na identificação de padrões. A capacidade do SOM para extrair padrões de uma variedade de dados de satélites e imagens térmicas é exemplificada.

Em Hsu e Li (2010), um método de análise de dados é proposto para agrupar e explorar as características espaço-temporais de 22 anos de dados de precipitação (1982-2003) para Taiwan. A Transformada Wavelet e o SOM foram combinados, sendo que a primeira foi utilizada para extrair características dinâmicas e multitemporais da série de precipitação e a última foi aplicada para identificar objetivamente aglomerados espacialmente homogêneos. Os autores argumentam que o reconhecimento de regiões hidrologicamente homogêneas e a identificação das características da precipitação associada promovem a eficiência na gestão dos recursos hídricos.

Para Crimmins (2006), condições extremas de tempo associadas à ocorrência de queimadas são geralmente consideradas como eventos discretos ao invés de serem consideradas como parte de uma variabilidade meteorológica e climatológica. Desta forma, este autor procedeu com uma abordagem climatológica sinótica, através do uso do SOM, para examinar a climatologia sazonal das condições climáticas extremas de fogo em todo o sudoeste dos Estados Unidos (Arizona e Novo México), durante o período de 1988 a 2003. Os resultados mostraram que três padrões de circulação principais, representando amplo fluxo de sudoeste e grandes gradientes de altura geopotencial, estão associados com mais de 80% dos dias com condições para fogo extremo.

Schalkwyk e Dyson (2013) investigaram aspectos das ocorrências de nevoeiros no aeroporto internacional da Cidade do Cabo, África do Sul, utilizando 13 anos de dados diários de PNMM. Observações horárias de superfície foram utilizadas para identificar os tipos de nevoeiro que mais frequentemente afetam a área do aeroporto. O SOM foi aplicado para determinar os tipos de circulações sinóticas dominantes associadas com as ocorrências de nevoeiro. Os autores concluem que as técnicas apresentadas podem ser usadas para fornecer aos previsores uma descrição detalhada dos tipos de nevoeiro que ocorrem com frequência, suas características, e a circulação sinótica a eles associadas.

Johnson *et al.* (2008) utilizaram o SOM com dados de reanálise do NCEP-NCAR para avançar na perspectiva de tratar os padrões de teleconexões do Hemisfério Norte como um contínuo e lançar luz sobre a migração secular para leste da *North Atlantic Oscillation* (NAO) que começou no final de 1970. Uma análise com 20 padrões de

PNMM obtidos com SOM, para o inverno no Hemisfério Norte, revela uma continuidade de padrões que correspondem estritamente com os padrões de teleconexões conhecidos. Os resultados também revelaram que a variabilidade interdecadal do campo hemisférico de PNMM pode ser entendida em termos de mudanças na distribuição de frequências dentro do contínuo de padrões de pressão descritos pelo SOM.

Sheridan e Lee (2012), com intuito de avançar além da simples correlação entre os índices de teleconexões, temperatura e anomalias de precipitação, elaboraram uma revisão de trabalhos que realizaram climatologias sinóticas para fornecer uma visão sobre a manifestação espaço-temporal das anomalias envolvidas nas teleconexões. Desta forma, obtem-se uma maior compreensão em termos da relação entre anomalias, teleconexões e frequências dos padrões de circulação que podem levar a eventos extremos sobre áreas específicas. Os autores citam uma série de trabalhos que se concentram em duas linhas de pesquisa principais: uma na circulação do Atlântico Norte com foco na *North Atlantic Oscillation* (NAO) e outra na circulação do Pacífico Norte e Pacífico Tropical com foco no El Niño-South Oscillation (ENSO). Os autores concluem que pesquisas de teleconexões com abordagens sinóticas podem ser divididas em diversas classes e que em alguns casos a metodologia sinótica é aplicada a uma teleconexão como prova de conceito da ferramenta e citam como exemplo a metodologia dos SOMs.

Rousi *et al.* (2013) realizaram estudo com objetivo principal de comparar dois métodos diferentes de reconhecimento de padrões. O primeiro, a Análise de Componentes Principais (PCA), método frequentemente utilizado em climatologia, e o segundo o SOM. A fim de comparar as duas metodologias, dois padrões de teleconexões foram escolhidos, a *North Atlantic Oscillation* (NAO), que afeta principalmente o clima da Europa Ocidental, e o padrão *North Sea–Caspian Pattern* (NCP), que afeta principalmente o leste do Mediterrâneo e da Península Balcânica. Os padrões de teleconexões foram estudados com anomalias de altura geopotencial em 500 hPa no período de inverno. De acordo com os resultados, as metodologias de PCA e SOM capturam a variabilidade do modo principal sobre a área de trabalho, representada pelo padrão NAO, mas o SOM é capaz de capturar até os padrões menos pronunciados, tais como o NCP.

Cavazos (2000) examina alguns dos mecanismos físicos e ligações remotas associadas com extremos de precipitação de inverno nos Balcãs. Dados diários de

reanálises do *National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research* (NCEP-NCAR) foram usados para determinar o papel da circulação e da umidade atmosférica em eventos extremos, e também em escalas de tempo intrasazonais e interanuais, para encontrar possíveis vínculos com padrões da *North Atlantic Oscillation* (NAO) e da *Arctic Oscillation* (AO). A classificação não linear do SOM foi empregada para obter os modos climáticos e as anomalias que dominaram durante o período de 1980-1993. Os resultados da classificação do SOM mostram o intenso fluxo meridional sobre a Europa Central e Oriental, aliado ao aumento das perturbações de inverno no Mediterrâneo central e uma língua de umidade no nível de 700 hPa a partir do leste do Mediterrâneo e mar Negro durante eventos anormalmente chuvosos na região búlgara.

Em Cavazos (1999) apresenta-se uma nova abordagem de *downscaling* para o diagnóstico do clima, baseado em técnicas que derivam as relações dos controles atmosféricos de grande escala com o clima local. O estudo documenta as condições de grande escala associadas a eventos extremos de precipitação no nordeste do México e sudeste do Texas, durante o período 1985-1993, e demonstra a capacidade do SOM para simular relações realistas entre os campos de circulação e umidade e a precipitação diária em escala local.

Hewitson e Crane (2002) apresentam o SOM como uma ferramenta para descrever a função de distribuição multidimensional de um conjunto de dados de PNMM em pontos de grade definidas para o nordeste dos Estados Unidos. Segundo os autores, o SOM identifica as principais características da circulação de escala sinótica sobre a região. Com efeito, o mapeamento do SOM representa uma distribuição não linear, de sobreposição, não discretas de diferentes tipos de circulação. Os padrões de circulação são facilmente visualizados em uma matriz de duas dimensões que coloca classes semelhantes adjacentes uma a outra e classes diferentes distantes no espaço de mapeamento. Neste trabalho, o SOM é usado para descrever mudanças na circulação sinótica ao longo do tempo, relacionando a circulação com dados de precipitação.

Schuenemann *et al.* (2009) analisaram os padrões sinóticos e a climatologia da precipitação sobre a região do Atlântico Norte para melhorar a compreensão da influência atmosférica para o balanço de massa da camada de gelo da Groenlândia. O SOM foi aplicado aos dados de reanálise de PNMM no período 1961 a 1999 e foram encontrados

um total de 35 padrões. Os autores isolaram as contribuições anuais de precipitação de cada padrão de pressão e observaram que metade da precipitação média anual sobre a Groenlândia estava associada com apenas 11 dos 35 modos sinóticos.

Emmanuel *et al.* (2012) dentre outras ferramentas, utilizaram o SOM para caracterizar a variabilidade espacial e temporal dos diferentes tipos de eventos de chuva em escalas que são consistentes com as aplicações hidrológicas urbanas. Os autores utilizaram um total de 24 períodos de chuva e encontraram quatro tipos diferentes de campos de precipitação, que exibem muitas escalas diferentes de variabilidade.

Lennard e Hegerl (2014) utilizaram 31 anos de dados de precipitação de duas estações meteorológicas na África do Sul, que possuem regimes pluviométricos diferentes, para investigar a relação entre a circulação de escala sinótica e o comportamento da chuva. Os autores concluem que eventos de chuvas extremas estão associados a determinados modos de circulação atmosférica e ressaltam a capacidade do SOM em relacionar forçantes sinóticas com os regimes de precipitação observados. Além disso, destaca-se que o SOM é útil para avaliar as respostas em escala local que mudanças nas características de circulação atmosférica em escala sinótica podem provocar.

Michaelides *et al.* (2007) observam que cartas sinóticas descrevem a distribuição espacial de vários parâmetros meteorológicos e constituem um instrumento indispensável para os meteorologistas realizarem o diagnóstico e previsão das condições de tempo. Diante deste contexto, os autores investigaram a eficácia do emprego do algoritmo do SOM na identificação objetiva de padrões sinóticos em cartas meteorológicas. Para alcançar este objetivo os autores utilizaram análises diárias de altura geopotencial em 500 hPa das 00 UTC do ano de 1996 em um domínio que englobava a Europa e a costa norte da África, gerando grupos de 15 e 20 classes de padrão sinótico. Os autores informam que os resultados indicam que a presente técnica produziu uma classificação satisfatória dos padrões sinóticos sobre a região geográfica de interesse. Finalmente, analisando a frequência de cada classe sinótica, os autores identificam uma forte influência sazonal.

Tymvios *et al.* (2010), considerando que chuvas induzidas dinamicamente estão fortemente ligadas com padrões sinóticos de circulação atmosférica em níveis superiores, investigaram a relação entre dias de eventos de grande volume de precipitação no leste do Mediterrâneo e os padrões de altura geopotencial associados em 500 hPa. Foram

utilizados dados de reanálise do projeto ERA40 do *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF) e dados diários de precipitação de uma rede de 23 pluviômetros, sendo selecionados 156 dias de chuvas extremas. Para reduzir o número de padrões diferentes e simplificar o processamento dos dados, os dias de entrada foram classificados em grupos sinóticos com características semelhantes utilizando a arquitetura SOM. Desta forma, padrões sinóticos foram agrupados em 9, 18, 27 e 36 grupos. A relação dos padrões sinóticos de ar superior e volumes de chuva foi criada e a classificação com 36 membros provou ser mais eficiente neste caso. Segundo os autores, dos casos selecionados a associação entre eventos de chuva extrema e os padrões específicos apresentaram boa concordância com a percepção dos previsores a respeito das situações que podem levar à precipitação excessiva.

Nishiyama *et al.* (2007) utilizou o SOM para compreender e visualizar as complexas relações entre os campos sinóticos e os eventos de chuvas intensas nas Ilhas Kyushu, no sudoeste do Japão durante a estação chuvosa. Para isso, os autores assumiram que os padrões sinóticos de interesse poderiam ser representados pelas componentes do vento em 850 hPa e pelos valores de água precipitável. Após a aplicação do algoritmo do SOM, oito padrões sinóticos foram obtidos. Os autores destacam que nem todos os padrões sinóticos ocorridos durante a estação chuvosa provocam chuva forte, mas ressaltam que um dos oito padrões obtidos está intimamente relacionado à ocorrência de eventos de chuvas intensas. Finalmente os autores concluem que a técnica do SOM pode ser uma ferramenta eficaz para a classificação de campos sinóticos não-lineares complexos e identificação de eventos de chuvas intensas.

## CAPÍTULO III – METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados inicialmente os dados de precipitação e os critérios utilizados para determinação dos eventos chuvosos extremos ocorridos no Município do Rio de Janeiro. Posteriormente são apresentados os dados utilizados para representarem as condições sinóticas associadas a cada um dos eventos extremos de chuva. Em seguida descreve-se a metodologia empregada na preparação, processamento e análise dos dados, que permitirá classificar os padrões sinóticos mais relevantes associados aos eventos extremos de precipitação.

### 3.1 – Dados de Precipitação e Definição de Eventos de Chuvas Extremas

Os dados de precipitação utilizados neste trabalho são provenientes das observações realizadas pela rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio, que opera no município do Rio desde setembro de 1996.

No sistema Alerta Rio, meteorologistas e técnicos em meteorologia fazem o acompanhamento ininterrupto das condições do tempo, objetivando identificar a presença e aproximação de sistemas meteorológicos que possam provocar chuvas intensas sobre o município do Rio de Janeiro e causar danos à vida dos cidadãos e às propriedades.

A rede de monitoramento pluviométrico atualmente é composta de 33 estações telepluviométricas automáticas e as informações de localização, cotas, endereços e ficha técnica podem ser acessadas em [http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page\\_id=27](http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/?page_id=27). Os dados de cada estação são transmitidos automaticamente a cada 15 minutos, via celular, e a disponibilidade de dados em tempo real é superior a 99,8%.

O banco de dados do Alerta-Rio foi escolhido, nesta dissertação, porque possui alta resolução espaço temporal no município do Rio de Janeiro, com dados confiáveis, visto que eles são consistidos, e a rede telemétrica possui manutenção e calibração periódicas.

O período analisado estende-se de janeiro de 1997 à abril de 2014, obtendo-se assim 17 anos de análise. A distribuição espacial da rede de pluviômetros foi determinada para atender ao monitoramento e emissão de alertas de chuvas intensas e deslizamentos para a população. Sendo assim, estas não estão homoganeamente distribuídas, existindo

uma maior concentração de estações nas Zonas Sul e Norte e na Baixada de Jacarepaguá, abrangendo o entorno do maciço da Tijuca, e uma menor concentração na Zona Oeste e no entorno do maciço da Pedra Branca (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Localização das estações telepluviométricas e seus respectivos números de identificação (tabela 1.1). Fonte: Sistema Alerta Rio. Imagem Google Earth.

Os totais pluviométricos diários foram calculados agregando-se o total de precipitação acumulada em 24 horas. Considerando o acumulado originalmente medido a cada 15 minutos na rede de pluviômetros do Alerta Rio, a totalização do acumulado em 24 horas será feita com os dados contidos no intervalo das observações de 9h e 15min local (12:15 UTC) do dia anterior e 9h local (12:00 UTC) do referido dia. A definição deste intervalo é baseada na regulamentação regional da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para registro de acumulados de precipitação em 24 horas. Além disto, este procedimento permite comparação com estudos anteriores.

Após a totalização dos acumulados em 24 horas para todas as estações telepluviométricas, estes dados foram utilizados para calcular os valores diários das médias espaciais de precipitação na rede de pluviômetros. Desta forma, pode-se focar a análise apenas sobre os eventos chuvosos que produziram precipitação generalizada associada à atuação de sistemas meteorológicos de escala sinótica, enquanto filtra-se a maioria dos eventos que produziram chuva forte, porém de forma localizada. Esta abordagem também foi utilizada nos estudos de Neto (2012) e Dolif e Nobre (2012).

Uma vez calculada as médias diárias de precipitação da rede de pluviômetros, definiu-se as datas de ocorrência dos eventos de chuva extrema. Foram definidos como eventos extremos de precipitação as ocorrências que produziram médias diárias da rede de pluviômetros superiores a 50 mm. Este limiar é o valor adotado pelo SWIC da OMM (<http://severe.worldweather.org/rain/>) para classificar um evento severo de precipitação. Além disto, a adoção deste critério permitirá comparações com estudos anteriores de Neto (2012) e Dolif e Nobre (2012).

### **3.2 – Classificação dos Padrões Sinóticos**

Com a definição das datas dos eventos de chuva extrema no município do Rio, foi feita a aquisição dos dados necessários para caracterizar a condição sinótica no dia de cada evento. Para esta tarefa utilizou-se os dados provenientes do banco de dados da reanálise do ERA-Interim do ECMWF (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>).

O conjunto de dados das reanálises utilizados representa os valores das variáveis meteorológicas no horário das 00 UTC correspondente ao dia de cada evento. Desta forma, utiliza-se observações feitas durante o período de acumulação dos volumes de chuva.

Os dados do ERA-Interim estão distribuídos em uma grade regular com resolução de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  em latitude e longitude. O domínio inicialmente utilizado para análise está compreendido pelas latitudes  $0^\circ$  e  $-50,25^\circ\text{S}$  e pelas longitudes  $279,75^\circ\text{W}$  e  $350,25^\circ\text{W}$ , no entanto estes limites sofreram alterações em função do processo de ajuste dos parâmetros da rede neural do SOM, sendo o domínio final utilizado para mapeamento e confecção dos campos médios compreendidos pelas latitudes  $-14,25^\circ\text{S}$  e  $-49,50^\circ\text{S}$  e pelas longitudes  $279,75^\circ\text{W}$  e  $350,25^\circ\text{W}$ . As variáveis utilizadas para caracterização da condição sinótica dos eventos extremos foram a pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM), para caracterização dos sistemas sinóticos em superfície; total de água precipitável, para caracterização da distribuição espacial da umidade; e altura geopotencial em 500hPa, para caracterização dos sistemas sinóticos em altitude.

Para realizar a classificação dos padrões sinóticos com o algoritmo SOM foi empregado o uso do software Matlab e o respectivo pacote SOM Toolbox disponível em <http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/download/>. Esta parte da metodologia foi



conduzida com procedimentos presentes nos trabalhos de Hewitson e Crane (2002), Richardson *et al.* (2003), Nishiyama *et al.* (2007), Michaelides *et al.*, (2007) e Affonso (2011).

Para utilização deste software, os dados de reanálise precisaram ser pré-processados para ajustá-los ao formato adequado. A formatação dos dados é uma etapa fundamental e necessária para a correta utilização da ferramenta de análise.

Nesta formatação, cada dia correspondente a um evento extremo será considerado uma amostra. Para cada amostra, os dados em grade precisarão ser transformados em um único vetor em formato de linha, concatenando as sequências relativas a cada variável (PNMM, água precipitável e altura geopotencial em 500 hPa). Desta maneira, o resultado final será uma matriz de entrada para o SOM Toolbox composta pelo número de colunas correspondente a todos os pontos de grade utilizados e pelo número de linhas correspondentes à quantidade de amostras (dias de eventos extremos) (Figura 3.2).

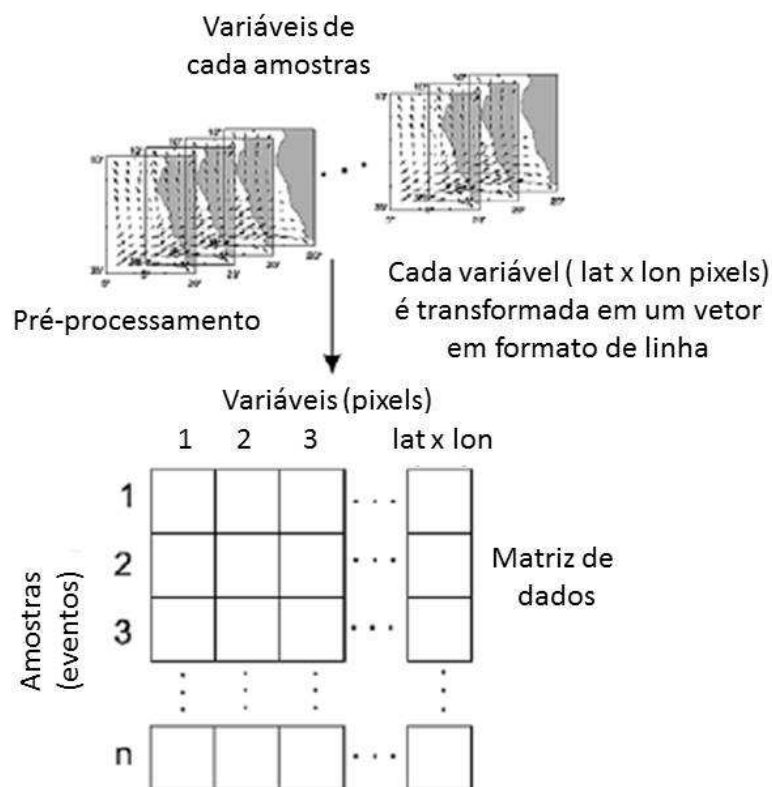


Figura 3.2 - Esquema representativo do pré-processamento necessário para utilização do SOM Toolbox. Adaptado de Richardson *et al.* (2003).

Por exemplo, com o domínio inicialmente utilizado, compreendido pelas latitudes 0° e 50,25°S e pelas longitudes 279,75°W e 350,25°W, com a resolução de 0,75° x 0,75°, cada variável de uma amostra possuiria 6.460 pontos de grade. Na opção de utilizar mais de uma variável para caracterizar a condição sinótica do evento, cada amostra possuiria o número de pontos de grade resultantes da multiplicação de 6.460 pelo número de variáveis utilizadas. No caso específico do uso de 3 variáveis cada amostra apresenta 19.380 pontos de grade e todas as 46 amostras juntas totalizam 891.480 valores que foram fornecidos para o SOM. Desta forma, as dimensões finais da matriz de entrada para o SOM seriam de:

**-19.380 Colunas = 6.460 x n° de variáveis (pressão, água precipitável e altura geopotencial).**

**-46 Linhas = número de amostras (dias de eventos extremos).**

Com a formatação dos dados, a matriz de entrada é inserida no algoritmo do SOM, sendo necessária a definição dos parâmetros da rede neural, como por exemplo o número de interações, fatores de correção, vizinhança topológica e número de nós. Diferentes configurações de parâmetros foram testadas e posteriormente avaliadas através do cálculo do Coeficiente de Silhouette (CS) (SANTOS *et al.* 2014; HSU e LI, 2010; ROUSSEEUW, 1987).

O CS foi utilizado para determinar a qualidade dos agrupamentos formados, avaliando como cada amostra é semelhante com outras amostras inseridas no mesmo grupo, em comparação com amostras inseridas no grupo mais próximo dentre todos os demais agrupamentos (Figura 3.3)

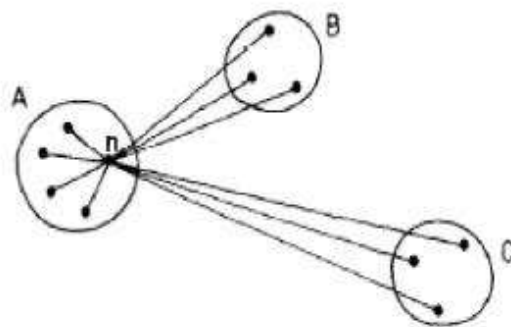


Figura 3.3 - Ilustração dos elementos envolvidos no cálculo do Coeficiente de Silhouette, onde a amostra n pertence ao grupo A. Adaptado de Rousseeuw (1987).

O CS oferece a vantagem de depender apenas da divisão real das amostras em grupos, sendo independente do algoritmo de agrupamento que foi utilizado para obtê-los. Como consequência, o CS pode ser utilizado para melhorar os resultados da classificação sinótica através da comparação das diferentes possibilidades de agrupamentos obtidos com configurações distintas dos parâmetros do SOM.

O CS é calculado de acordo com a seguinte equação 3.1 (ROUSSEEUW, 1987):

$$CS(n) = \frac{B(n)-A(n)}{\text{máx}\{A(n),B(n)\}} \quad (3.1)$$

Onde  $A(n)$  é a distância média, medida como uma distância euclidiana, da enésima amostra em relação a todas as outras amostras dentro do mesmo agrupamento e  $B(n)$  é a distância média da enésima amostra em relação a todas as outras amostras alocadas no agrupamento mais próximo. Os valores deste coeficiente variam de -1 a 1. Valores próximos de 1 indicam que o objeto está inserido no grupo correto. Valores próximos de -1 indicam que a amostra foi, provavelmente, alocada em um agrupamento inadequado. Os valores próximos de 0 indicam que o objeto está perto do limite entre dois grupos distintos e não pertencem a um agrupamento ou outro.

Cada amostra possui um CS e a média global dos coeficientes (CS Global) de todas as amostras permite avaliar o desempenho geral do agrupamento (SANTOS *et al.* 2014 e HSU e LI, 2010), de acordo com a equação 3.2:

$$CS\ Global = \frac{1}{i} \sum_{n=1}^i CS(n) \quad (3.2)$$

Onde  $i$  é o número total de amostras agrupadas. A configuração que apresenta o melhor resultado global é escolhida, representando assim o melhor ajuste dos parâmetros do SOM para agrupamento das amostras utilizadas.

Os parâmetros testados foram o número total de interações, o número de interações da fase de ordenamento, o fator de correção inicial da fase de ajuste fino, o

fator de correção final da fase de ajuste fino, o fator de vizinhança durante a fase de ajuste fino e o número de nós do mapeamento.

Inicialmente utilizou-se um domínio espacial fixo e cada um dos parâmetros foram sendo modificados individualmente e os resultados da modificação avaliados através do CS global. Esta primeira etapa de ajustes resultou em um total de 50 rodadas de testes de sensibilidade.

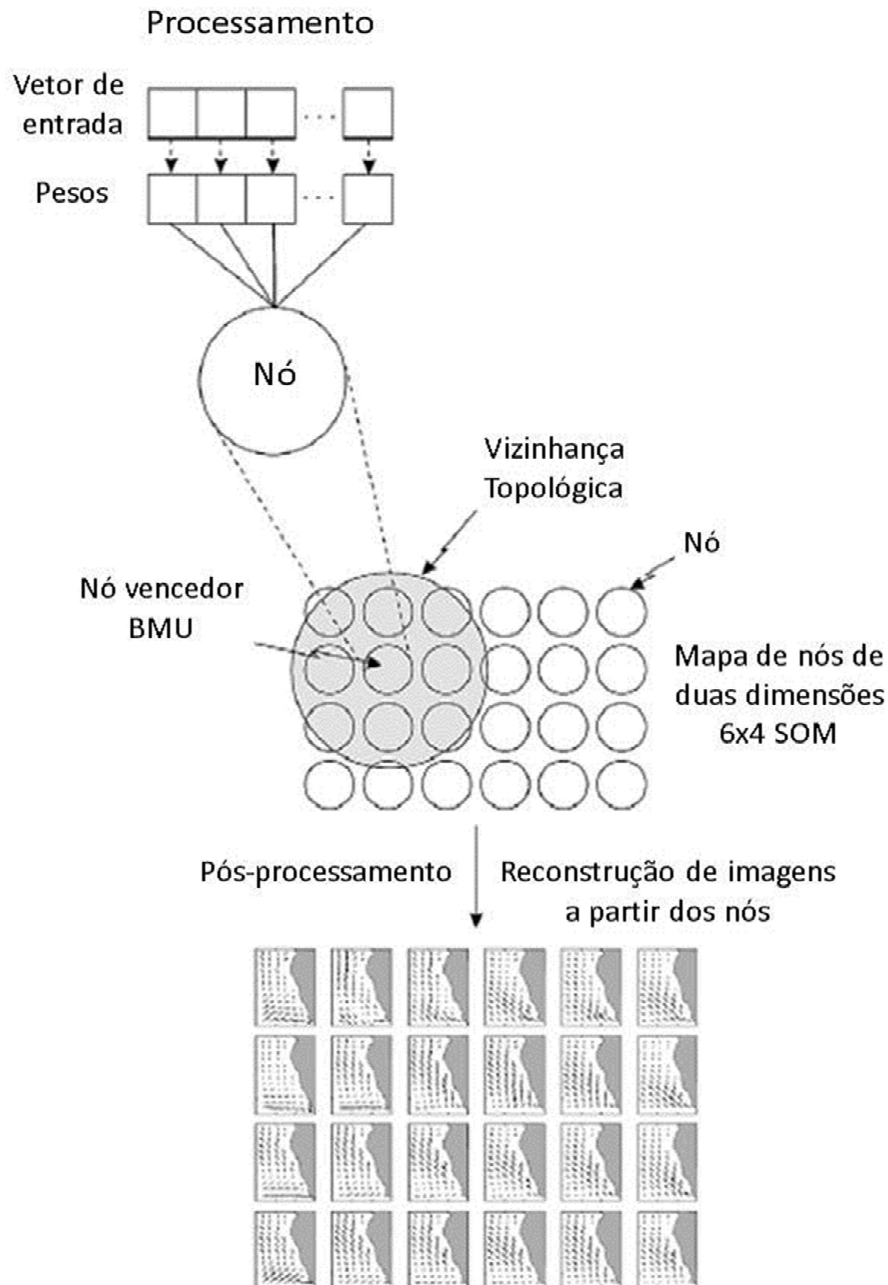


Figura 3.4 - Esquema representativo do processamento e pós-processamento para confecção dos mapas auto-organizados. Adaptado de Richardson *et al.* (2003).

Posteriormente, após a definição do melhor conjunto de parâmetros, foram feitos testes de sensibilidade modificando-se apenas o domínio espacial, onde os limites de latitude e longitude foram sendo alterados individualmente e também avaliados através do CS global. Esta segunda etapa de ajustes resultou em um total de 24 rodadas de teste. Finalmente, após definição do melhor domínio, foram feitas novas modificações individuais dos parâmetros da rede neural, elegendo-se a configuração ideal do algoritmo do SOM como aquela que apresentou o valor de CS global mais próximo de 1. A etapa final de ajuste foi composta por 20 novos testes de sensibilidade.

Após a definição do melhor agrupamento feito pelo SOM, os dados em formato de grade do padrão sinótico representado por cada nó do mapa auto-organizado foram recriados a partir da distribuição espacial média das três variáveis de cada amostra. Isto foi feito através do cálculo da média em cada ponto de grade, considerando todas as amostras relacionadas ao padrão sinótico correspondente (Figura 3.4).

As principais etapas da metodologia, incluindo aquisição dos dados de chuva, definição das datas de ocorrência dos eventos extremos, aquisição dos dados de reanálise e pré-processamento, processamento e ajuste de parâmetros do SOM, pós-processamento para obtenção dos campos médios são apresentadas em formato de fluxograma para melhor compreensão de todas as etapas (Figura 3.5).

Uma vez definidos os padrões sinóticos associados aos eventos extremos de precipitação, uma série de investigações pode ser conduzida com os resultados. A mais simples de ser empreendida com o SOM foi observar a frequência de ocorrência de cada padrão sinótico, acumulando em cada nó o número de eventos extremos associados. Com estes resultados uma análise de frequência da ocorrência de cada padrão ao longo do tempo pode ser conduzida.

O cálculo do volume médio de precipitação associado a cada nó pode ser obtido permitindo assim uma melhor compreensão sobre os volumes da precipitação associada a cada padrão sinótico. O cálculo do desvio padrão do volume de precipitação associada a cada nó também permite estimar a variabilidade interna de cada modo sinótico mapeado.

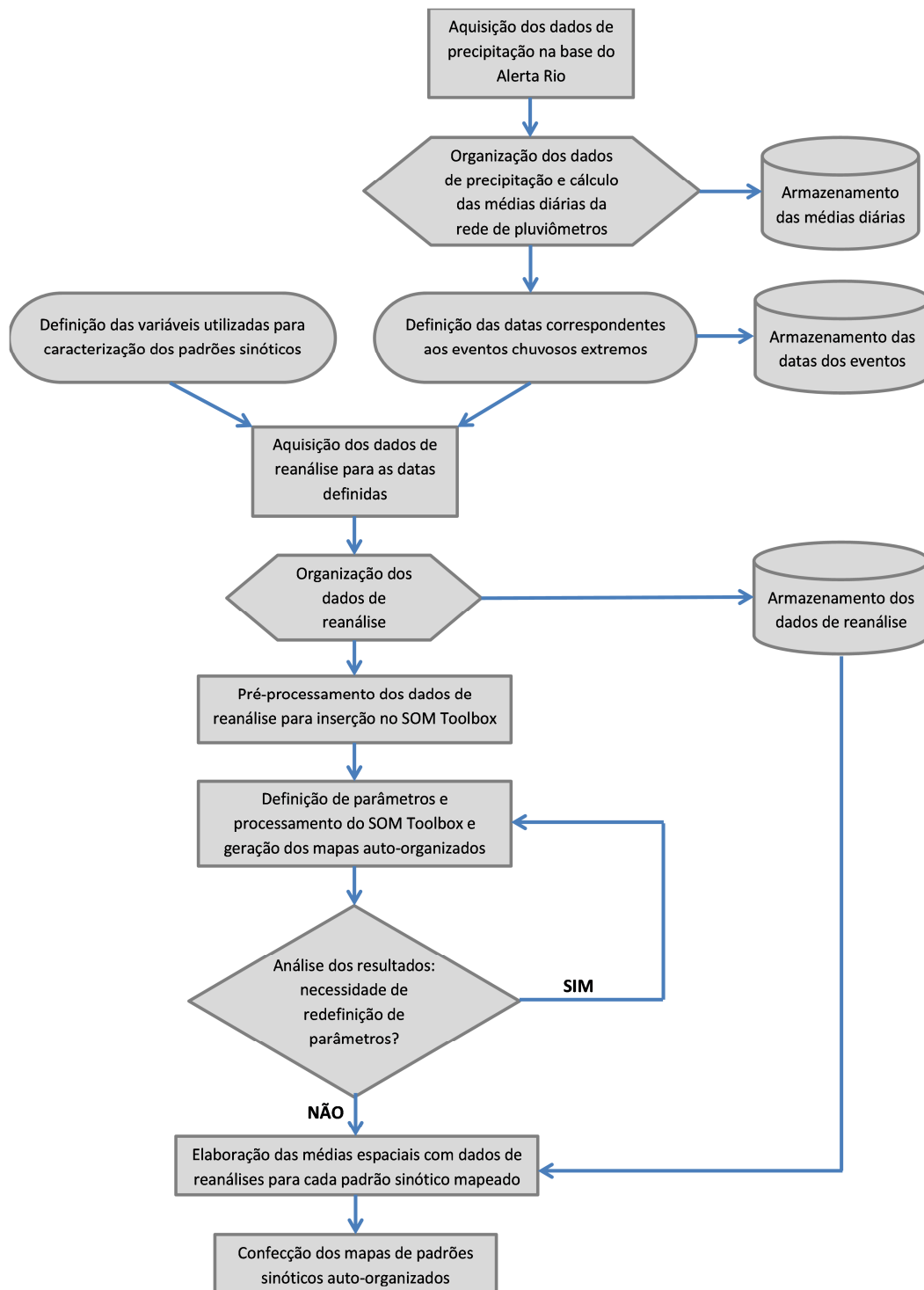


Figura 3.5 - Fluxograma representativo das etapas da metodologia envolvidas na determinação dos padrões sinóticos.

Após a definição dos padrões sinóticos associados à ocorrência de eventos extremos, torna-se possível aplicar novamente a ferramenta do SOM aos dados de precipitação acumulada em 24h de todas as estações pluviométricas da rede do Alerta Rio. Foram selecionados apenas os dados correspondentes aos dias de eventos extremos e estes foram

separados de acordo com a classificação resultante da determinação dos padrões sinóticos. Neste caso, cada estação pluviométrica foi considerada uma amostra e os dados de precipitação acumulada em 24h de cada um dos eventos extremos pertencentes a cada um dos padrões sinóticos encontrados anteriormente foram considerados elementos do vetor em formato de linha.

Desta forma, busca-se elaborar um agrupamento das estações pluviométricas a partir da distribuição da chuva provocada por cada um dos padrões sinóticos mapeados, visando a definição de RPH características. As principais etapas da metodologia envolvidas na determinação de RPH para cada padrão sinótico mapeado são apresentadas em fluxograma distinto para melhor entendimento (Figura 3.6).

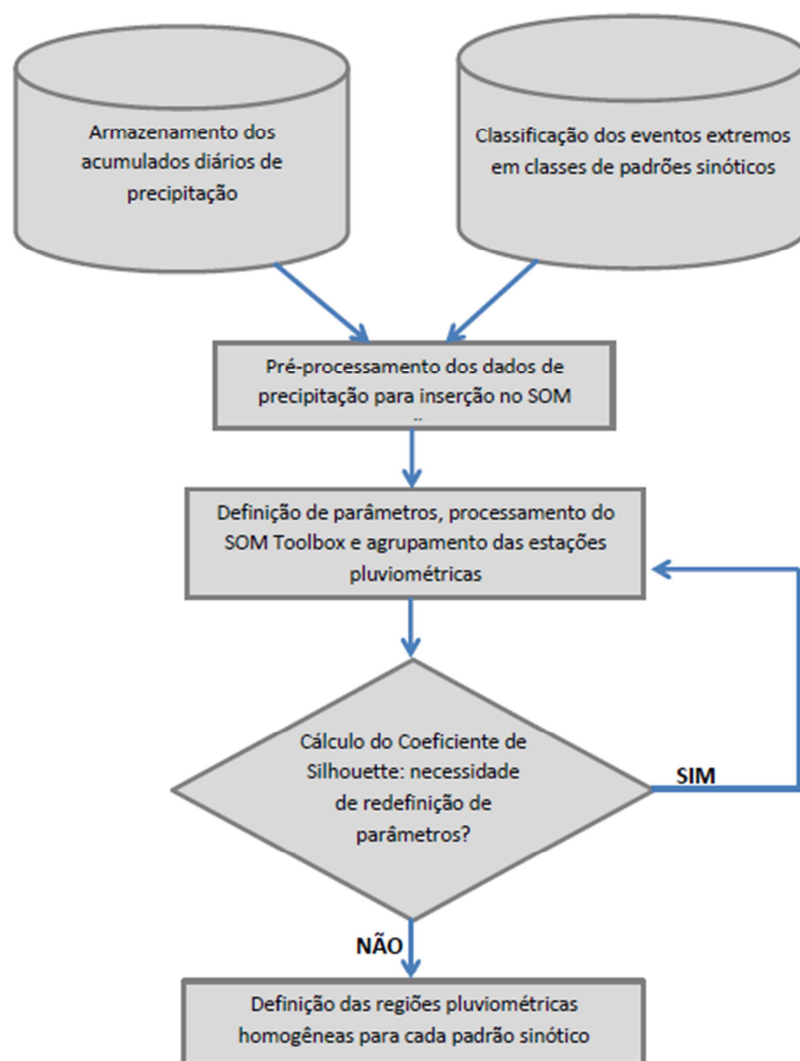


Figura 3.6 - Fluxograma representativo das etapas da metodologia envolvidas na determinação de Regiões Pluviométricas Homogêneas (RPH).

## CAPÍTULO IV - RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados resultados da seleção dos eventos extremos de chuva obtidos através dos dados históricos de precipitação do Sistema Alerta Rio, da classificação dos padrões sinóticos associados aos eventos extremos selecionados e da determinação de RPH para cada um dos padrões sinóticos encontrados.

### 4.1 - Eventos Extremos de Precipitação

Primeiramente foram adquiridos os dados de precipitação acumulada em 15 minutos de todas as estações pluviométricas do Sistema Alerta Rio, durante o período de janeiro de 1997 a abril de 2014. Posteriormente foi feita a totalização do acumulado em 24 horas com os dados contidos no intervalo das observações de 9h e 15min local (12:15 UTC) do dia anterior e 9h local (12:00 UTC) do referido dia. A definição deste intervalo é baseada na regulamentação regional da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para registro de acumulados de precipitação em 24 horas. A partir dos valores totalizados em 24 horas de cada estação foram calculadas as médias diárias de precipitação da rede pluviométrica. Em seguida, as médias espaciais foram ordenadas de forma crescente para seleção dos dias com médias superiores a 50 mm. Com esta seleção, foram obtidos 46 casos de eventos de chuva extrema no município do Rio. Além disso, através do ordenamento das médias de precipitação foi possível construir uma curva de permanência e verificar que o limiar de 50 mm de precipitação média diária corresponde ao percentil 99,27% (Figura 4.1). Curvas de permanência são resultado de uma análise estatística que permite verificar qual é a porcentagem de tempo em que a precipitação apresenta determinados valores, expressando assim a relação entre a chuva acumulada e a frequência com que esta ocorre. As respectivas datas, precipitação média diária e percentil de cada evento extremo são apresentados na tabela 4.1.



Tabela 4.1 - Datas dos eventos extremos selecionados com precipitação média diária superior a 50 mm, precipitação acumulada média diária de cada evento e o respectivo percentil.

<b>Data</b>	<b>Chuva acumulada (mm)</b>	<b>Percentil</b>
06/04/2010	188,5	100,00
09/01/1998	144,5	99,97
24/12/2001	127,9	99,95
18/03/2003	111,1	99,94
31/12/2009	107,5	99,92
12/02/1998	98,1	99,90
11/12/2013	94,4	99,89
12/02/2007	87,6	99,87
26/04/2011	82,0	99,86
22/01/2009	80,7	99,84
07/03/2010	72,1	99,83
24/05/2006	71,5	99,81
17/02/2000	71,4	99,79
28/01/2006	70,6	99,78
03/01/2000	70,6	99,76
24/10/2007	68,8	99,75
26/09/2012	66,9	99,73
13/12/2007	65,2	99,71
14/03/2008	64,6	99,70
12/10/2003	64,1	99,68
07/04/2010	63,8	99,67
25/10/2007	63,2	99,65
26/11/2005	62,2	99,64
14/12/2007	62,1	99,62
18/04/2006	61,9	99,60
07/04/2003	59,5	99,59
01/05/2012	58,6	99,57
25/01/2003	57,9	99,56
18/03/2013	57,5	99,54
06/12/2010	56,8	99,52
26/08/2003	56,2	99,51
13/02/2009	55,0	99,49
20/05/2007	54,2	99,48
15/04/2014	53,7	99,46
03/02/2002	53,0	99,44
05/01/2006	52,7	99,43
07/10/1998	52,6	99,41
07/02/2004	52,2	99,40
19/03/2000	52,1	99,38
06/12/2013	51,8	99,37
15/01/2010	51,2	99,35
16/01/2014	51,2	99,33
24/10/2005	50,7	99,32
07/10/2006	50,7	99,30
03/11/2003	50,3	99,29
05/12/2009	50,2	99,27

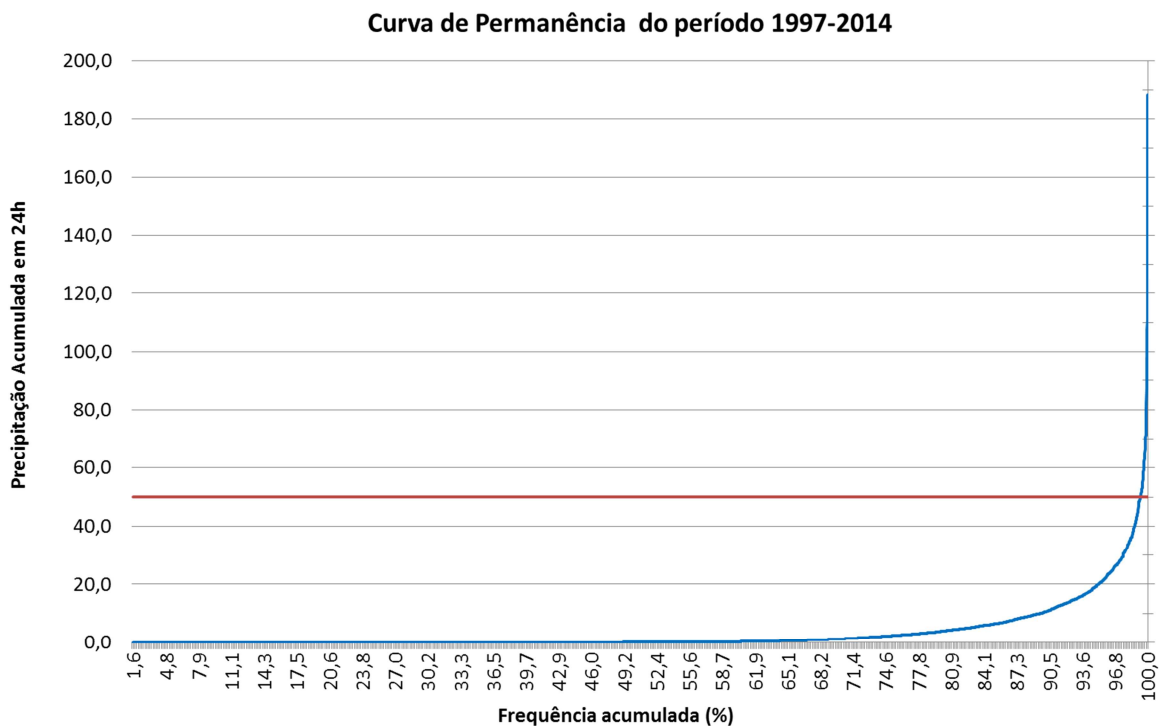


Figura 4.1 - Curva de permanência da precipitação média acumulada em 24 horas na rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio no período entre 1997 e 2014.

A distribuição anual dos 46 eventos extremos de chuva pode ser observada na figura 4.2. Destaca-se os anos de 2003 e 2007 com as maiores frequências de ocorrência de eventos extremos, totalizando seis eventos ao longo de todo ano. Os anos de 2006 e 2010 apresentam máximos secundários de ocorrência deste tipo de evento, totalizando cinco eventos extremos. Nos anos de 1997 e 1999 não houve registro de eventos deste tipo, e nos anos de 2001, 2002, 2004, 2008 e 2011 foram registrados apenas uma ocorrência por ano.

A distribuição mensal dos registros de eventos extremos de chuva apresenta uma sazonalidade bem definida, assim como observado na distribuição mensal média da rede do Alerta Rio apresentada na tabela 1.1. A maior frequência de registros fica concentrada nos meses de outubro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio (Figura 4.3). Nos meses de agosto e setembro houve registro de apenas um evento extremo ao longo do período entre 1997 e 2014, sendo que nos meses de junho e julho nenhum evento deste tipo chegou a ser registrado.

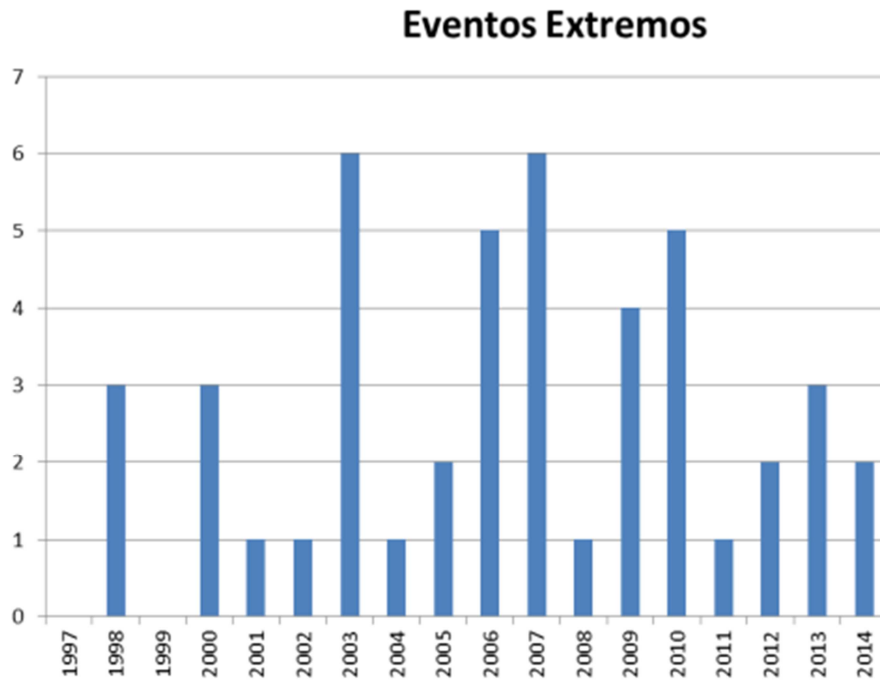


Figura 4.2 - Distribuição anual das ocorrências de 46 eventos extremos registradas na rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio no período entre 1997 e 2014.

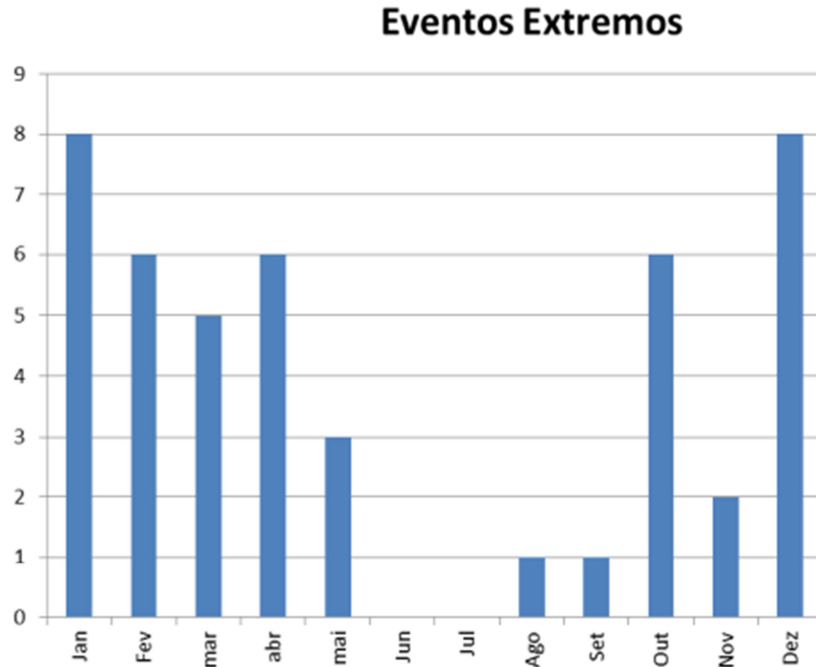


Figura 4.3 - Distribuição mensal das ocorrências de 46 eventos extremos registradas na rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio no período entre 1997 e 2014.

Sabe-se que os sistemas meteorológicos que se manifestam durante os eventos extremos distribuem a precipitação de forma heterogênea, mostrando grande variabilidade no tempo e no espaço. A análise de agrupamentos tem sido utilizada na climatologia para a definição de regiões climáticas e pluviométricas homogêneas (FILHO *et al.* 2005, BOUHID *et al.* 2008, SANTOS *et al.* 2014 e JOURDAN *et al.* 2014). Com a definição das datas de extremos de precipitação torna-se possível aplicar a ferramenta SOM em uma análise exploratória da distribuição espacial do total de precipitação acumulada em 24 horas.

Desta forma, busca-se elaborar um agrupamento das estações pluviométricas a partir da distribuição da chuva diária provocada durante os eventos extremos de precipitação, visando-se definir Regiões Pluviométricas Homogêneas (RPH).

Para isso, foram selecionados apenas os dados de precipitação acumulada em 24 horas das estações telepluviométricas nos dias de ocorrência dos extremos de precipitação. As estações que apresentaram qualquer tipo de falha nos dados de precipitação acumulada em 24h nos períodos de extremos de precipitação foram descartadas. Desta forma, o montante total de estações com 46 valores de chuva acumulada em 24h disponíveis para realização do agrupamento foi de 26, excluindo-se assim estações que foram desativadas ou instaladas em anos posteriores a 1998.

Neste caso, cada estação telepluviométricas separadamente foi considerada uma amostra e os dados de precipitação acumulada em 24h de cada um dos eventos extremos foram considerados elementos do vetor em formato de linha.

Para aplicação do SOM foram feitos testes preliminares de sensibilidade dos parâmetros, fixando-se o número desejado de nós (grupos) em 4 através da utilização de um mapeamento de dimensão 2x2. A imposição de 4 nós (grupos), e consequentemente do número de RPH, justifica-se pelo objetivo de buscar acesso apenas às características mais gerais da distribuição espacial da chuva.

Foram testados o número total de interações, o número de interações da fase de ordenamento, o fator de correção inicial da fase de ajuste fino, o fator de correção final da fase de ajuste fino e o fator de vizinhança durante a fase de ajuste fino.

Após a realização de 18 testes de sensibilidade foi eleita a configuração que apresentou melhor resultado, com valor global do CS de 0,41 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Informações dos parâmetros finais de configuração do algoritmo SOM para determinação de Regiões Pluviométricas Homogêneas.

<b>Parâmetros de configuração do SOM</b>	<b>Valores</b>
Número total de interações	2.000
Número de interações da fase de ordenamento	1.000
Fator de correção inicial da fase de ajuste fino	0.9
Fator de correção final da fase de ajuste fino	0.3
Fator de vizinhança durante fase de ajuste fino	0
Dimensão fixa da matriz SOM	2x2
Grade de nós	Hexagonal

Após a determinação da melhor configuração do SOM, o processamento da rede neural resultou na classificação das 26 estações em 4 grupos distintos. A obtenção destes 4 grupos permitiu a definição das 4 regiões pluviométricas distintas.

A figura 4.4 mostra o resultado do agrupamento com as quatro RPH distintas e revela aspectos espaciais relevantes. O Grupo 1 contempla as duas estações que estão localizadas nas maiores cotas de altitude, estando a estação 4 (Tijuca) na cota de 340m e a estação 5 (Santa Teresa) na cota de 170m, e posicionadas sobre as vertentes do maciço da Tijuca. A tabela 4.3 revela que este grupo representa a região pluviométrica que apresenta os maiores valores de precipitação média diária observados durante a ocorrência dos 46 eventos extremos.

O Grupo 2 é composto por 8 estações telepluviométricas, a maioria delas posicionadas sobre ou bem próximas das vertentes do maciço da Tijuca (Figura 4.4) e com posicionamento mais litorâneo. Este grupo apresenta o segundo maior valor de precipitação média diária observada durante a ocorrência dos 46 eventos extremos (Tabela 4.3).



Figura 4.4 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva identificados, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.

Os grupos 3 e 4 são compostos por 4 e 12 estações, respectivamente, e encontram-se alocados em regiões relativamente mais distantes dos maciços montanhosos e em áreas de baixada. Estas duas regiões pluviométricas apresentam os menores valores de precipitação média diária observada durante os 46 eventos de chuvas extremas. Ressalta-se que o grupo 3, formado apenas por estações localizadas na macro bacia hidrográfica da Baía de Sepetiba apresentou o menor valor de precipitação média diária, se destacando das demais estações localizadas nas áreas de baixada das macro bacias hidrográficas da Baía de Guanabara e de Jacarepaguá.

Tabela 4.3 - Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva identificados.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Precipitação média (mm)	90,9	77,0	59,7	63,1

## 4.2 – Classificação dos Padrões Sinóticos com Aplicação do SOM

Para obtenção da configuração dos parâmetros ajustáveis do algoritmo do SOM, que apresentasse o melhor agrupamento das amostras, foram realizados testes de sensibilidade.

A definição do número final de grupos apresenta-se como uma etapa importante. Quanto maior o número de agrupamentos maior o nível de detalhamento presente em cada grupo. Em contrapartida, quanto menor o número de agrupamentos maior será o nível de generalização de cada grupo.

Os testes com variação dos números de nós, conseqüentemente variação do número de grupos, revelou a existência de poucos agrupamentos possíveis, não excedendo mais do que cinco grupos. Mesmo aumentando o número de nós para possibilitar a obtenção de um maior número de grupos, o algoritmo tendia a classificar as amostras em apenas quatro ou cinco agrupamentos. Nos testes com grandes números de nós e definição de cinco grupos como resultado final, dois destes grupos apresentavam menor distância euclidiana. Desta forma, a definição de 4 nós possíveis para agrupamento dos 46 eventos não apresenta uma decisão arbitrária. A dimensão final do SOM foi definida como 2x2, resultando assim em 4 nós ou grupos.

O valor global do CS de cada configuração distinta foi utilizado para avaliação da qualidade do resultado dos diferentes agrupamentos. Após a realização de 94 testes de sensibilidade foi eleita a configuração que apresentou melhor resultado, com valor global do CS de 0,25 (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Informações dos parâmetros finais de configuração do algoritmo SOM para classificação dos padrões sinóticos.

Parâmetros de configuração do SOM	Valores
Número total de interações	50.000
Número de interações da fase de ordenamento	40.000
Fator de correção inicial da fase de ajuste fino	0.9
Fator de correção final da fase de ajuste fino	0.1
Fator de vizinhança durante fase de ajuste fino	0
Dimensão da matriz SOM	2x2
Grade de nós	Hexagonal
Domínio de latitude	14,25°S / 50,25°S
Domínio de longitude	283,5°W / 350,25°W

Após a determinação da melhor configuração do SOM, o processamento da rede neural resultou na classificação dos 46 dias de eventos de chuvas extremas em 4 grupos distintos. A obtenção destas 4 classes permitiu a confecção dos campos médios de cada uma das 3 variáveis meteorológicas utilizadas neste estudo, tornando possível assim a definição dos padrões sinóticos associados a cada uma das classes.

Primeiramente, os campos médios de pressão ao nível médio do mar (PNMM), compostos pelos campos de PNMM dos dias específicos de cada uma das 4 classes são apresentados na figura 4.5. Observa-se nitidamente 4 padrões sinóticos distintos em superfície, retratando condições médias de PNMM relacionadas ao eventos extremos de chuva de cada classe.

O padrão sinótico 1 é caracterizado pela presença de um intenso sistema de alta pressão pós-frontal, com seu centro posicionado sobre a foz do Rio Prata, entre Argentina e Uruguai, e apresentando valores centrais superiores a 1024 hPa. Outro sistema de alta pressão, relacionado à Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pode ser visto parcialmente sobre o oceano entre as longitudes de 330°W e 350°W. Esta condição indica a presença de uma zona frontal entre o Oceano Atlântico e a Região Sudeste, próximo ao Rio de Janeiro, associada a um intenso gradiente de pressão. Esta característica sugere que o padrão 1 pode estar relacionado a situações relevantes de advecção de umidade do mar para o continente em direção ao Rio de Janeiro (Figura 4.5).

O padrão sinótico 2 apresenta um sistema de alta pressão, com centro posicionado entre o litoral dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná e o oceano adjacente e com valores centrais superiores a 1016 hPa. Outro sistema de alta pressão, provavelmente relacionado à ASAS, pode ser visto parcialmente sobre o oceano entre as longitudes de 330°W e 350°W. Sobre a Região Sudeste do Brasil não se observa gradientes importantes de PNMM (Figura 4.5). Esta característica sugere uma região de divisão de massas de ar, no entanto sem fortes gradientes de pressão, sobre a Região Sudeste do Brasil.

No padrão sinótico 3 observa-se uma ampla área com pressões relativamente mais altas, com valores de 1016 hPa, estendendo-se desde o litoral dos estados da Região Sul do Brasil até grande parte do Oceano Atlântico Sul. Neste padrão, destaca-se a presença de regiões de pressão relativamente mais baixas próximas ao litoral dos estados do Rio de



Janeiro e São Paulo, sugerindo assim a presença de um sistema de baixa pressão (Figura 4.5).

O padrão sinótico 4 apresenta uma condição semelhante ao padrão sinótico 2, com um sistema de alta pressão posicionado entre o litoral dos estados da Região Sul, Uruguai e oceano adjacente e outro sistema de alta pressão relacionado à ASAS. No entanto, uma característica permite visualizar uma diferença importante entre os padrões 2 e 4, trata-se da presença de uma ampla e profunda área de baixa pressão ao sul do paralelo 30°S e entre as longitudes 310°W e 350°W (Figura 4.5). De forma semelhante ao padrão 2, o padrão 4 também sugere a presença de uma região de divisão de massas de ar sobre a Região Sudeste do Brasil, no entanto, no padrão 4 esta divisão de massas de ar apresenta-se de certa forma conectada à profunda região de baixa pressão descrita anteriormente.

Neste ponto, cabe destacar que a classificação dos padrões sinóticos contemplou informações de 3 variáveis meteorológicas distintas. Sendo assim, mesmo que dois padrões sinóticos distintos apresentem configurações semelhantes em alguma das 3 variáveis utilizadas, a caracterização dos padrões não se encerra apenas nas informações de uma variável isoladamente. Desta maneira, será possível notar adiante outras diferenças marcantes entre os padrões 2 e 4 nos campos médios de altura geopotencial em 500 hPa e de água precipitável.

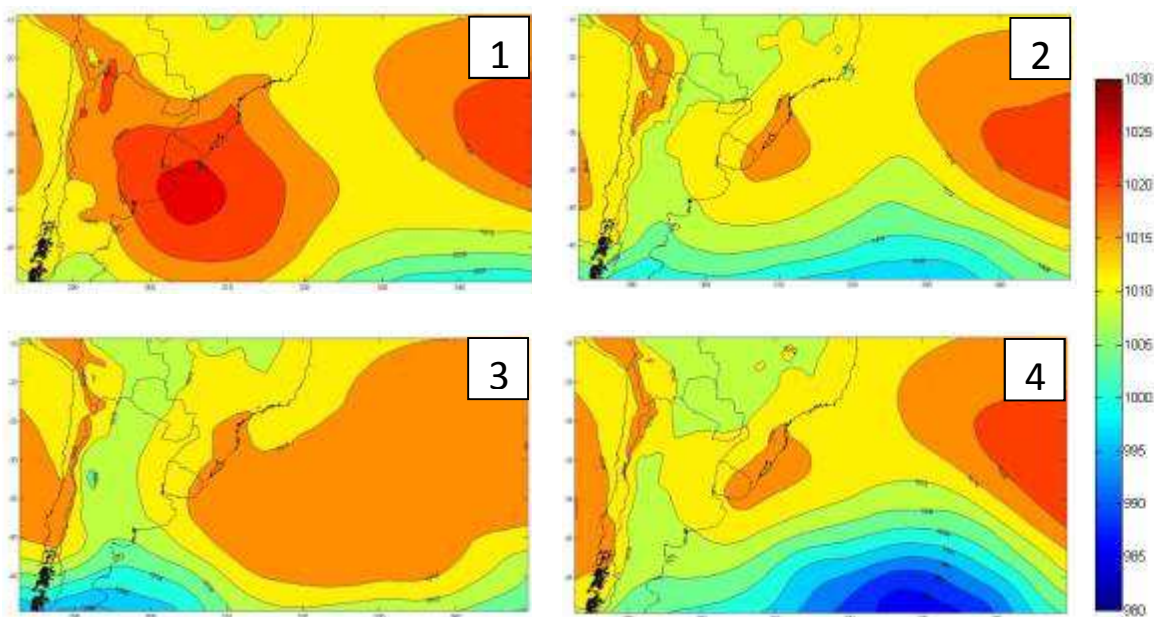


Figura 4.5 - Campos médios de pressão ao nível médio do mar (PNMM) para cada um dos quatro padrões sinóticos obtidos.

Os campos médios de altura geopotencial em 500 hPa para cada um dos 4 padrões sinóticos, compostos pelos campos dos dias específicos de cada uma das 4 classes, são apresentados na figura 4.6. Observa-se nitidamente 4 padrões sinóticos distintos em níveis médios, retratando condições médias da distribuição da altura geopotencial em 500 hPa relacionadas ao dias de eventos extremos de chuva.

O padrão sinótico 1 é caracterizado pela presença de um intenso cavado frontal, que tem seu eixo orientado de noroeste para sudeste e se estende desde o Oceano Atlântico, ao sul de 40°S, até o sul da Região Centro Oeste do Brasil. A orientação das isolinhas de altura geopotencial indicam a atuação de ventos de direção sul/sudoeste sobre o Atlântico Sul em níveis médios, na retaguarda do cavado frontal, favorecendo o avanço do ar frio em baixos níveis de latitudes altas para latitudes mais baixas (Figura 4.6). Neste padrão, parte da Região Sudeste do Brasil, incluindo o estado do Rio de Janeiro, encontra-se na porção leste do cavado e próximo a uma ampla área de forte gradiente de altura geopotencial, sugerindo também intensa atividade baroclínica e condições favoráveis para o levantamento das parcelas de ar.

No padrão sinótico 2 a presença de dois cavados principais pode ser observada, sendo um de maior comprimento, com eixo orientado na direção norte/sul e estendendo-se desde latitudes próximas à 33°S até 50°S. O cavado de menor comprimento está posicionado ao sul do litoral do Rio de Janeiro, apresentando seu eixo entre os estados da Região Sul e o oceano próximo e orientado no sentido noroeste/sudeste entre as latitudes 25°S e 35°S (Figura 4.6). Neste padrão os gradientes de altura geopotencial estão menos intensos e mais afastados do litoral do Rio de Janeiro em comparação com o padrão sinótico 1.

O padrão sinótico 3 é identificado pela presença de um cavado baroclínico amplificado sobre as Regiões Sul e Sudeste do Brasil (Figura 4.6). A posição do cavado em latitudes subtropicais e tropicais sugere que este sistema possivelmente estaria associado a instabilidade no escoamento da corrente de jato subtropical. Destaca-se a posição do estado do Rio de Janeiro em relação ao eixo do cavado, localizando-se na porção leste deste eixo e em região favorável à ocorrência de movimentos ascendentes.

A análise do padrão sinótico 4 revela a ausência de cavados baroclínicos sobre a Região Sudeste do Brasil. Além disso, não se observa gradientes intensos de altura geopotencial próximos ao Rio de Janeiro (Figura 4.6). Destaca-se a presença de uma

ampla e profunda área de baixa altura geopotencial e circulação ciclônica posicionada ao sul de 35°S, possivelmente associada a um intenso ciclone extratropical.

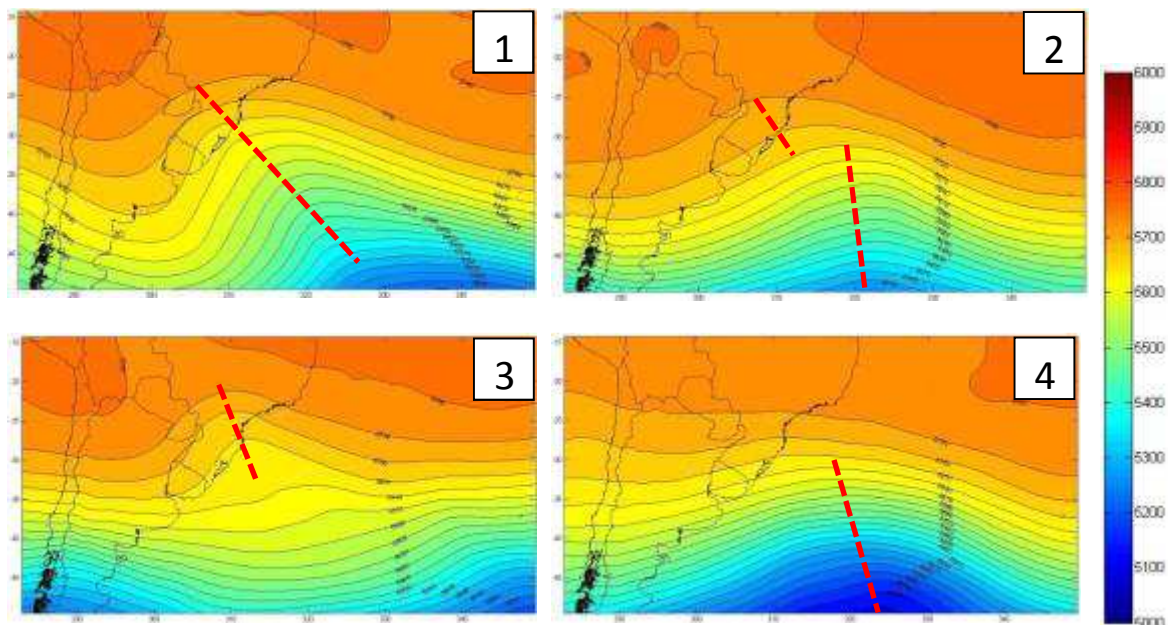


Figura 4.6 - Campos médios de altura geopotencial em 500 hPa para cada um dos quatro padrões sinóticos obtidos. A linha vermelha tracejada marca o eixo dos cavados.

Os campos médios de água precipitável para cada um dos 4 padrões sinóticos são apresentados na figura 4.7. Observa-se 4 padrões distintos retratando condições médias da distribuição de água precipitável relacionadas ao dias de eventos extremos de chuva.

No padrão sinótico 1 nota-se a presença de valores máximos de até 50 mm de água precipitável sobre o litoral do Rio de Janeiro e o oceano próximo. Esta região apresenta-se orientada no sentido noroeste/sudeste, encontra-se em sua maior parte sobre o oceano e não apresenta conexão bem definida com as áreas de máximos secundários localizados sobre a Região Centro Oeste e sul da Região Norte do Brasil. Entre o litoral sul do Rio de Janeiro, o litoral de Santa Catarina e as áreas oceânicas próximas é possível observar um intenso gradiente de água precipitável, indicando assim um destacado contraste de massas de ar (Figura 4.7).

O padrão sinótico 2 destaca-se pela presença de valores máximos de até 55 mm de água precipitável sobre o litoral do Rio de Janeiro. Esta região de valores máximos se apresenta orientada no sentido noroeste/sudeste, encontra-se em sua maior parte sobre o oceano e apresenta conexão com máximos relativos localizados em parte das Regiões Sudeste, Centro Oeste e Norte do Brasil e da Bolívia (Figura 4.7). O forte gradiente de

umidade observado entre o litoral sul do Rio e o litoral de Santa Catarina indica uma clara separação de massas de ar.

Analisando o padrão sinótico 3 verifica-se a presença de uma região de valores máximos de até 50 mm de água precipitável sobre o litoral do Rio de Janeiro, porém com menor dimensão espacial quando comparada aos máximos observados nos padrões 1 e 2. Esta região de valores máximos apresenta-se orientada no sentido noroeste/sudeste e não apresenta conexão bem definida com as áreas de máximos relativos localizados sobre o oeste da Região Centro Oeste e sul da Região Norte do Brasil (Figura 4.7). Neste padrão observa-se um gradiente no teor de umidade entre o litoral do Rio de Janeiro e o litoral de Santa Catarina, porém menos intenso do que os gradientes vistos nos padrões 1 e 2.

Nota-se no padrão sinótico 4 uma região de valores máximos de água precipitável de até 50 mm sobre o litoral do Rio de Janeiro (Figura 4.7). O gradiente significativo de umidade entre o litoral sul do Rio de Janeiro e o litoral norte do Rio Grande do Sul indica um intenso contraste de massas de ar com características distintas. Observa-se que a região de valores máximos de água precipitável e dos gradientes associados estende-se de forma organizada, com curvatura ciclônica pelo Oceano Atlântico até latitudes superiores a 50°S.

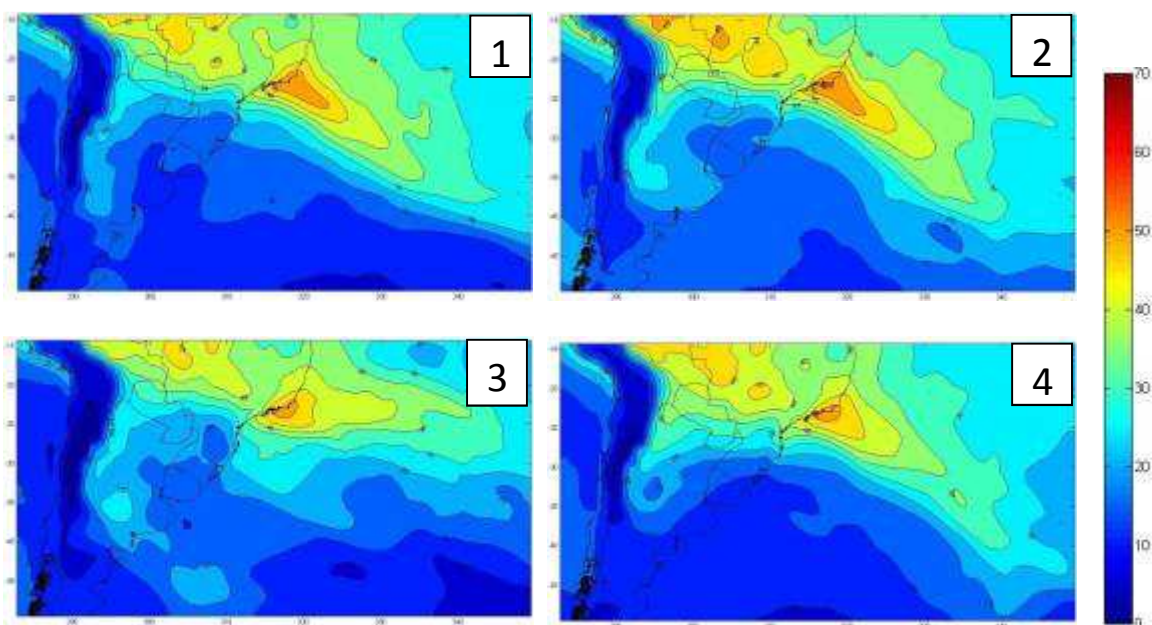


Figura 4.7 - Campos médios de água precipitável para cada um dos quatro padrões sinóticos obtidos.

A tabela 4.5 apresenta diversas informações sobre cada um dos padrões sinóticos obtidos. Primeiramente observa-se que o padrão sinótico 1 apresenta o maior número de ocorrências, respondendo por 33% do total de ocorrências e indicando assim maior frequência deste padrão. O padrão sinótico 2 apresenta o segundo maior número de ocorrências, seguido pelos padrões sinóticos 4 e 3, respectivamente. O baixo número de ocorrências relacionados ao padrão sinótico 3, respondendo por apenas 13% do total de ocorrências, indica que os dias de eventos extremos de precipitação associados a este padrão são menos frequentes.

O CS médio para cada um dos padrões sinóticos apresenta maior valor no padrão 2 e menor valor no padrão 3. O valor mais próximo de 1 indica a maior qualidade do agrupamento do padrão 2 e o valor mais próximo de 0 observado no padrão 3 indica que este agrupamento não apresenta a mesma qualidade dos demais (Tabela 4.5).

A precipitação média, o desvio padrão, a precipitação máxima e a porcentagem do total de precipitação de cada um dos padrões sinóticos, calculados a partir da média diária utilizada para caracterizar os dias de eventos extremos, revelam características importantes (Tabela 4.5).

O padrão sinótico 1 apresenta a maior precipitação média, com 77,8 mm; o maior desvio padrão, com 33,6 mm; o maior valor de precipitação máxima, com 188,5 mm; e responde por 36% do volume total de precipitação associada a todos os dias de eventos extremos. O padrão sinótico 2 destaca-se após o padrão 1 apresentando os segundos maiores valores de precipitação média, de desvio padrão, de precipitação máxima e respondendo por 31% do volume total de precipitação provocada por todos os dias de eventos extremos. Destaca-se que os padrões sinóticos 1 e 2 juntos respondem pelas maiores médias de precipitação, pelos maiores valores de desvio padrão, pelos maiores máximos de chuva, por 63% de todas as ocorrências de extremos de chuva e por 67% do total de precipitação destes eventos. Em contrapartida, o padrão sinótico 3 apresenta a menor precipitação média, o menor desvio padrão, e a menor precipitação máxima, sendo que neste caso este padrão foi o único a não apresentar precipitação máxima superior aos 100 mm. Além disso, o padrão 3 responde por apenas 11% da porcentagem total de precipitação dos eventos de chuva extremas identificados (Tabela 4.5). Desta forma, revela-se maior importância relativa dos padrões sinóticos 1 e 2 nas ocorrências de extremos de precipitação e menor importância relativa do padrão 3.

Tabela 4.5 - Informações sintetizadas dos quatro padrões sinóticos associados a eventos extremos. A cor verde indica o maior valor de cada linha.

	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4
Ocorrências	15	14	6	11
Porcentagem do total de ocorrências (%)	32,6	30,4	13,0	23,9
Coef. Silhouette médio	0,20	0,37	0,07	0,25
Precipitação diária média (mm)	77,8	71,8	61,0	64,7
Desvio padrão da precipitação diária (mm)	33,6	29,5	7,0	22,4
Precipitação diária máxima (mm)	188,5	144,5	72,1	111,1
Porcentagem do total de precipitação (%)	35,9	30,9	11,3	21,9

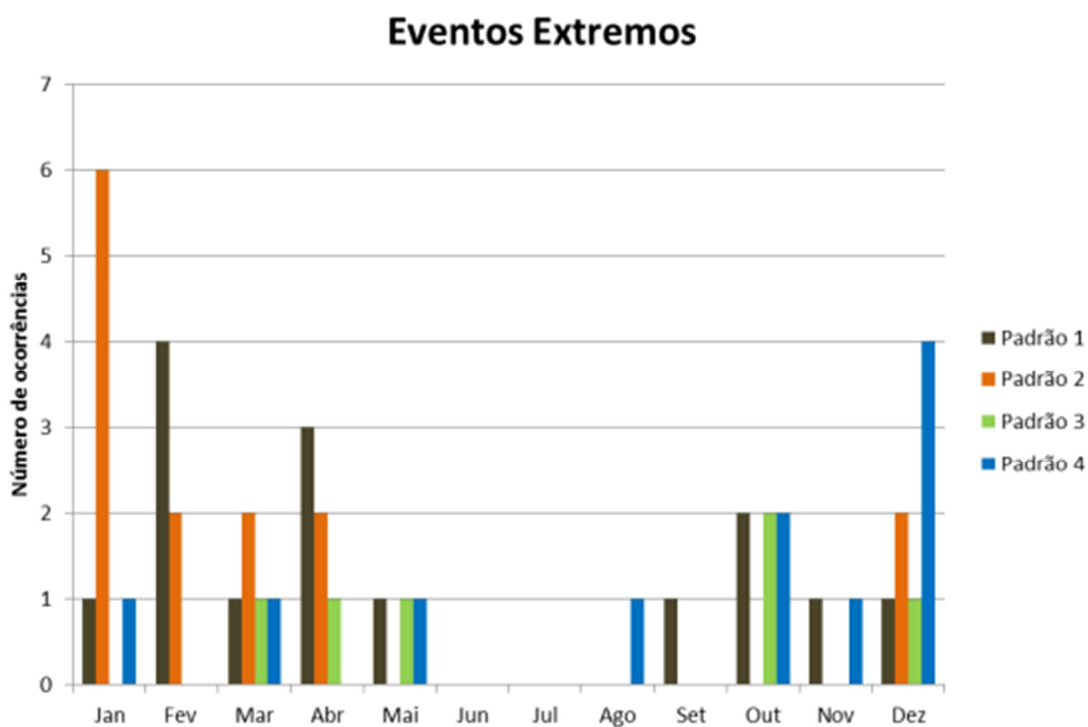


Figura 4.8 - Número de ocorrências de cada padrão sinótico acumuladas em todos os meses ao longo do ano.

A figura 4.8 mostra em formato de gráfico de barras as ocorrências de cada padrão sinótico acumuladas em todos os meses do ano. O padrão sinótico 1 apresenta maior número de ocorrências nos meses de fevereiro e abril, enquanto o padrão 2 apresenta um valor máximo de destaque em janeiro e o padrão 4 em dezembro. Desta forma, observa-se a maior importância dos padrões sinóticos 2 e 4 na ocorrência de extremos de precipitação durante o período mais chuvoso do verão nos meses de janeiro e dezembro,

respectivamente. Já o padrão sinótico 3 apresenta um máximo relativo no mês de outubro, porém sem grande destaque. Sendo assim, observa-se um indício da possibilidade de existência de meses preferenciais para ocorrência de determinados padrões sinóticos associados à extremos de precipitação no município do Rio de Janeiro.

#### **4.2.1 - Padrão Sinótico 1**

Os campos médios do padrão sinótico 1 indicam uma típica condição frontal e pós-frontal sobre o Rio de Janeiro. A presença de um intenso sistema de alta pressão pós-frontal, com valores de 1024 hPa entre o Oceano Atlântico e a foz do Rio da Prata, e o intenso gradiente de água precipitável localizado sobre o Atlântico, ao norte do sistema de alta pressão pós-frontal e próximo ao litoral do Rio de Janeiro, são características desta condição (Figuras 4.9a e 4.9b). Cabe informar que as figuras 4.9a, 4.9b e 4.9c já foram apresentadas anteriormente no ítem 4.2, mas estão sendo aqui reapresentadas para facilitar e enriquecer a discussão sinótica específica do padrão sinótico. Destaca-se ainda que o mesmo procedimento será adotado na discussão dos demais padrões sinóticos nos itens subsequentes.

A presença de um amplo cavado frontal, com intenso gradiente de altura geopotencial em 500 hPa, estendendo seu eixo até parte das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, torna as condições atmosféricas favoráveis ao levantamento das parcelas de ar (Figura 4.9c). Uma influência direta da presença do cavado frontal é o estabelecimento de um escoamento conducente favorável ao avanço do ar frio em superfície desde latitudes altas até o litoral das Regiões Sul e Sudeste do Brasil (Figura 4.9c).

O gradiente de pressão ao sul do Rio de Janeiro induzindo a atuação de ventos de componente sul, o alto teor de umidade entre o litoral e o oceano e o avanço do anticiclone pós-frontal em direção às latitudes mais baixas sugerem um cenário onde o transporte de umidade do mar para o litoral Fluminense torna-se relevante. Possivelmente, um cenário como este, onde as condições sinóticas em médios e altos níveis são favoráveis ao levantamento das parcelas e atuam em conjunto com a convergência de massa e umidade em baixos níveis, torna o ambiente atmosférico propício à ocorrência de eventos chuvosos de longa duração.

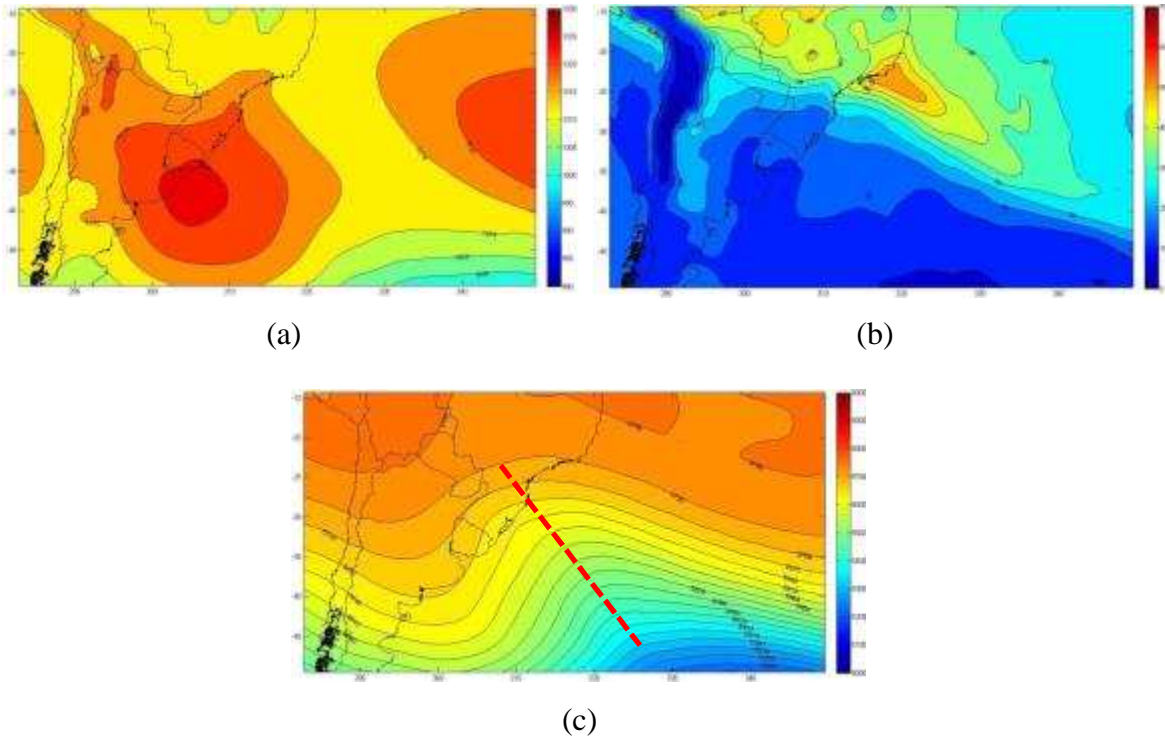


Figura 4.9 - Campos médios do padrão sinótico 1, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.

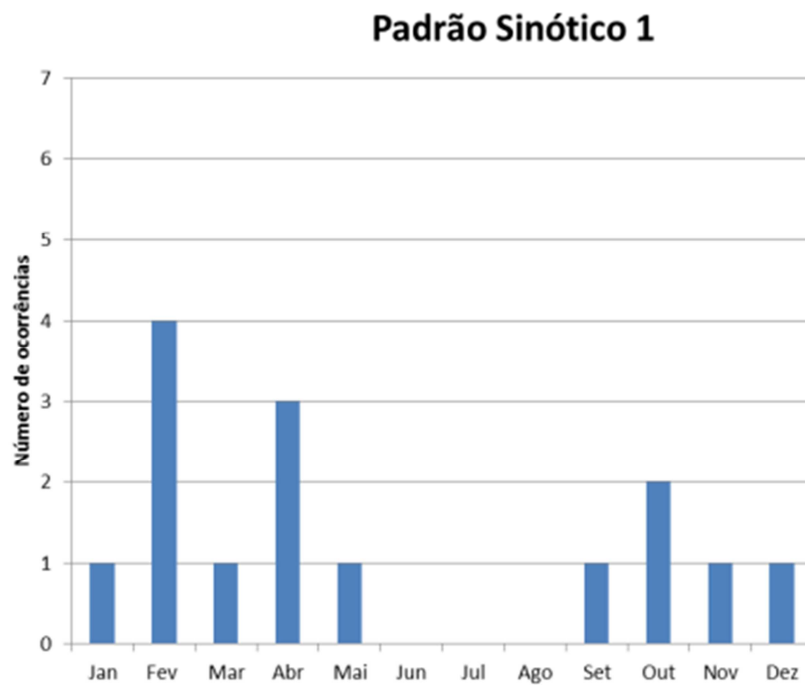


Figura 4.10 - Número de ocorrências do padrão sinótico 1 acumuladas por meses do ano.



Analisando-se o número de ocorrências do padrão sinótico 1 acumulado ao longo dos meses do ano, nota-se valores máximos nos meses de fevereiro e abril (Figura 4.10). Esta distribuição permite levantar um possível comportamento preferencial para aumento da ocorrência deste tipo de padrão durante a metade final da estação chuvosa no Rio de Janeiro.

A tabela 4.6 mostra a posição de cada dia em relação ao *ranking* dos 46 eventos extremos identificados, as datas dos eventos e os respectivos CS de cada dia (amostra). Escolhendo-se o maior valor do coeficiente entre todas as amostras de um mesmo grupo, torna-se possível eleger a amostra que melhor represente o grupo como um todo. Em relação às amostras do grupo formador do padrão sinótico 1, destaca-se o dia 18/03/2013 com o maior valor do CS (0,42). Nota-se também que neste grupo está incluído o dia do evento que apresentou a maior média de precipitação acumulada em 24 horas de todo o histórico de dados, com 188,5 mm no dia 06/04/2010.

Neste grupo destaca-se a existência de eventos extremos de chuva recentes, como os dias 06 e 07/04/2010, 26/09/2012, 18/03/2013 e 11/12/2013 (tabela 4.6). Outro aspecto relevante deste grupo é a existência de uma amostra com valor de CS negativo, porém próximo de zero (tabela 4.6). Isto sinaliza que esta amostra não é bem representada pelo grupo como um todo.

Tabela 4.6 - Informações sintetizadas do padrão sinótico 1 associado a eventos extremos.

Padrão Sinótico 1		
Número do Evento	Data do Evento	Coef. Silhouette
1	06/04/2010	0,30
6	12/02/1998	0,13
7	11/12/2013	0,09
8	12/02/2007	0,10
12	24/05/2006	0,30
13	17/02/2000	0,34
15	03/01/2000	-0,05
16	24/10/2007	0,12
17	26/09/2012	0,07
20	12/10/2003	0,21
21	07/04/2010	0,32
25	18/04/2006	0,24
29	18/03/2013	0,42
38	07/02/2004	0,18
45	03/11/2003	0,25

A análise dos campos sinóticos, elaborados a partir dos dados de reanálise, para o dia mais representativo do grupo formador do padrão sinótico 1, permite a extração de diversas informações. Os campos sinóticos de todos os dias do padrão sinótico 1 encontram-se disponíveis no Anexo 1.

Assumindo-se o dia 18/03/2013 como o mais representativo, observa-se no campo de PNMM deste dia um intenso sistema de alta pressão pós-frontal, com valores centrais de 1028 hPa entre o litoral da província de Buenos Aires e o Oceano Atlântico. Este sistema pós-frontal projeta uma crista sobre o litoral Sul do Rio de Janeiro (Figura 4.11a). Os gradientes de pressão e de umidade localizados próximos do litoral Sul Fluminense indicam brusca descontinuidade entre massas de ar e relevante atividade frontal. De acordo com o acompanhamento dos sistemas frontais apresentado no Boletim de Monitoramento e Análises Climáticas (CLIMANÁLISE, 2013), este sistema se propagou sobre o Rio de Janeiro entre os dias 17/03/2013 e 18/03/2013 (Figura 4.12).

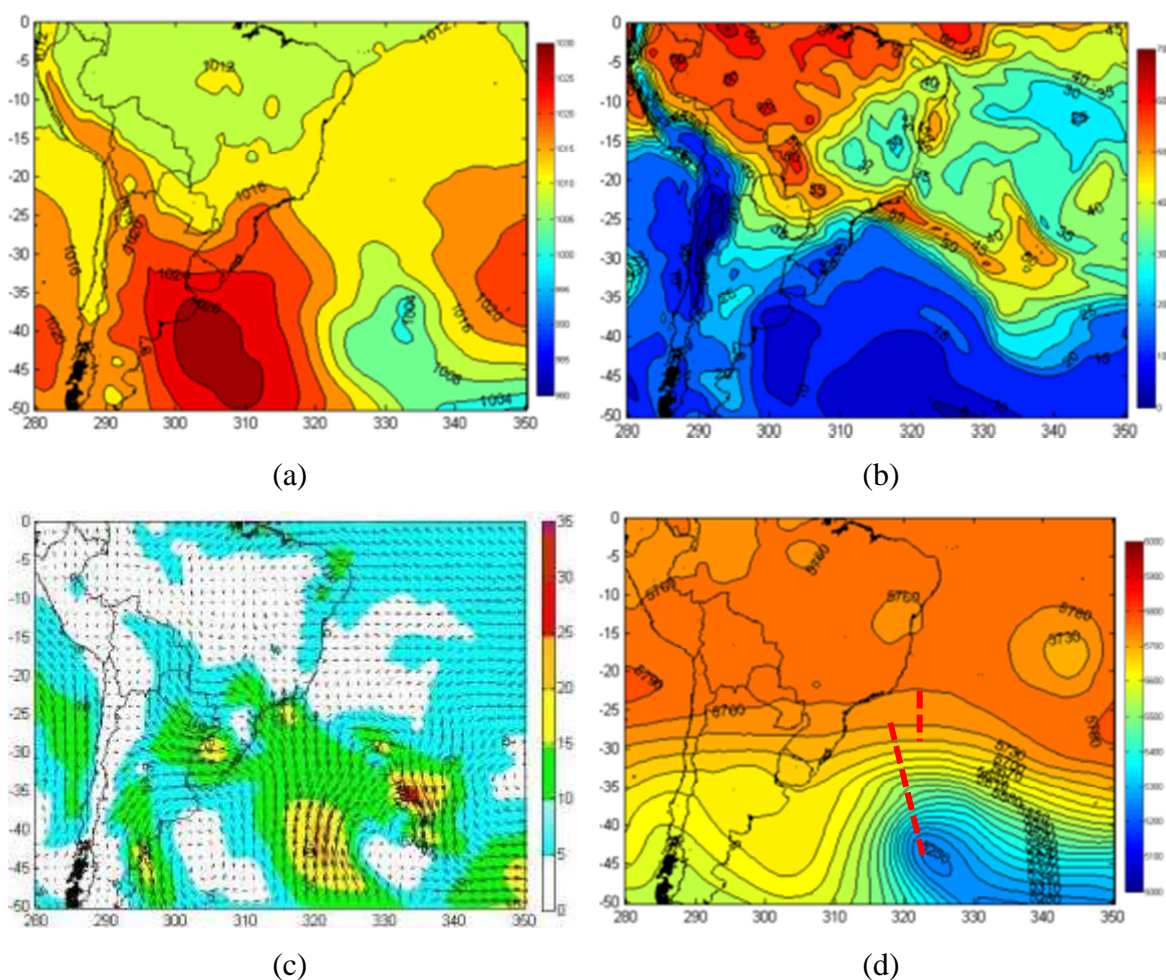


Figura 4.11 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 18/03/2013 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

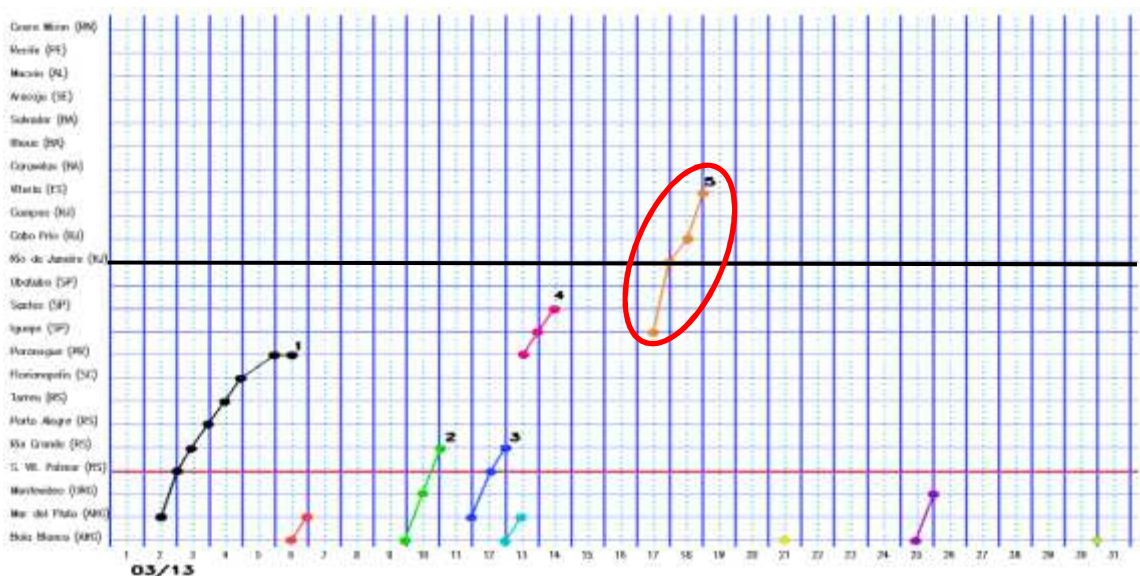


Figura 4.12 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 2013.

Valores máximos de água precipitável entre a costa do Rio de Janeiro e o oceano próximo superam os 55 mm (Figura 4.11b). Mínimos relativos de água precipitável sobre o interior da Região Sudeste e parte das Regiões Centro-Oeste e Nordeste sugerem a inatividade da Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Para enriquecer a análise das condições sinóticas do dia mais representativo, agregando mais informação e confiabilidade, foram feitos também campos de direção e velocidade do vento em 925 hPa para os mesmos horários. Uma extensa pista de ventos de direção sul/sudeste apresenta forte desaceleração sobre o litoral do Rio de Janeiro (Figura 4.11c). Os altos valores de água precipitável e seus gradientes e a desaceleração do escoamento em baixos níveis sugerem significativo transporte e convergência de massa e umidade.

Uma ampla área de circulação ciclônica sobre o Atlântico Sul, incluindo a presença de cavados frontais e cavados de ondas curtas próximos ao Sudeste do Brasil, caracteriza o cenário em níveis médios (Figura 4.11d).

Nas figuras 4.13 a e b, são apresentadas imagens de satélite dos canais infravermelho e vapor d'água, respectivamente. Dentre as imagens disponíveis, foi escolhido o horário de 20:45 UTC por estar mais próximo do horário das 00:00 UTC

analisado nos campos sinóticos e, ainda assim, retratar parte da atividade convectiva associada ao ciclo diurno de aquecimento da superfície.

Observando a imagem de satélite do canal infravermelho do dia 17/03/2013 às 20:45 UTC (Figura 4.13a), nota-se a presença de um ciclone extratropical ativo sobre o Oceano atlântico que estende parte de seu ramo frontal frio sobre o Rio de Janeiro. Núcleos convectivos isolados podem ser observados na dianteira deste ramo frontal sobre o interior da Região Sudeste. Na retaguarda do sistema frontal e sobre grande parte do Atlântico Sul verifica-se a presença de células cumuliformes isoladas, denominadas de células abertas. Segundo Houze (1993) as células abertas ocorrem preferencialmente sobre águas relativamente quentes, são compostas por aglomerados de nuvens do tipo cumulus e por pequenos cumulonimbus e sua formação é favorecida quando o aquecimento originado pelo fluxo de calor sensível da superfície é dominante. Quando o ar frio de latitudes altas escoia sobre águas relativamente mais quentes do Atlântico Sul as condições se tornam propícias para formação deste tipo de células. Sobre o Rio de Janeiro a nebulosidade em sua maior parte é composta por nuvens nimbostratus, com cumulonimbus isolados embebidos, sendo forçadas pela convergência em baixos níveis em escala sinótica provocada pelo avanço do anticiclone pós-frontal e pela atuação da frente fria.

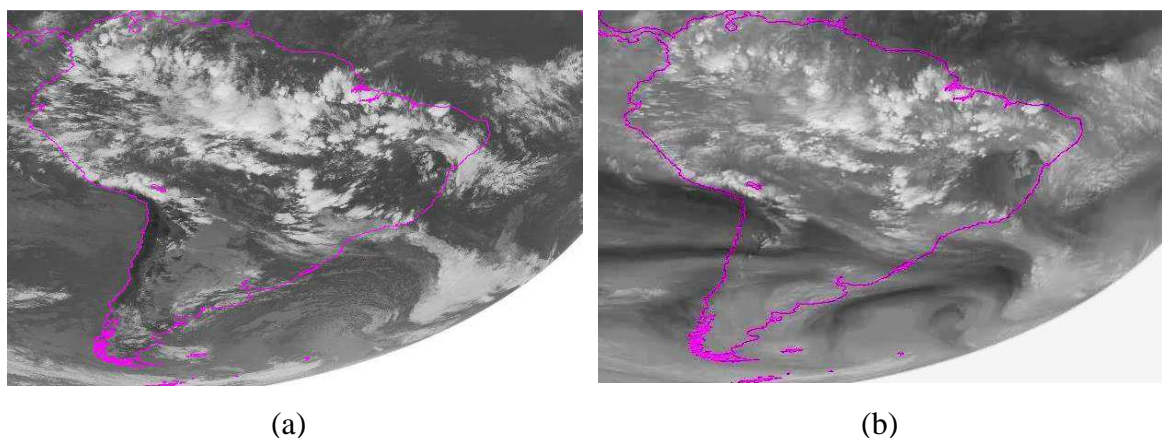


Figura 4.13 - Imagens do satélite GOES13 do dia 17/03/2013 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água). Fonte: <http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html>

A imagem de satélite do canal vapor d'água do dia 17/03/2013 às 20:45 UTC mostra tons escuros de cinza na retaguarda da frente fria resultantes da subsidência de ar seco com alta vorticidade relacionada à atividade ciclogênica (Figura 4.13b). Também é

possível observar tons de cinza mais escuros entre o norte da Região Sudeste e o sul da Região Nordeste, indicando assim um secamento da atmosfera e pouca nebulosidade, sendo coerente com o campo de água precipitável da figura 4.11b. Núcleos convectivos isolados no interior da Região Sudeste apresentam-se embebidos em uma região de alto teor de umidade em médios e altos níveis que engloba grande parte do Rio de Janeiro. Observa-se assim, características típicas de atuação de um sistema frontal que possui a maior parte de sua estrutura se deslocando de maneira oceânica.

Com o conhecimento das datas de extremos de precipitação de cada padrão sinótico, torna-se possível aplicar a ferramenta do SOM em uma análise exploratória da distribuição espacial do total de precipitação acumulada em 24 horas. Desta forma, busca-se elaborar um agrupamento das estações pluviométricas a partir da distribuição da chuva provocada por cada um dos padrões sinóticos associados aos eventos extremos de precipitação, visando-se definir RPH características de cada um dos padrões encontrados.

Para isso, foram selecionados apenas os dados de precipitação acumulada em 24 horas das estações telepluviométricas nos dias de ocorrência dos extremos de precipitação de cada padrão sinótico. Os procedimentos são semelhantes aos descritos no item 4.1, porém são utilizados apenas os dias correspondentes de cada padrão sinótico e não o total dos 46 dias de eventos extremos. Desta forma, no caso do padrão sinótico 1 foram usados os dados de 26 estações com acumulados diários dos 15 dias de extremos de chuva que foram mapeados na classificação sinótica.

Foram mantidos os números de nós (grupos) do procedimento feito para todos os dias de eventos extremos no item 4.1. Após a realização dos testes de sensibilidade foi eleita a configuração que apresentou melhor resultado e esta foi aplicada aos dados dos quatro padrões sinóticos distintos (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Parâmetros finais de configuração do algoritmo SOM para determinação de Regiões Pluviométricas Homogêneas dos 4 padrões sinóticos.

<b>Parâmetros de configuração do SOM</b>	<b>Valores</b>
Número total de interações	2.000
Número de interações da fase de ordenamento	1.000
Fator de correção inicial da fase de ajuste fino	0.9
Fator de correção final da fase de ajuste fino	0.4
Fator de vizinhança durante fase de ajuste fino	0
Dimensão fixa da matriz SOM	2x2
Grade de nós	Hexagonal

Após a determinação da melhor configuração do SOM, o processamento da rede neural resultou na classificação das 26 estações em 4 grupos distintos, apresentando CS global com valor 0,316. A obtenção destes 4 grupos permitiu a definição das 4 regiões pluviométricas distintas associados à distribuição espacial de chuva provocada pelos eventos classificados no padrão sinótico 1.

A figura 4.14 e a tabela 4.8 mostram o resultado do agrupamento com as quatro RPH distintas e revelam aspectos espaciais relevantes da distribuição de chuva nos eventos extremos do padrão sinótico 1. O Grupo 1 é composto apenas pela estação 4 (Tijuca), que está localizada sobre o maciço da Tijuca e apresenta maior cota de altitude da rede de estações com 340 m acima do nível do mar, apresentando a maior precipitação diária média durante os 15 dias de eventos extremos de chuva, com 129 mm. O Grupo 2 é formado por 7 estações, localizadas nas vertentes ou próximas ao entorno dos maciços montanhosos, e apresenta a segunda maior média diária de precipitação. O Grupo 3 engloba 4 estações que estão restritas à macro bacia hidrográfica da Baía de Sepetiba, caracterizada por extensas áreas de baixada, e apresenta média diária de precipitação significativamente menor do que os grupos 1 e 2. O Grupo 4 é composto por 14 estações que se distribuem sobre áreas afastadas dos maciços montanhosos e dominada por regiões de baixada e apresenta o menor volume de precipitação média diária entre as quatro RPH.



Figura 4.14 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 1, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.

Em relação à distribuição espacial das RPH observa-se a atribuição de uma região com máximo de chuva média diária sobre o interior do maciço da Tijuca, acompanhada de uma região com máximos secundários contemplando os locais próximos às vertentes dos maciços montanhosos. Duas RPH distintas apresentam os menores volumes de precipitação e estão limitadas às áreas distantes dos maciços e dominadas por regiões de baixada. Este aspecto sugere a importância da presença dos maciços montanhosos na variabilidade espacial da precipitação durante eventos extremos de chuva sobre o município do Rio de Janeiro associados ao padrão sinótico 1 (Figura 4.14 e tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 1.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Precipitação média (mm)	129,3	91,8	71,0	69,0

A figura 4.15 mostra os máximos acumulados em 1 hora e em 24 horas na rede de estações do Alerta Rio durante os eventos extremos associados ao padrão sinótico 1. Observa-se diversos tipos de relações entre os acumulados horários e diários. Acumulados horários que indicam a ocorrência de chuva intensa e acumulados diários

elevados, como nos eventos 1 (06/04/2010), 6 (12/02/1998) e 7 (11/12/2013), revelam a ocorrência de um evento chuvoso intenso de longa duração. Já acumulados horários que indicam ocorrência de chuva intensa e acumulados diários reduzidos, como no evento 13 (17/02/2000), revelam a ocorrência de um evento chuvoso intenso, porém de curta duração. Finalmente, acumulados horários menos expressivos e acumulados diários elevados, como no evento 25 (18/04/2006), indicam a ocorrência de um evento chuvoso caracterizado por chuva menos intensa porém mais persistente. Destaca-se que neste padrão sinótico 47% dos máximos horários associados aos eventos de chuva extrema superaram os 50 mm acumulados em 1 hora, sendo que apenas 7% dos máximos horários foram superiores a 75 mm acumulados em 1 hora.



Figura 4.15 - Valores máximos horários e diários de precipitação (mm) registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 1.

O padrão sinótico 1, caracterizado pela atuação de um sistema frontal onde os processos advectivos assumem grande importância, tende a concentrar seu maiores volumes de precipitação sobre as áreas montanhosas e litorâneas da cidade. Lima *et al.* (2009), ao investigarem as condições atmosféricas de grande escala associadas aos episódios de chuva intensas sobre o Sudeste do Brasil, observam que na distribuição geográfica dos eventos de chuvas intensas, existem maiores concentrações destes eventos perto da costa. Este resultado indica que os eventos intensos estão associados com forte advecção de



umidade do Oceano Atlântico. Além disso, estas áreas possuem terreno complexo como a Serra do Mar e as serras da Mantiqueira. Estas características topográficas são susceptíveis a formação e intensificação de sistemas precipitantes estacionários o que pode causar chuvas intensas e totais diários de precipitação elevados.

Houze (1993) observa que o escoamento do ar sobre áreas montanhosas quase sempre influencia a formação de nebulosidade, podendo forçar, disparar ou intensificar o desenvolvimento das nuvens. Além disso, formações montanhosas afetam a estrutura e precipitação de nuvens nimbostratus associadas aos sistemas meteorológicos como frentes frias.

Dereczynski *et al.* (2009) indicam que ao longo do ano e sazonalmente os máximos de precipitação na cidade do Rio de Janeiro localizam-se sobre os três maciços. Nas demais áreas de planície da cidade a precipitação apresenta menores valores e distribui-se de forma mais homogênea. Este padrão de distribuição espacial da precipitação é explicado pelos sistemas meteorológicos em deslocamento preferencialmente de sul para norte, produzindo máximos de precipitação à barlavento das serras e mínimos de precipitação à sotavento. Em relação aos eventos de chuvas intensas, Dereczynski *et al.* (2009) constataram que a maior parte dos casos, cerca de 77%, foi provocada por sistemas frontais.

Seluchi *et al.* (2009) informam que 54% dos eventos chuvosos que provocaram mortes por deslizamentos de terra na Serra do Mar no estado de São Paulo estavam associadas a atuação de sistemas frontais. Estes eventos se apresentaram mais intensos do que a média e os campos médios de baixos níveis exibem um cavado seguido por uma crista mais intensa e estão associados a um forte gradiente de temperatura meridional. A instabilidade termodinâmica é ligeiramente mais intensa do que a da climatologia destes sistemas e é combinada com forte circulação ciclônica na troposfera média e superior. Ainda nestes casos, o momento dos deslizamentos coincide com o posicionamento do cavado em 250 hPa sobre a região da Serra do Mar.

Lima *et al.* (2009), ao investigarem 45 anos de dados sobre a Região Sudeste concluem que os eventos de precipitação intensa estão na sua maioria (53%) associados a sistemas frontais. Moura e Escobar (2011), utilizando a técnica de Componentes Principais, observaram que um dos principais padrões sinóticos associados a casos de chuva extrema na cidade do Rio de Janeiro, durante o período de 1997-2010, mostra uma

frente fria intensa sobre a Região Sudeste. A análise da configuração de pressão em superfície associada permitiu aos autores inferir que existe uma forte componente marítima sobre o litoral do Sudeste nestes casos, devido ao intenso gradiente de pressão observado sobre o Oceano Atlântico e o continente, potencializando a advecção de umidade. Cabe ressaltar que este cenário é semelhante ao cenário obtido com o campo médio de PNMM do padrão sinótico 1 e com o campo do dia 18/03/2013.

Desta maneira, constata-se que o padrão sinótico 1 se apresenta como o mais relevante entre os quatro padrões, uma vez que este é o mais frequente e o que apresenta em média os maiores volumes de chuva acumulados, incluindo o maior máximo de precipitação. Além disso, durante estes eventos, a distribuição espacial da precipitação indica a existência de regiões pluviométricas susceptíveis ao registro de acumulados de chuva ainda mais elevados do que em outras áreas da cidade. O cenário meteorológico representado pelo padrão sinótico 1, associado à condição topográfica do município do Rio de Janeiro, fazem com que a chuva se torne ainda mais intensa nas áreas montanhosas e litorâneas da cidade, destacando-se o maciço da Tijuca. Em função da persistência e duração da advecção frontal e pós-frontal de umidade em escala sinótica vinda do oceano, os eventos chuvosos associados a esse padrão costumam apresentar longa duração.

#### **4.2.2 - Padrão Sinótico 2**

Os campos médios do padrão sinótico 2 indicam uma condição semelhante ao estabelecimento de uma zona de convergência de massa e umidade, possivelmente associada a ZCAS, sobre o Rio de Janeiro. A presença de dois sistemas de alta pressão, estando um posicionado entre o litoral da Região Sul, Uruguai e oceano adjacente e o outro, associado à ASAS, posicionado mais a leste sobre regiões subtropicais e tropicais do Atlântico, influenciam o padrão de escoamento na baixa troposfera. Esta configuração indica a existência de uma região de descontinuidade entre duas massas de ar distintas (Figura 4.16a).

No campo médio de água precipitável observa-se valores máximos de até 55 mm no litoral do Rio de Janeiro. Este máximo de água precipitável encontra-se embebido em uma região mais ampla de valores elevados de água precipitável que se estende sobre a

Bolívia, as Regiões Centro Oeste e Sudeste e se conecta ao Atlântico em direção à sudeste (Figura 4.16b). O intenso gradiente de umidade que pode ser notado entre o litoral sul do Rio de Janeiro e a Região Sul revela uma clara separação entre massas de ar com diferentes características, situação semelhante ao estabelecimento de uma zona de convergência.

Um cavado de onda curta, posicionado entre 25°S e 35°S, pode ser visto associado a uma ampla região de circulação ciclônica de um cavado frontal posicionado entre 32°S e 50°S (Figura 4.16c). A presença deste cavado, possivelmente associado a um meandro da corrente de jato subtropical, pode favorecer o aumento da convergência em baixos níveis e o levantamento justamente nas áreas com valores elevados de água precipitável que abrangem parte da Região Sudeste, incluindo o Rio de Janeiro.

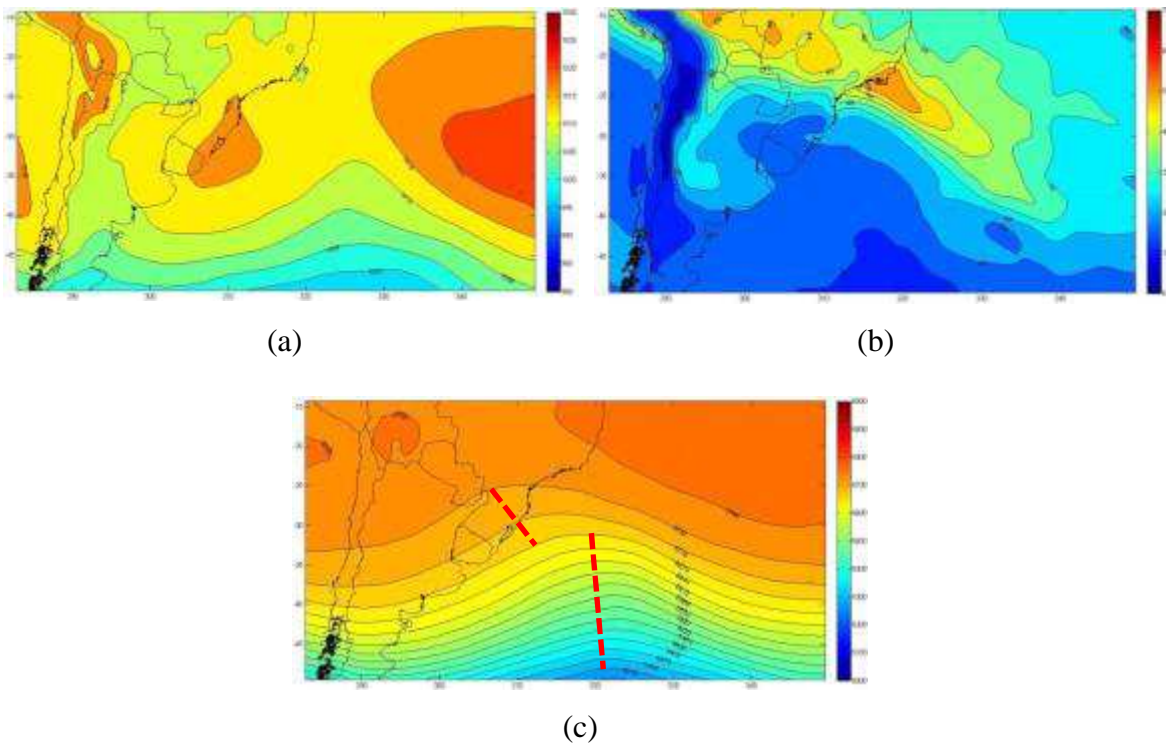


Figura 4.16 - Campos médios do padrão sinótico 2, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.



Figura 4.17 - Número de ocorrências do padrão sinótico 2 acumuladas em todos os meses do ano.

A presença de dois sistemas de alta pressão em superfície, com clara separação de massas sobre o sudeste do Brasil, resultando em valores elevados de umidade atmosférica nesta região, sugerem um cenário caracterizado pelo estabelecimento de uma zona de convergência de massa e umidade sobre estas áreas. A convergência de umidade, oriunda do escoamento em baixos níveis nos flancos oeste e sudoeste do sistema de alta pressão associado à ASAS e nos flancos nordeste e leste do anticiclone centrado em 30°S e 310°W, em conjunto ao deslocamento do cavado de onda curta em níveis médios, tornam o ambiente em escala sinótica propício para ocorrência de volumes e taxas de precipitação elevada.

Analisando-se o número de ocorrências do padrão sinótico 2 acumuladas ao longo dos meses do ano, destacam-se valores máximos no mês de janeiro (Figura 4.17). Esta distribuição permite levantar um possível comportamento preferencial para ocorrência deste tipo de padrão durante o auge do verão no hemisfério sul, sendo o período do ano normalmente mais chuvoso no Rio de Janeiro e propício para formação de zonas de convergência de massa e umidade em escala sinótica, incluindo a ZCAS.

A tabela 4.9 mostra a posição de cada dia em relação ao *ranking* dos 46 eventos extremos identificados, as datas dos eventos e os respectivos CS de cada dia (amostra).

Escolhendo-se o maior valor do coeficiente entre todas as amostras de um mesmo grupo, torna-se possível eleger a amostra que melhor represente o grupo como um todo. Em relação às amostras do grupo formador do padrão sinótico 2, destaca-se o dia 09/01/1998 com o maior valor do CS (0,53), que é o evento mais antigo identificado no histórico. Na lista de eventos do padrão sinótico 2 ainda é possível observar a presença do segundo e terceiro evento chuvoso extremo mais intenso, com precipitação média acumulada em 24 horas de 144,5 mm e 127,9 mm, respectivamente.

Nota-se também na tabela 4.9 os valores elevados do CS, apresentando inclusive o valor máximos do CS dentre todas as 46 amostras utilizada. Ressalta-se a ausência de dias com CS negativo. Estas características indicam a composição de um grupo com grande homogeneidade.

Tabela 4.9 - Informações sintetizadas do padrão sinótico 2 associado a eventos extremos.

Padrão Sinótico 2		
Número do Evento	Data do Evento	Coef. Silhouette
2	09/01/1998	0,53
3	24/12/2001	0,26
9	26/04/2011	0,32
10	22/01/2009	0,24
14	28/01/2006	0,50
18	13/12/2007	0,30
19	14/03/2008	0,38
32	13/02/2009	0,44
34	15/04/2014	0,35
35	03/02/2002	0,34
36	05/01/2006	0,33
39	19/03/2000	0,32
41	15/01/2010	0,42
42	16/01/2014	0,41

A análise dos campos sinóticos, elaborados a partir dos dados de reanálise, para o dia mais representativo do grupo formador do padrão sinótico 2 permite a extração de diversas informações. Os campos sinóticos de todos os dias do padrão sinótico 2 encontram-se disponíveis no Anexo 1.

Assumindo-se o dia 09/01/1998 como o mais representativo, observam-se no campo de PNMM dois sistemas de alta pressão distintos (Figura 4.18a). Um posicionado

entre o litoral da Região Sul e o Atlântico com valores superiores a 1016 hPa e o outro posicionado à leste de 330°W com valores superiores a 1024 hPa e provavelmente associado à ASAS. De acordo com o acompanhamento dos sistemas frontais apresentado no Boletim de Monitoramento e Análises Climáticas (CLIMANÁLISE, 1998), um sistema frontal se propagou sobre o Rio de Janeiro em direção ao Espírito Santo durante o dia 07/01/1998, permanecendo estacionário na altura da cidade de Vitória entre os dias 08/01/1998 e 09/01/1998 (Figura 4.19). Uma região de pressões relativamente menores pode ser vista entre os dois sistemas de alta pressão. A convergência em baixos níveis provocada pelo escoamento na borda dos sistemas de alta pressão promove a redução da pressão em superfície.

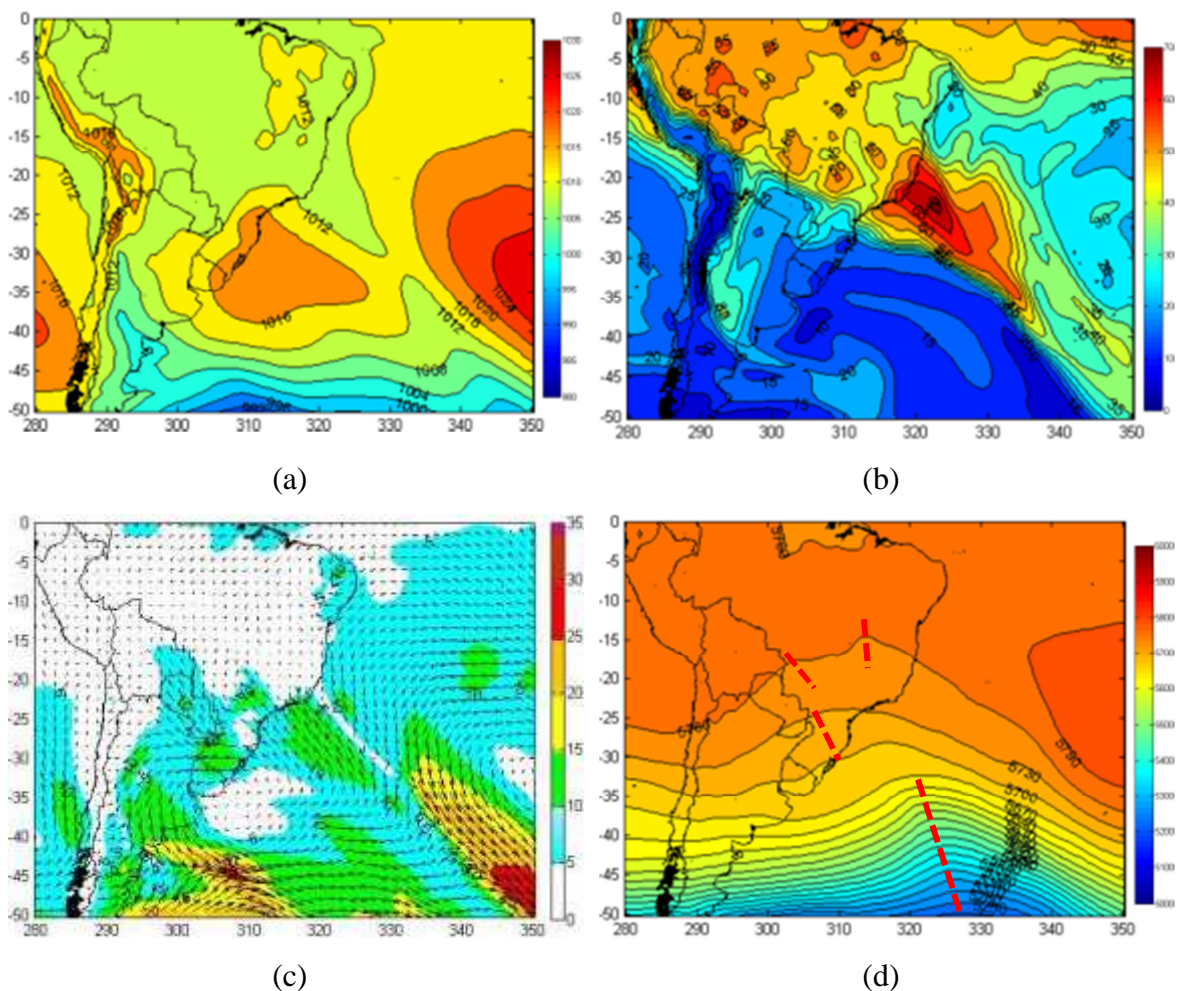


Figura 4.18 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 09/01/1998 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (mgp).



Figura 4.19 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 1998.

Na figura 4.18b verifica-se a presença de uma região com valores muito elevados de umidade integrada na coluna atmosférica, chegando a apresentar até 70 mm de água precipitável sobre o oceano próximo ao litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Este excesso de água na atmosfera pode ser resultado da convergência no transporte de massa e umidade nas bordas sudoeste e oeste da ASAS. Esta área de valor máximo de água precipitável encontra-se embebida em uma região mais ampla de valores também elevados, estendendo-se desde a Região Norte, conectando-se com as Regiões Centro Oeste e Sudeste e avançando em direção ao Atlântico com orientação no sentido noroeste/sudeste. Esta concentração de umidade e distribuição espacial é uma das características típicas dos eventos de zona de convergência.

Análise do escoamento em baixos níveis da troposfera revela a configuração de uma região de forte convergência, com intenso cisalhamento horizontal, entre o Rio de Janeiro e o oceano adjacente (Figura 4.18c). Esta região de convergência é formada pela borda sudoeste da ASAS e pela borda nordeste do anticiclone que atua entre o oceano e o litoral da Região Sul, coincidindo com a localização da área de valores máximos de água precipitável. A desaceleração de uma pista de ventos de direção sudeste, entre o oceano e o Rio de Janeiro, intensifica ainda mais a convergência sobre a área de estudo.

Analisando-se a figura 4.18d observa-se a presença de cavados de onda curta sobre o centro-sul do Brasil entre 15°S e 35°S e um intenso cavado frontal com forte gradiente de altura geopotencial entre 35°S e 50°S. O fraco gradiente de altura

geopotencial associado aos cavados de onda curta sobre o centro-sul do Brasil indicam que estes não estão relacionados à intensa atividade baroclínica, podendo-se tratar de meandros da corrente de jato subtropical.

Nas figuras 4.20a e 4.20b, são apresentadas imagens de satélite dos canais infravermelho e vapor d'água, respectivamente. Dentre as imagens disponíveis, foi escolhido o horário de 20:45 UTC por estar mais próximo do horário das 00:00 UTC analisado nos campos sinóticos e, ainda assim, retratar parte da atividade convectiva associada ao ciclo diurno de aquecimento da superfície.

Observando a imagem de satélite do canal infravermelho do dia 08/01/1998 às 20:45 UTC (Figura 4.20a), nota-se a atividade convectiva concentrada sobre as Regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste, incluindo o Rio de Janeiro. Sobre a Região Sul, Paraguai, Uruguai e grande parte da Argentina observa-se ausência de nebulosidade significativa, associada aos baixos teores de umidade do ar observado nesta região na figura 4.18b. Verifica-se a presença de nuvens do tipo cirrus embebidas em uma circulação ciclônica entre o litoral da Região Nordeste e o oceano, associada à atuação do vórtice ciclônico de altos níveis. Na imagem do canal do vapor d'água na figura 4.20b constata-se que a umidade em médios e altos níveis encontra-se concentrada sobre as Regiões Norte, Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste. No interior do continente, sobre parte das Regiões Sul e sul da Região Centro-Oeste verifica-se tons escuros de cinza resultantes da intrusão e subsidência de ar seco com alta vorticidade associado aos cavados de onda curta vistos na figura 4.18d. Outra região de intrusão de ar seco e subsidência é observada sobre o Atlântico associada ao cavado frontal posicionado entre 35°S e 50°S na figura 4.18d.

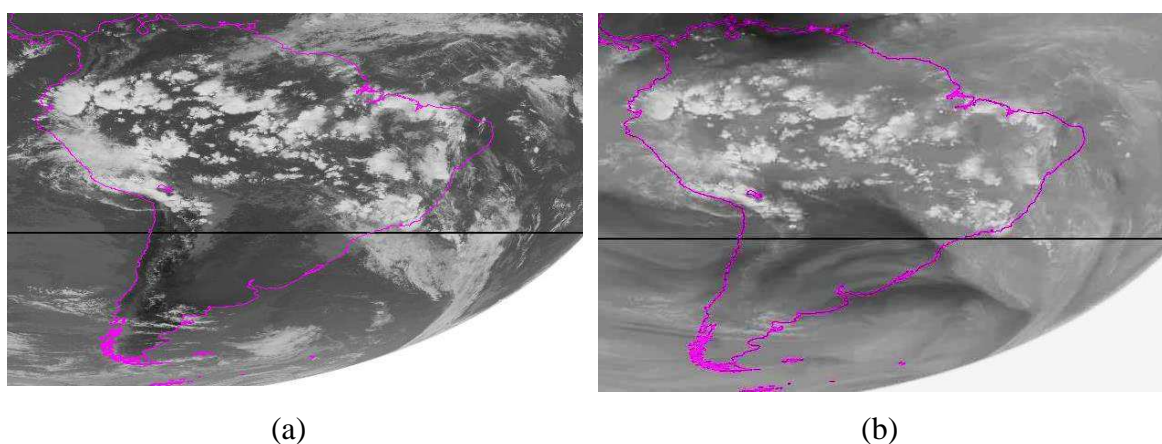


Figura 4.20 - Imagens do satélite GOES8 do dia 08/01/1998 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água).  
Fonte: <http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html>



Com o conhecimento das datas de extremos de precipitação de cada padrão sinótico, torna-se possível aplicar a ferramenta do SOM em uma análise exploratória da distribuição espacial do total de precipitação acumulada em 24 horas. Desta forma, busca-se elaborar um agrupamento das estações pluviométricas a partir da distribuição da chuva provocada por cada um dos padrões sinóticos associados aos eventos extremos de precipitação. Para isso, foram selecionados apenas os dados de precipitação acumulada em 24 horas das estações telepluviométricas nos 14 dias de ocorrência dos extremos de precipitação do padrão sinótico 2 que foram mapeados na classificação sinótica. O processamento da rede neural resultou na classificação das 26 estações em 4 grupos distintos, apresentando CS global com valor 0,201. A obtenção destes 4 grupos permitiu a definição das 4 regiões pluviométricas distintas associadas à distribuição espacial de chuva provocada pelos eventos classificados no padrão sinótico 2.

A figura 4.21 e a tabela 4.10 mostram o resultado do agrupamento com as quatro RPH distintas e revelam aspectos espaciais relevantes da distribuição de chuva nos eventos extremos do padrão sinótico 2. O Grupo 1 é composto pelas estações 4 (Tijuca), 5 (Santa Teresa) e 7 (Grajaú), que estão localizada sobre o maciço da Tijuca. Este grupo apresenta a maior precipitação diária média durante os 14 dias de eventos extremos de chuva, com 93,4 mm. O Grupo 2 é formado por 8 estações, localizadas nas vertentes ou próximas ao entorno dos maciços montanhosos, e apresenta a segunda maior média diária de precipitação.

No padrão sinótico 2, o Grupo 3 apresenta a menor média diária de precipitação e passou a ter 8 estações, que se distribuem em áreas afastadas dos maciços montanhosos e sobre regiões de baixada. O Grupo 4 é composto por 7 estações que também se distribuem sobre áreas afastadas dos maciços montanhosos, apresentando junto com o Grupo 3 os menores volumes de precipitação média diária entre as quatro RPH (Figura 4.21 e tabela 4.10).



Figura 4.21 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 2, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.

Em relação à distribuição espacial das RPH observa-se a atribuição de uma região com máximo de chuva média diária sobre o interior do maciço da Tijuca, acompanhada de uma região com máximos secundários contemplando áreas próximas às vertentes da face sul dos maciços montanhosos. Duas RPH distintas apresentam os menores volumes de precipitação e estão limitadas às áreas distantes dos maciços e dominadas por regiões de baixada. Este aspecto sugere a importância da presença dos maciços montanhosos na variabilidade espacial da precipitação durante eventos extremos de chuva sobre o município do Rio de Janeiro.

Tabela 4.10 - Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 2.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Precipitação média (mm)	93,4	73,0	57,0	66,4

A figura 4.22 mostra os máximos acumulados em 1 hora e em 24 horas na rede de estações do Alerta Rio durante os eventos extremo associados ao padrão sinótico 2. Observa-se diversos tipos de relações entre os acumulados horários e diários. Acumulados horários que indicam a ocorrência de chuva intensa e acumulados diários

elevados, como nos eventos 2 (09/01/1998), 9 (26/04/2011) e 39 (19/03/2000), revelam a ocorrência de um evento chuvoso intenso de longa duração. Já a presença de acumulados horários que indicam ocorrência de chuva intensa e acumulados diários reduzidos, como nos eventos 14 (28/01/2006), 18 (13/12/2007) e 42 (16/01/2014) representam a ocorrência de um evento chuvoso intenso, porém de curta duração. Finalmente, acumulados horários menos expressivos e acumulados diários elevados, como no evento 34 (15/04/2014), indicam a ocorrência de um evento chuvoso caracterizado por chuva menos intensa, porém de longa duração capaz de provocar elevados totais diários.

Destaca-se que neste padrão sinótico 71% dos máximos horários associados aos eventos de chuva extrema superaram os 50 mm acumulados em 1 hora, sendo que 27% dos máximos horários foram superiores a 75 mm acumulados em 1 hora. Isto indica um comportamento preferencial deste padrão em produzir taxas de precipitação elevadas.



Figura 4.22 - Valores máximos horários e diários de precipitação (mm) registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 2.

O padrão sinótico 2, caracterizado pela presença de uma zona de convergência, possivelmente associada a ZCAS, com valores elevados de água precipitável, associada a presença de sistemas de alta pressão distintos, sugere que o transporte e a convergência de umidade assumem grande importância. O alto percentual de taxas de precipitação intensa também sugere intensa atividade convectiva como característica deste cenário.

Moura e Escobar (2011) destacam que um dos principais padrões sinóticos associados a casos de chuva extrema na cidade do Rio de Janeiro durante o período de 1997-2010 mostra a passagem de frentes frias com trajetória predominantemente zonal e provavelmente associada com episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante a estação chuvosa. Utilizando a técnica de Componentes Principais, a segunda componente revela a presença de um sistema de alta pressão posicionado entre o litoral da Região Sul e o Atlântico, outro sistema de alta pressão associado à ASAS e uma região de pressões relativamente mais baixas sobre parte da Região Sudeste e do oceano adjacente. Este cenário é semelhante ao cenário obtido com o campo médio de PNMM do padrão sinótico 2 e com o campo do dia 09/01/1998.

Neste padrão sinótico, assim como no padrão sinótico 1, é possível observar uma configuração em médios níveis favorável para a ocorrência e intensificação de movimentos ascendentes. Neste cenário associado ao padrão sinótico 2, como de forma semelhante no padrão sinótico 1, os maiores volumes de chuva tendem a se concentrar sobre as áreas montanhosas da cidade.

Lima *et al.* (2009) informam que na Região Sudeste a precipitação intensa é causada principalmente por duas perturbações atmosféricas importantes, as frentes frias e as Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Os autores afirmam que a ZCAS é definida como uma zona de atividade convectiva reforçada que é mais pronunciada durante o verão austral e é visível em mapas de precipitação média como uma faixa que se estende da Bacia Amazônica Sul para o leste em direção ao Atlântico sobre a Região Sudeste do Brasil. O sistema é responsável por uma grande quantidade de chuvas nos estados do Rio de Janeiro, norte e leste de São Paulo, sul e oeste de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e no sul e leste do Mato Grosso.

Carvalho *et al.* (2002) expõe que a ZCAS é conhecida por desempenhar um papel importante na determinação da precipitação média anual na Região sudeste do Brasil. No entanto, estes autores informam que a precipitação na ZCAS apresenta uma rica variedade de variações intrasazonais e os eventos mais extremos ocorrem em associação com linhas de instabilidade, complexos convectivos de mesoescala, ou outros tipos de sistemas de mesoescala.

Desta maneira, constata-se que o padrão sinótico 2 se apresenta como o segundo mais relevante dentre os quatro padrões. Além disso, durante estes eventos, a distribuição

espacial da precipitação indica a existência de regiões pluviométricas susceptíveis ao registro de acumulados de chuva ainda mais elevados do que em outras áreas da cidade. O cenário meteorológico representado pelo padrão sinótico 2, associado à condição topográfica do município do Rio de Janeiro, fazem com que a chuva se torne ainda mais intensa nas áreas montanhosas da cidade, destacando-se o maciço da Tijuca. Suspeita-se que estas características atmosféricas e topográficas são propícias para a formação e intensificação de sistemas convectivos estacionários que podem causar totais diários e taxas de precipitação elevadas.

Considerando os padrões sinóticos 1 e 2, verifica-se que estes respondem juntos por 63% das ocorrência de dias de eventos extremos de chuva identificadas e por 67% do total de precipitação média diária observada durante os 46 dias de eventos. Desta forma, verifica-se a importância destes dois padrões sinóticos em relação à ocorrência de eventos extremos. Este resultado é coerente com outros trabalhos que também destacaram a importância dos sistemas frontais e das zonas de convergência nos eventos de chuvas intensas e extremas (CARVALHO *et al.* 2002, LIMA *et al.* 2009, SELUCHI *et al.* 2009 e DOLIF e NOBRE, 2012).

### **4.2.3 - Padrão Sinótico 3**

Os campos médios do padrão sinótico 3 (Figura 4.23a) indicam uma situação caracterizada pela presença de uma zona frontal estacionária em níveis baixos, sobre o litoral do Rio de Janeiro e o oceano, e a atuação de um cavado baroclínico em níveis médios sobre o sudeste do Brasil. A presença de uma ampla área de pressões relativamente mais altas, com valores de 1016 hPa, estendendo-se desde o litoral dos estados da Região Sul do Brasil até grande parte do Oceano Atlântico pode ser notada. Neste padrão, destaca-se a presença de regiões de pressão relativamente mais baixas próximas ao litoral dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, sugerindo assim a presença de um sistema de baixa pressão.

Uma região de valores máximos de até 50 mm de água precipitável sobre o litoral do Rio de Janeiro pode ser observada na figura 4.23b. Esta região de valores máximos apresenta-se orientada no sentido noroeste/sudeste mas sem apresentar conexão bem definida com as áreas de máximos relativos localizados sobre o oeste da Região Centro

Oeste e sul da Região Norte do Brasil. Observa-se um gradiente de umidade entre o litoral do Rio de Janeiro e o litoral de Santa Catarina, porém menos intenso do que nos demais padrões sinóticos, sugerindo assim uma descontinuidade menos abrupta entre massas de ar.

Em médios níveis verifica-se a presença de um cavado baroclínico amplificado sobre as Regiões Sul e Sudeste do Brasil (Figura 4.23c). A posição do cavado em latitudes subtropicais e tropicais sugere que este sistema pode estar associado à instabilidade no escoamento da corrente de jato subtropical. Destaca-se a posição do estado do Rio de Janeiro em relação ao eixo do cavado, localizando-se na porção leste deste eixo e em região favorável à ocorrência de movimentos ascendentes. Este posicionamento pode ser o responsável pela redução da PNMM sobre o Atlântico, próximo ao litoral do Rio de Janeiro, e pelos altos valores de água precipitável resultantes da convergência de massa e umidade em baixos níveis.

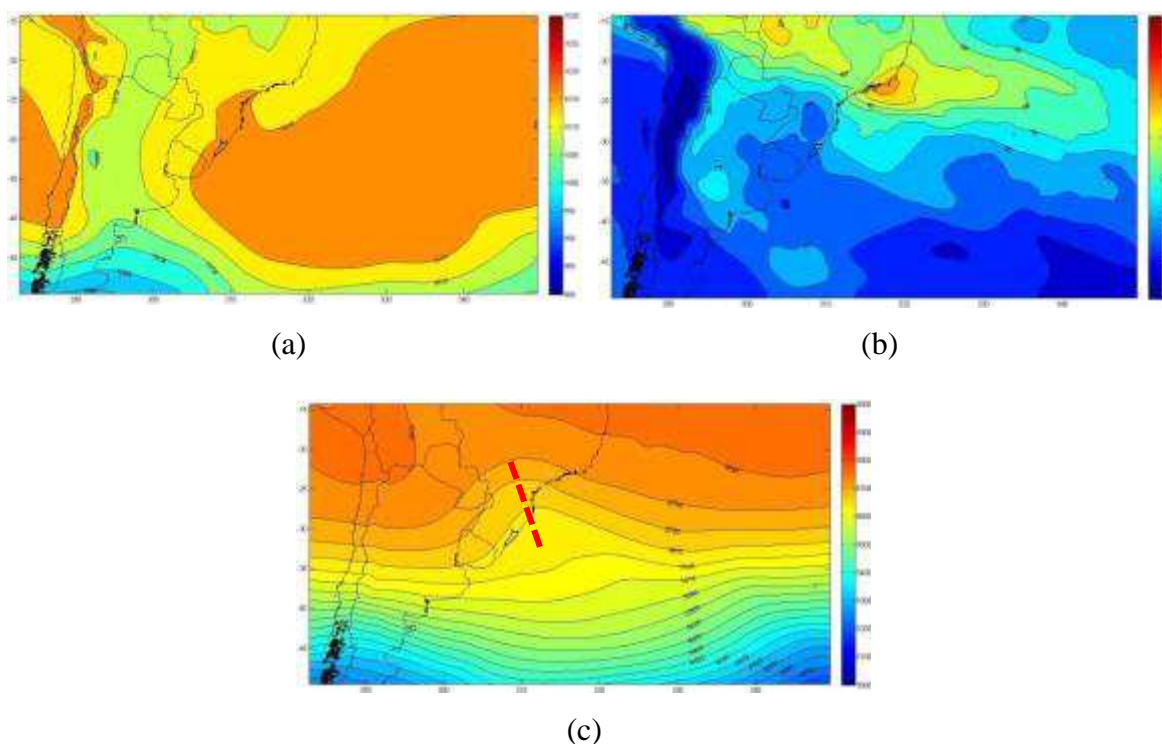


Figura 4.23 - Campos médios do padrão sinótico 3, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.

A presença de máximos de água precipitável e pressões relativamente mais baixas sobre o mar, próximo ao Rio de Janeiro, estão associadas à convergência de massa e

umidade em baixos níveis provocada pela atuação do cavado em altitude. Estes mecanismos atuam de forma propícia para ocorrência de eventos chuvosos significativos.

Na figura 4.24 são mostradas as ocorrências do padrão sinótico 3 acumuladas ao longo dos meses do ano. Não se observa valores máximos de destaque, sugerindo a inexistência de uma época preferencial para ocorrência. Este resultado pode estar relacionado à natureza transiente do cavado baroclínico observado em níveis médios, manifestando-se ao longo de diferentes épocas do ano.



Figura 4.24 - Número de ocorrências do padrão sinótico 3 acumuladas em todos os meses do ano.

A tabela 4.11 mostra a posição de cada dia em relação ao *ranking* dos 46 eventos extremos identificados, as datas dos eventos e os respectivos CS de cada dia (amostra). Escolhendo-se o maior valor do coeficiente entre todas as amostras de um mesmo grupo, torna-se possível eleger a amostra que melhor represente o grupo como um todo. Em relação às amostras do grupo formador do padrão sinótico 3, destaca-se o dia 25/10/2007 com o maior valor do CS (0,32). Nota-se também que neste grupo não se observa a presença dos maiores eventos extremos, sendo o maior deles apenas o décimo primeiro evento do *ranking*.

Outros aspectos interessantes entre os dados da tabela 4.11 são os baixos valores dos CS de cada amostra deste padrão sinótico, destacando-se metade das amostras com

valores negativos. Esta característica reflete a pequena homogeneidade deste agrupamento.

Tabela 4.11 - Informações sintetizadas do padrão sinótico 3 associado a eventos extremos.

Padrão Sinótico 3		
Número do Evento	Data do Evento	Coef. Silhouette
11	07/03/2010	-0,04
22	25/10/2007	0,32
24	14/12/2007	-0,10
26	07/04/2003	-0,08
27	01/05/2012	0,10
44	07/10/2006	0,18

A análise dos campos sinóticos, elaborados a partir dos dados de reanálise, para o dia mais representativo do grupo formador do padrão sinótico 3 permite a extração de diversas informações. Os campos sinóticos de todos os dias do padrão sinótico 3 encontram-se disponíveis no Anexo 1.

Assumindo-se o dia 25/10/2007 como o mais representativo, observam-se no campo de PNMM que a ampla área de alta pressão, observada no campo médio de PNMM do padrão sinótico 3 (Figura 4.23a), apresenta-se dividida sobre o Atlântico (Figura 4.25a), com a presença de um intenso sistema de alta pressão atuando sobre o oceano próximo ao litoral das Regiões Sul e Sudeste. Nota-se um cavamento no campo de PNMM próximo ao litoral do Rio de Janeiro. Na figura 4.25b verifica-se a presença de uma extensa região de valores máximos de água precipitável que se estende desde a Região Norte, passando pelo sul das Regiões Centro-Oeste e Sudeste e avançando em direção ao Atlântico. Esta região de umidade elevada e o gradiente de água precipitável associado sugerem a existência de uma separação de massas sobre estas áreas.

De acordo com o acompanhamento dos sistemas frontais apresentado no Boletim de Monitoramento e Análises Climáticas (CLIMANÁLISE, 2007), um sistema frontal chegou ao Rio de Janeiro durante o dia 23/10/2007, permanecendo estacionário durante a primeira metade do dia 24/10/2007 e seguindo em processo de dissipação (Figura 4.26). A análise do campo de vento em 925 hPa revela a atuação de ventos de componente leste em direção ao litoral do Rio de Janeiro e associados ao escoamento da borda do anticiclone (Figura 4.25c). Possivelmente, próximo à superfície, este escoamento se



apresente um pouco deslocado para direção sudeste em função do aumento do atrito e da sua componente ageostrófica.

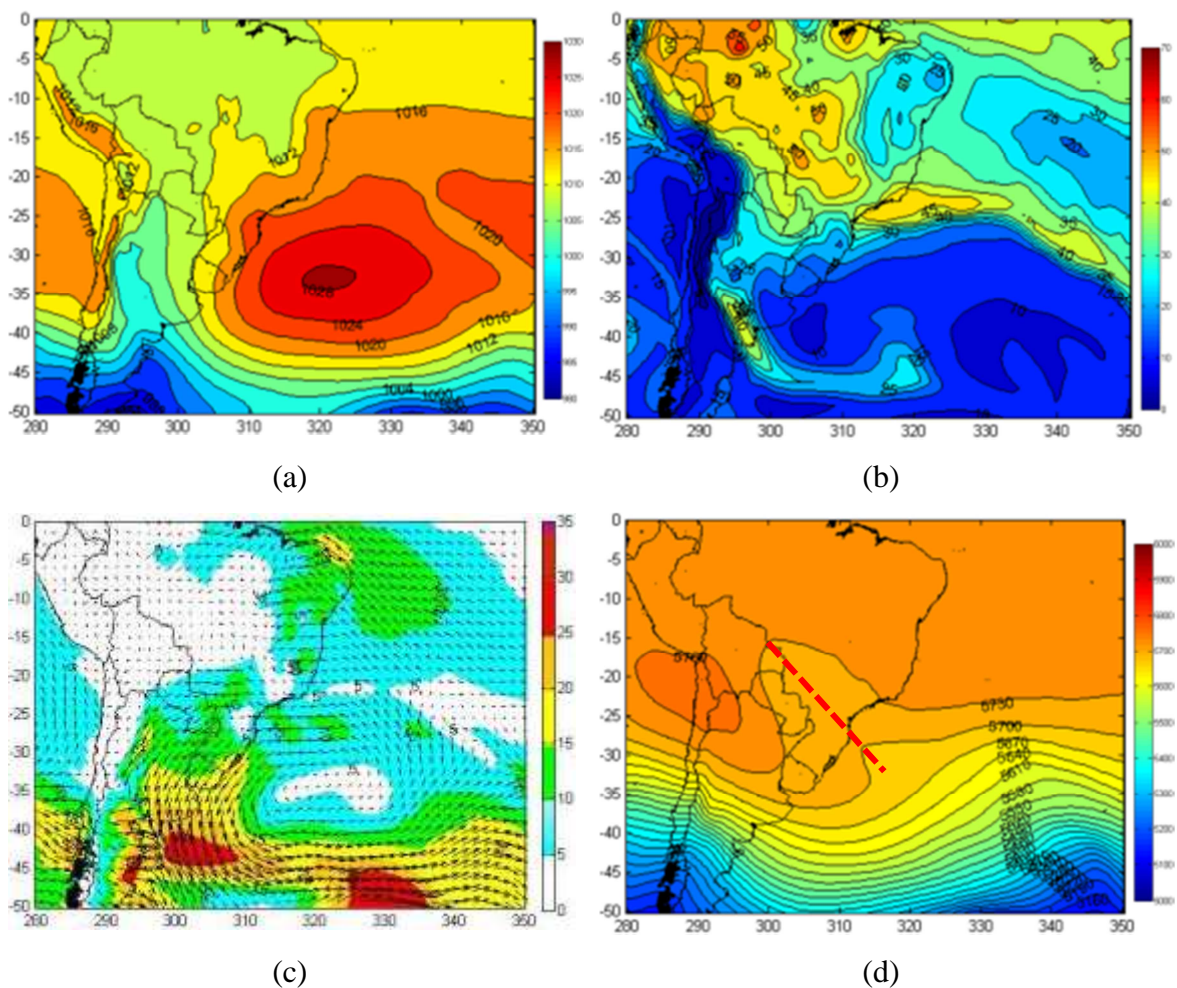


Figura 4.25 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 25/10/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (mgp).

Em níveis médios observa-se a presença de um cavado baroclínico bem amplificado, porém com fraco gradiente de altura geopotencial, sobre parte do centro-sul do Brasil (Figura 4.25d). Possivelmente este cavado está associado a um meandro da corrente de jato subtropical. O posicionamento deste sistema mantém o Rio de Janeiro em uma região favorável ao levantamento das parcelas de ar. Este levantamento pode ser responsável pela redução da pressão em superfície, forçando o surgimento de um cavado no campo de pressão na borda noroeste do anticiclone próximo ao Rio de Janeiro. A redução da pressão em superfície, próximo ao Rio de Janeiro, pode provocar ondulações na zona de separação de massas existente entre os dois sistemas de alta pressão sobre o Atlântico.



Na imagem do canal do vapor d'água (Figura 4.27b) observa-se tons escuros de cinza sobre grande parte da Região Sul, Paraguai, Uruguai e norte da Argentina resultantes da intrusão e subsidência de ar seco com alta vortividade associado ao cavado baroclínico mencionado anteriormente. Observa-se também que em níveis médios e altos a umidade encontra-se concentrada sobre grande parte do centro-norte do Brasil e o oceano adjacente. A distribuição de umidade em médios e altos níveis associados ao cavado baroclínico revelam sua capacidade de provocar levantamento do ar em escala sinótica.

A figura 4.28 mostra o resultado do agrupamento com as quatro RPH distintas. O processamento da rede neural resultou na classificação das 26 estações em 4 grupos distintos, apresentando CS global com valor 0,317.

Neste agrupamento, o Grupo 1 é composto por 4 estações, localizadas sobre ou próximas às vertentes das faces sul/sudeste dos maciços da Tijuca e da Pedra Branca e apresenta os maiores valores de precipitação diária média, com 79,9 mm (Figura 4.28 e tabela 4.12). O grupo 2 é composto por 6 estações que se distribuem no entorno dos maciços montanhosos, principalmente na porção sul/sudeste, e apresenta a segunda maior média diária de precipitação, com 62,2 mm. Neste padrão sinótico o Grupo 3 é formado por 5 estações, incluindo as quatro estações da macro bacia hidrográfica da Baía de Sepetiba e a estação 12 (Bangu), apresentando a menor média diária, com apenas 43,1 mm. Nota-se que todas as estações deste grupo estão posicionadas de forma afastada dos maciços montanhosos. Além disso, destaca-se que este grupo apresenta valores médios diários significativamente menores do que os demais grupos, sendo inclusive inferiores ao valor de 50 mm utilizado como critério para identificação dos eventos extremos de chuva (Figura 4.28 e tabela 4.12). O Grupo 4 é o mais numeroso com 11 estações, todas localizadas em áreas distantes dos maciços montanhosos, e concentradas sobre a zona norte da cidade e a parte norte da baixada de Jacarepaguá, apresentando assim a segunda média diária de chuva durante os dias de eventos extremos com apenas 56,2 mm.



Figura 4.28 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 3, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.

Em relação à distribuição espacial das RPH observa-se a atribuição de uma região com máximo de chuva média diária sobre as vertentes da face sul/sudeste do maciço da Tijuca, acompanhada de uma região com máximos secundários contemplando principalmente áreas próximas às vertentes da face sul/sudeste dos maciços montanhosos. Duas RPH distintas apresentam os menores volumes de precipitação e estão limitadas às áreas distantes dos maciços e dominadas por regiões de baixada. Este aspecto sugere a importância da presença dos maciços montanhosos na variabilidade espacial da precipitação durante eventos extremos de chuva sobre o município do Rio de Janeiro (Figura 4.28 e tabela 4.12). Possivelmente o transporte de umidade provocado pela atuação de ventos de componente sul/sudeste, devido ao posicionamento do anticiclone sobre o mar e a redução da pressão próxima ao litoral do Rio, favorecem o maior acúmulo de precipitação nas vertentes dos maciços voltadas para sul/sudeste (Figura 4.28 e tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 3.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Precipitação média (mm)	79,9	62,2	43,1	56,2

A figura 4.29 mostra os máximos acumulados em 1 hora e em 24 horas na rede de estações durante os eventos extremo associados ao padrão sinótico 3. Observa-se dois tipos de relações entre acumulados horários e diários. Acumulados horários que indicam ocorrência de chuva intensa e acumulados diários reduzidos, como no evento 11 (07/03/2010), revelam a ocorrência de um evento chuvoso intenso, porém de curta duração. Já acumulados horários menos expressivos e acumulados diários elevados, como nos eventos 24 (14/12/2007) e 27 (01/05/2012), indicam a ocorrência de um evento chuvoso caracterizado por chuva menos intensa, porém de longa duração capaz de provocar elevados totais diários. Destaca-se que neste padrão sinótico apenas 17% dos máximos horários associados aos eventos de chuva extrema superaram 50 mm acumulados em 1 hora, sendo que nenhum máximo horário superior a 75 mm acumulados em 1 hora foi registrado. Indica-se assim um comportamento preferencial deste padrão em produzir taxas de precipitação menos elevadas, porém com acumulados diários expressivos.

### Acumulados máximos horários e diários

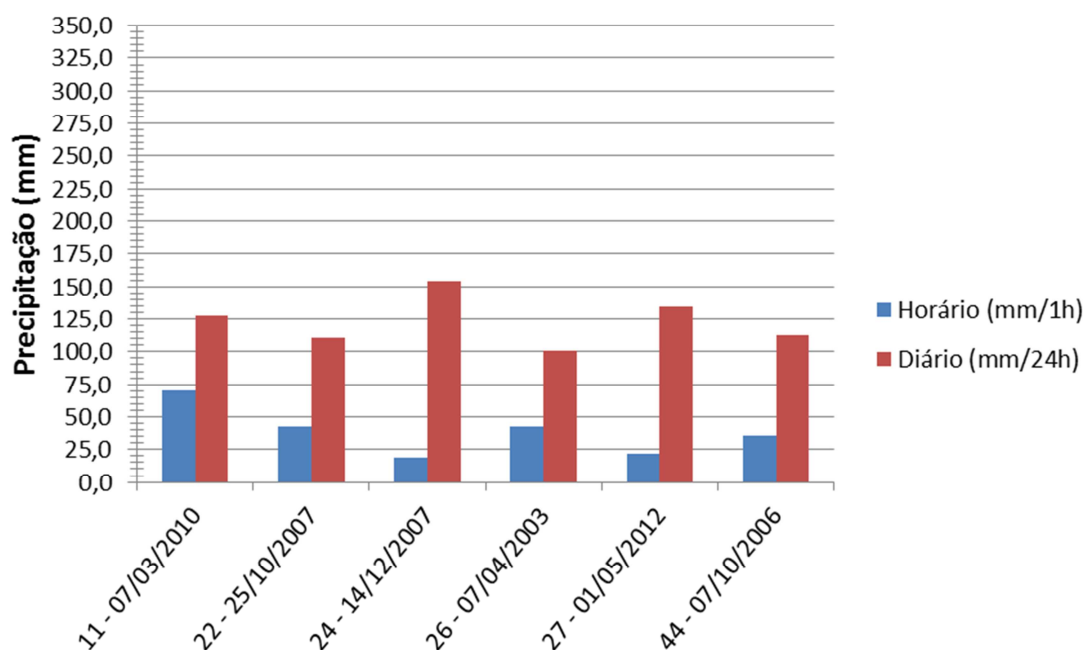


Figura 4.29 - Valores máximos horários e diários de precipitação (mm) registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 3.

O padrão sinótico 3, caracterizado pela atuação de um cavado baroclínico amplificado, que se desloca em direção a uma região de separação entre duas massas de ar com elevados valores de água precipitável ao norte, representa um cenário favorável ao

levantamento do ar em escala sinótica. A presença de um anticiclone sobre o oceano e de uma região de pressões relativamente mais baixas próximas do litoral do Rio de Janeiro parecem favorecer o transporte de umidade do mar, através da atuação de ventos de componente sudeste/leste, em direção às vertentes sul/sudeste dos maciços montanhosos. Esta condição sinótica tendeu a provocar uma distribuição espacial caracterizada por máximos de precipitação nas faces dos maciços voltadas para o oceano e mínimos de precipitação em áreas afastadas dos maciços e concentradas sobre as zonas Norte e Oeste da cidade. Um cenário atmosférico onde o levantamento em escala sinótica e a convergência de umidade na baixa troposfera favorecem a ocorrência de acumulados elevados de chuva sobre as faces das áreas montanhosas da cidade voltadas para sul e sudeste seria a característica principal do padrão sinótico 3.

#### **4.2.4 - Padrão Sinótico 4**

Os campos médios de PNMM do padrão sinótico 4 indicam a presença de dois sistemas de alta pressão, estando um posicionado entre os litorais da Região Sul e do Uruguai e oceano adjacente e o outro, associado à ASAS, posicionado mais a leste sobre regiões subtropicais e tropicais do Atlântico. Esta configuração indica a existência de uma região de descontinuidade entre duas massas de ar distintas. Um intenso sistema de baixa pressão, com valores inferiores a 988 hPa e centrado em 50°S e 300°W, destaca-se neste padrão. Este sistema estende um cavado em direção à região limitada pela borda dos dois sistemas de alta pressão (Figura 4.30a).

No campo médio de água precipitável observa-se valores máximos de até 50 mm sobre o litoral do Rio de Janeiro e o oceano. Este máximo encontra-se embebido em uma região mais ampla de valores elevados de água precipitável, que se estende para sudeste sobre o Atlântico em direção ao sistema de baixa pressão (Figura 4.30b). O gradiente de umidade existente ao sul desta região de valores máximos de água precipitável se apresenta alinhado e com curvatura ciclônica sobre o Atlântico até latitudes superiores a 45°S. Esta característica revela uma visível condição de separação entre massas de ar, situação semelhante ao papel desempenhado por um sistema frontal.

Em médios níveis não se observa a presença de sistemas meteorológicos significativos próximos ao Rio de Janeiro. Este aspecto revela que a atividade baroclínica

neste padrão possivelmente não é destacadamente relevante. Um amplo cavado com intenso gradiente de geopotencial, associado ao sistema de baixa pressão observado em superfície, pode ser visto ao sul de 30°S sobre o Atlântico (Figura 4.30c).

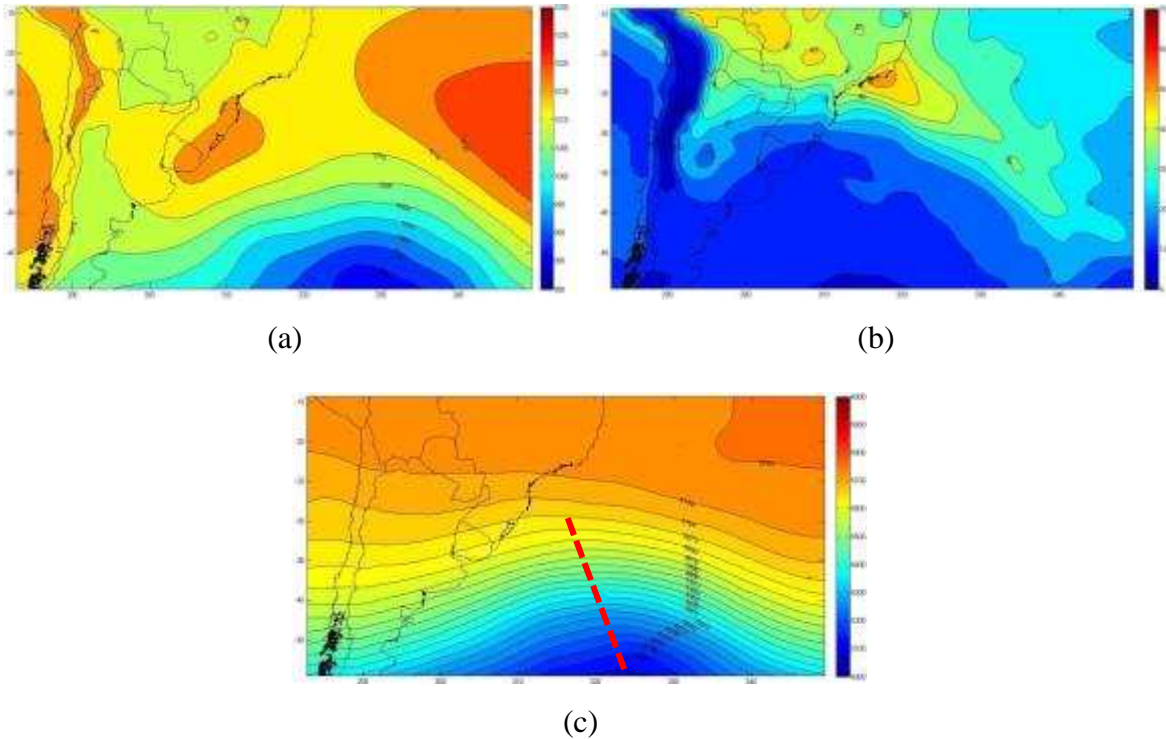


Figura 4.30 - Campos médios do padrão sinótico 4, sendo (a) pressão ao nível médio do mar, (b) água precipitável e (c) altura geopotencial em 500hPa.

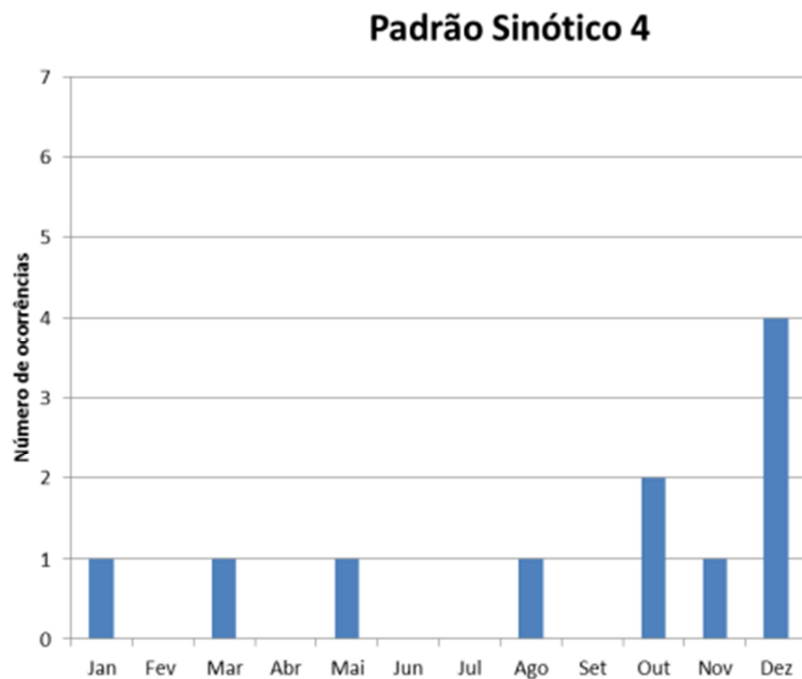


Figura 4.31 - Número de ocorrências do padrão sinótico 4 acumuladas em todos os meses do ano.

A presença do intenso sistema de baixa pressão sobre o Atlântico Sul estendendo um cavado em direção ao sudeste do Brasil, entre dois sistemas de alta pressão distintos, sendo um associado à ASAS e outro caracterizado como pós-frontal, sugere o deslocamento oceânico do ramo frontal frio de um ciclone extratropical ao largo da Região Sudeste. A ausência de sistemas meteorológicos significativos em níveis médios sobre o sudeste do Brasil mostra que os principais mecanismos de escala sinótica associados à ocorrência da precipitação nos eventos chuvosos extremos do padrão sinótico 4 estão restritos aos níveis mais baixos da troposfera.

Analisando-se o número de ocorrências do padrão sinótico 4 acumuladas ao longo dos meses do ano, destacam-se valores máximos no meses de outubro e dezembro (Figura 4.31). Este comportamento revela que esse padrão se torna mais frequente durante a metade inicial da estação chuvosa no Rio de Janeiro.

A tabela 4.13 mostra a posição de cada dia em relação ao *ranking* dos 46 eventos extremos identificados, as datas dos eventos e os respectivos CS de cada dia (amostra). Em relação às amostras do grupo formador do padrão sinótico 4, destaca-se o dia 24/10/2005 com o maior valor do CS (0,43). Nota-se também que neste padrão é observada apenas a presença de uma amostra com CS negativo, indicando o agrupamento correto da maioria das amostras.

Tabela 4.13 - Informações sintetizadas do padrão sinótico 4 associado a eventos extremos.

Padrão Sinótico 4		
Número do Evento	Data do Evento	Coef. Silhouette
4	18/03/2003	0,13
5	31/12/2009	0,14
23	26/11/2005	0,42
28	25/01/2003	-0,09
30	06/12/2010	0,35
31	26/08/2003	0,31
33	20/05/2007	0,09
37	07/10/1998	0,40
40	06/12/2013	0,40
43	24/10/2005	0,43
46	05/12/2009	0,21



A análise dos campos sinóticos, elaborados a partir dos dados de reanálise, para o dia mais representativo do grupo formador do padrão sinótico 4 permite a extração de diversas informações. Os campos sinóticos de todos os dias do padrão sinótico 4 encontram-se disponíveis no Anexo 1.

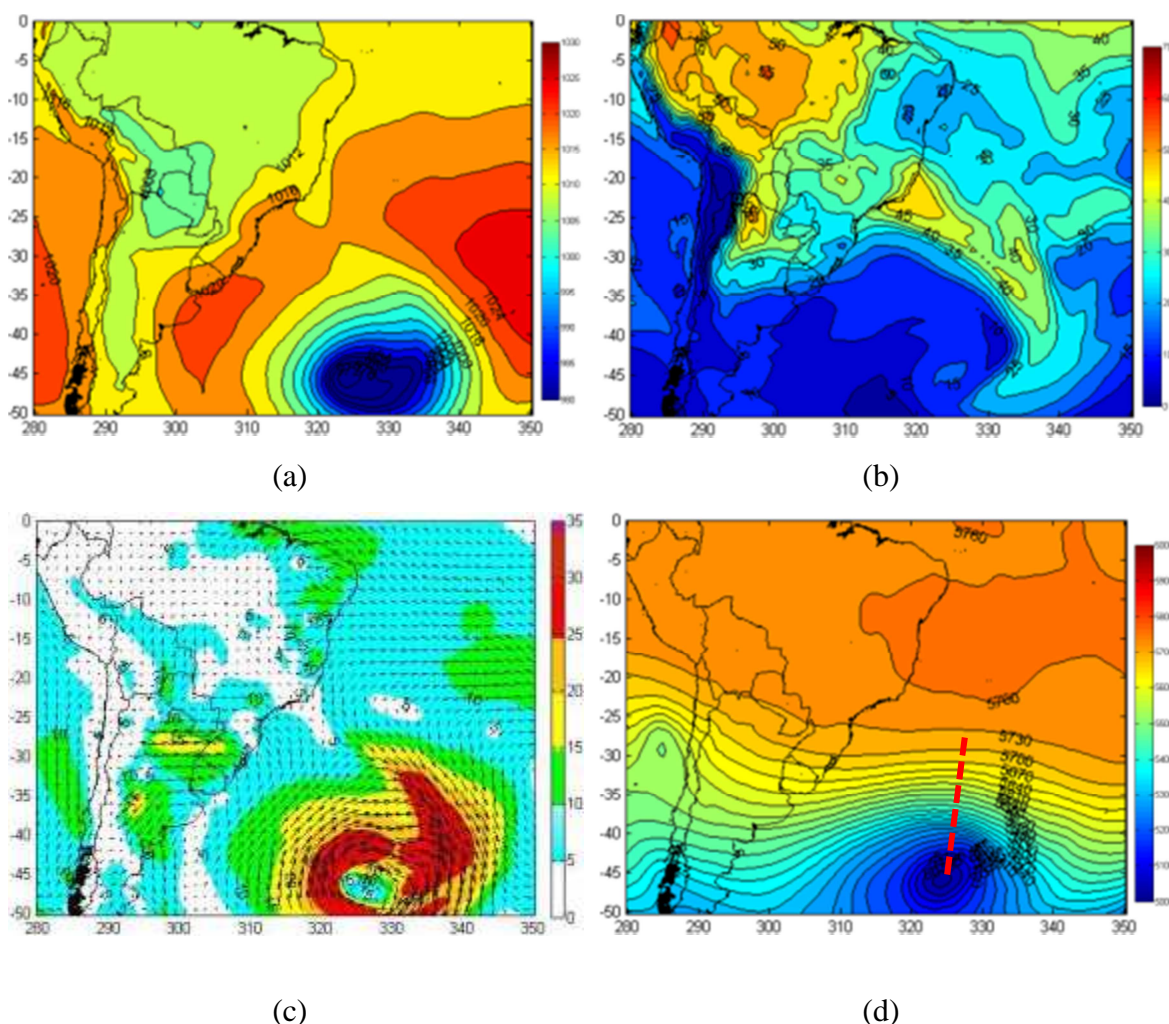


Figura 4.32 - Campos da reanálise ERA-Interim observados do dia 24/10/2005 às 00 UTC, sendo (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

Assumindo-se o dia 24/10/2005 como o mais representativo, observa-se no campo de PNMM a presença de um intenso ciclone extratropical, com valores em seu centro inferiores a 972 hPa e centrado em 46°S/322°W, estendendo um ramo frontal frio em direção ao litoral do Rio de Janeiro (Figura 4.32a). Regiões com valores máximos de água precipitável estão associadas ao ramo frontal do ciclone e podem ser observadas desde o litoral do Rio até as proximidades do centro de baixa pressão. Destaca-se que esta região de valores elevados de umidade está desconectada das regiões de máximos

observada sobre a Região Norte do Brasil (Figura 4.32b). A presença dos gradientes intensos de pressão em superfície e de água precipitável com curvatura ciclônica sobre o oceano, indo em direção ao ramo ocluso do ciclone, mostra a característica oceânica deste sistema frontal. O escoamento em baixos níveis mostra a presença de máximos de vento, com até 30 m/s, associados ao ciclone extratropical. O Rio de Janeiro encontra-se sob uma região de ventos fracos, caracterizada pela convergência entre a ASAS e o anticiclone pós-frontal (Figura 4.32c).

Em níveis médios, observa-se um profundo centro de baixa altura geopotencial, possivelmente associada a um vórtice ciclônico, centrado em 47°S/327°W e posicionado a leste em relação ao sistema de baixa pressão em superfície, indicando assim o andamento da fase de oclusão do ciclone. Assim como no campo médio analisado anteriormente, não se observa a atuação de sistemas meteorológicos significativos em níveis médios sobre a Região Sudeste (Figura 4.32d). Isto indica que mecanismos dinâmicos em escala sinótica associados a produção da precipitação sobre o Rio de Janeiro atuaram de forma restrita a baixa troposfera.

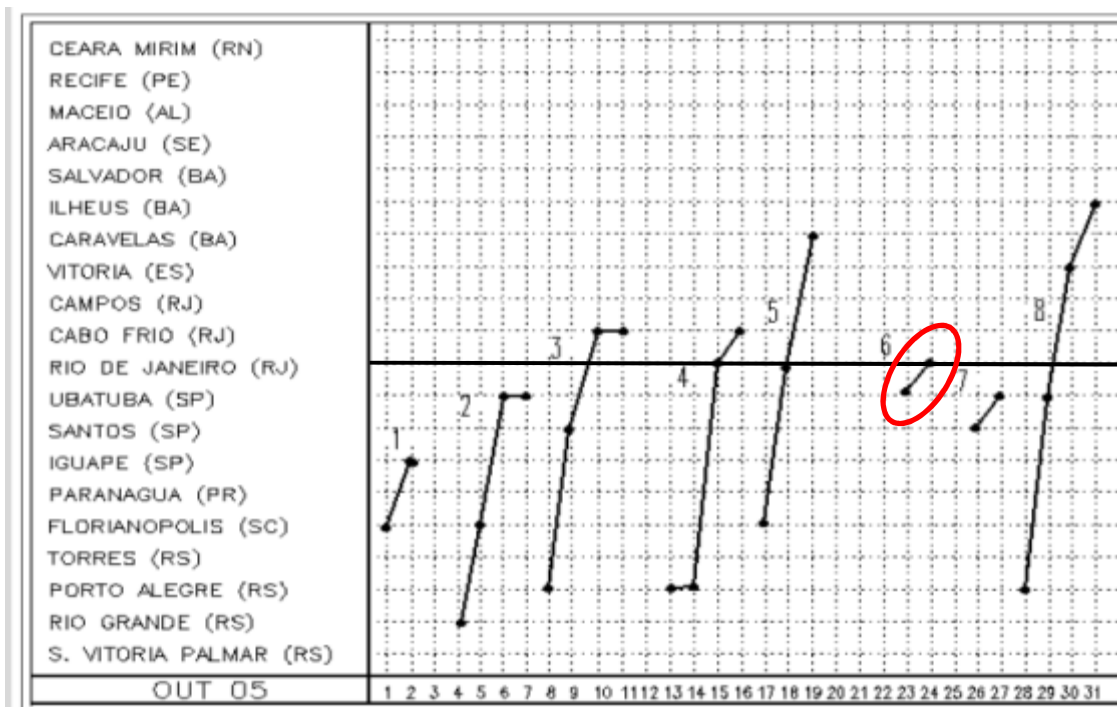


Figura 4.33 - Acompanhamento dos sistemas frontais pelo litoral brasileiro. A linha preta horizontal em destaque marca a posição do Rio de Janeiro. Adaptado de Climanálise, 2005.

De acordo com o acompanhamento dos sistemas frontais apresentado no Boletim de Monitoramento e Análises Climáticas (CLIMANÁLISE, 2005), uma frente fria atuou

apenas entre o litoral norte de São Paulo e o litoral do Rio de Janeiro durante o dia 23/10/2005 (Figura 4.33). Esta informação reforça o comportamento oceânico do deslocamento do sistema frontal sugerido anteriormente, sendo observado apenas em um pequeno trecho do litoral da Região Sudeste.

Nas figuras 4.34a e 4.34b, são apresentadas imagens de satélite dos canais infravermelho e vapor d'água, respectivamente. Observando a imagem de satélite do canal infravermelho do dia 23/10/2005 às 20:45 UTC (Figura 4.34a), nota-se um amplo ciclone extratropical estendendo um ramo frio frontal sobre o Rio de Janeiro, onde pode-se observar a presença de núcleos convectivos. Nas imagens do canal do vapor d'água observa-se tons cinzas escuros e claros, associados ao ramo frontal frio, indicando separação entre regiões secas e úmidas na média e alta troposfera (Figura 4.34b). Neste canal também é possível observar a presença de núcleos convectivos sobre o Rio de Janeiro.

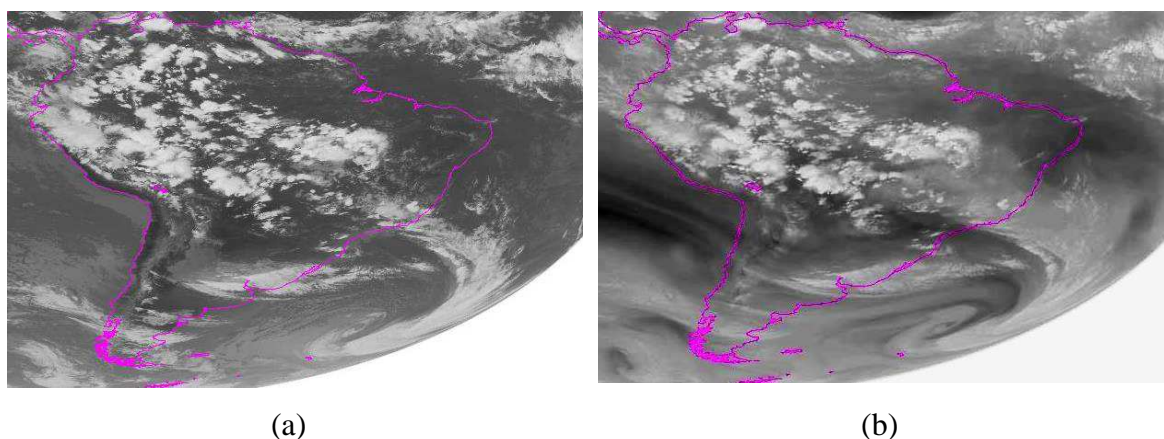


Figura 4.34 - Imagens do satélite GOES12 do dia 23/10/2005 às 20:45 UTC, sendo (a) canal 4 (infravermelho) e (b) canal 3 (vapor d'água).  
Fonte: <http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/archive.html>

A figura 4.35 mostra o resultado do agrupamento com as quatro RPH distintas e revela aspectos espaciais relevantes e distintos da distribuição de chuva nos eventos extremos do padrão sinótico 4. O processamento da rede neural resultou na classificação das 26 estações em 4 grupos distintos, apresentando CS global com valor 0,499. Neste agrupamento, o Grupo 1 passou a ser composto por 6 estações, localizadas sobre os maciços da Tijuca e da Pedra Branca ou próximas as suas vertentes, apresentando o maior valor de precipitação diária média, com 73,2 mm (Figura 4.35 e tabela 4.14). O grupo 2 é

composto por 8 estações que se distribuem entorno dos maciços montanhosos e apresenta a segunda maior média diária de precipitação, com 65 mm.

Neste padrão sinótico o Grupo 3 também é formado apenas pela estação 26 (Campo Grande), mas neste caso ela representa a região pluviométrica com o menor valor de precipitação média diária, com 53,9 mm. O Grupo 4 é mais uma vez o mais numeroso com 11 estações, todas localizadas em áreas de baixada e distantes dos maciços montanhosos, e apresenta a segunda menor média diária de chuva durante os dias de eventos extremos com 60,8 mm.



Figura 4.35 - Regiões Pluviométricas Homogêneas obtidas através dos dados de precipitação diária relativos à todos os eventos extremos de chuva relacionados ao padrão sinótico 4, sendo o Grupo 1 (vermelho), Grupo 2 (azul), Grupo 3 (branco) e Grupo 4 (verde). Os números identificam cada estação de acordo com a tabela 1.1. Imagem Google Earth.

Em relação à distribuição espacial das RPH observa-se a atribuição de uma região com máximo de chuva média diária sobre o interior e as vertentes dos maciços da Tijuca e da Pedra Branca, acompanhada de uma região com máximos secundários contemplando os locais do entorno destes maciços. Duas RPH distintas apresentam os menores volumes de precipitação e estão limitadas às áreas distantes dos maciços e dominadas por regiões de baixada, destacando-se uma região de mínimos absolutos de precipitação média diária associada a estação 26 (Campo Grande). Este aspecto sugere a importância da presença dos maciços montanhosos na variabilidade espacial da precipitação durante eventos

extremos de chuva sobre o município do Rio de Janeiro associados ao padrão sinótico 4 (Figura 4.35 e tabela 4.14).

Tabela 4.14 - Precipitação média diária (mm) das quatro Regiões Pluviométricas Homogêneas identificadas no padrão sinótico 4.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Precipitação média (mm)	73,2	65,0	53,9	60,8

A figura 4.36 mostra os máximos acumulados em 1 hora e em 24 horas na rede de estações durante os eventos extremos associados ao padrão sinótico 4. Observa-se uma diversidade de tipos de relações entre os acumulados horários e diários. Acumulados horários que indicam a ocorrência de chuva intensa e acumulados diários elevados, como no eventos 28 (25/01/2003), revelam a ocorrência de um evento chuvoso intenso de longa duração. Já acumulados horários que indicam ocorrência de chuva intensa e acumulados diários reduzidos, como no evento 40 (06/12/2013) e 43 (24/10/2005), revelam a ocorrência de um evento chuvoso intenso, porém de curta duração. Finalmente, acumulados horários menos expressivos e acumulados diários elevados, como nos eventos 5 (31/12/2009) e 31 (26/08/2003), indicam a ocorrência de um evento chuvoso caracterizado por chuva menos intensa de longa duração. Destaca-se que neste padrão sinótico 55% dos máximos horários associados aos eventos de chuva extrema superaram os 50 mm acumulados em 1 hora, sendo que 36% dos máximos horários foram superiores a 75 mm acumulados em 1 hora. Esta característica revela o potencial das condições sinóticas associadas ao padrão sinótico 4 em provocar taxas de precipitação elevadas.

## Acumulados máximos horários e diários

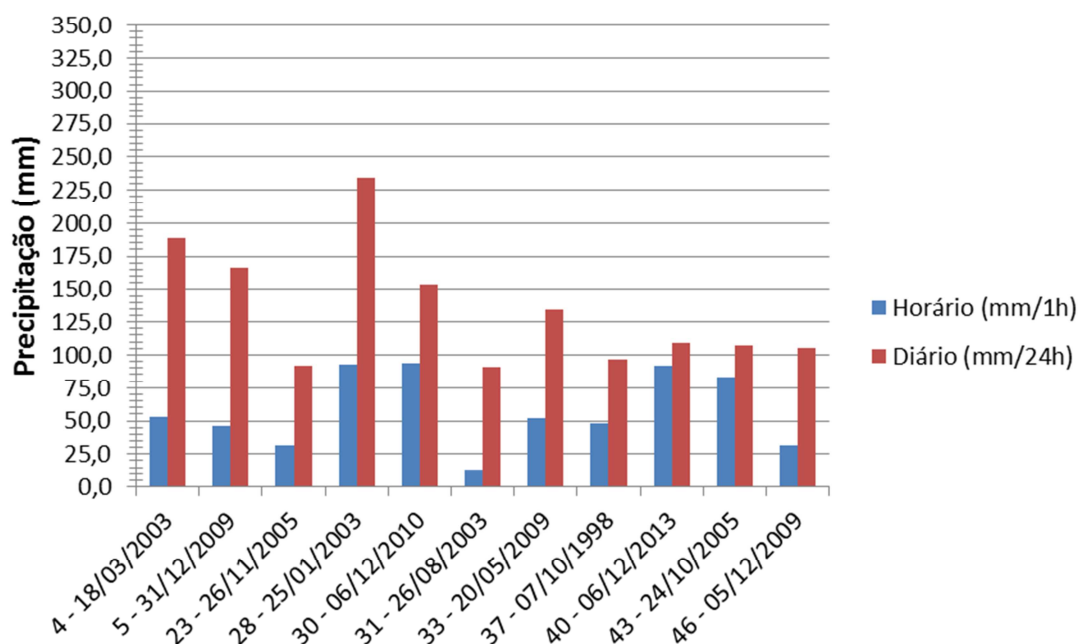


Figura 4.36 - Valores máximos horários e diários registrados na rede de estações durante os eventos extremos correspondentes ao padrão sinótico 4.

O padrão sinótico 4, caracterizado pela atuação de um sistema frontal com posicionamento oceânico, sem suporte dinâmico em níveis médios sobre o Rio de Janeiro, apontaria dois cenários possíveis para ocorrência dos extremos de chuva. Em um dos cenários possíveis os processos advectivos em baixos níveis assumem grande importância no transporte e convergência de umidade em direção às vertentes dos maciços. No entanto, considerando-se o fraco gradiente de pressão observado sobre o Rio de Janeiro nas figuras 4.30a e 4.32a, a atuação de ventos fracos (Figura 4.32c) e a ausência de sistemas meteorológicos significativo em níveis médios, para fornecer suporte dinâmico, estima-se que os processos advectivos em baixos níveis não apresentam a eficiência necessária para transportar massa e umidade suficiente em direção às vertentes dos maciços, ao ponto de provocar um evento extremo de chuva. O cenário mais plausível é caracterizado pelo papel da convergência na baixa troposfera, provocada pelo deslocamento oceânico do sistema frontal, em atuar como gatilho para o disparo da atividade convectiva. O alto percentual de taxas de precipitação intensa associadas aos eventos chuvosos deste padrão sinótico e a maior ocorrência durante o mês de dezembro, época típica de forte aquecimento da superfície, também sugerem a intensa atividade convectiva como responsável pela precipitação extrema e característica deste cenário.

## CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Foram identificados 46 dias de ocorrência de precipitação extrema no município do Rio de Janeiro no período entre janeiro de 1997 à abril de 2014, sendo que estes 46 casos correspondem ao percentil 99,27%. A distribuição mensal das ocorrências apresenta sazonalidade bem definida, sendo que a maior frequência de registros concentra-se nos meses de outubro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio.

A classificação dos 46 casos de chuva extrema em 4 padrões sinóticos, através da aplicação do SOM e análise dos mapas auto-organizados, revelou aspectos importantes da condição atmosférica associada. Os resultados permitem também verificar a potencialidade dos mapas auto-organizados no auxílio da análise de grandes quantidades de campos sinóticos. Consta-se que é possível diagnosticar padrões sinóticos mais e menos frequentes, assim como características da precipitação associada a cada um destes padrões.

O padrão sinótico 1 caracteriza-se por uma típica situação frontal, sugerindo relevante advecção de umidade do mar para o continente em direção ao Rio de Janeiro. Este padrão apresenta maior número de ocorrências na metade final da estação chuvosa e se mostra o mais relevante entre os quatro padrões, uma vez que este é o mais frequente, o que apresenta em média os maiores volumes de chuva acumulados, incluindo o maior máximo de precipitação média diária, além de responder por 36% do volume total de precipitação associada a todos os dias de eventos extremos.

O cenário meteorológico representado pelo padrão sinótico 1, associado à condição topográfica do município do Rio de Janeiro, fazem com que a chuva se torne ainda mais intensa nas áreas montanhosas da cidade, destacando-se o maciço da Tijuca. Em função da persistência e duração da advecção de umidade em escala sinótica vinda do oceano, os eventos chuvosos associados a esse padrão costumam apresentar longa duração.

O padrão sinótico 2 possui maior frequência de ocorrência durante o mês de janeiro, em condições típicas de verão, e destaca-se, após o padrão sinótico 1, por apresentar os segundos maiores valores de precipitação média, de desvio padrão e de precipitação diária máxima, respondendo por 31% do volume total de precipitação

provocada por todos os dias de eventos extremos. Este padrão revela-se assim o segundo mais relevante dentre os quatro padrões sinóticos obtidos e é representado pela existência de uma região de divisão de massas de ar, sem fortes gradientes de pressão, sobre a Região Sudeste do Brasil. Este aspecto está relacionado à presença de uma zona de convergência de massa e umidade com valores elevados de água precipitável, associada ao escoamento em baixos níveis dos dois anticiclones distintos. A atuação de cavados em médios níveis torna o ambiente ainda mais favorável à ocorrência de movimentos ascendentes e formação de sistemas precipitantes. O alto percentual de taxas de precipitação intensa durante os eventos classificados neste padrão também sugere intensa atividade convectiva como característica.

O cenário meteorológico representado pelo estabelecimento de uma zona de convergência de massa e umidade, associado à condição topográfica do município do Rio de Janeiro, fazem com que a chuva se torne ainda mais intensa nas áreas montanhosas da cidade, destacando-se o maciço da Tijuca. Suspeita-se que estas características atmosféricas e topográficas são propícias para a formação e intensificação de sistemas convectivos estacionários que podem causar totais diários e também taxas de precipitação elevadas.

Dentre os quatro padrões sinóticos, o padrão sinótico 3 apresenta a menor precipitação média, o menor desvio padrão, e a menor precipitação máxima, sendo que neste caso este padrão foi o único a não apresentar precipitação média diária máxima superior aos 100 mm. Além disso, o padrão 3 responde por apenas 11% da porcentagem total de precipitação dos eventos de chuva extremas identificados e sua frequência de ocorrência é a mais baixa dentre os quatro padrões, apresentando um máximo relativo no mês de outubro, porém sem grande relevância. Cabe ressaltar, que este padrão também apresentou o menor valor do CS global em comparação com os demais, indicando assim a composição de um agrupamento menos homogêneo.

A presença de máximos de água precipitável e pressões relativamente mais baixas sobre o mar, próximo ao Rio de Janeiro, estão associadas à convergência de massa e umidade em baixos níveis provocada pela atuação do cavado baroclínico em altitude. Estes mecanismos atuam de forma propícia para ocorrência de eventos chuvosos significativos, representando uma condição atmosférica favorável ao levantamento do ar em escala sinótica. A presença de um anticiclone sobre o oceano e de uma região de



pressões relativamente mais baixas próximas do litoral do Rio de Janeiro parecem favorecer o transporte de umidade do mar, através da atuação de ventos de componente sudeste/leste, em direção às vertentes sul/sudeste dos maciços montanhosos. Esta condição sinótica tendeu a provocar uma distribuição espacial caracterizada por máximos de precipitação nas faces dos maciços voltadas para o oceano e mínimos de precipitação em áreas afastadas dos maciços e concentradas sobre as zonas Norte e Oeste da cidade.

Finalmente, o padrão sinótico 4 apresenta maior frequência de ocorrência no mês de dezembro, sugerindo assim a presença de condições atmosféricas típicas de verão. Destaca-se a presença de um intenso sistema de baixa pressão sobre o Atlântico Sul, estendendo um cavado em direção ao sudeste do Brasil entre dois anticiclones distintos, sendo um associado à ASAS e outro caracterizado como pós-frontal. Esta configuração sugere o deslocamento oceânico do ramo frontal frio de um ciclone extratropical ao largo da Região Sudeste. A ausência de sistemas meteorológicos significativos em médios níveis da troposfera sobre o sudeste do Brasil mostra que os principais mecanismos de escala sinótica, associados à ocorrência da precipitação nos eventos chuvosos extremos do padrão sinótico 4, estão restritos aos baixos níveis.

O cenário meteorológico associado ao padrão sinótico 4 é caracterizado pelo papel da convergência na baixa troposfera, provocada pelo deslocamento oceânico do sistema frontal, em atuar como gatilho para o disparo da convecção.

O fraco gradiente de pressão observado sobre o Rio de Janeiro, a atuação de ventos fracos em baixos níveis e a ausência de sistemas meteorológicos significativo em níveis médios, para fornecer suporte dinâmico, mostra que os processos advectivos em baixos níveis não apresentam a eficiência necessária para transportar massa e umidade suficiente para resultar em volumes extremos de chuva. O alto percentual de taxas de precipitação intensa associadas aos eventos chuvosos deste padrão sinótico e a maior ocorrência durante o mês de dezembro, época típica de forte aquecimento da superfície, também sugerem a intensa atividade convectiva como responsável pela precipitação extrema e característica deste cenário.

Destaca-se que os padrões sinóticos 1 e 2 juntos respondem pelas maiores médias de precipitação, pelos maiores valores de desvio padrão, pelos maiores máximos de chuva, por 63% de todas as ocorrências de extremos de chuva e por 67% do total de precipitação destes eventos. Observa-se assim a maior importância relativa destes dois

padrões. O padrão sinótico 3 pode ser identificado como o menos frequente (13%) e associado à volumes menores de precipitação, além de apresentar maior variabilidade interna. O padrão sinótico 4 mostra sua relevância através da significativa porcentagem do total de ocorrências (24%) e do alto percentual de ocorrência de taxas de precipitação intensas.

Os resultados deste trabalho são coerentes com resultados anteriores de autores que investigaram a ocorrência de eventos extremos de chuva sobre a Região Sudeste e o Rio de Janeiro. De maneira geral, constata-se que a maior parte dos eventos extremos de chuva sobre o município do Rio de Janeiro está relacionado a padrões de escala sinótica típicos da atuação de frentes frias e de zonas de convergência, representados neste estudo pelos padrões sinóticos 1 e 2. No entanto, verifica-se que os eventos extremos de precipitação no Rio de Janeiro não se limitam apenas por estes dois principais padrões. Testes com números maiores de agrupamentos para classificação e a análise dos quatro padrões sinóticos distintos obtidos, indicam que uma variabilidade maior de condições sinóticas, representadas pelos eventos dos padrões sinóticos 3 e 4, também está significativamente presente na ocorrência dos extremos de precipitação, representando 37% do total de ocorrências.

Os resultados desta pesquisa, incluindo a identificação, documentação e classificação dos casos de chuvas extremas, geraram resultados que devem colaborar com a evolução do entendimento meteorológico sobre o assunto, incrementando o conhecimento científico existente e auxiliando as atividades operacionais de previsão de tempo na cidade do Rio de Janeiro.

O uso de novas variáveis meteorológicas para o processo de classificação sinótica, a utilização de campos de anomalia no lugar dos campos diários para inserção no algoritmo do SOM, o uso de outros métodos de classificação e agrupamento e a atualização e ampliação da lista de eventos extremos, através da inclusão de novos e de futuros casos ocorridos após abril de 2014, são algumas das possibilidades para originar novas pesquisas sobre a ocorrência de eventos de chuva extrema no município do Rio de Janeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Affonso, G. S.; Mapas auto-organizáveis de Kohonen (SOM) aplicados na avaliação dos parâmetros de qualidade da água. Dissertação de mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Astel, A., Tsakovski, S., Barbieri, P., Simeonov, V.; Comparison of self-organizing maps classification approach with cluster and principal components analysis for large environmental data sets. *Water Research*, v. 41, p. 4566-4578, 2007.

Avelar, A. S., Coelho Netto, A. L., D'Orsi, R. N.; Monitoramento dos problemas de encosta na cidade do Rio de Janeiro frente às mudanças climáticas em curso e futuras. Projeto megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas. Relatório Região Metropolitana do Rio de Janeiro, p.311–328, 2011.

Bouhid, R. G. A., Marques, V. S., Pinheiro, F. M. A., Ferraud, A. S.; Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 4, p. 501-509, 2008

Brasiliense, C., Panisset, J. S., Almeida V. A., Justi da Silva, A. M. G.; Índices termodinâmicos no Rio de Janeiro: climatologia e tendências temporais. XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia; Anais, 2012.

Calado, R. N.; Estudo de caso de tempestade severa no Rio de Janeiro em Abril de 2010. Monografia em meteorologia – Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2012.

Carvalho, L. M. V., Jones, C., Liebman, B.; Extreme precipitation events in south-eastern South America and large-scale convective patterns in South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v. 15, p. 2377 - 2394, 2002.

Cavazos, T.; Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas. *Journal of Climate*, v. 12, p. 1506-1523, 1999.

Cavazos, T.; Using self-organizing maps to investigate extreme climate events: an application to wintertime precipitation in the Balkans. *Journal of Climate*, v. 13, p. 1718-1732, 2000.

Climanálise; Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.13, n.01, 1998.  
Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0198/index.html>

Climanálise; Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.20, n.10, 2005.  
Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/1005/index.html>

Climanálise; Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.22, n.10, 2007.  
Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index1007.shtml>

Climanálise; Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.28, n.03, 2013.  
Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0313.shtml>

Crimmins, M. A.; Synoptic climatology of extreme fire-weather conditions across the southwest United States. *International Journal of Climatology*, v. 26, p. 1001-1016, 2006.

Dereczynski, C. P., Silva de Oliveira, J., Osório, M. C.; Climatologia da precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 24-38, 2009.

Dereczynski, C. P., Marengo, J., Justi da Silva, M. G. A., Santos, I. A.; Clima e mudanças climáticas na Cidade do Rio de Janeiro. Projeto megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas. Relatório Região Metropolitana do Rio de Janeiro, p.43-73, 2011.  
Disponível em: [https://s3.amazonaws.com/tapajos/Megacidades/2\\_Clima.pdf](https://s3.amazonaws.com/tapajos/Megacidades/2_Clima.pdf)

Dereczynski, C. P., Silva W. L., Marengo, J.; Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 2, n. 1, 2013.

Dolif, G., Nobre, C.; Improving extreme precipitation forecasts in Rio de Janeiro, Brazil: are synoptic patterns efficient for distinguishing ordinary from heavy rainfall episodes?. *Atmospheric Science Letters*, v.13, 2012.

Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E., Flahaut, B.; Temporal and sapatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. *Journal of Hydrology*, v. 430-431, p. 162-172, 2012.

Fernandes, F. M. P. R. P.; Técnicas de visualização de mapas auto-organizados. Dissertação de mestrado em Engenharia Informática e de Computadores – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2011. Disponível em: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1066694/1/dissertacao.pdf>

Filho, T. K., Assad, E. D., Lima, P. R. S. R; Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 4, p.311-322, 2005.

Hewitson, B. C., Crane, R. G.; Self-organizing maps: applications to synoptic climatology. *Climate Research*, v. 22, p. 13-26, 2002.

Houze, R. A. J.; *Cloud Dynamics*. International Geophysics Series, v. 53. Academic Press, 1993.

Hsu, K., Li, S.; Clustering spatial-temporal precipitation data using wavelet transform and self-organizing map neural network. *Advances in Water Resources*, v. 33, p. 190-200, 2010.

Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., Kyselý, J., Tveito, O. E.; Classifications of atmospheric circulation patterns – recent advances and applications. In: *Trends and directions in climate research*. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1146, p. 105-152, 2008.

Johnson, C. N., Feldstein, S. B., Tremblay, B.; The continuum of northern hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use of self-organizing maps. *Journal of Climate*, v. 21, p. 6354-6371, 2008.

Jourdan, P. Brasiliense, C. Souza, C. Campani, A.; Determinação de regiões pluviométricas homogêneas no município do Rio de Janeiro utilizando a técnica Self-organizing Maps. XVIII Congresso Brasileiro de Meteorologia; Anais, 2014.

Kohonen, T., The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, v. 78, n. 9, p.1464-1480, 1990.

Kohonen, T., Oja, M., Kaski, S.; Bibliography of self-organizing map (SOM) papers: 1998-2001 addendum. *Neural Computing Surveys*, v. 3, p. 1-156, 2002.

Lennard, C., Hegerl, G.; Relating changes in synoptic circulation to the surface rainfall response using self-organizing maps. *Climate Dynamics*, v. 44, p. 861-879, 2014.

Lima, D. R. O.; Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a bacia hidrográfica do rio Manso. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), COPPE. Rio de Janeiro, 2005.

Lima, K. C., Fernández, J. P. R., Satyamurti, P.; Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brazil. *Theoretical Applied Climatology*, v.101, p. 121-135, 2009.

Liu, Y., Weisberg, R. H.; A review of self-organizing map applications in meteorology and oceanography. In: *Self organizing maps - applications and novel algorithm design*, Dr. Josphat Igadwa Mwasiagi, Ed. InTech, 2011. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/selforganizing-maps-applications-and-novel-algorithm-design/a-review-of-self-organizing-map-applications-in-meteorology-and-oceanography>

Lorenz, E. N.; Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 26, p. 636-646, 1969.

Marcelino, E. V., Desastres naturais e geotecnologias: Conceitos básicos. Santa Maria, Rio Grande do Sul. CRS/INPE, 2007. Disponível em: <http://www.inpe.br/crs/geodesastres/conteudo/publicacoes/conceitosbasicos.pdf>

Michaelides, S. C., Liassidou, F., Schizas, C. N.; Synoptic Classification and establishment of analogues with artificial neural networks. Pure and Applied Geophysics, v. 164, p 1347-1364, 2007.

Miguez, M. G., Fernandes, L. C., Azevedo, J. P. S., Canedo, L. P.; Vulnerabilidades da infraestrutura de drenagem urbana e os efeitos das mudanças climáticas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Projeto megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas. Relatório Região Metropolitana do Rio de Janeiro, p.125–144, 2011.

Moura, R. C., Escobar, G. C. J.; Climatologia sinótica de eventos extremos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Anais do IV Simpósio Internacional de Climatologia. João Pessoa, Paraíba. 2011.

Nascimento, E. L.; Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.1, p. 121-140, 2005.

Neto, G. D.; Previsão de extremos de chuva no Rio de Janeiro: melhorias utilizando o conhecimento adquirido com eventos anteriores. Tese de doutorado em Meteorologia. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2012. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BKDM7E>

Nishiyama, K., Shinichi, E., Jinno, K., Uvo, C. B., Olsson, J., Berndtsson, R.; Identification of typical synoptic patterns causing heavy rainfall in the rainy season in Japan by a self-organizing map. Atmospheric Research, v. 83, p. 185-200, 2007.

Oliveira, P. T., Lima, K. C., Santo e Silva, C. M.; Synoptic environment associated with heavy rainfall events on the coastland of Northeast Brazil. Advances in Geosciences, v. 35, p.73-78, 2013.

Pearce, J. L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman, R. J., Uotila, P., Tapper, N. J.; Investigating the influence of synoptic-scale meteorology on air quality using self-organizing maps and generalized additive modeling. *Atmospheric Environment*, v. 45, p. 128-136, 2011.

Pimentel, L. C. G., Marton, E., Da Silva, M. S., Jourdan, P.; Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. No prelo, abril (2014).

Polifke, S. F., Chuvas severas no Rio de Janeiro: avaliação de indicadores dos processos físicos associados. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2014.

Reboita, M. S., Gan, M. A., Da Rocha, R. P., Ambrizzi, T.; Regimes de precipitação na América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

Richardson, A. J., Risien, C., Shillington, F. A.; Using self-organizing maps to identify patterns in satellite imagery. *Progress in Oceanography*, v. 59, p. 223-239, 2003.

Rousi, E., Anagnostopoulou, C., Tolika, K., Maheras, P.; Representing teleconnection patterns over Europe: a comparison of SOM and PCA methods. *Atmospheric Research*, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.010>

Rousseeuw, P. J.; Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53-65, 1987.

Santos, E. B., Lucio, P. S., Santos e Silva, C. M.; Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. *Atmospheric Science Letters*, 2014.

Santurette, P., Georgiev, C. G.; Weather analysis and forecasting: applying satellite water vapor imagery and potential vorticity analysis. Elsevier Academic Press, 2005.



Schalkwyk, L. V., Dyson, L., L.; Climatological characteristics of fog at Cape Town International Airport. *Weather and Forecasting*, v. 28, p. 631-646, 2013.

Schuenemann, K. C., Cassano, J. J., Finnis, J.; Synoptic forcing of precipitation over Greenland: climatology for 1961-99. *Journal of Hydrometeorology*. V. 10, p. 60-78, 2009.

Seluchi, M. E., Chou, S. C., Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theoretical Applied Climatology*, v. 98, p. 67 - 77, 2009.

Sheridan, S. C., Lee, C. C.; The self-organizing map in synoptic climatological research. *Progress in Physical Geography*, v. 1, p. 109-119, 2011.

Sheridan, S. C., Lee, C. C.; Synoptic climatology and the analysis of atmospheric teleconnections. *Progress in Physical Geography*, v. 36, p. 548-557, 2012.

Teixeira, M. S. e Satyamurty, P.; Dynamical and synoptic characteristics oh heavy rainfall episodes in southern Brazil. *Monthly Weather Review*, v.135, p.598-617, 2007.

Tymvios, F., Savvidou, K. Michaelides, S. C.; Association of geopotential height patterns with heavy rainfall events in Cyprus. *Advances in Geosciences*, v. 23, p. 73-78, 2010.

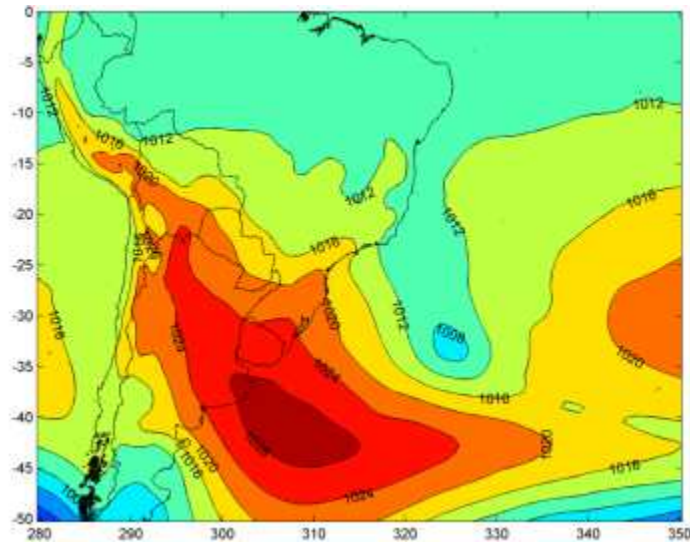
Van den Dool, H. M.; A new look at weather forecasting through analogues. *Monthly Weather Review*, v. 117, p. 2230-2247, 1989.

Vasconcellos, F. C., Cavalcanti, I. F. A.; Extreme precipitation over southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern hemisphere annular mode. *Atmospheric Science Letters*, v. 11, p. 21-26, 2010.

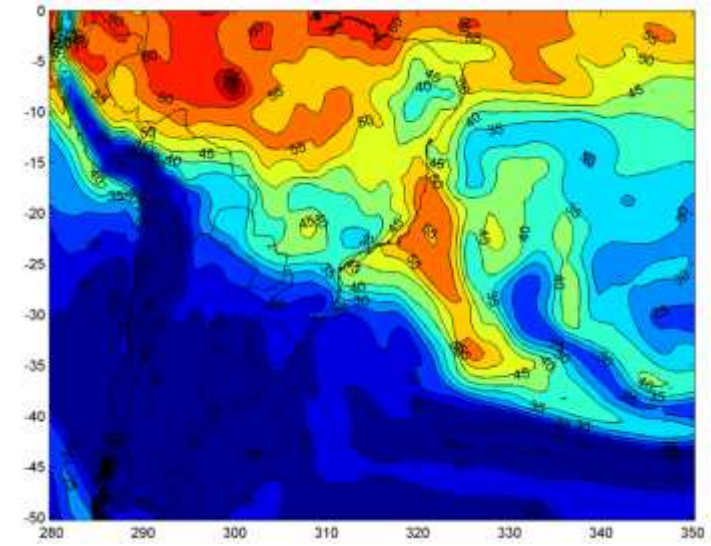
Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., Parhankangas, J.; SOM toolbox for Matlab 5. Helsinki University of Technology. Report A57, 2000. Disponível em: <http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/package/papers/techrep.pdf>

Wang, N., Biggs, T. W., Skupin, A.; Visualizing gridded time series data with self-organizing maps: an application to multi-year snow dynamics in the Northern Hemisphere. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 39, p. 107-120, 2013.

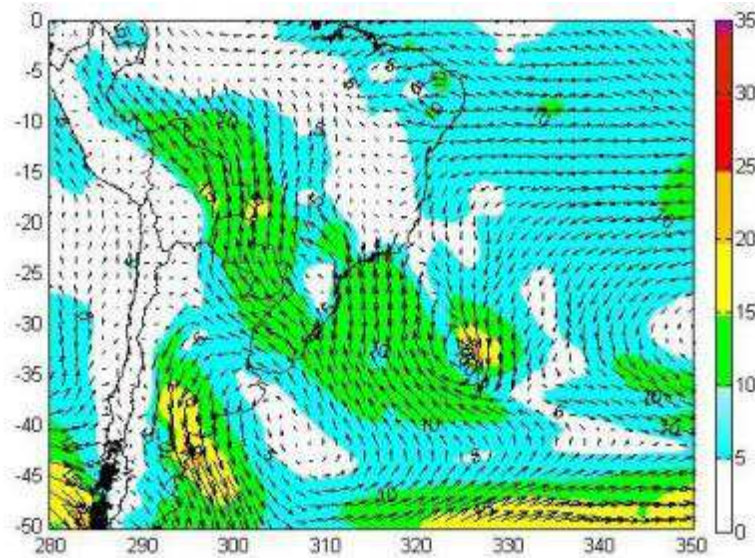
# ANEXO 1: PADRÃO SINÓTICO 1



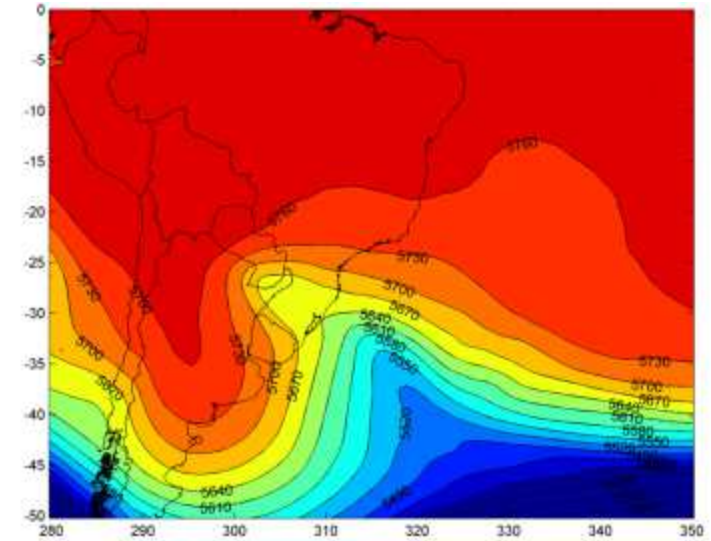
(a)



(b)

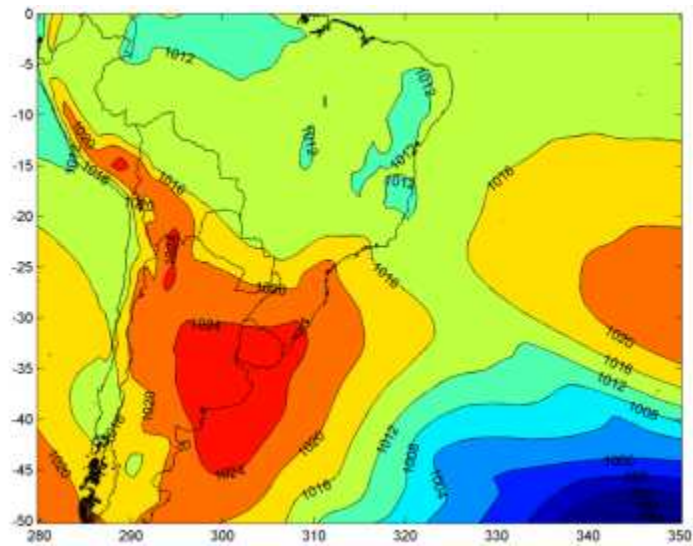


(c)

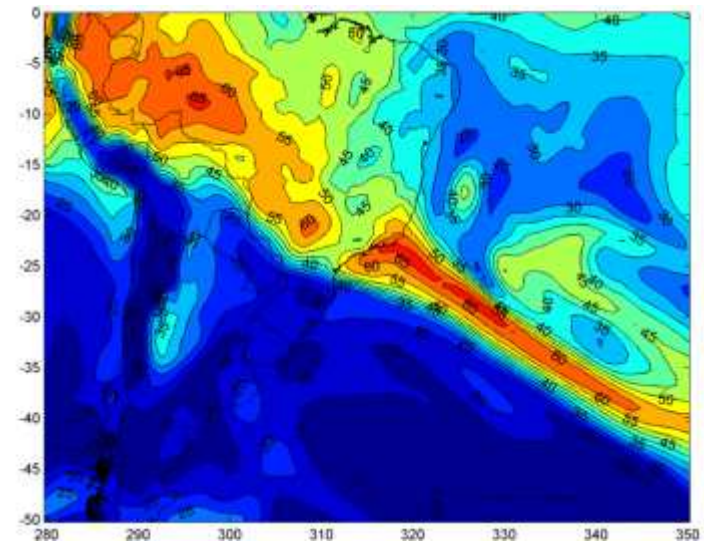


(d)

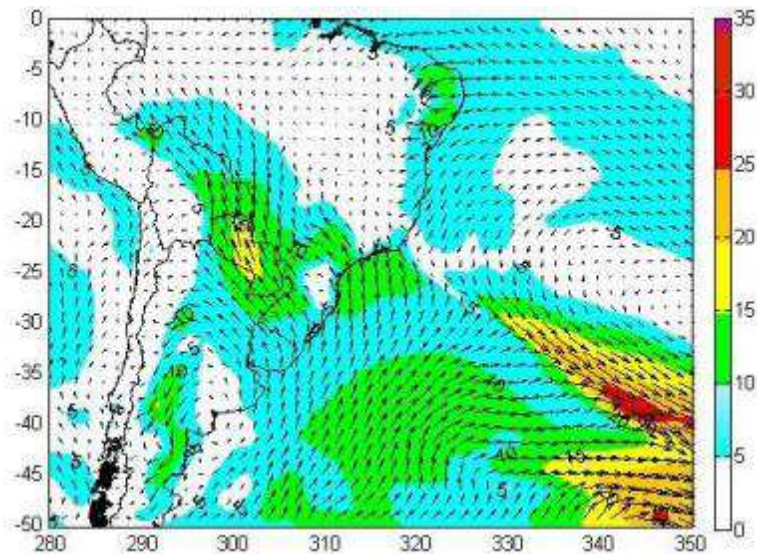
Evento 1 - Campos observados do dia 06/04/2010 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



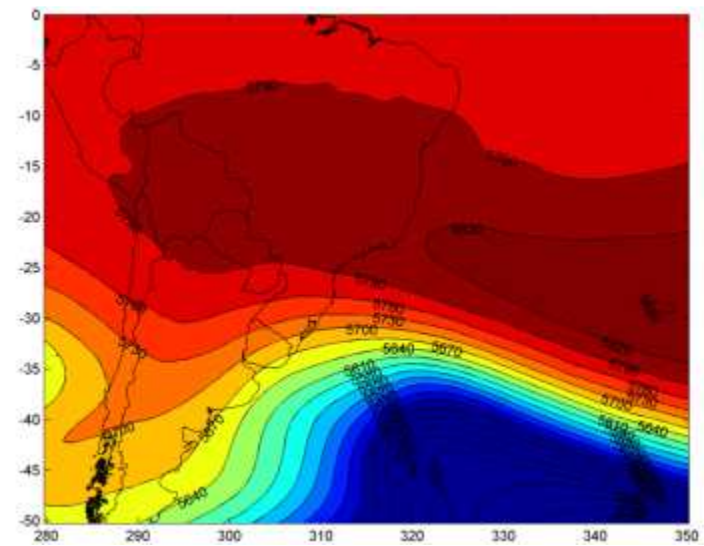
(a)



(b)

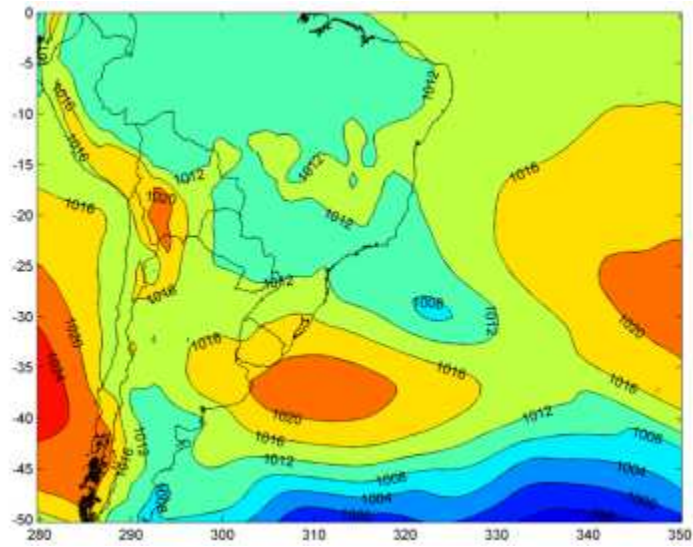


(c)

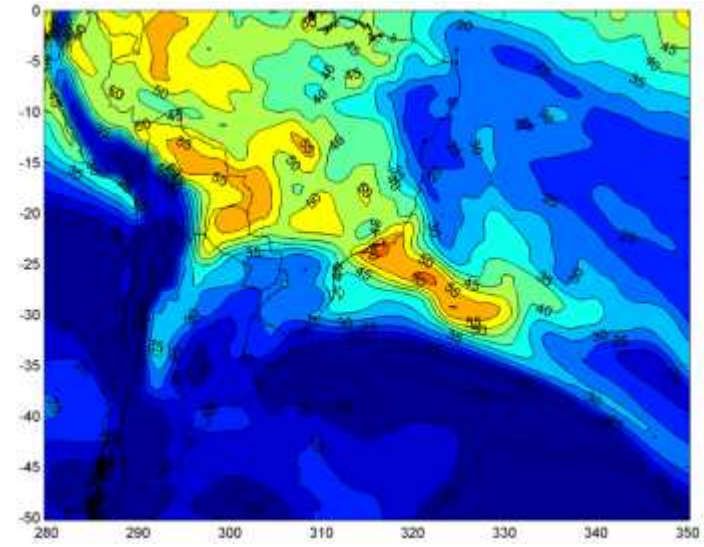


(d)

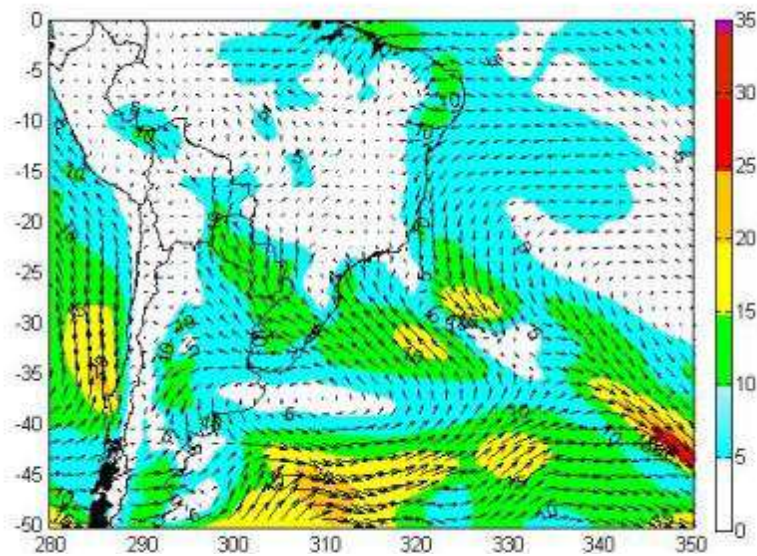
Evento 6 - Campos observados do dia 12/02/1998 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



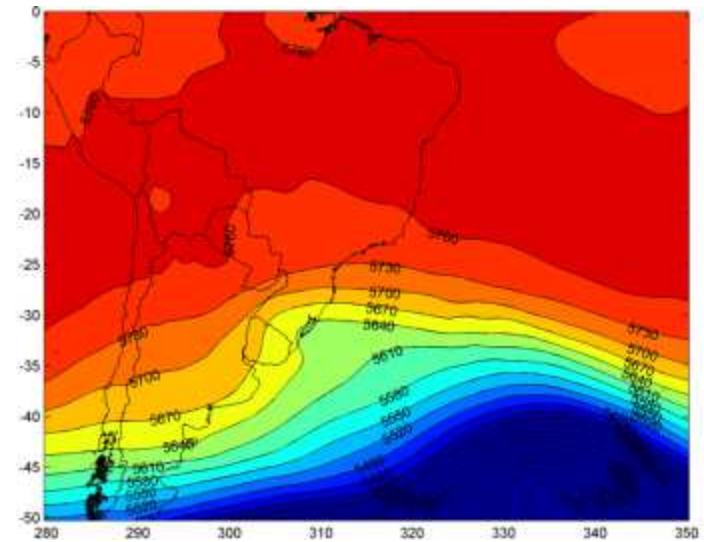
(a)



(b)

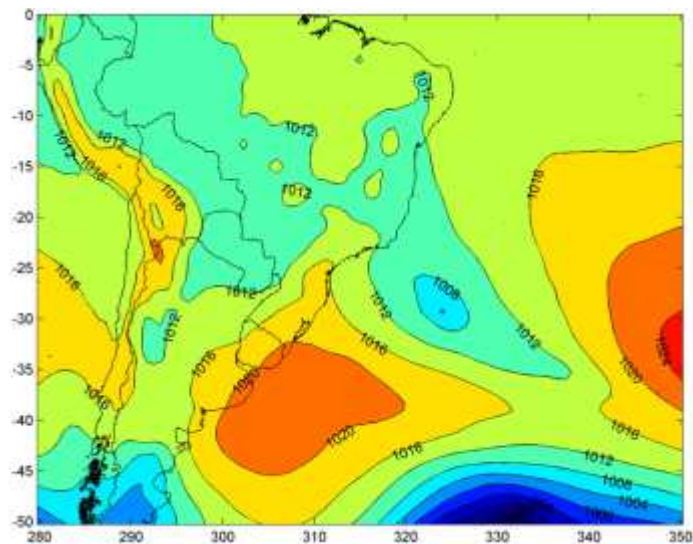


(c)

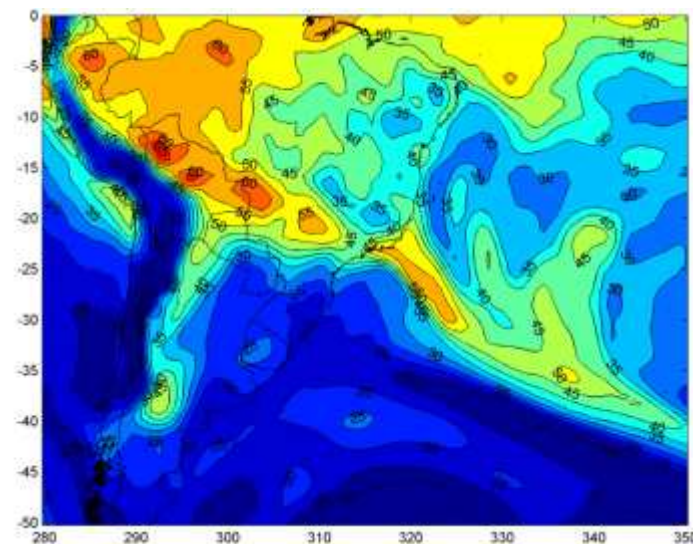


(d)

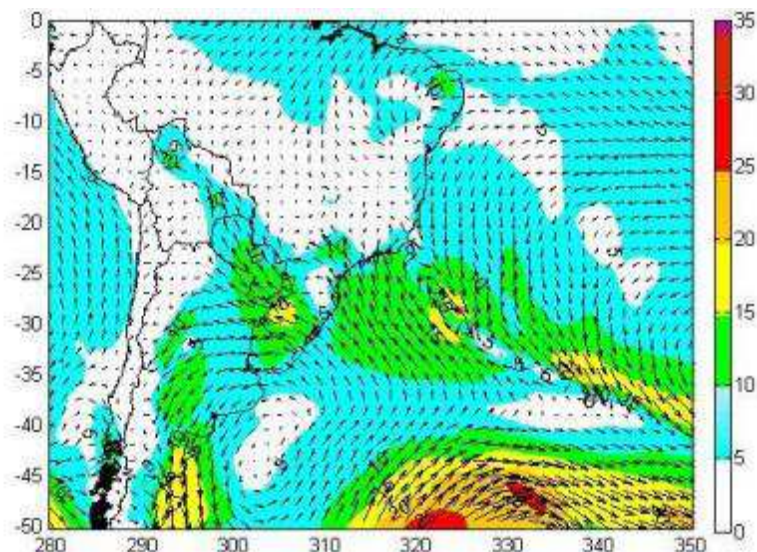
Evento 7 - Campos observados do dia 11/12/2013 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



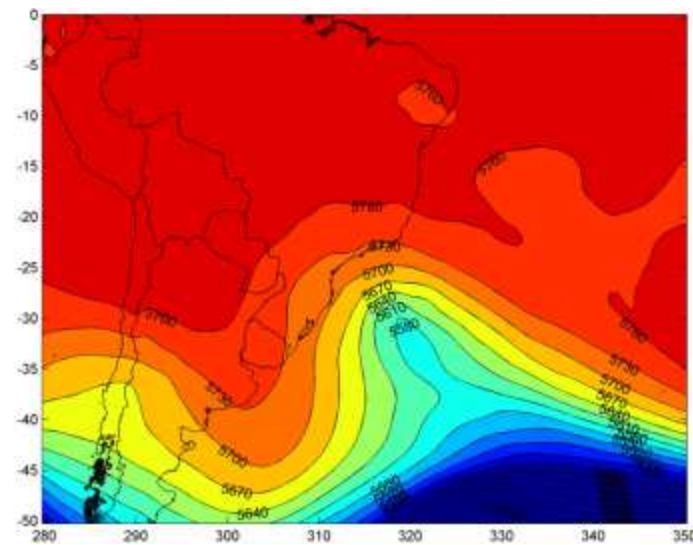
(a)



(b)

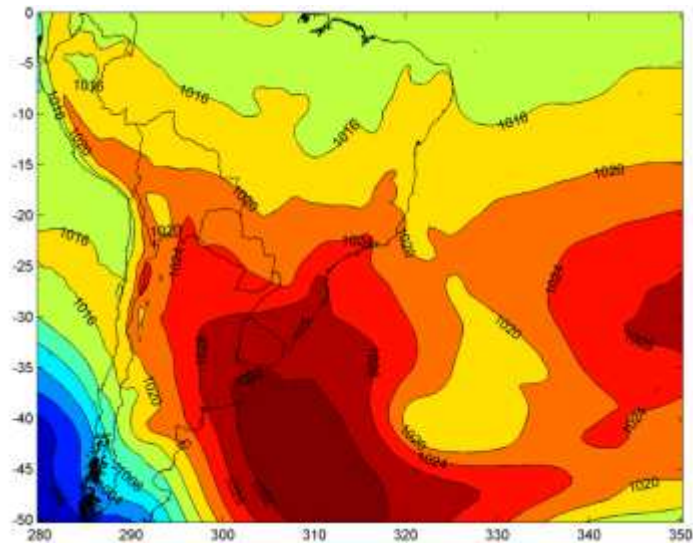


(c)

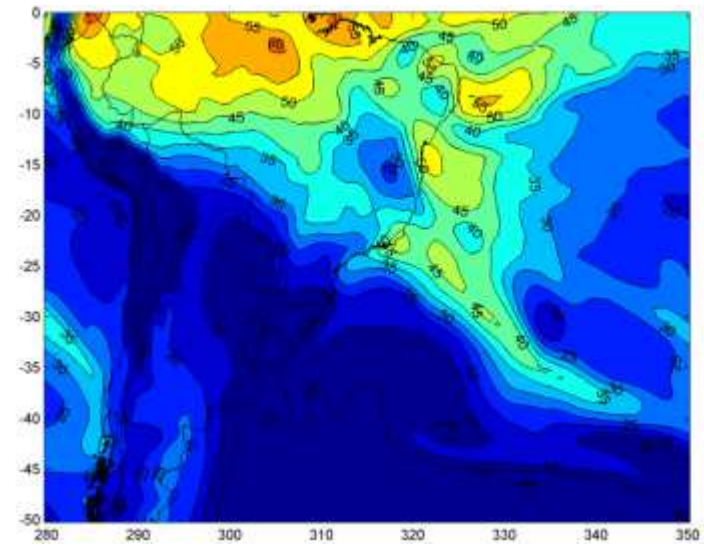


(d)

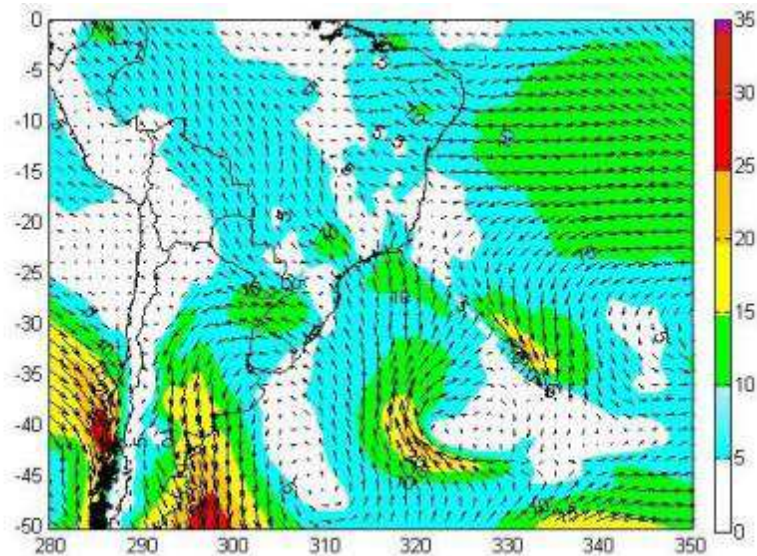
Evento 8 - Campos observados do dia 12/02/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



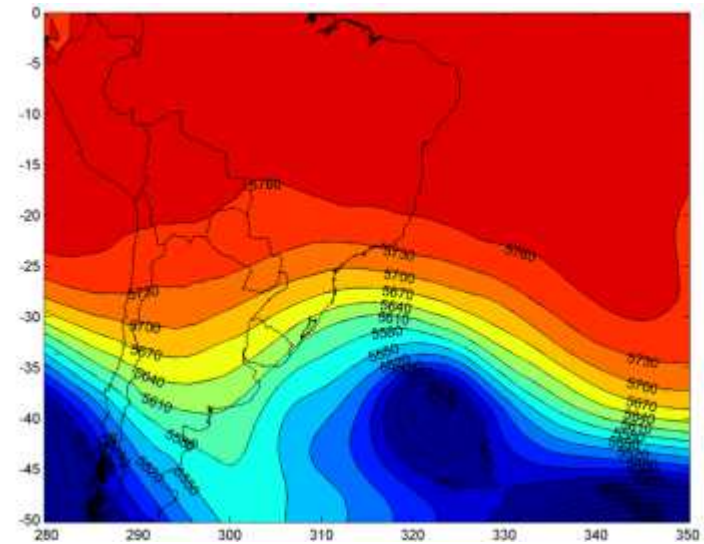
(a)



(b)

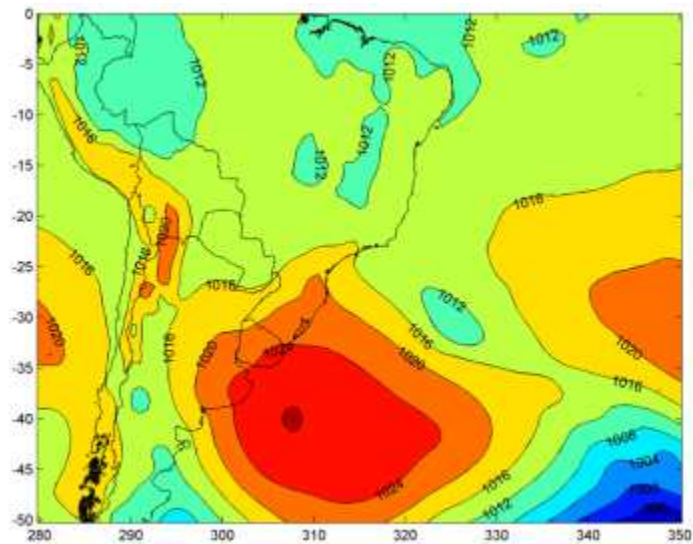


(c)

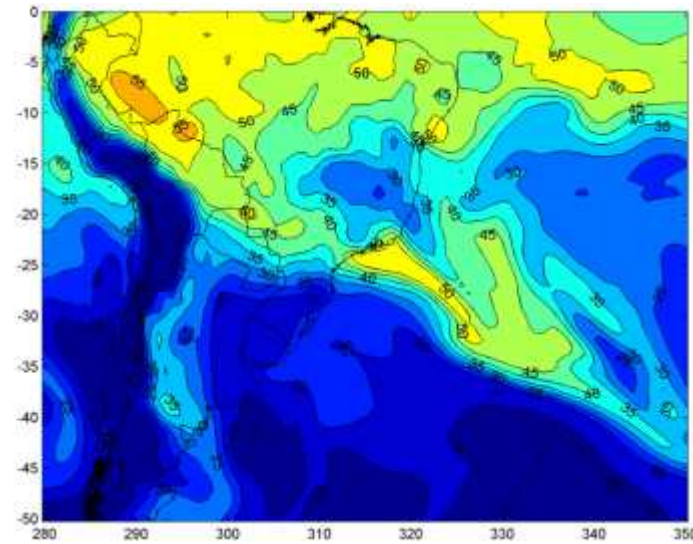


(d)

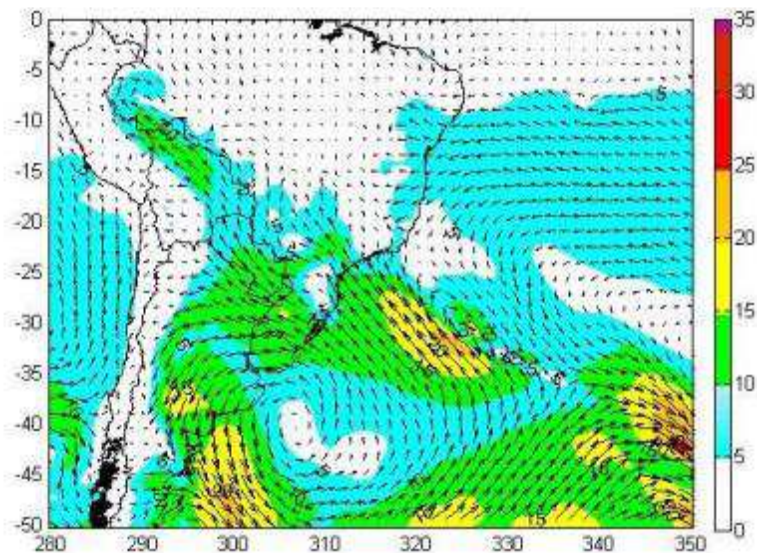
Evento 12 - Campos observados do dia 24/05/2006 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



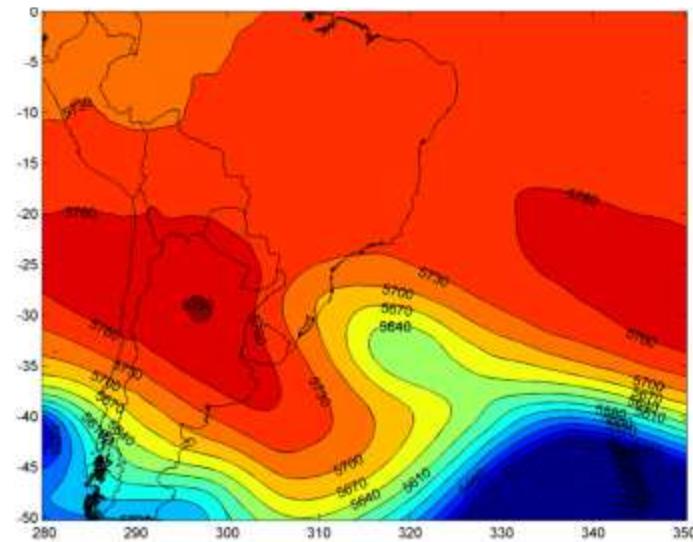
(a)



(b)



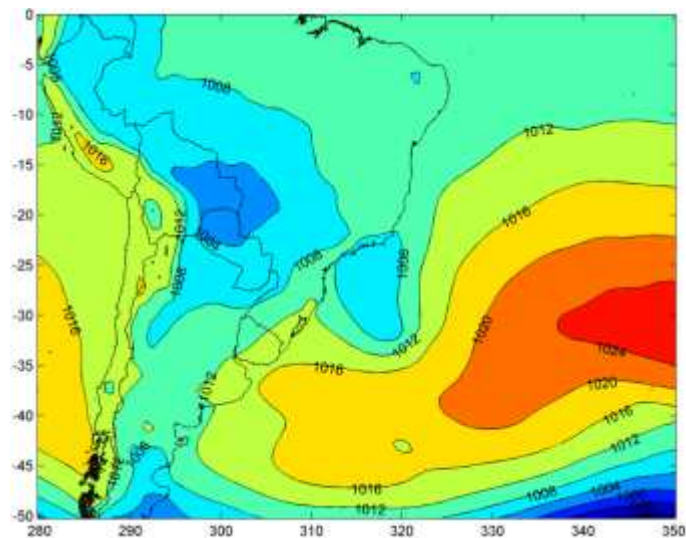
(c)



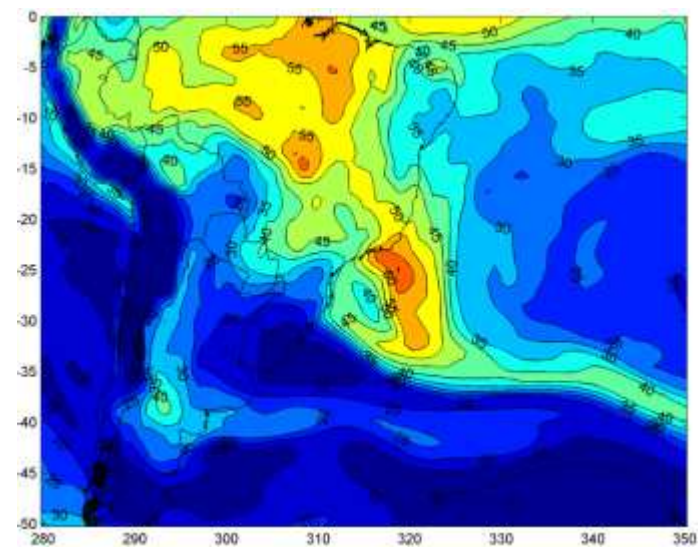
(d)

Evento 13 - Campos observados do dia 17/02/2000 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

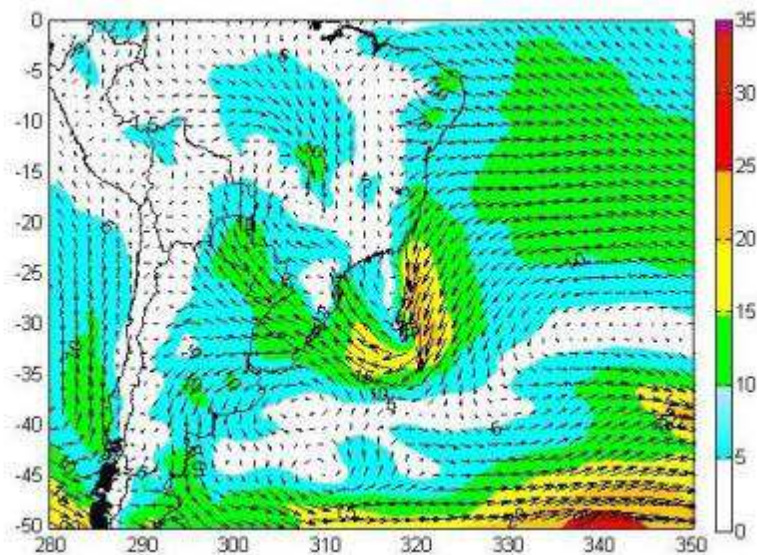




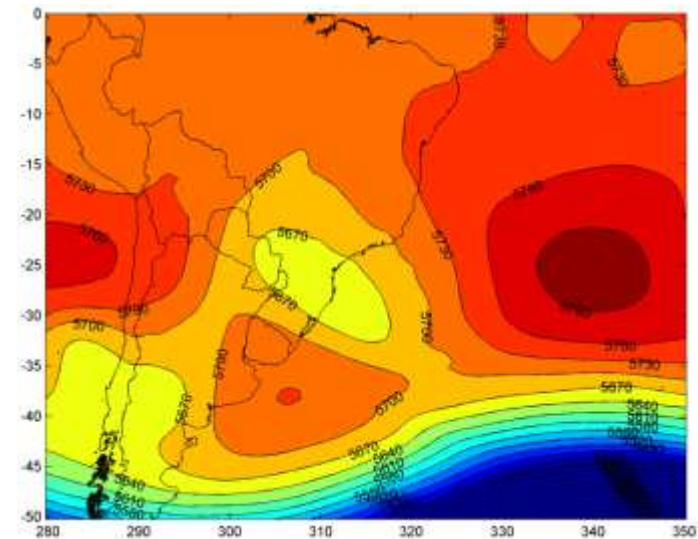
(a)



(b)

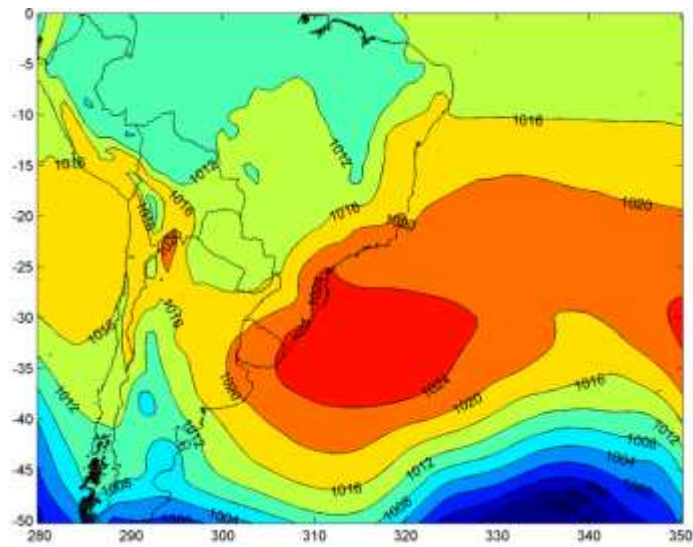


(c)

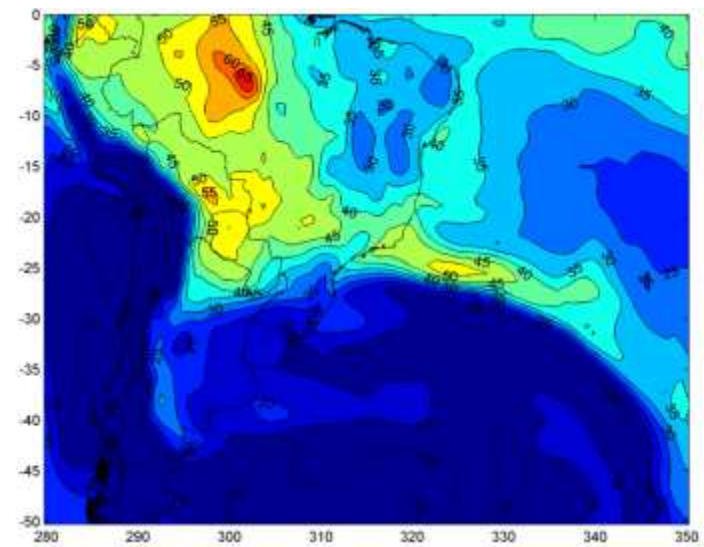


(d)

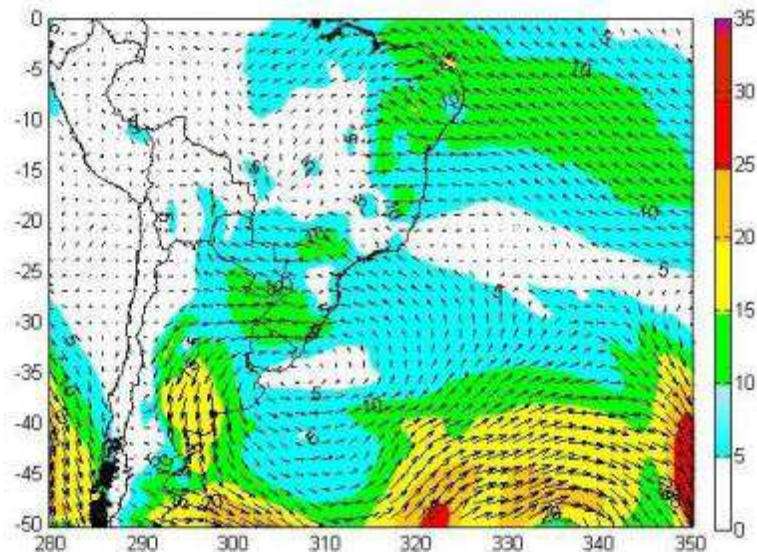
Evento 15 - Campos observados do dia 03/01/2000 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



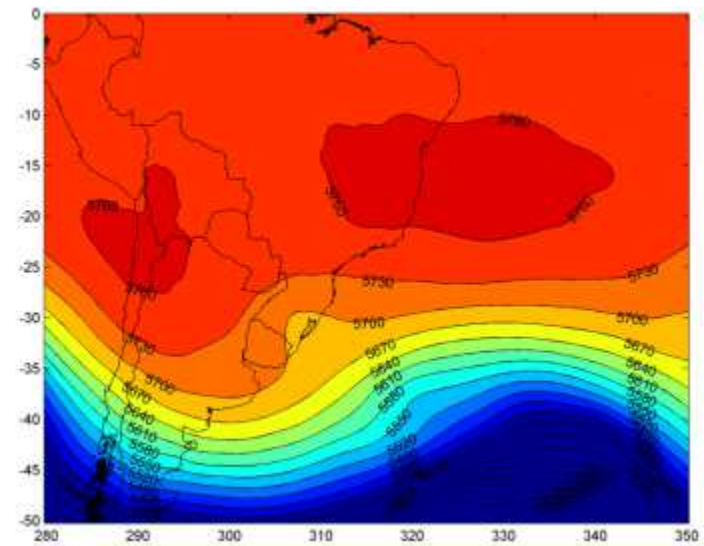
(a)



(b)

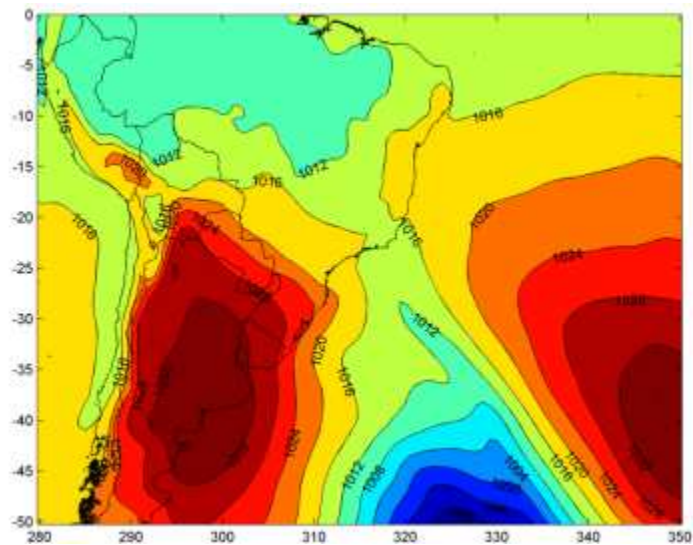


(c)

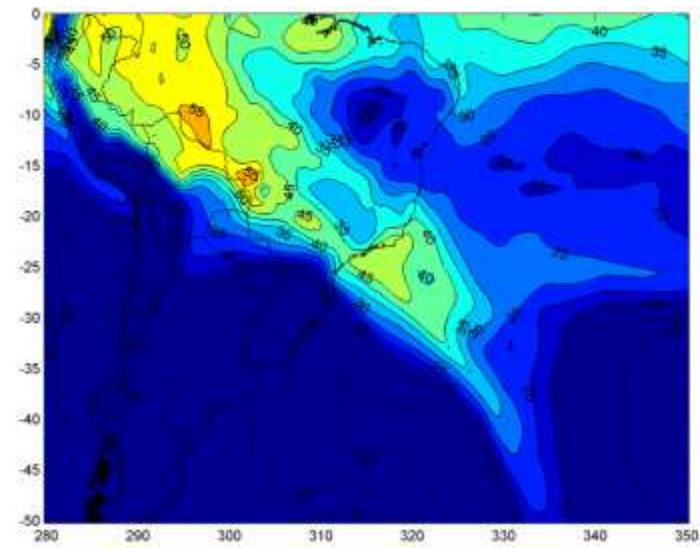


(d)

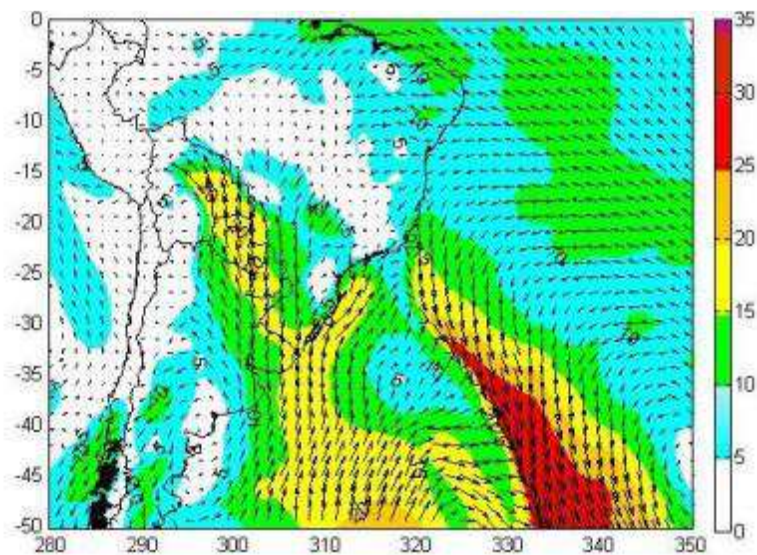
Evento 16 - Campos observados do dia 24/10/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



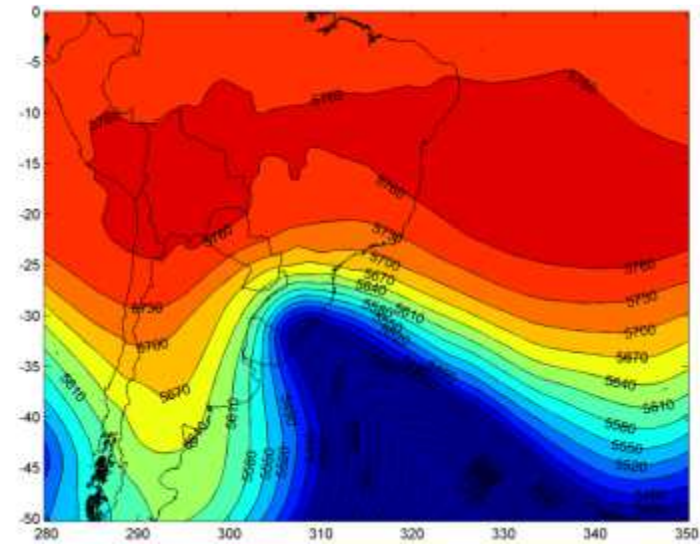
(a)



(b)

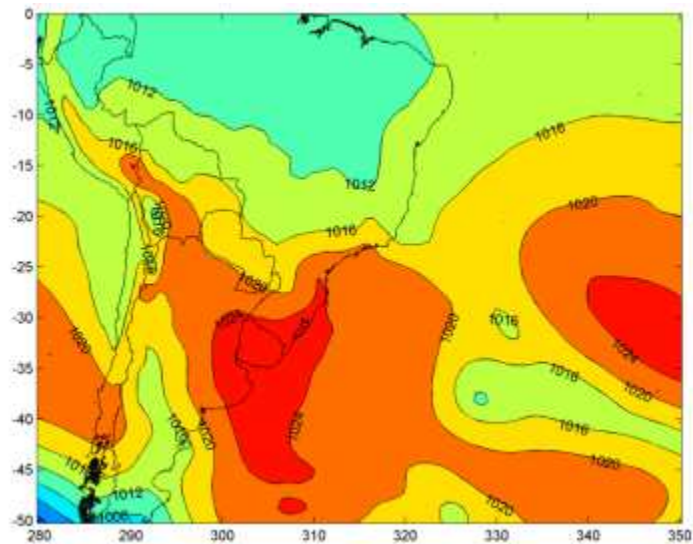


(c)

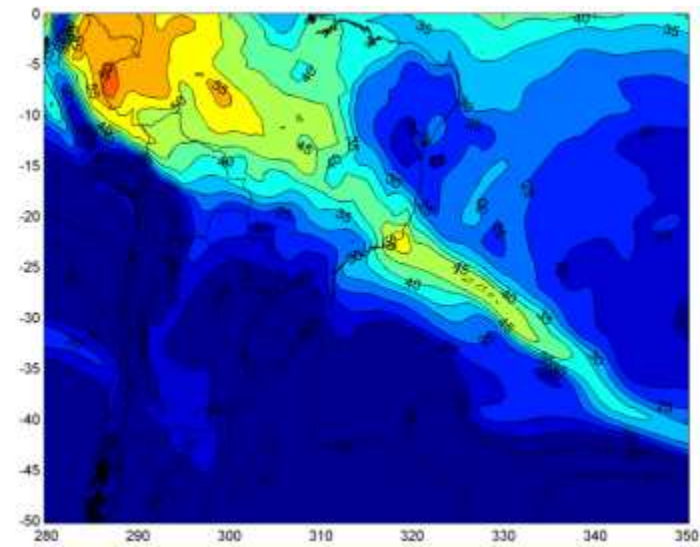


(d)

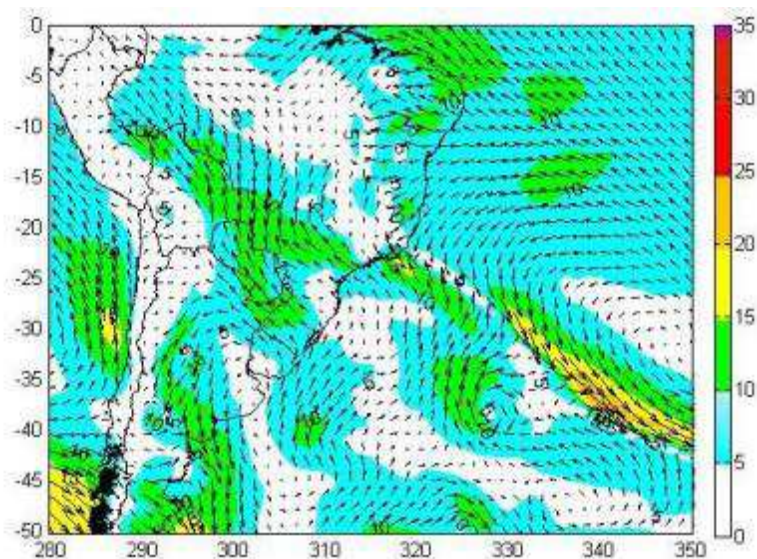
Evento 17 - Campos observados do dia 26/09/2012 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



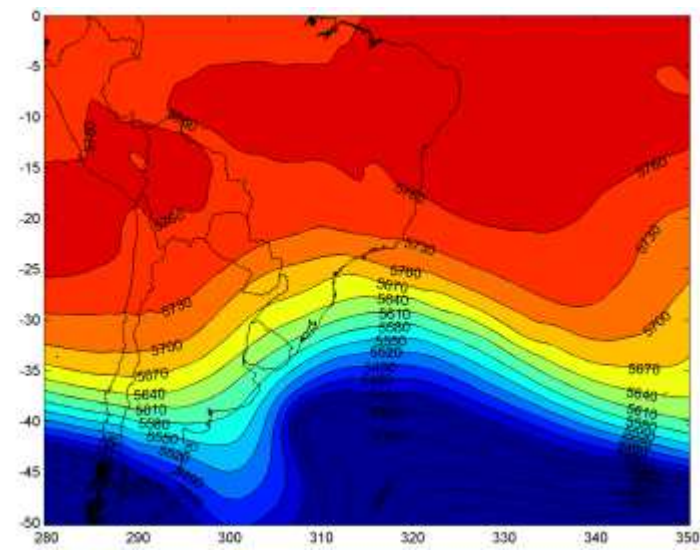
(a)



(b)

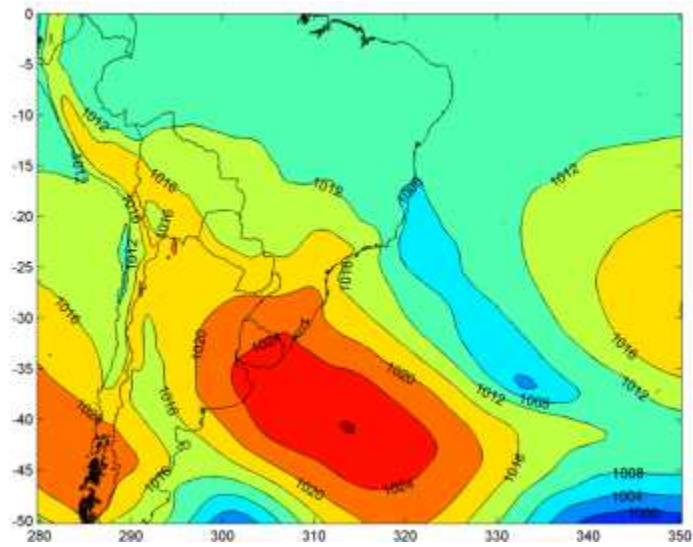


(c)

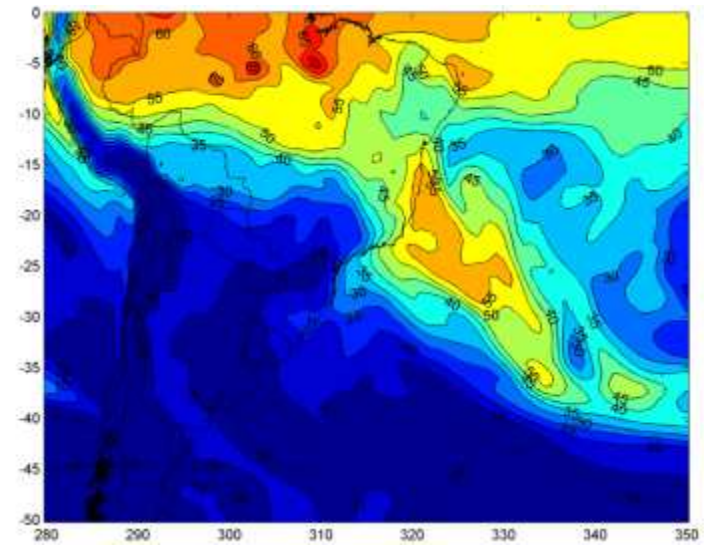


(d)

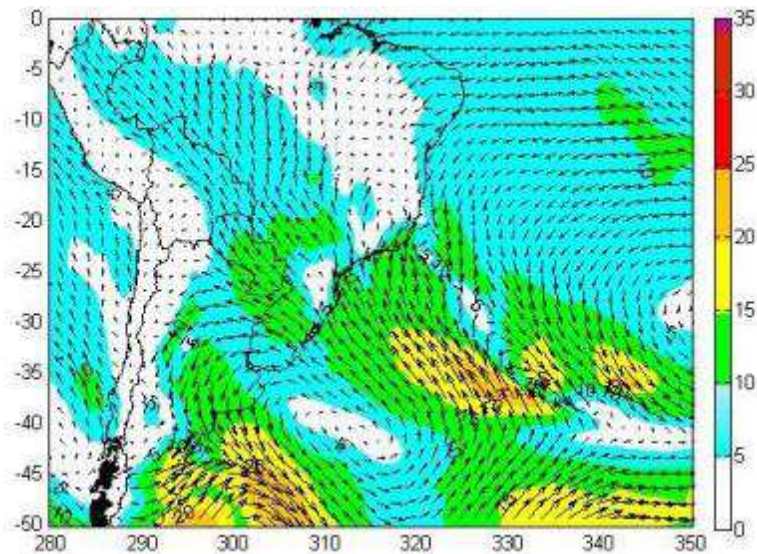
Evento 20 - Campos observados do dia 12/10/2003 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



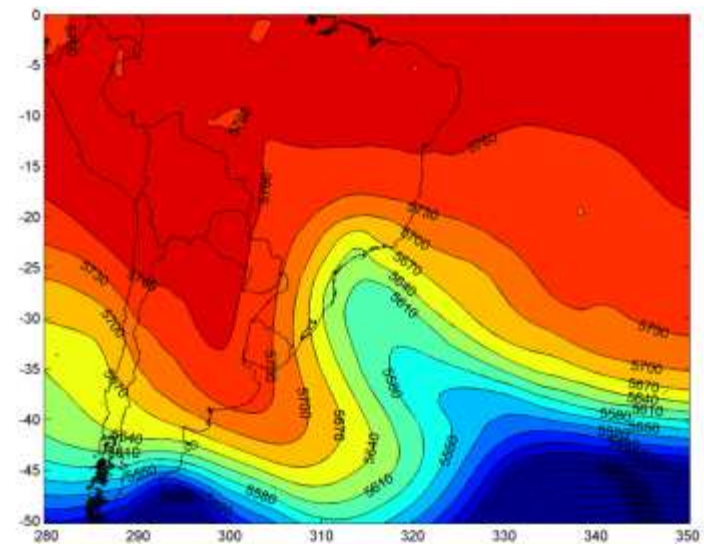
(a)



(b)

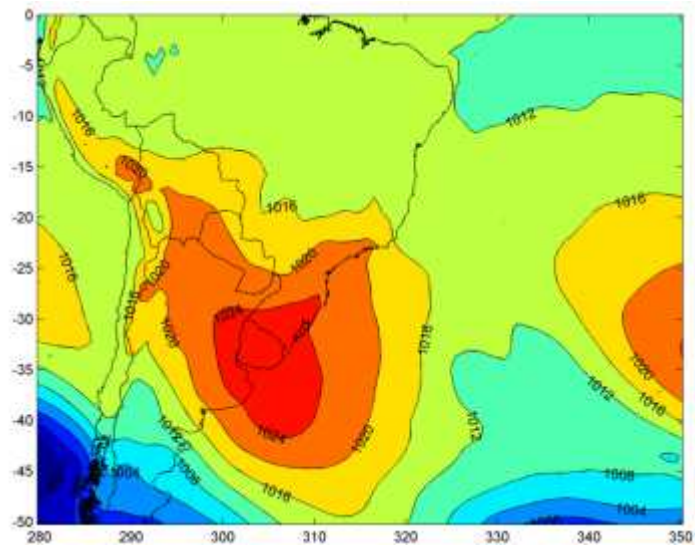


(c)

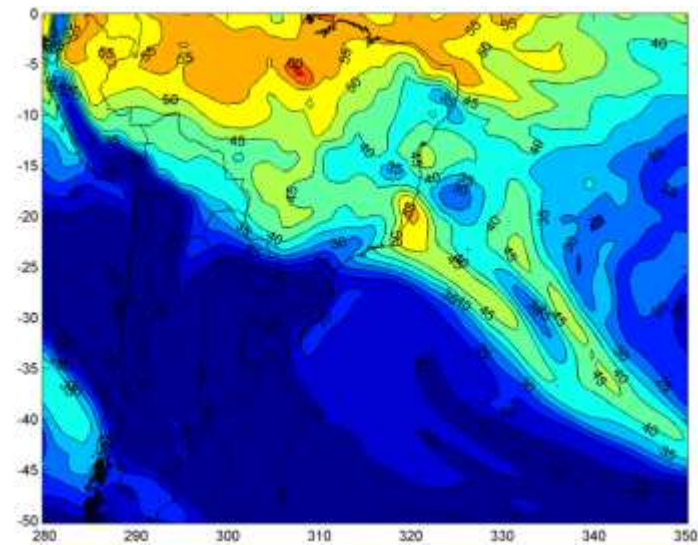


(d)

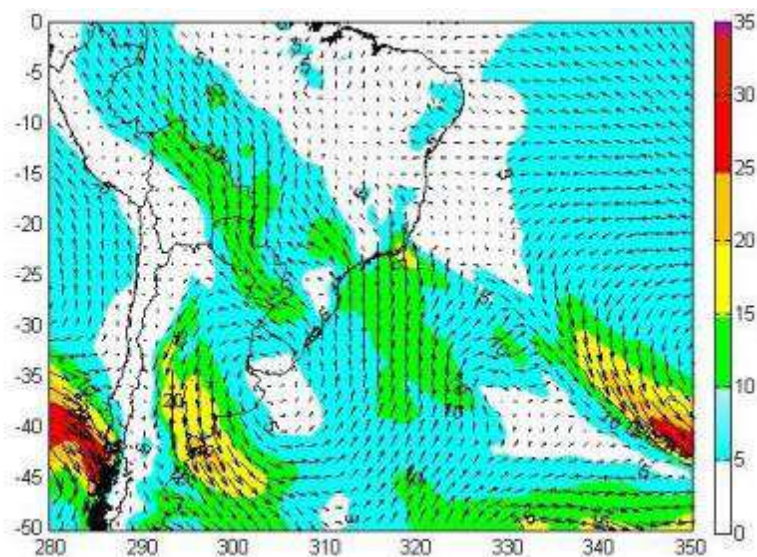
Evento 21 - Campos observados do dia 07/04/2010 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



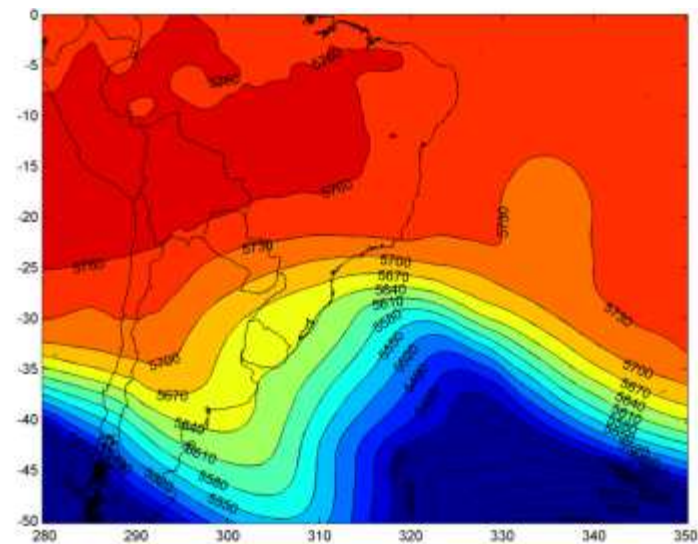
(a)



(b)

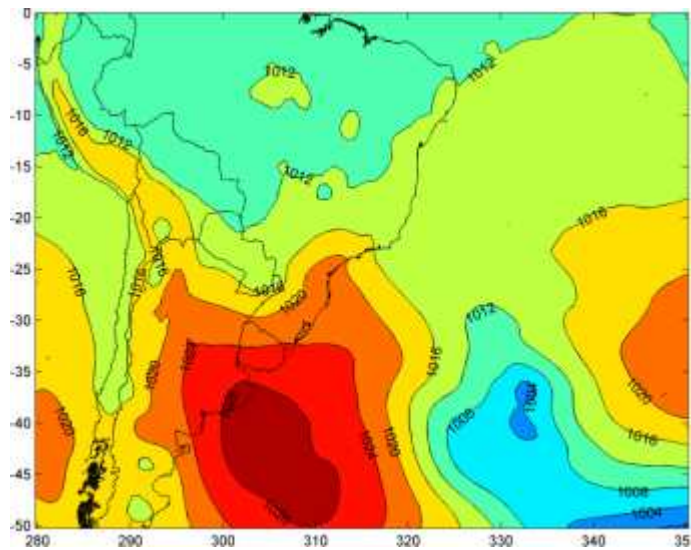


(c)

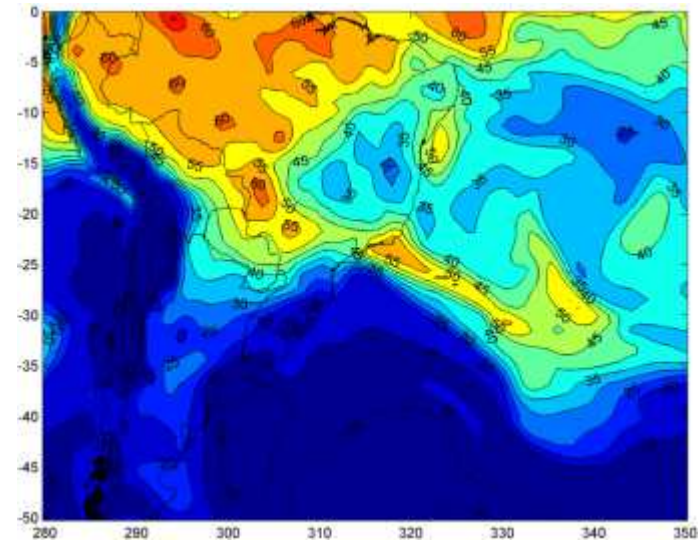


(d)

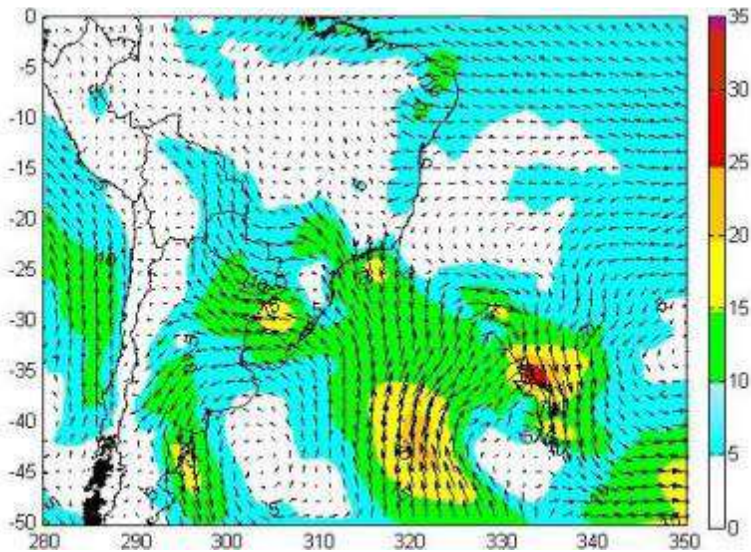
Evento 25 - Campos observados do dia 18/04/2006 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



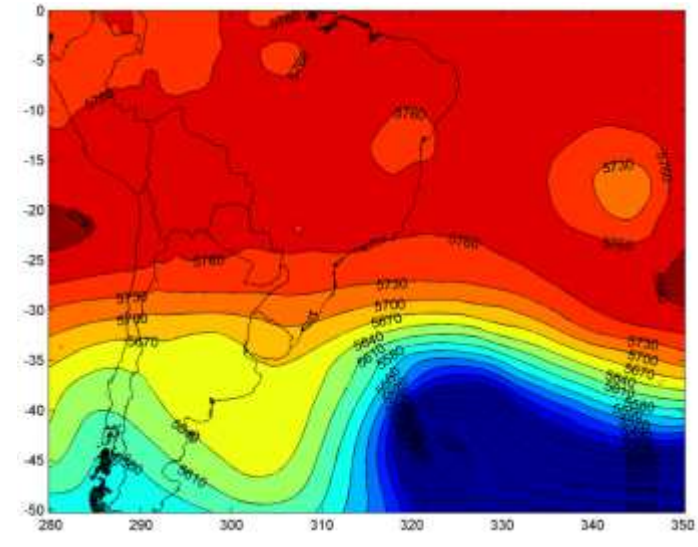
(a)



(b)

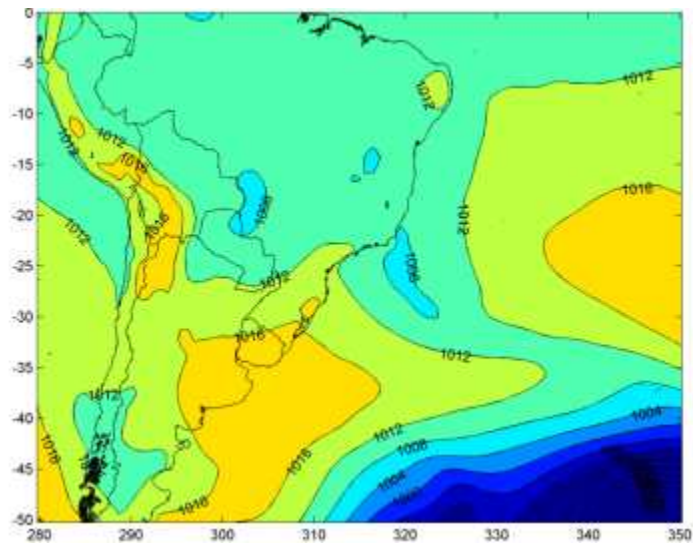


(c)

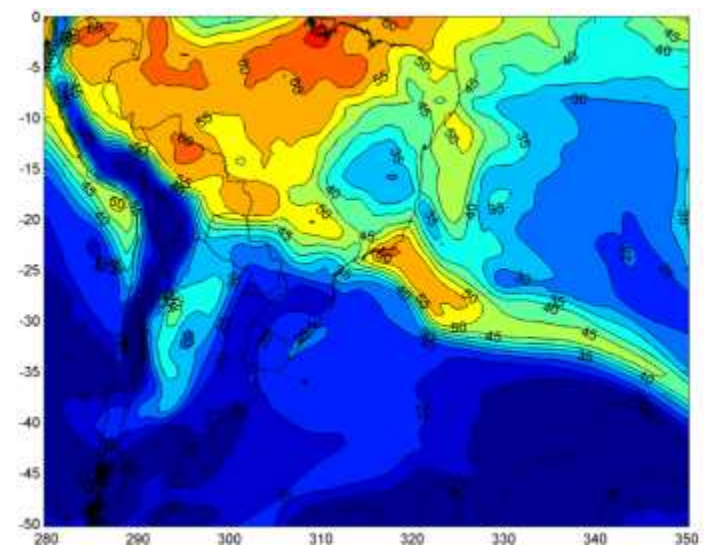


(d)

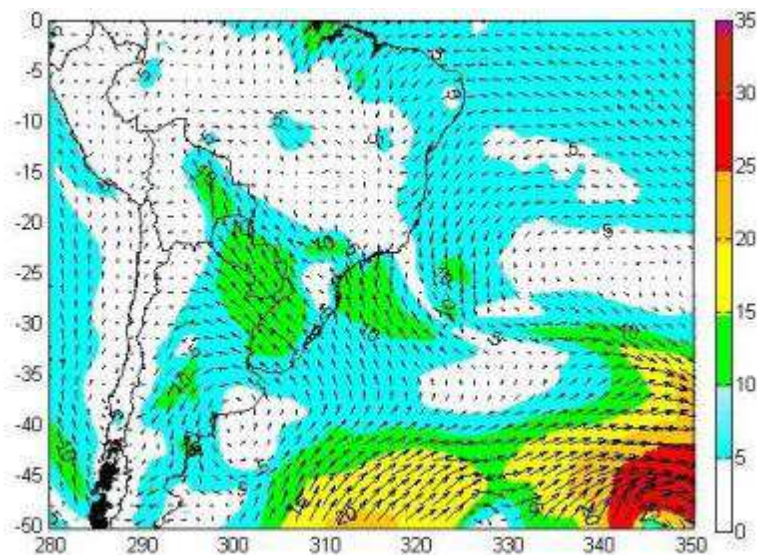
Evento 29 - Campos observados do dia 18/03/2013 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



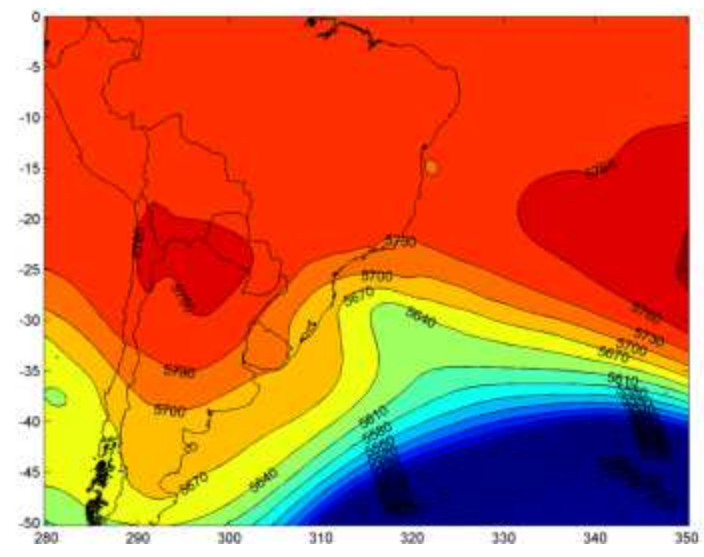
(a)



(b)



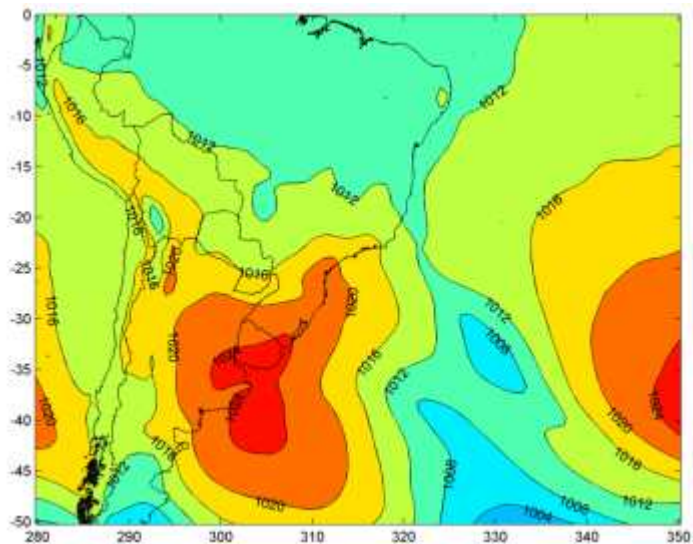
(c)



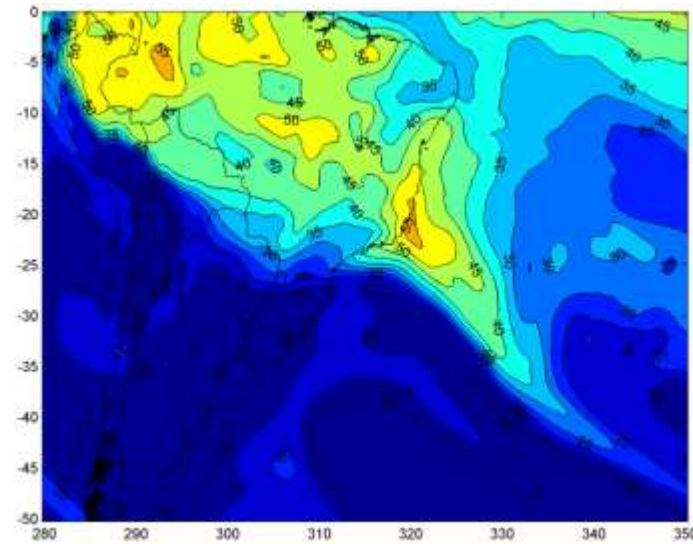
(d)

Evento 38 - Campos observados do dia 07/02/2004 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

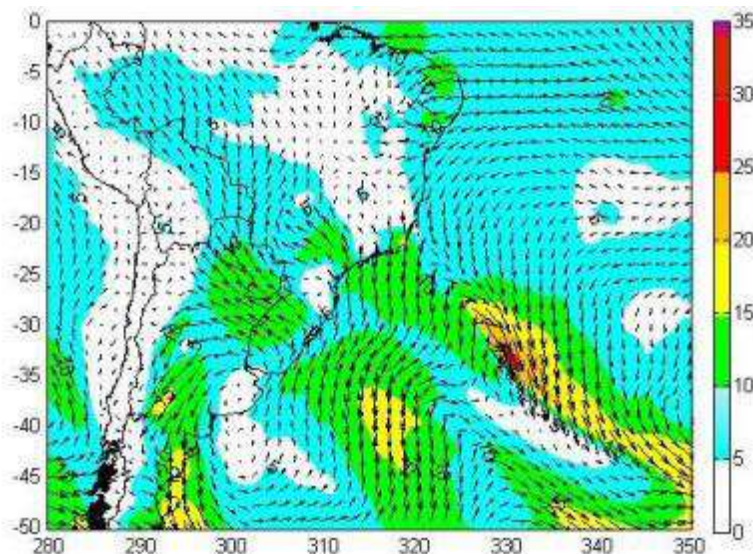




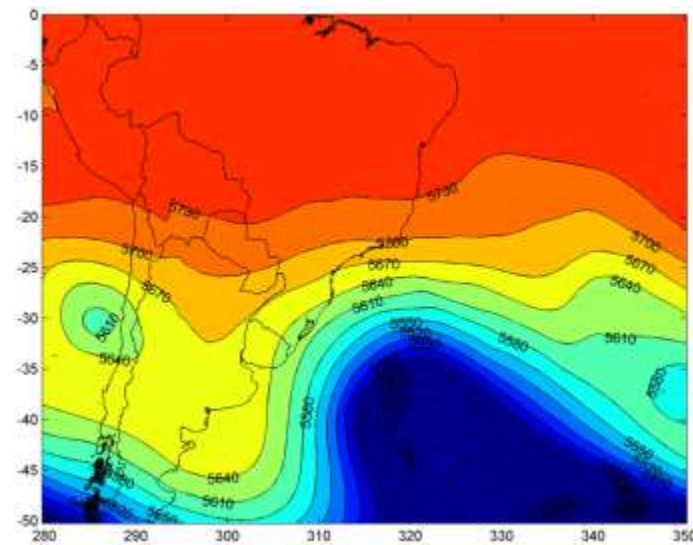
(a)



(b)



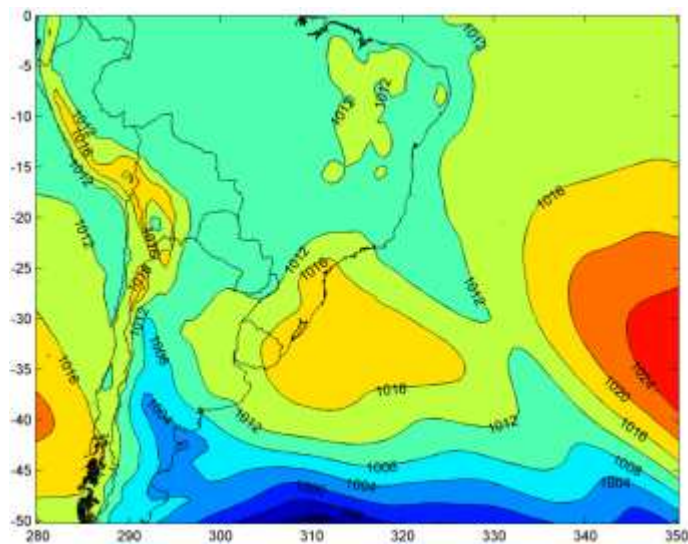
(c)



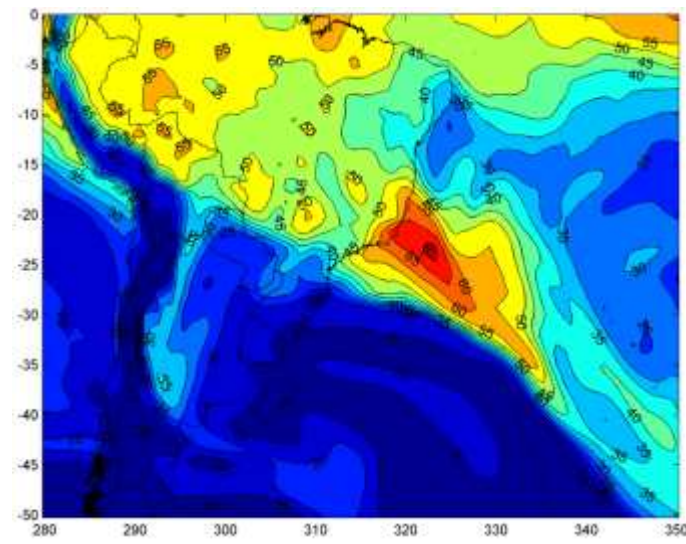
(d)

Evento 45 - Campos observados do dia 03/11/2003 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

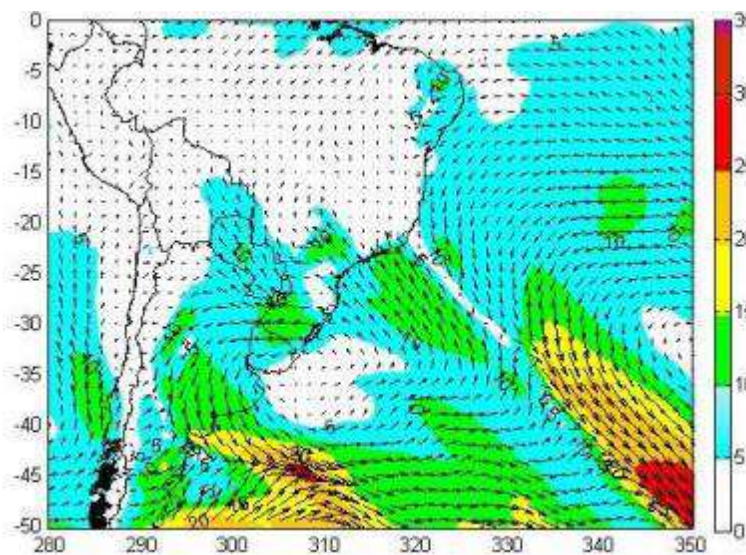
## ANEXO 1: PADRÃO SINÓTICO 2



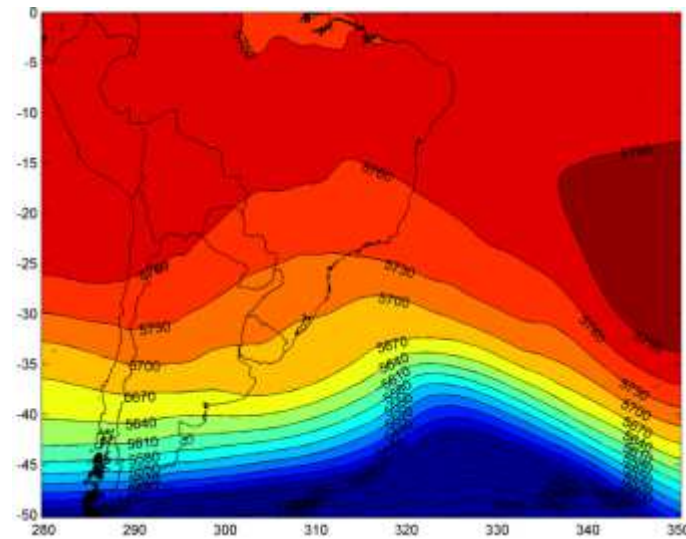
(a)



(b)

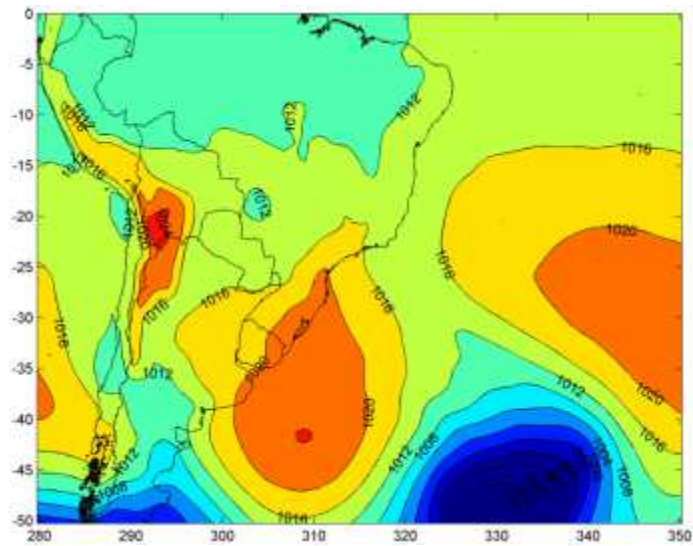


(c)

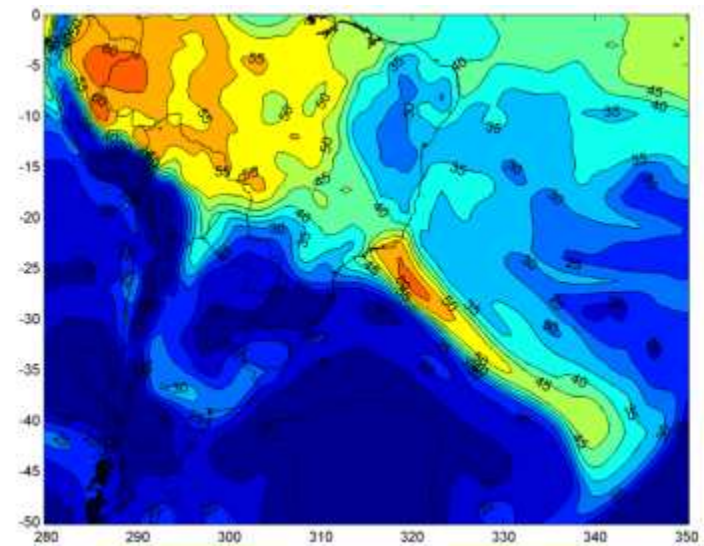


(d)

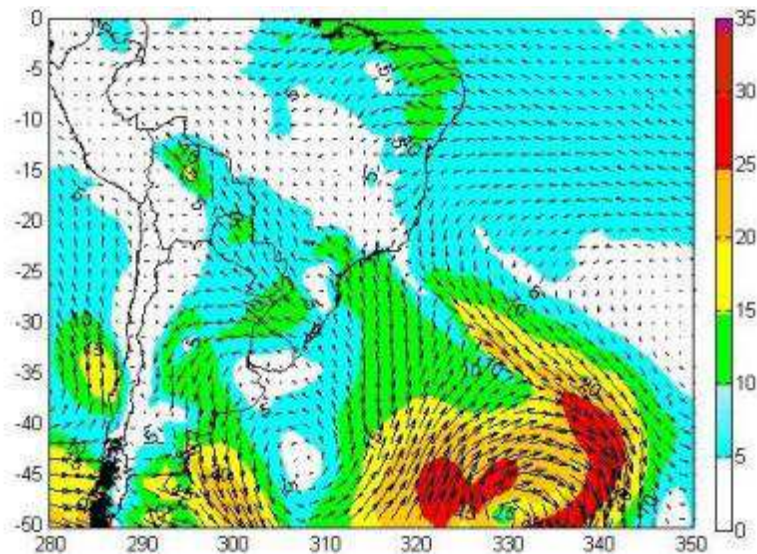
Evento 2 - Campos observados do dia 09/01/1998 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



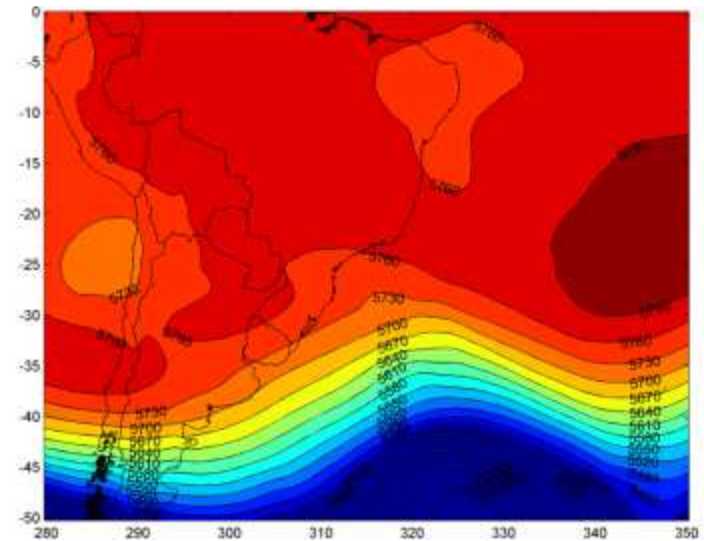
(a)



(b)

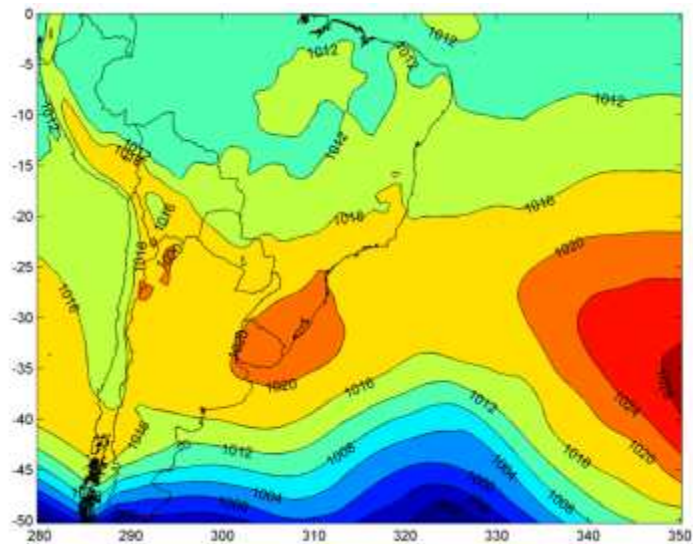


(c)

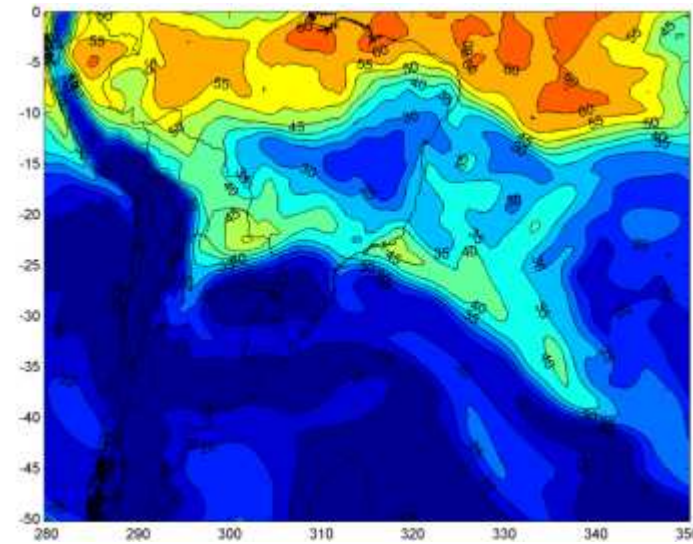


(d)

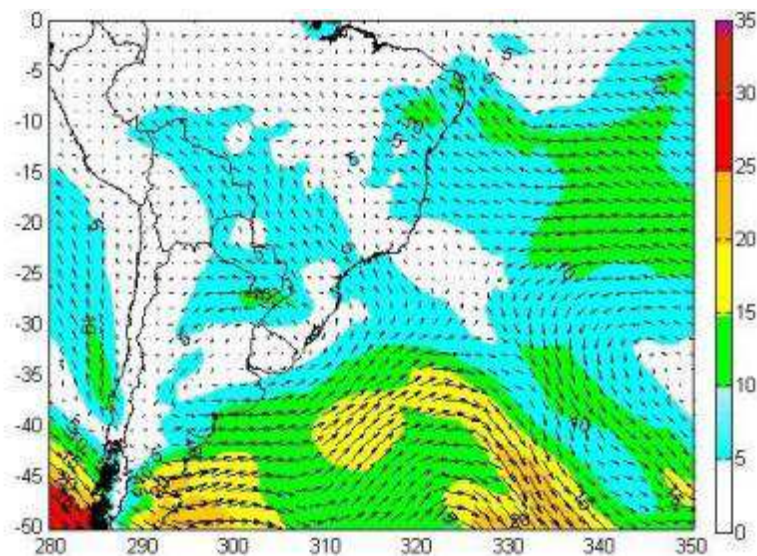
Evento 3 - Campos observados do dia 24/12/2001 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



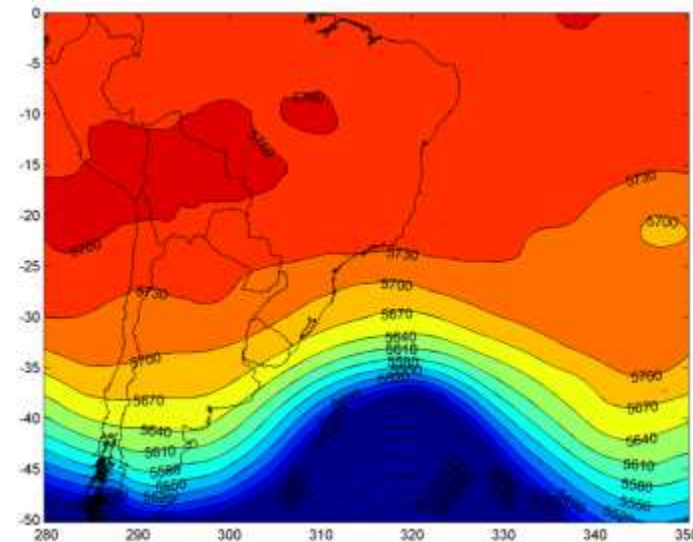
(a)



(b)

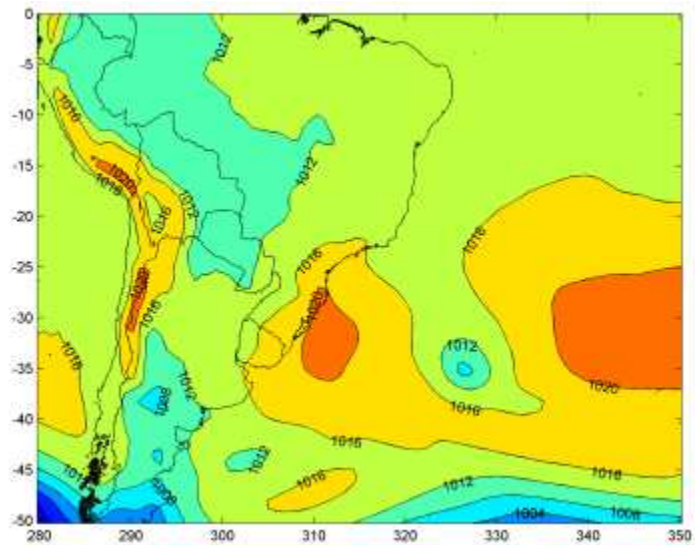


(c)

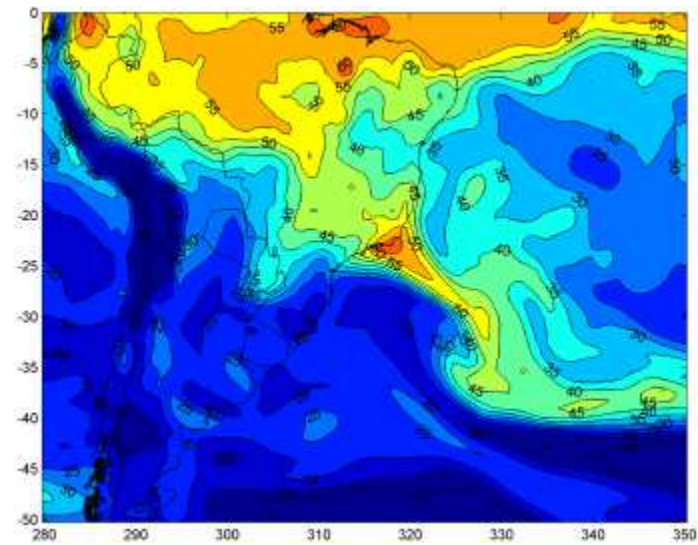


(d)

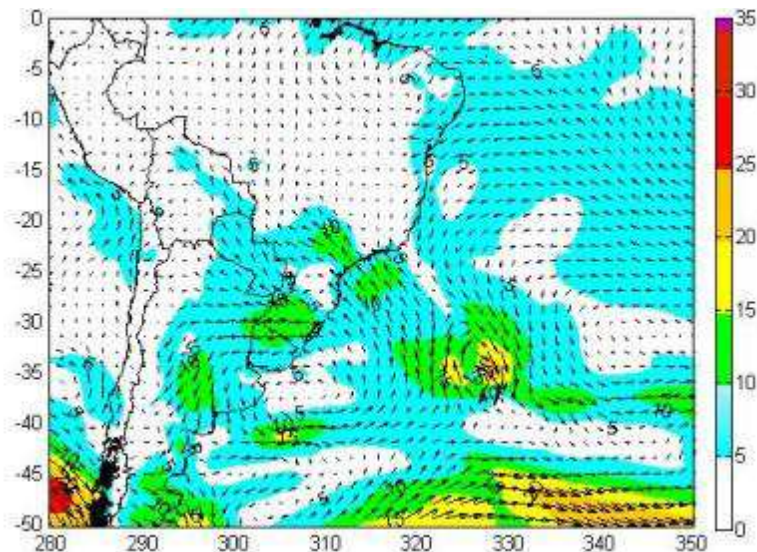
Evento 9 - Campos observados do dia 26/04/2011 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



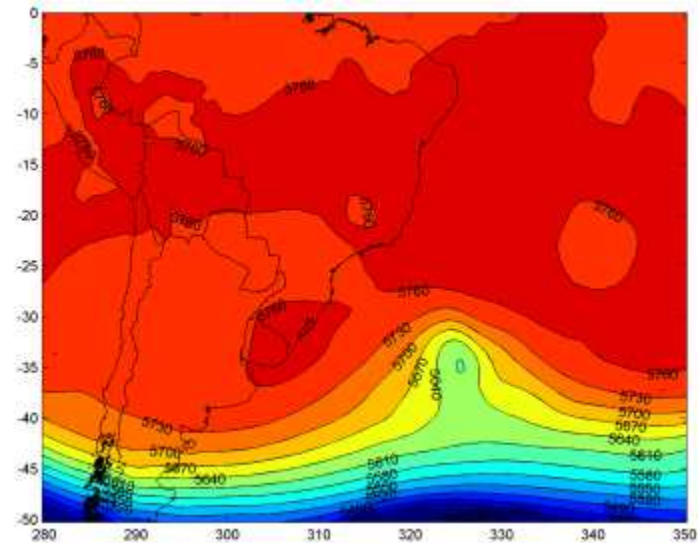
(a)



(b)

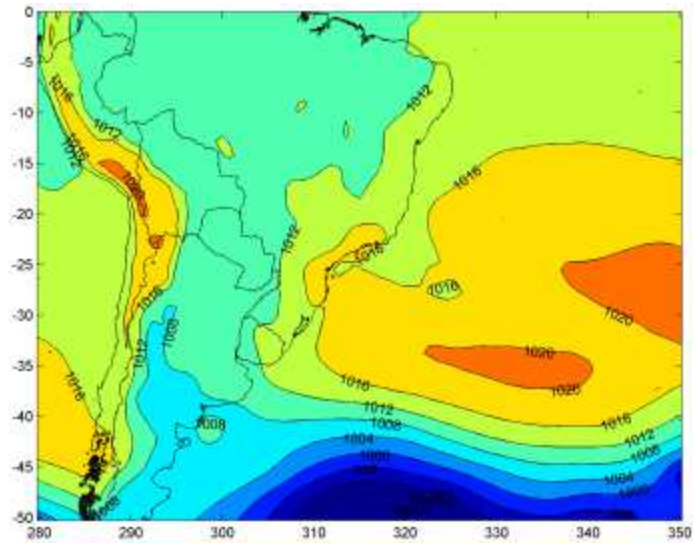


(c)

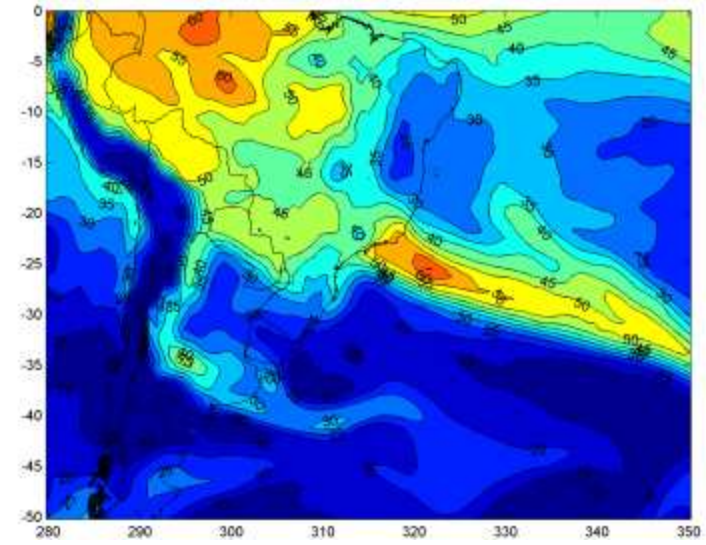


(d)

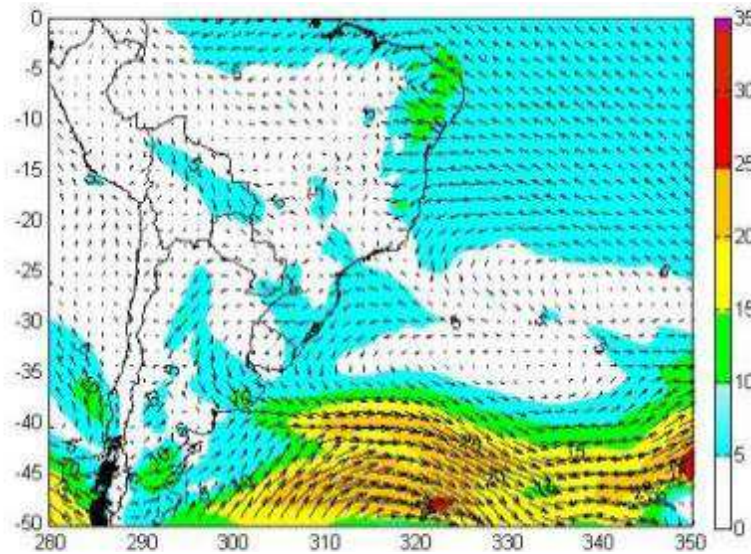
Evento 10 - Campos observados do dia 22/01/2009 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



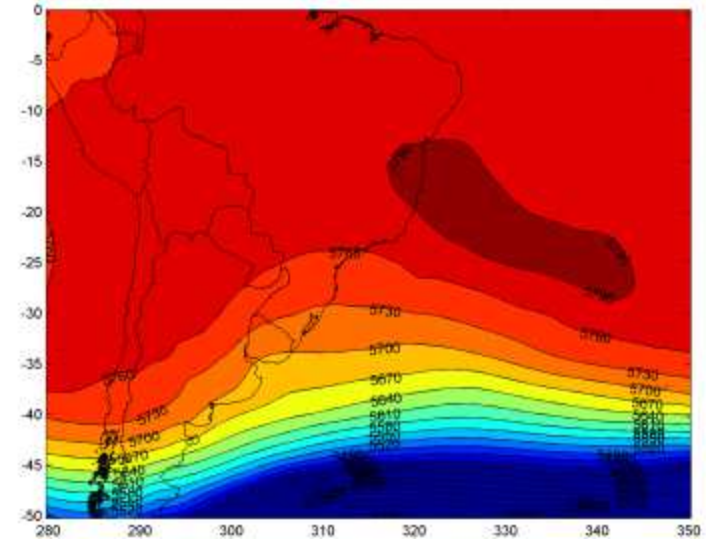
(a)



(b)

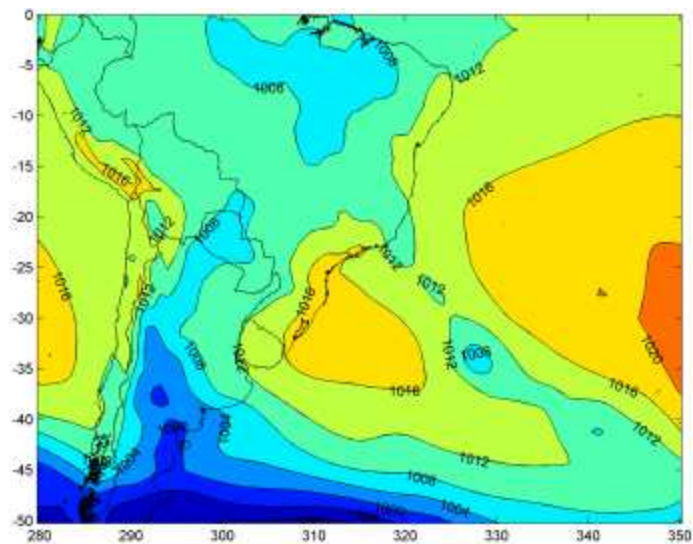


(c)

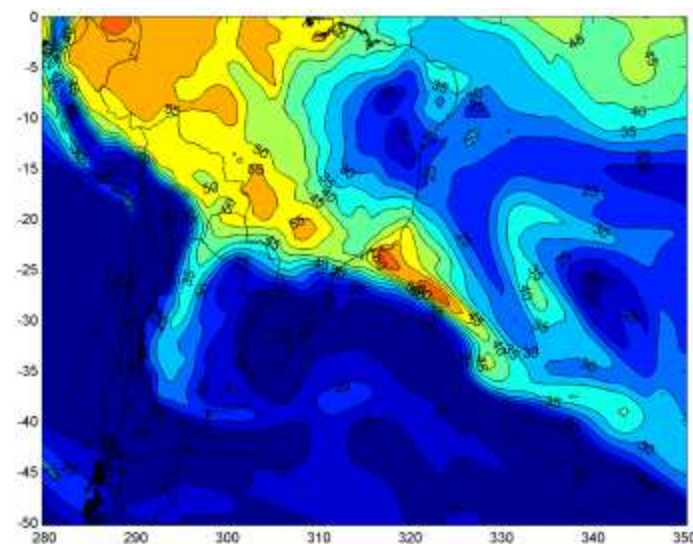


(d)

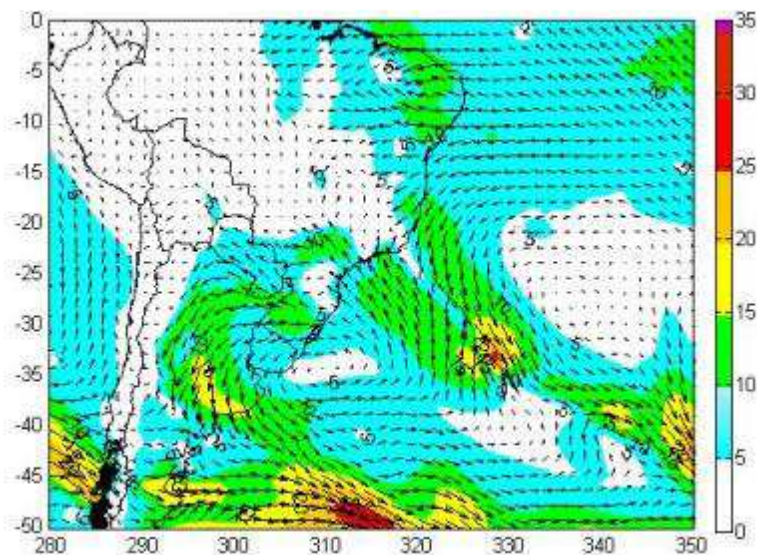
Evento 14 - Campos observados do dia 28/01/2006 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



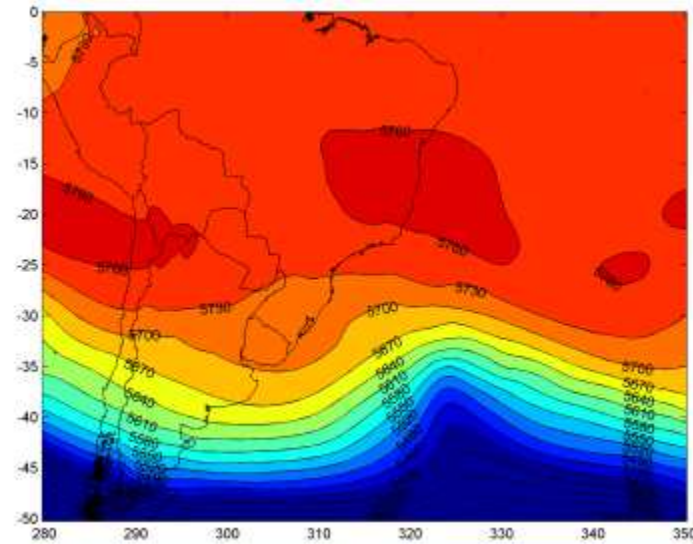
(a)



(b)

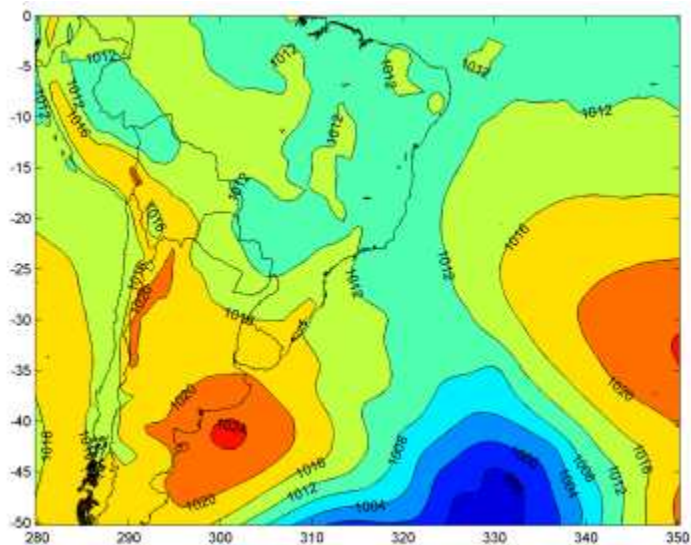


(c)

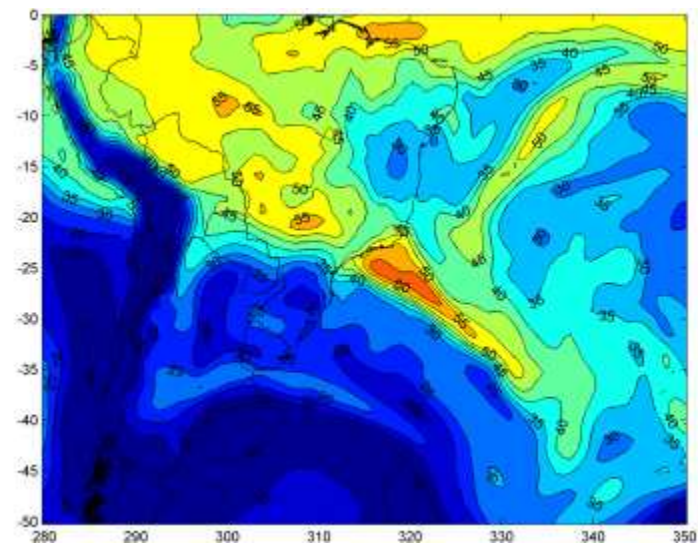


(d)

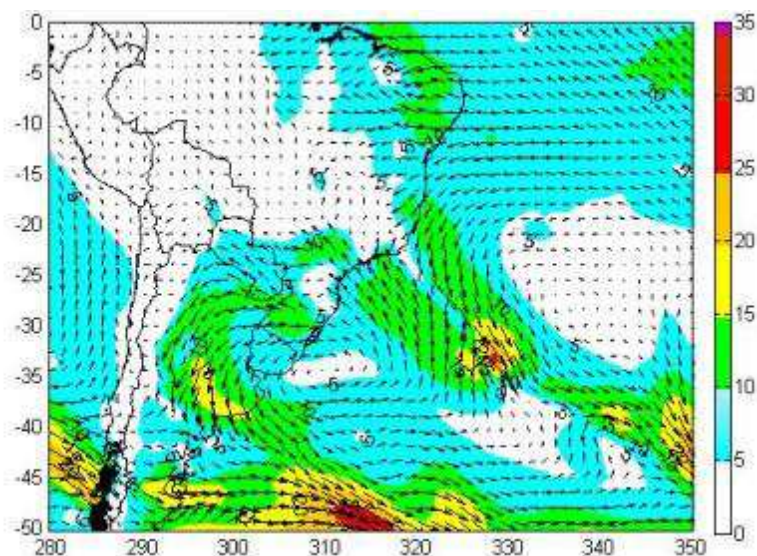
Evento 18 - Campos observados do dia 13/12/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



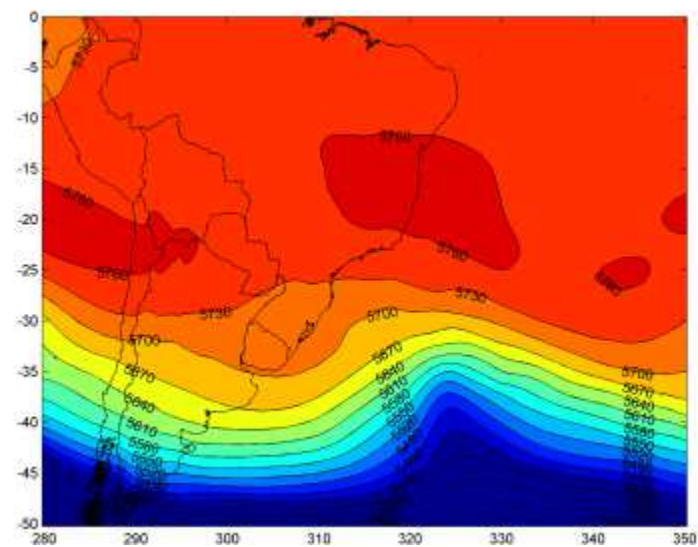
(a)



(b)



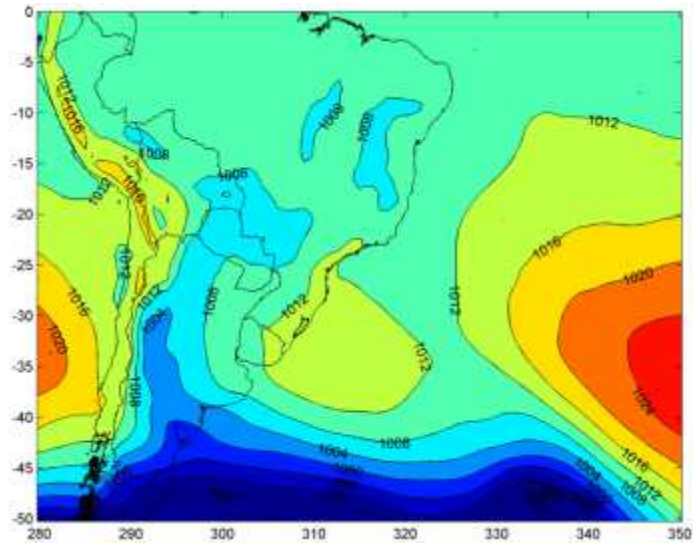
(c)



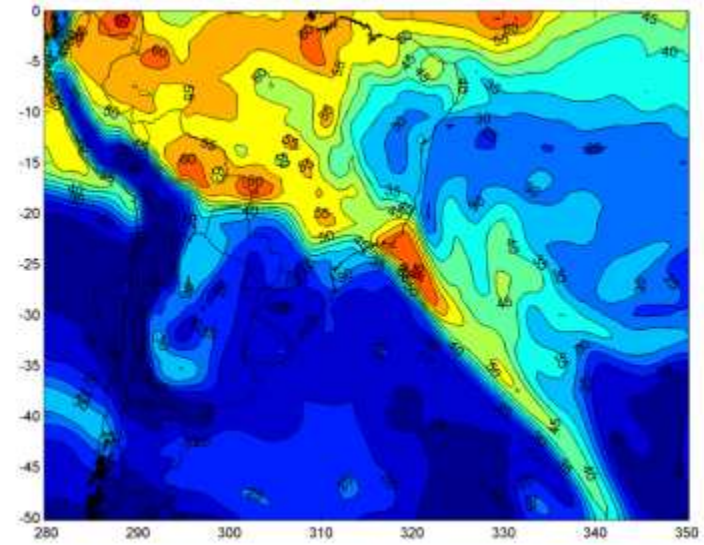
(d)

Evento 19 - Campos observados do dia 14/03/2008 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

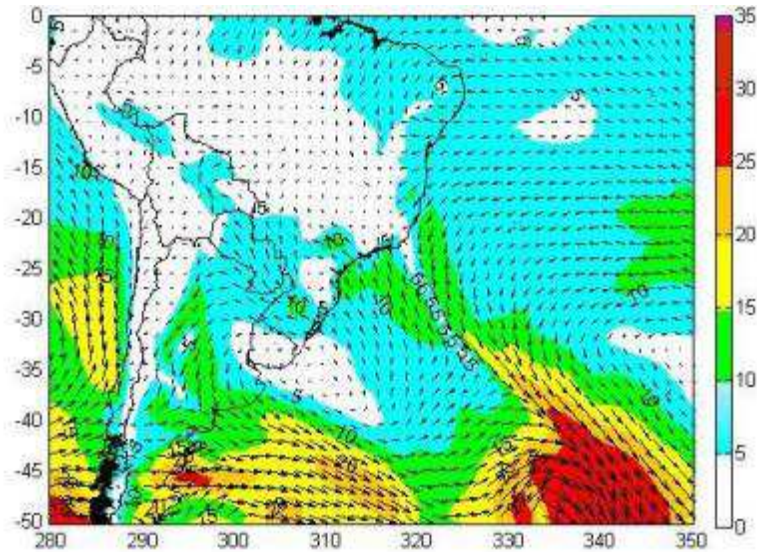




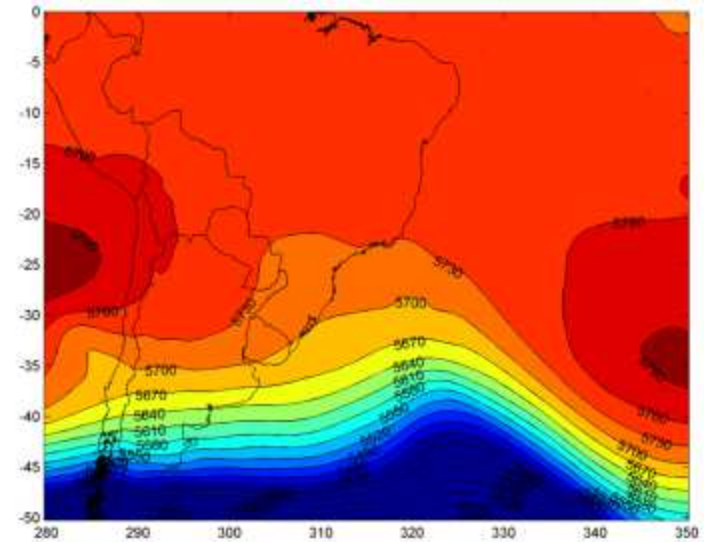
(a)



(b)

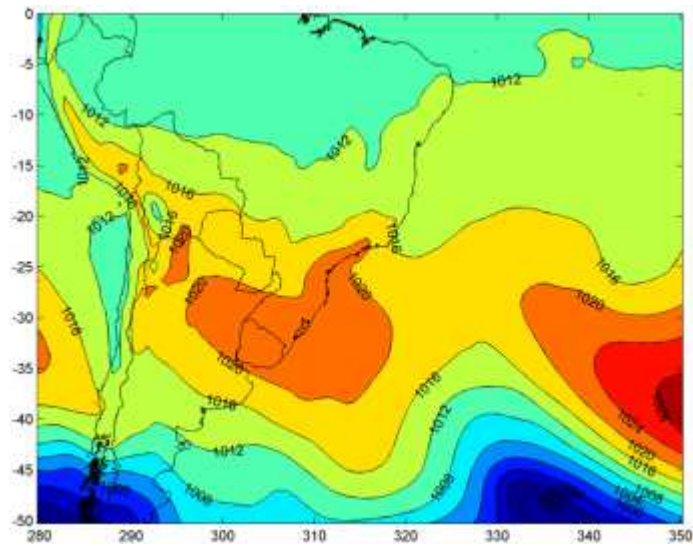


(c)

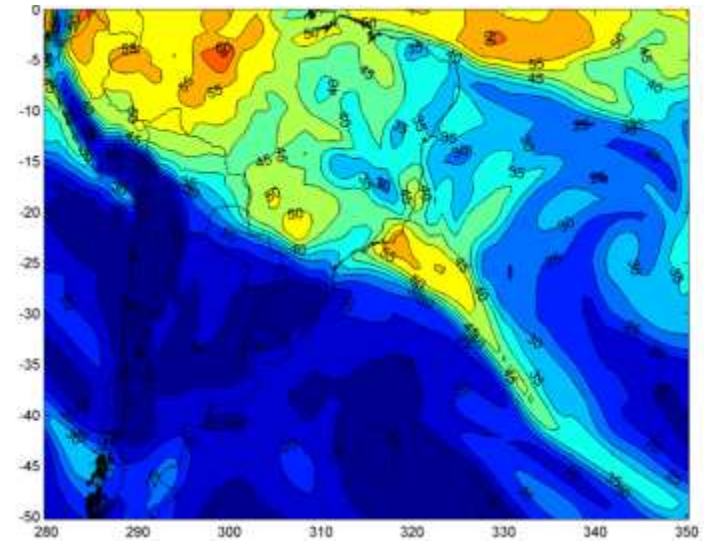


(d)

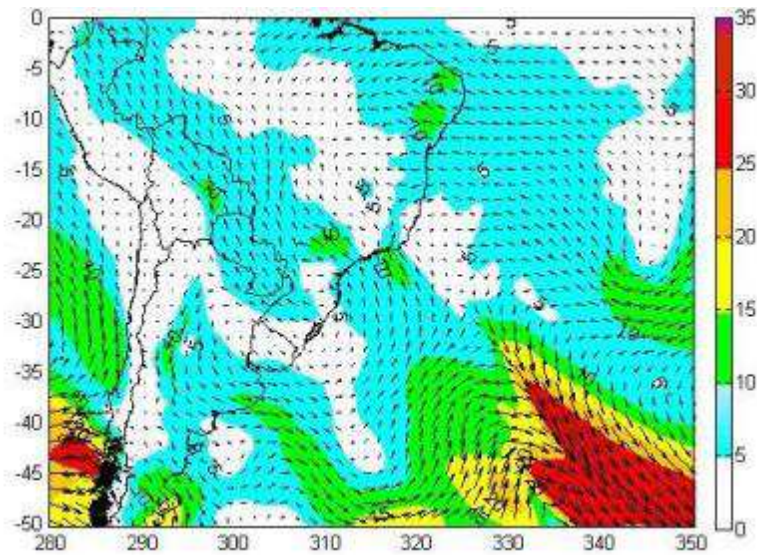
Evento 32 - Campos observados do dia 13/02/2009 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



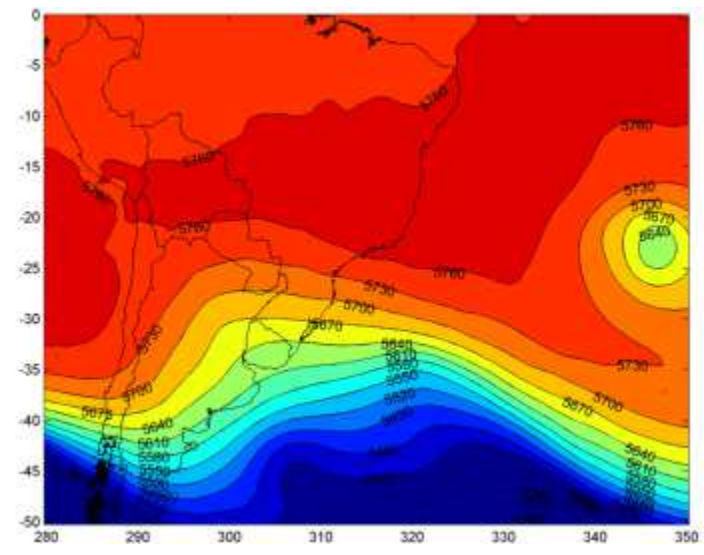
(a)



(b)

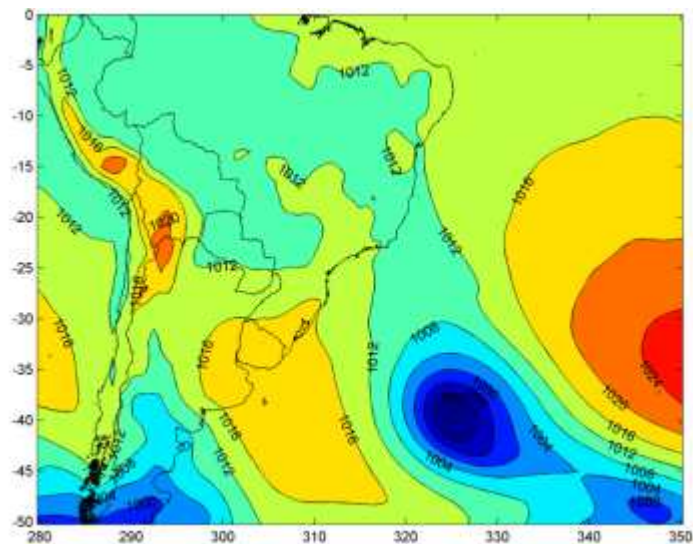


(c)

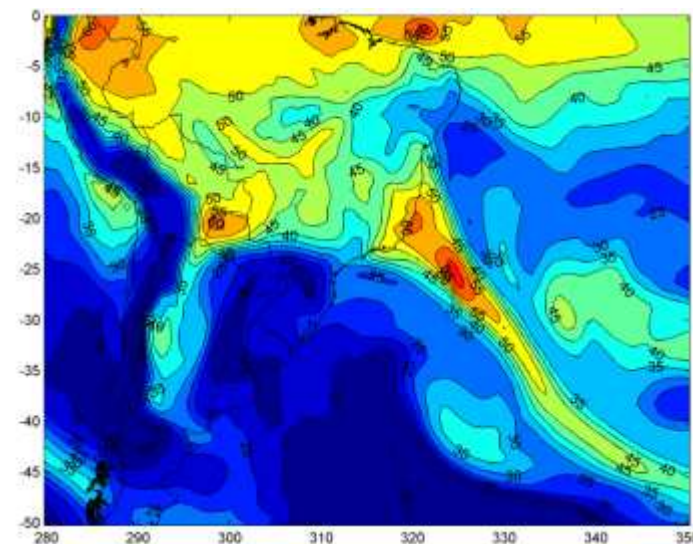


(d)

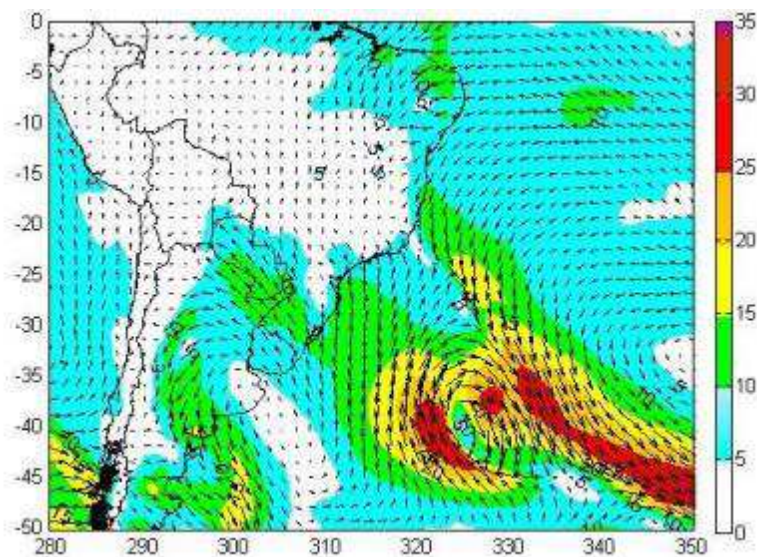
Evento 34 - Campos observados do dia 15/04/2014 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



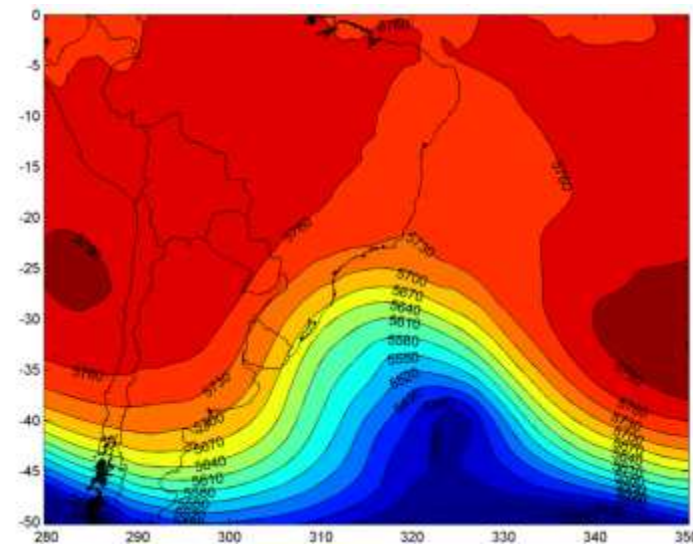
(a)



(b)

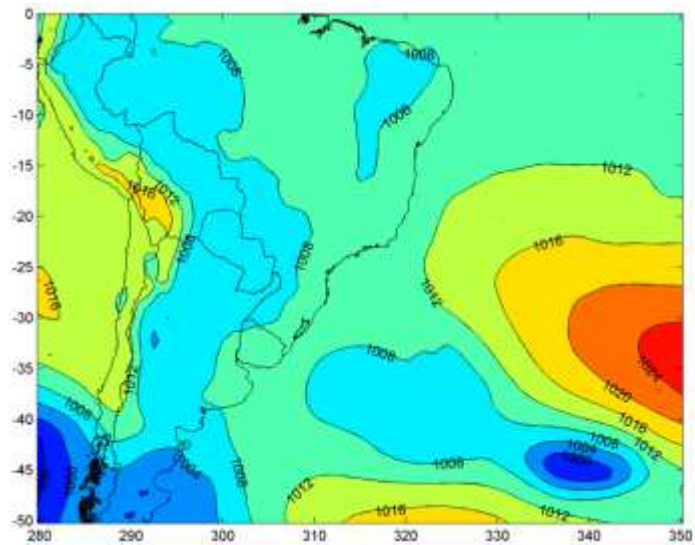


(c)

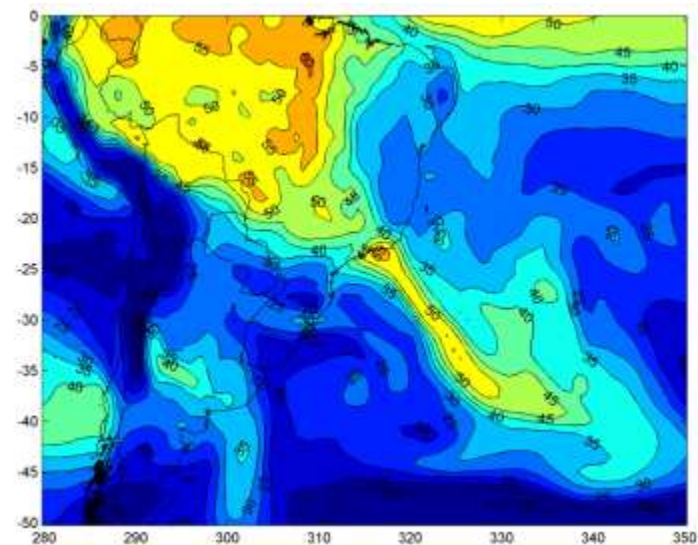


(d)

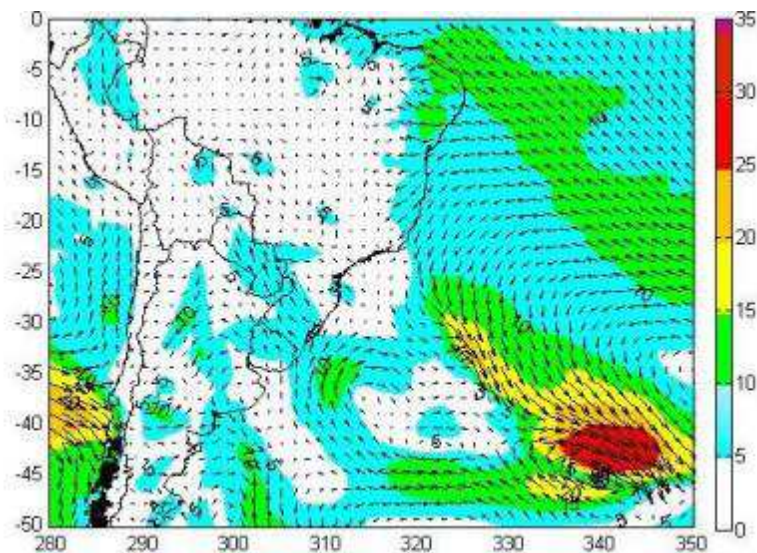
Evento 35 - Campos observados do dia 03/02/2002 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



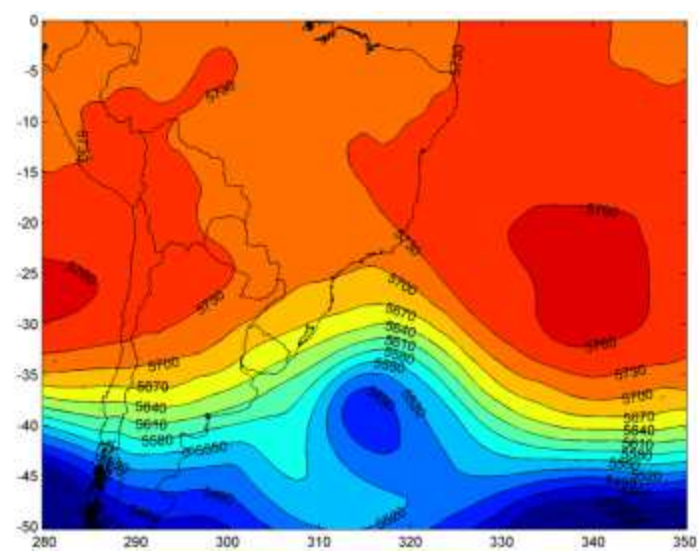
(a)



(b)

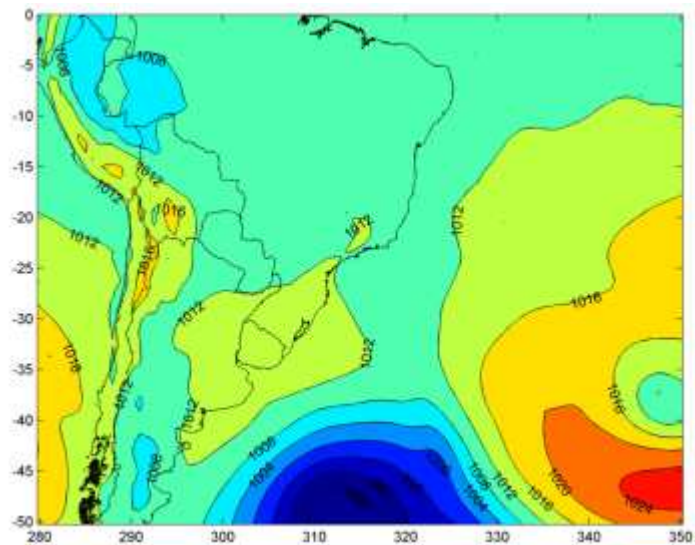


(c)

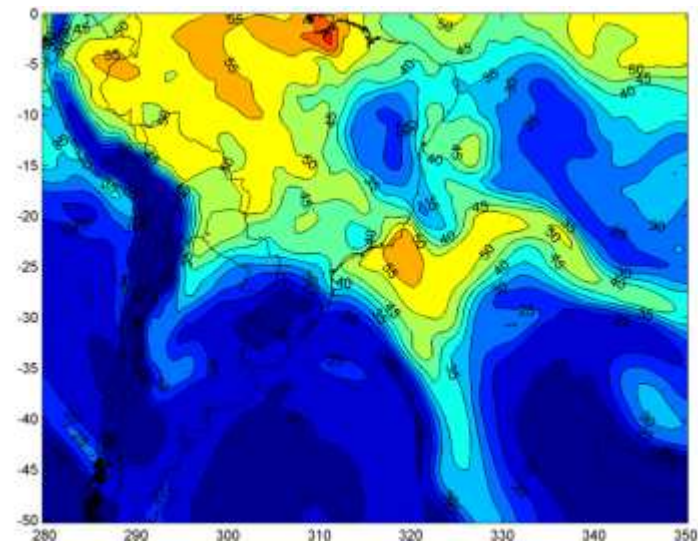


(d)

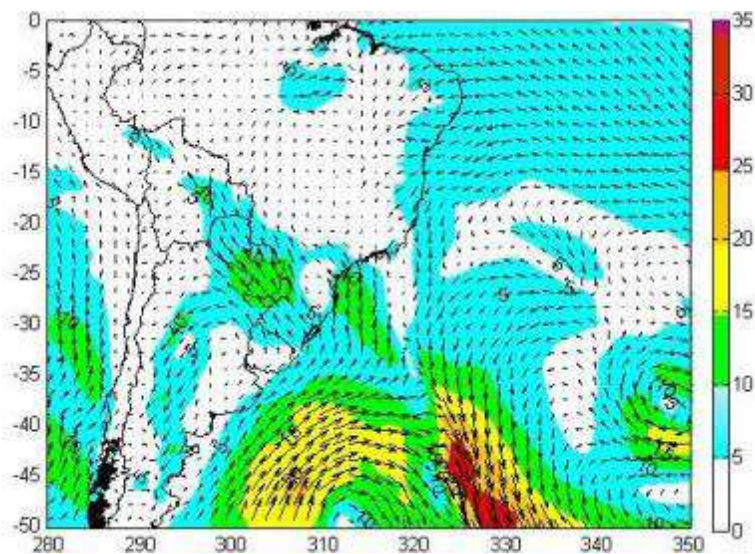
Evento 36 - Campos observados do dia 05/01/2006 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



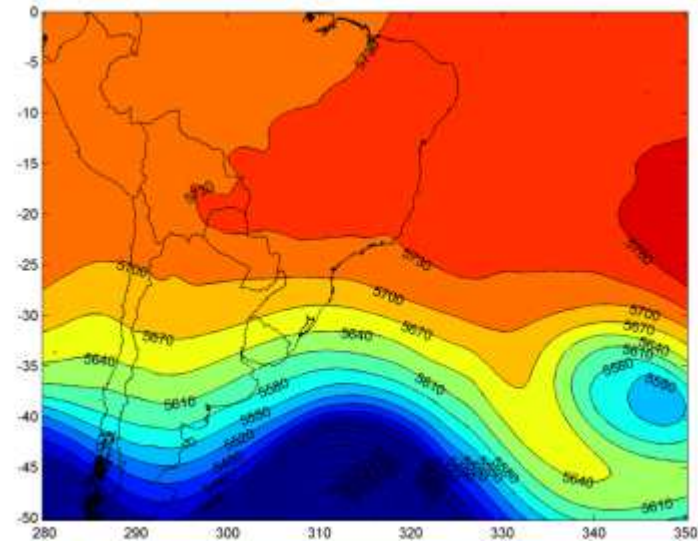
(a)



(b)

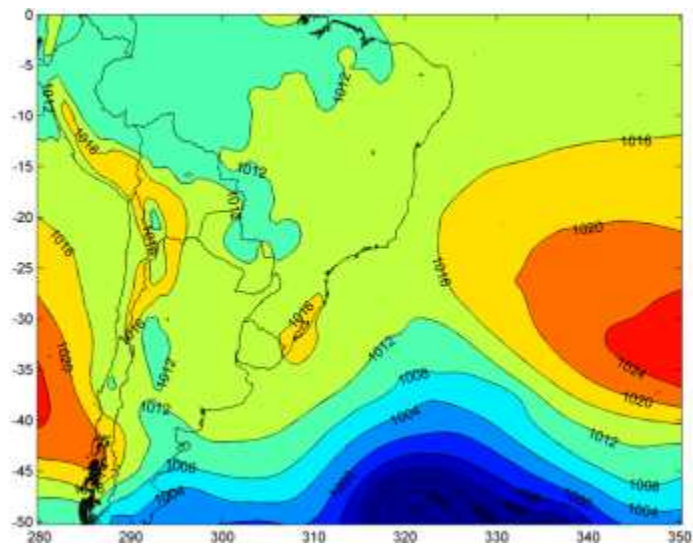


(c)

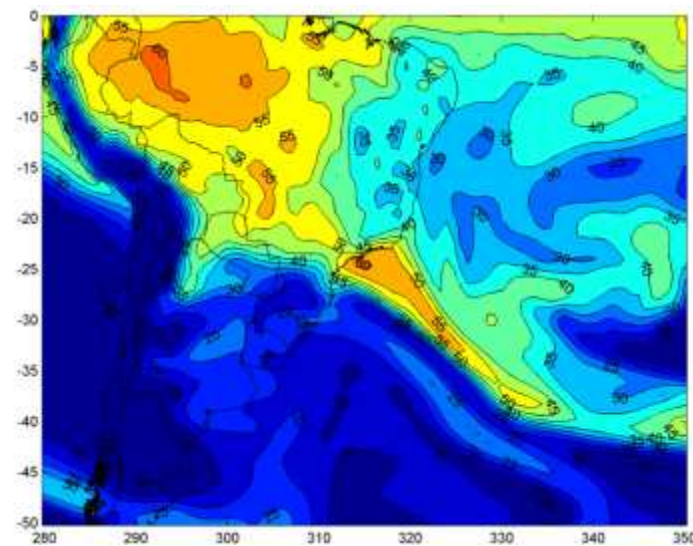


(d)

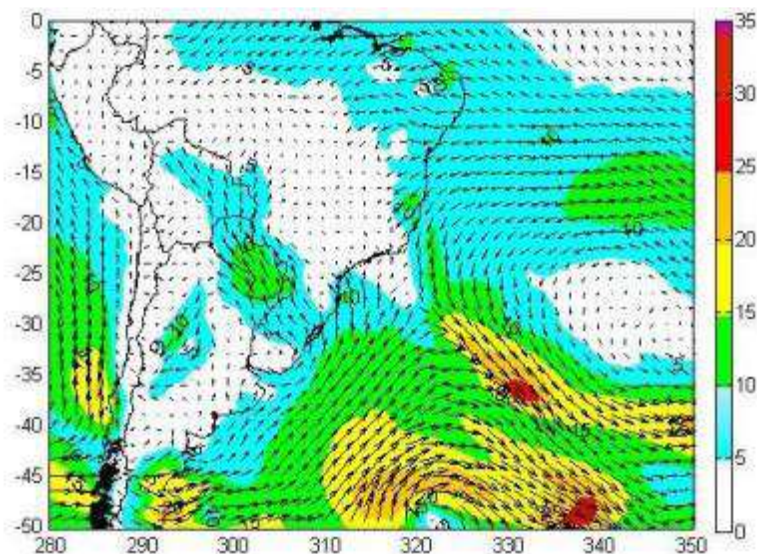
Evento 39 - Campos observados do dia 19/03/2000 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



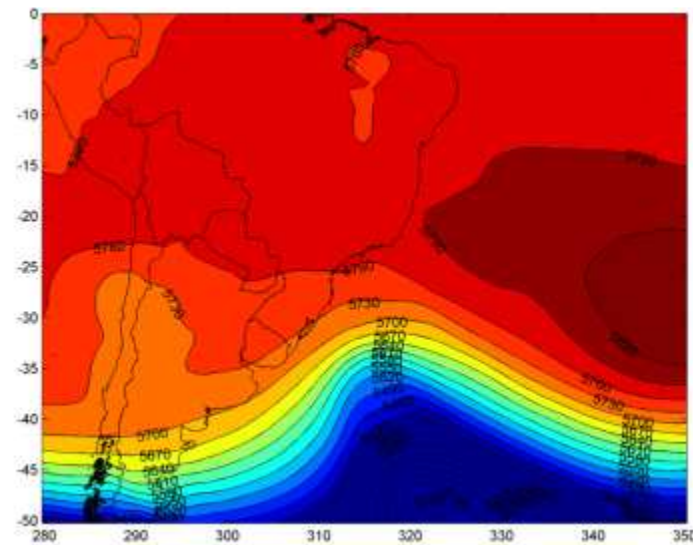
(a)



(b)

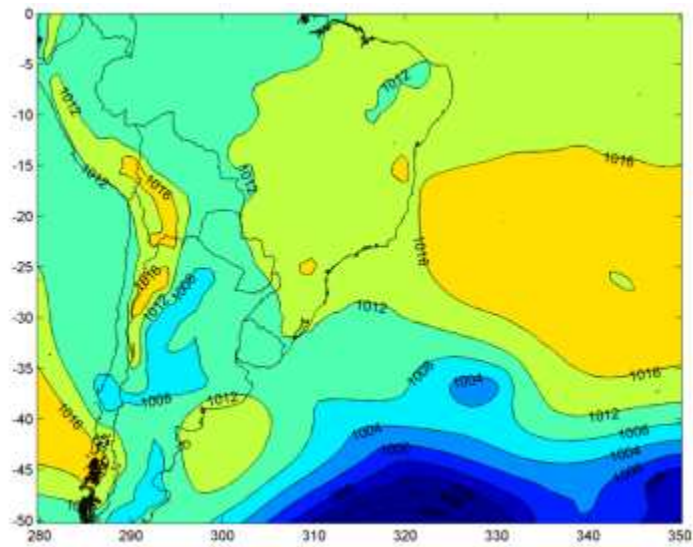


(c)

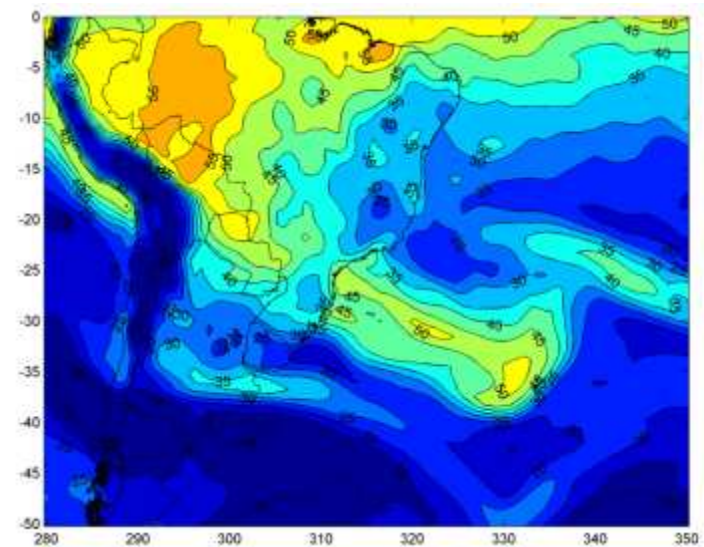


(d)

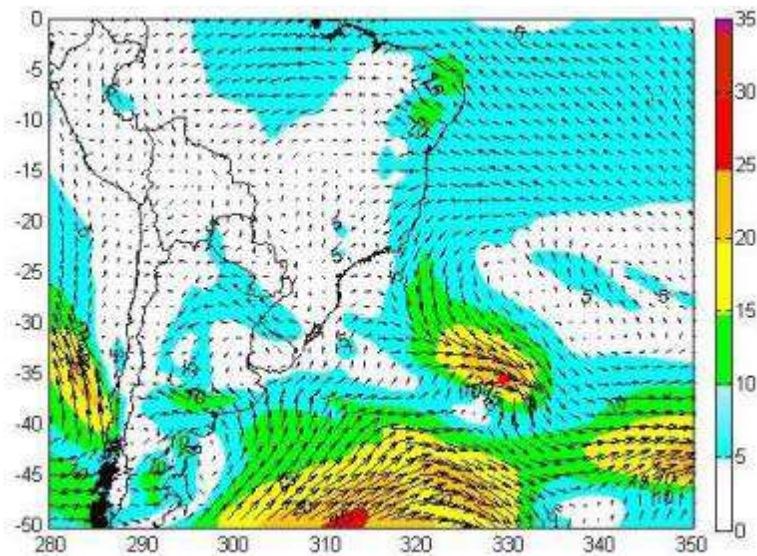
Evento 41 - Campos observados do dia 15/01/2010 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



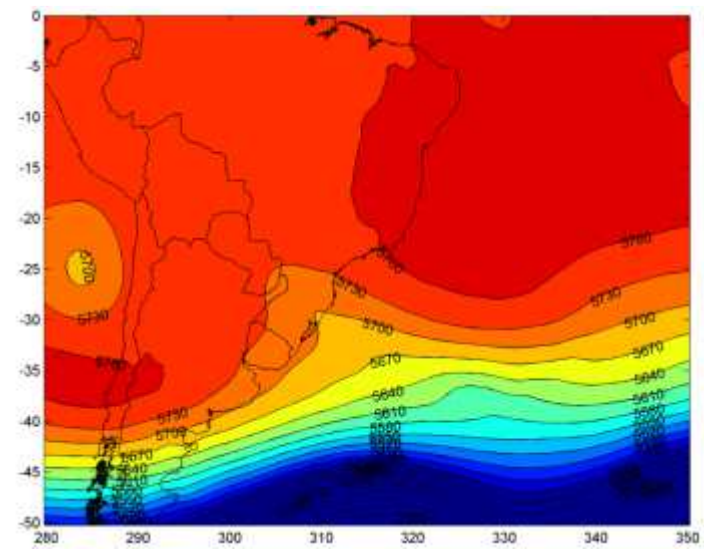
(a)



(b)



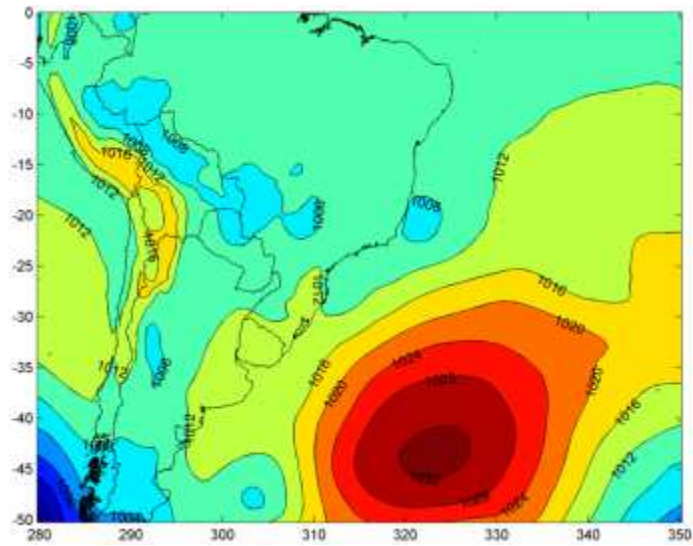
(c)



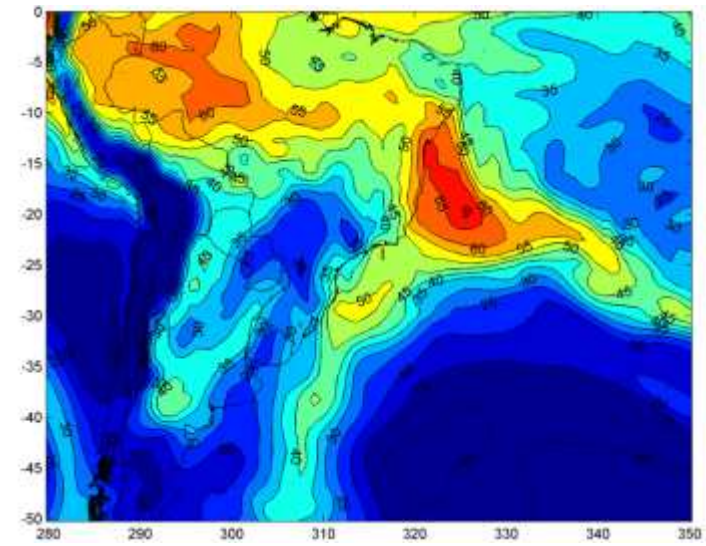
(d)

Evento 42 - Campos observados do dia 16/01/2014 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

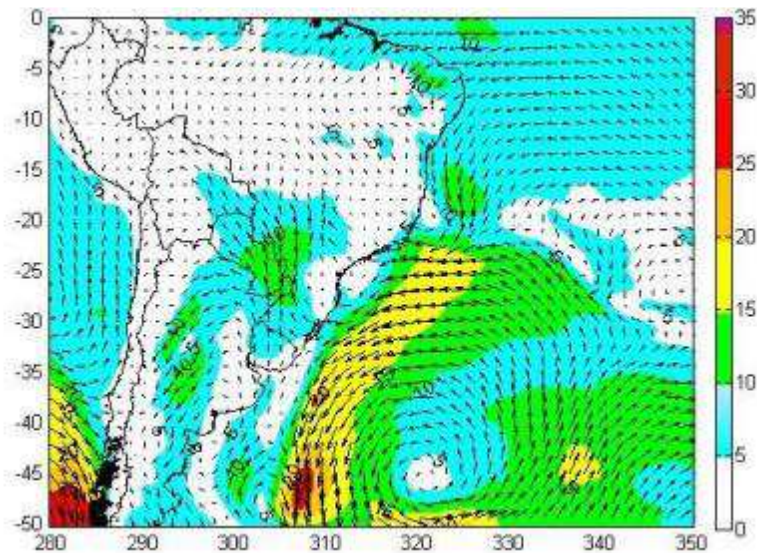
# ANEXO 1: PADRÃO SINÓTICO 3



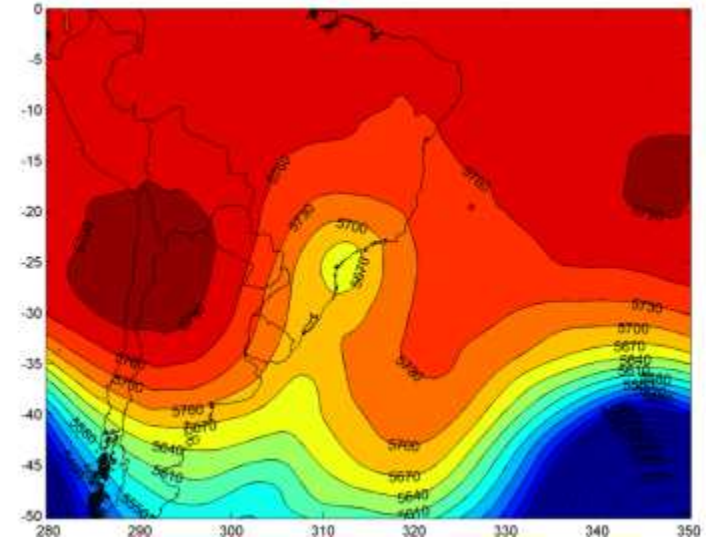
(a)



(b)



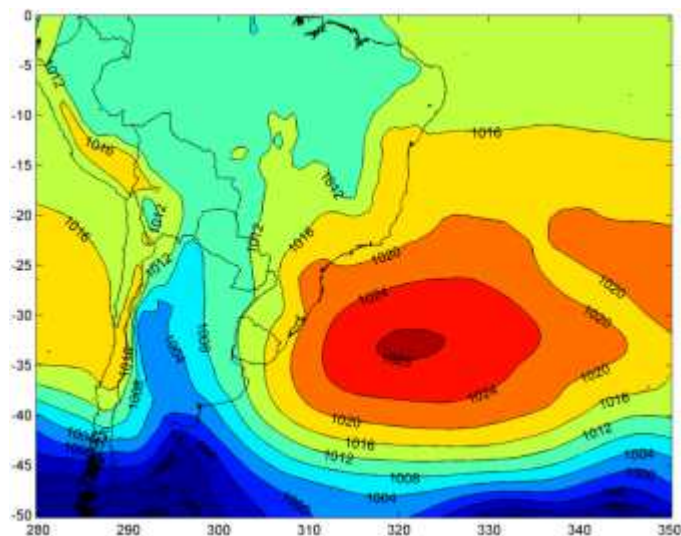
(c)



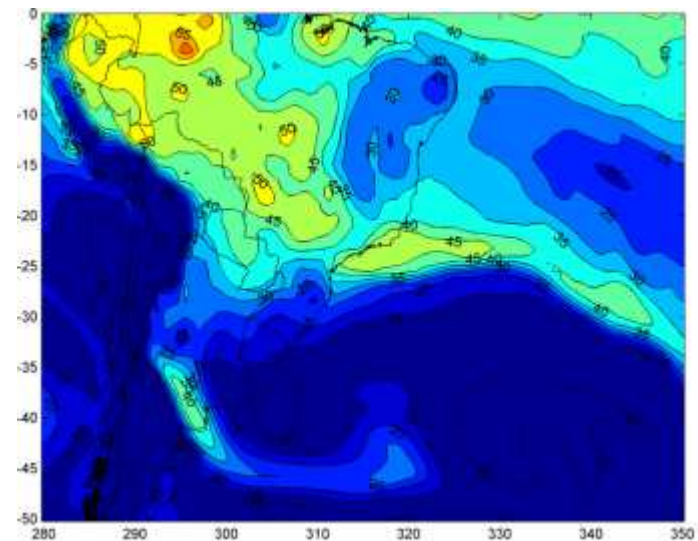
(d)

Evento 11 - Campos observados do dia 07/03/2010 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

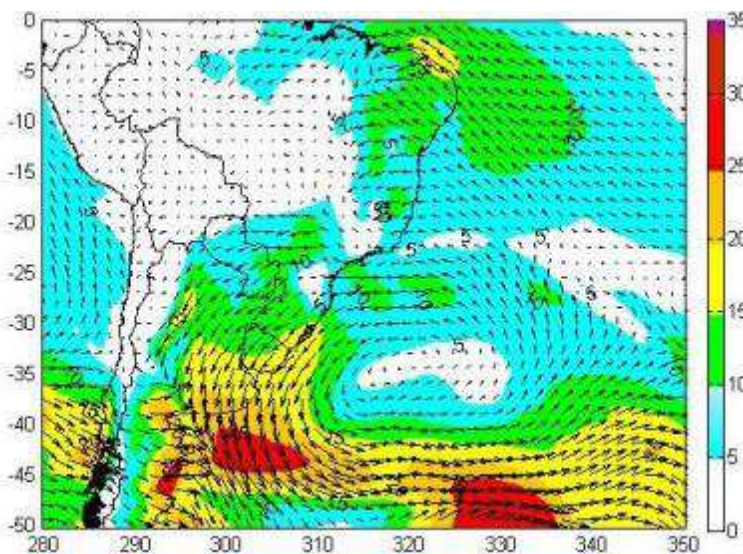




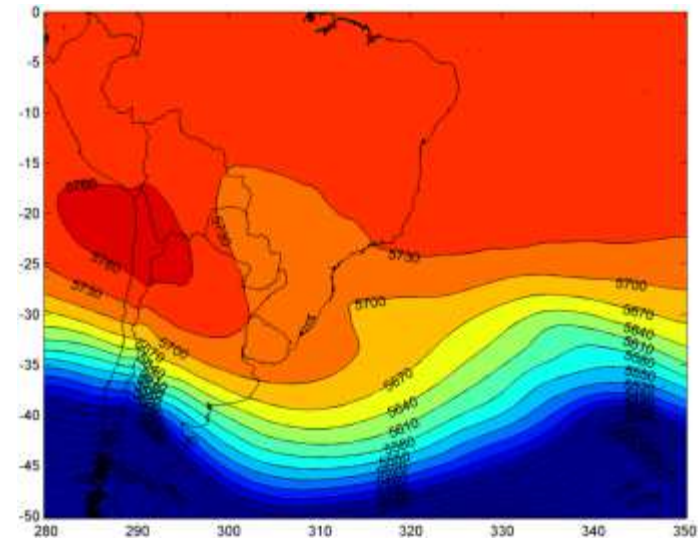
(a)



(b)

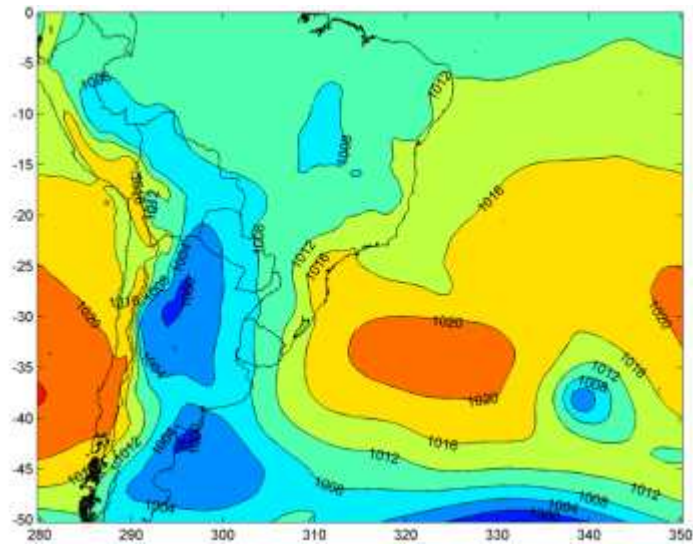


(c)

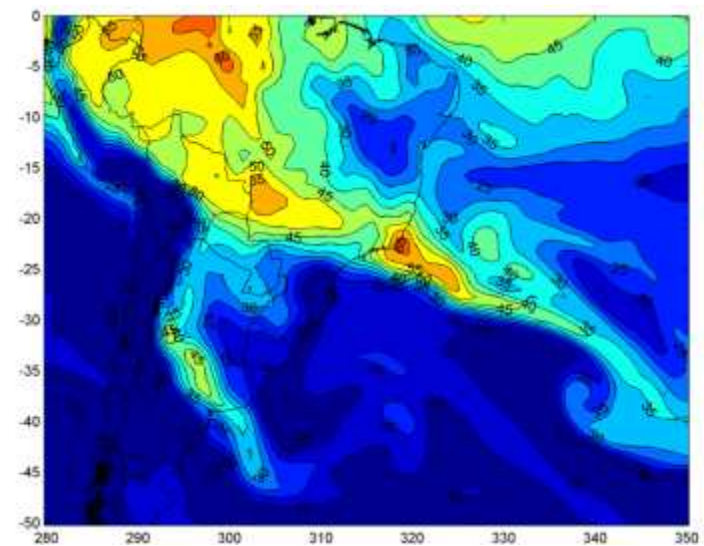


(d)

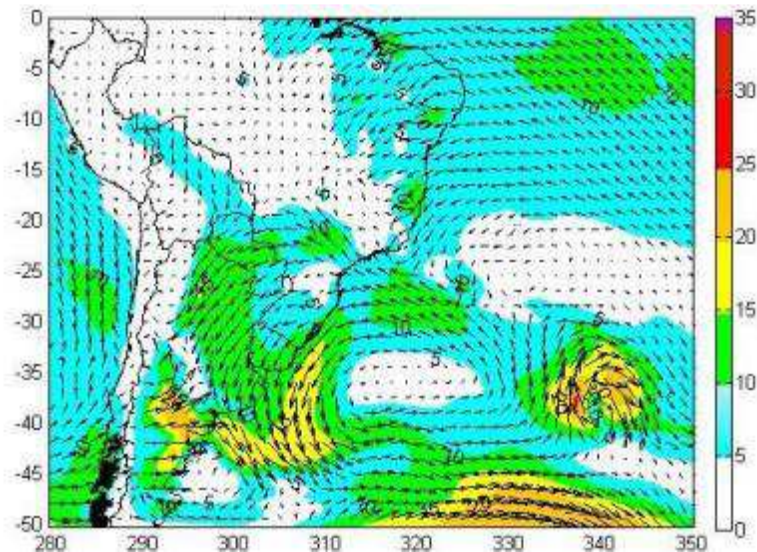
Evento 22 - Campos observados do dia 25/10/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



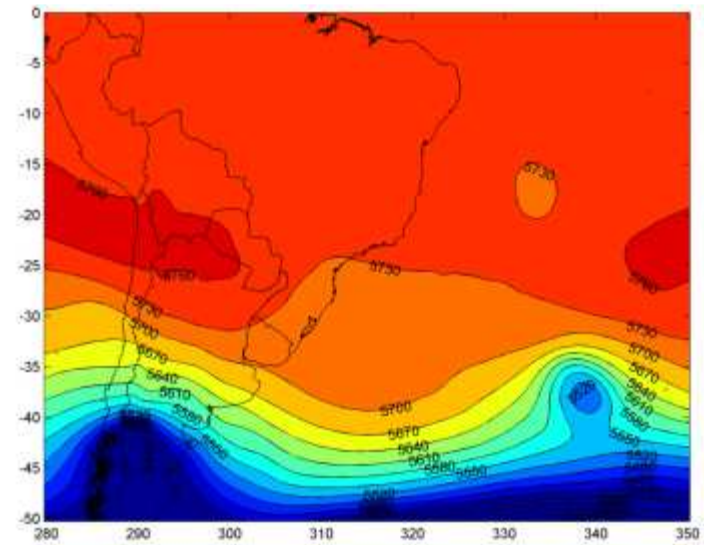
(a)



(b)

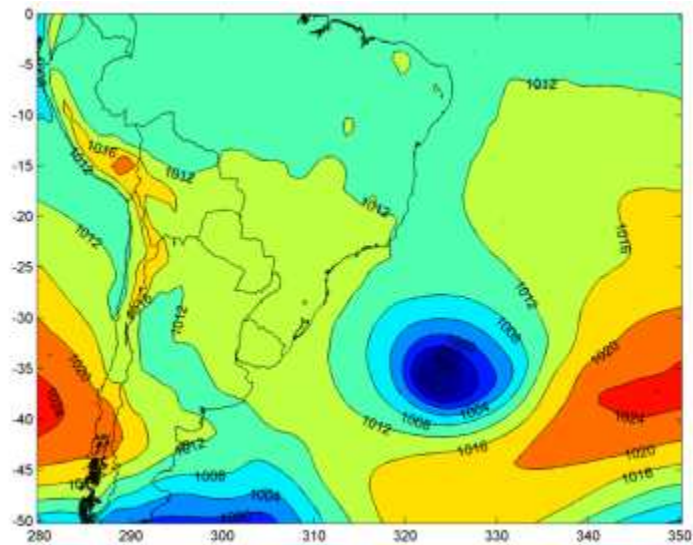


(c)

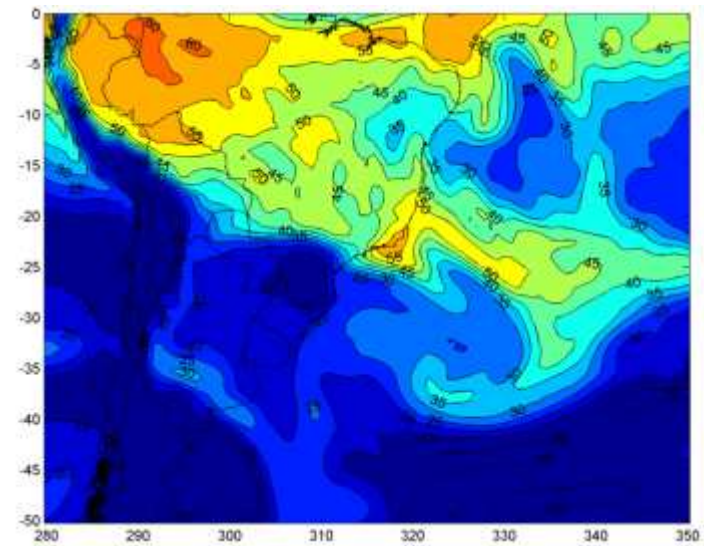


(d)

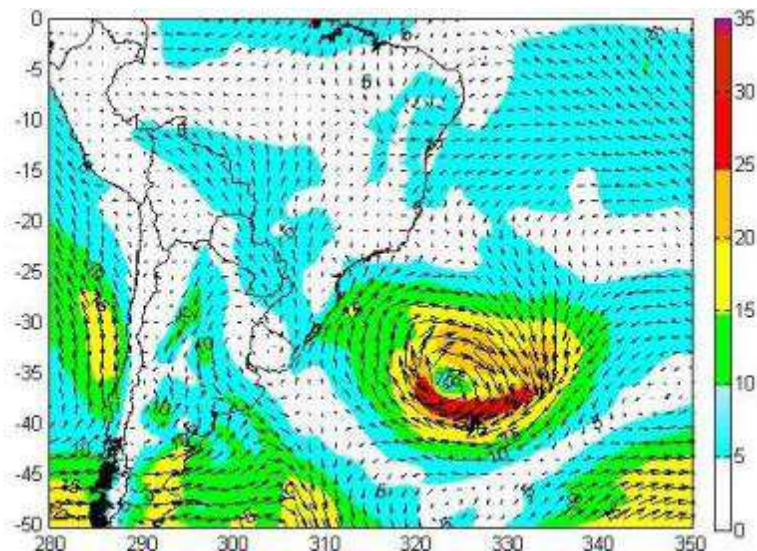
Evento 24 - Campos observados do dia 14/12/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



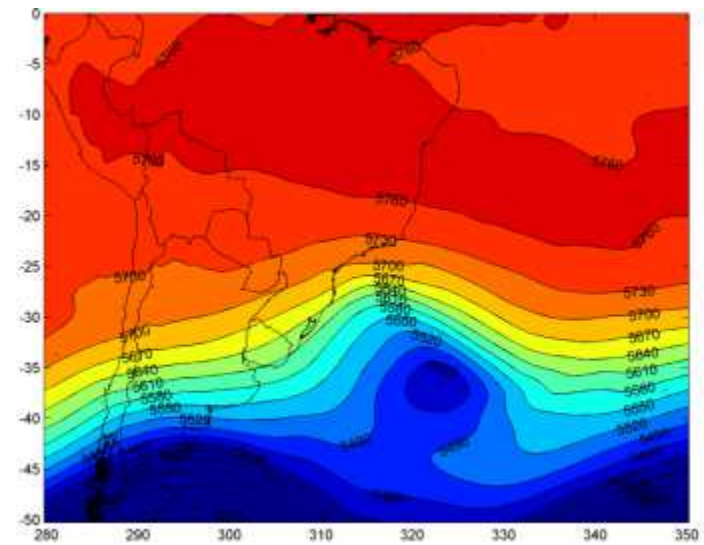
(a)



(b)

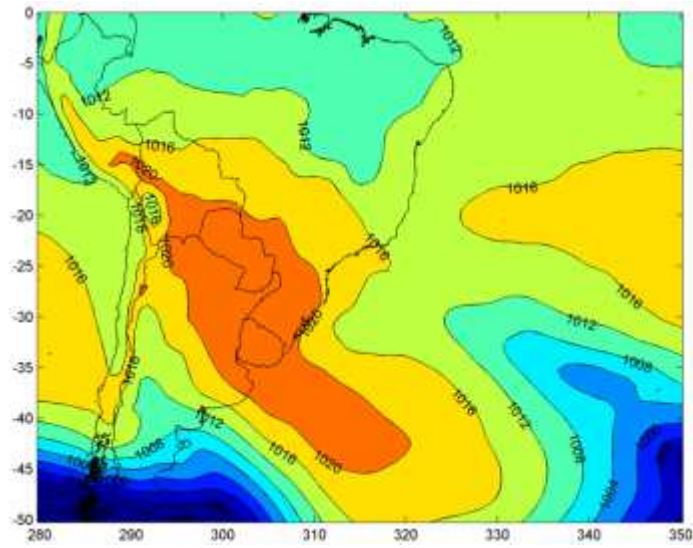


(c)

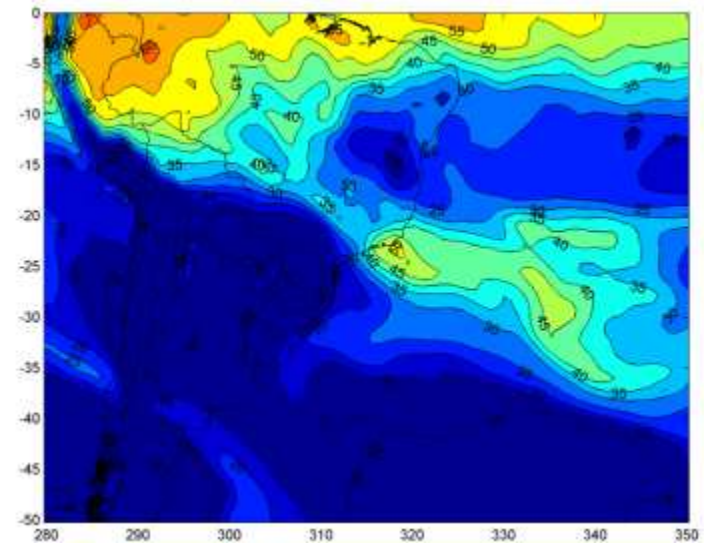


(d)

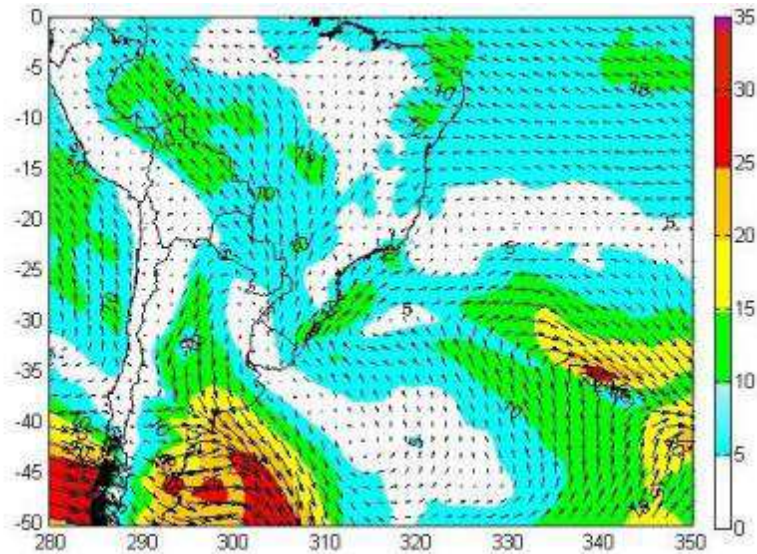
Evento 26 - Campos observados do dia 07/04/2003 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



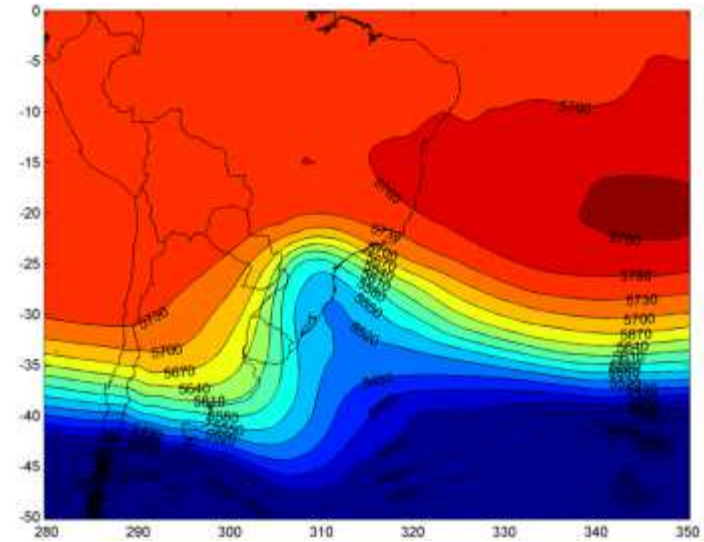
(a)



(b)

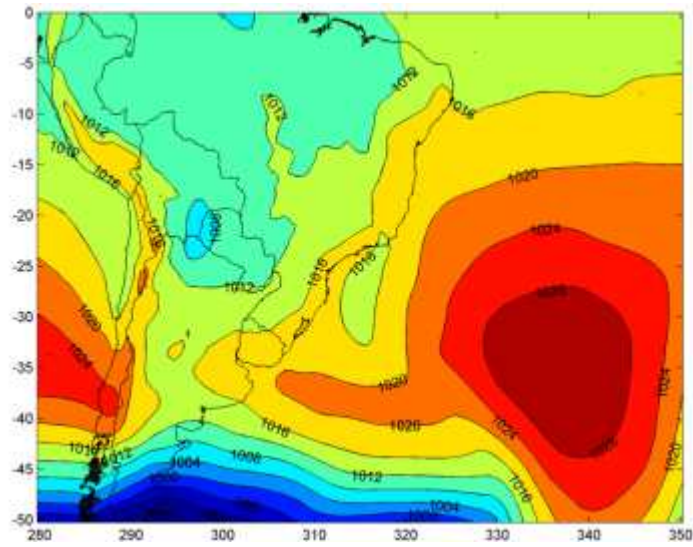


(c)

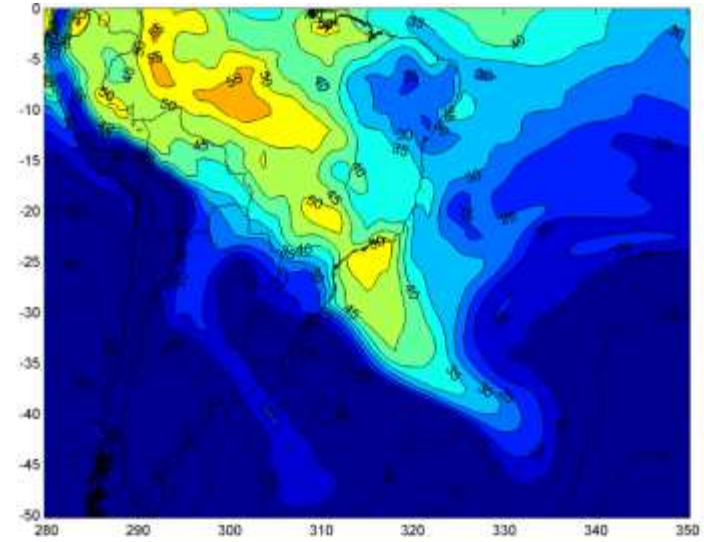


(d)

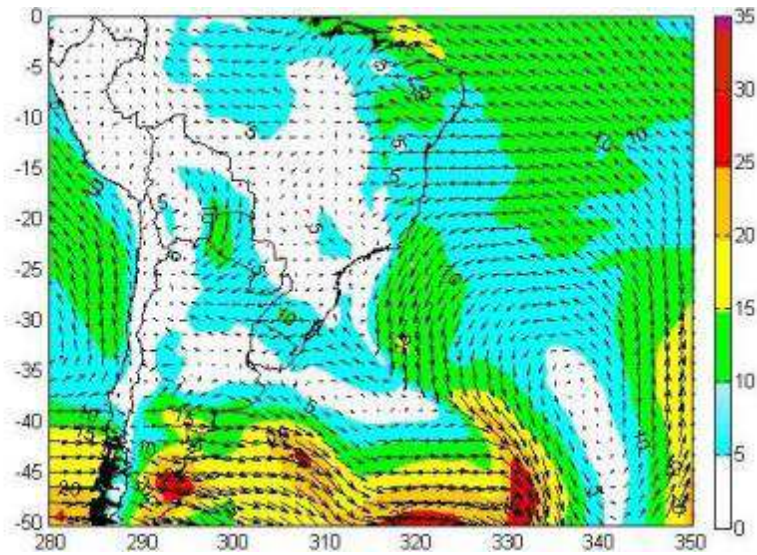
Evento 27 - Campos observados do dia 01/05/2012 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



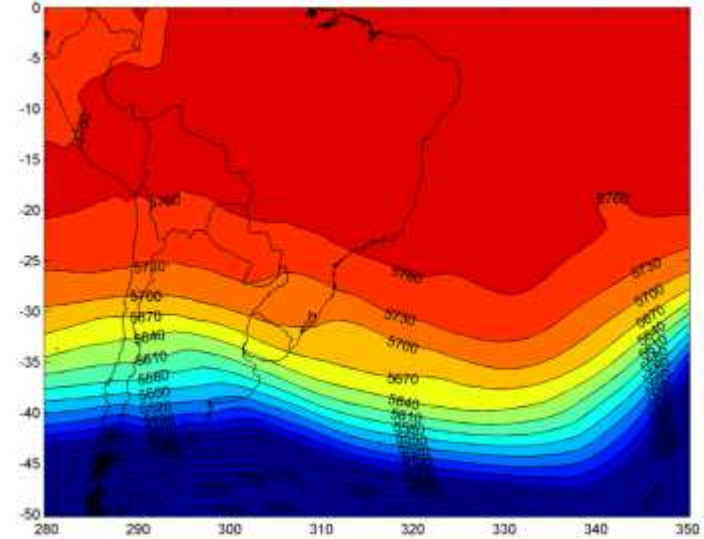
(a)



(b)



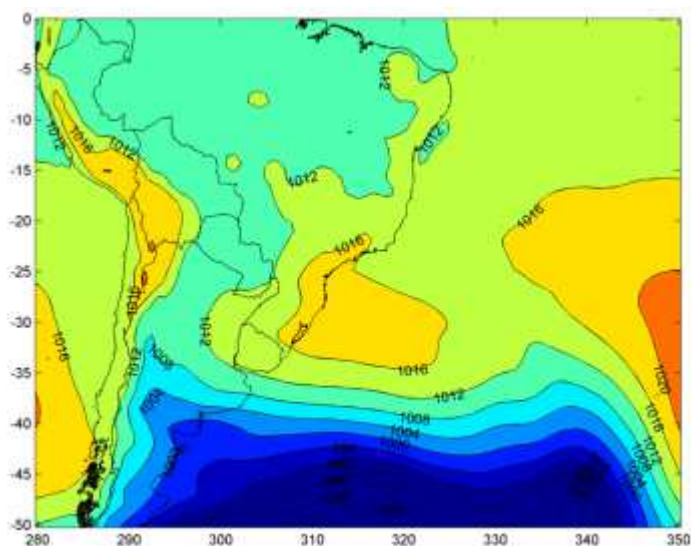
c)



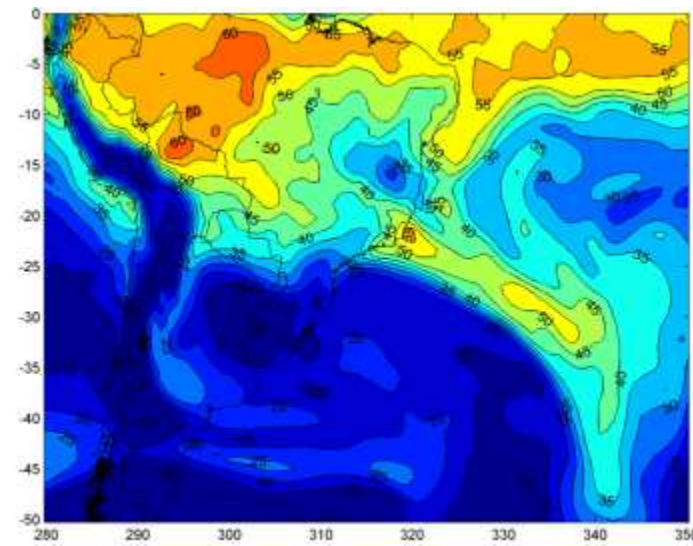
(d)

Evento 44 - Campos observados do dia 07/10/2006 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

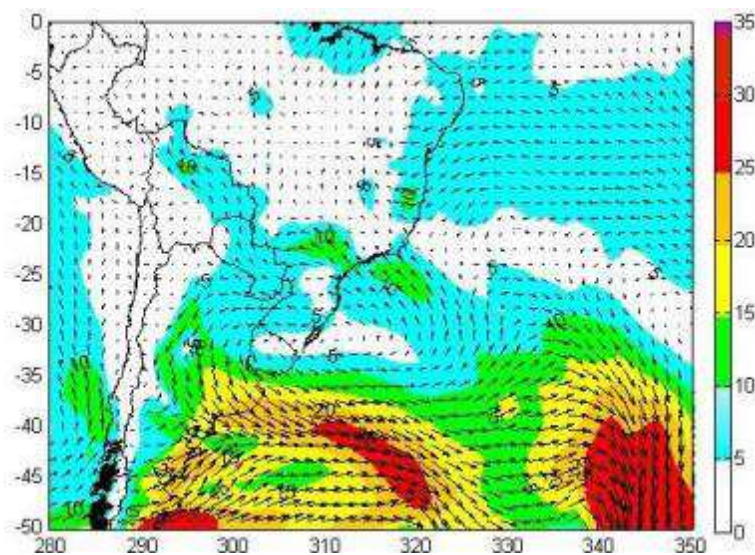
## ANEXO 1: PADRÃO SINÓTICO 4



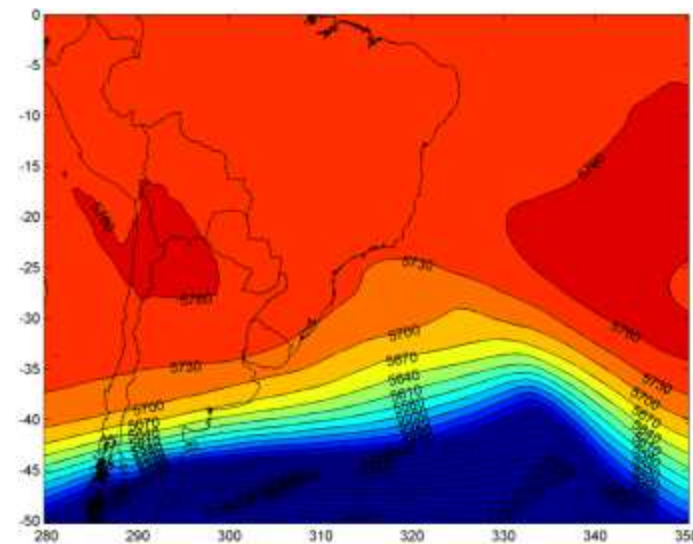
(a)



(b)

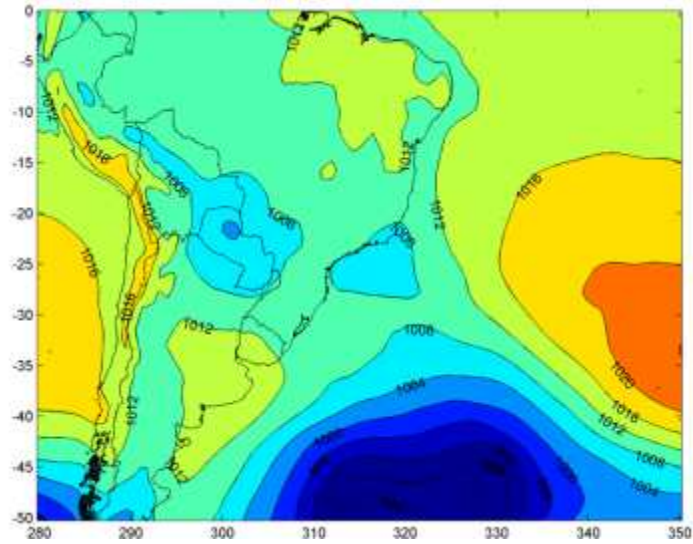


(c)

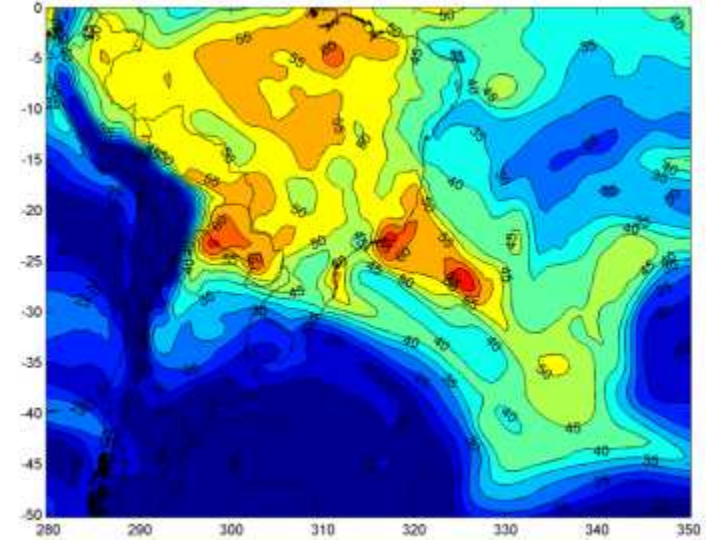


(d)

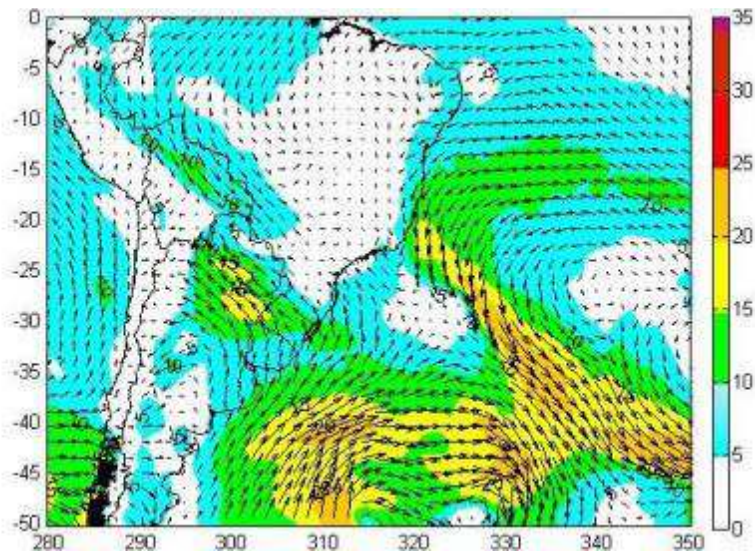
Evento 4 - Campos observados do dia 18/03/2003 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



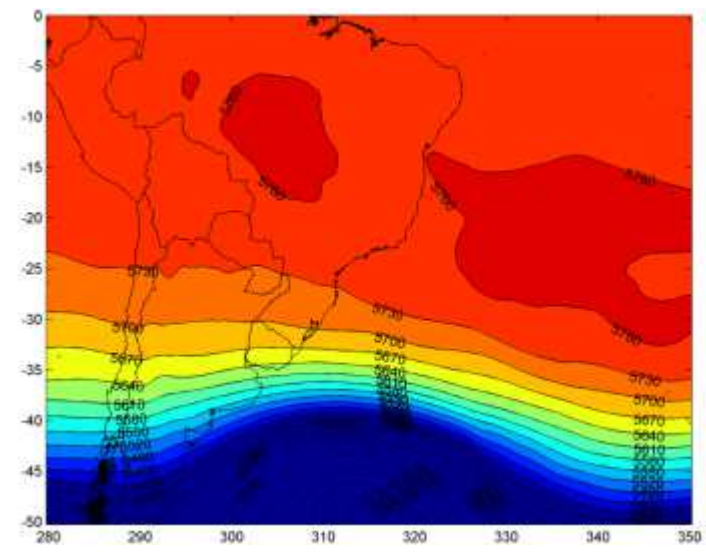
(a)



(b)

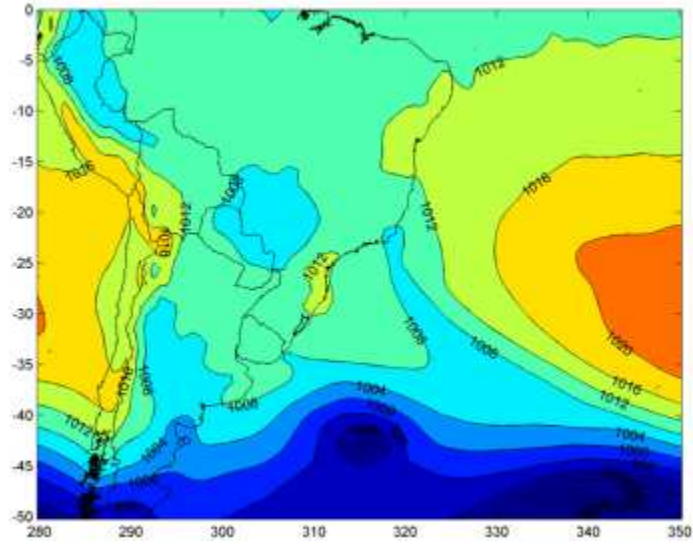


(c)

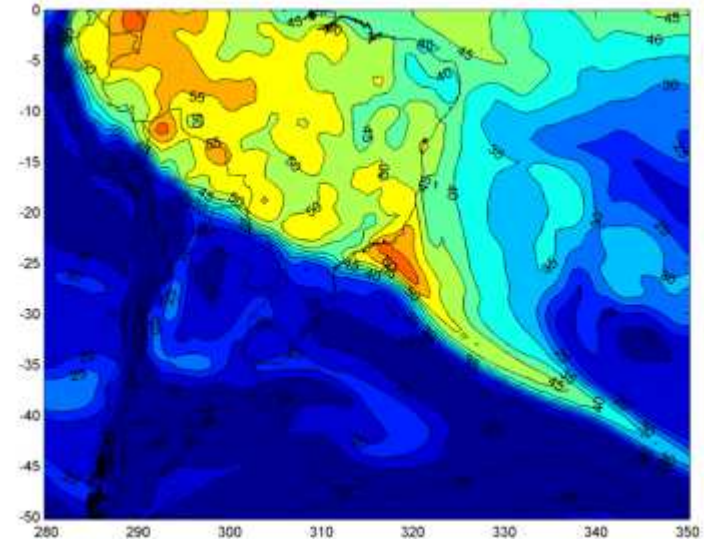


(d)

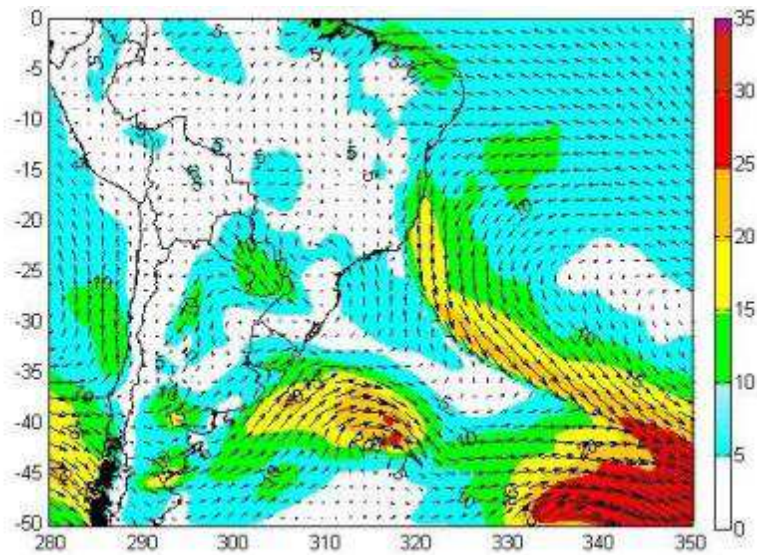
Evento 5 - Campos observados do dia 31/12/2009 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



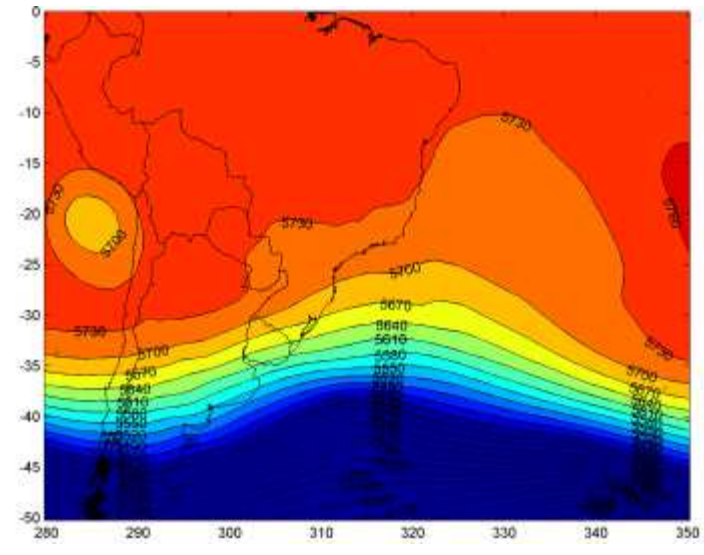
(a)



(b)



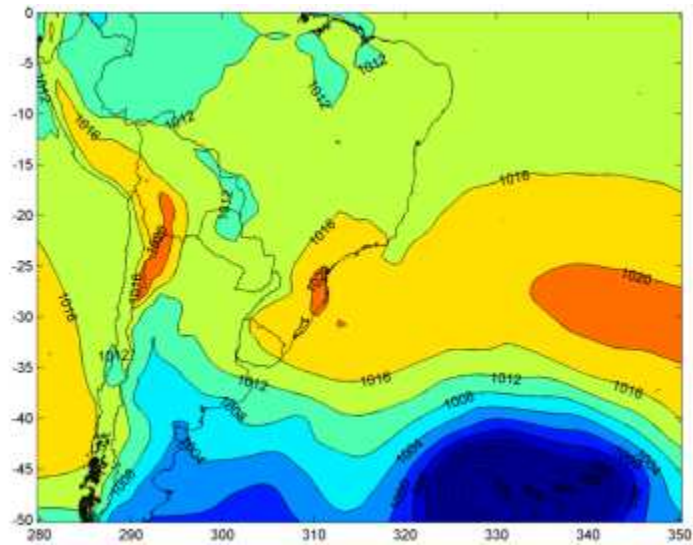
(c)



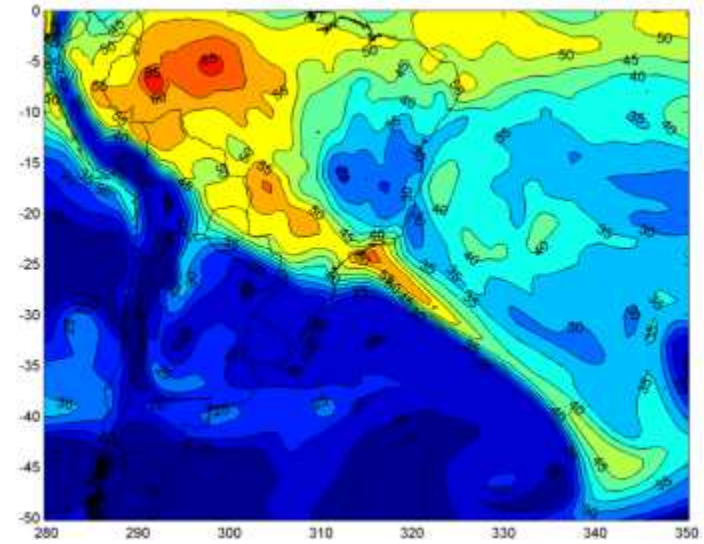
(d)

Evento 23 - Campos observados do dia 26/11/2005 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).

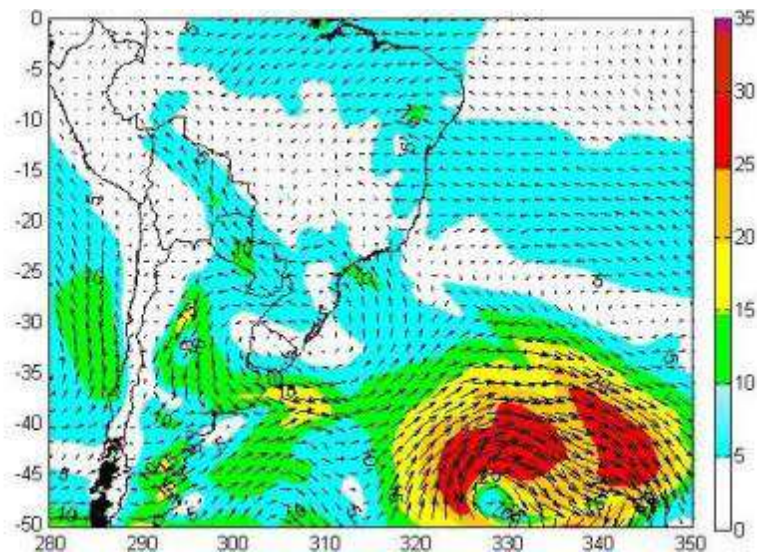




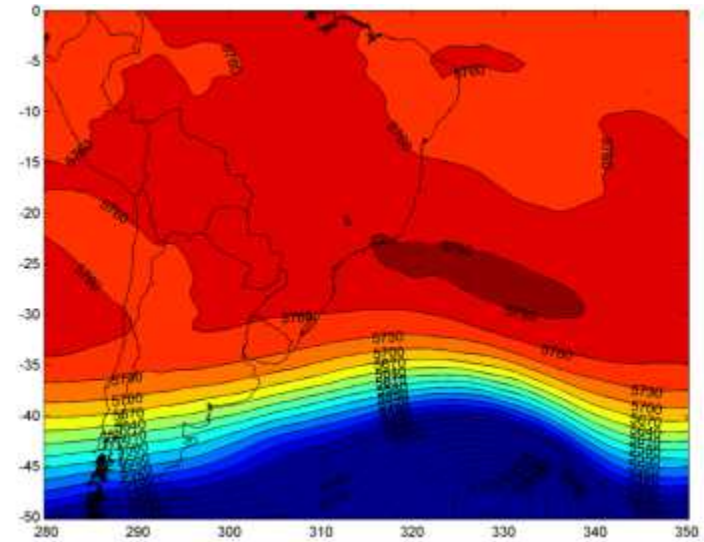
(a)



(b)

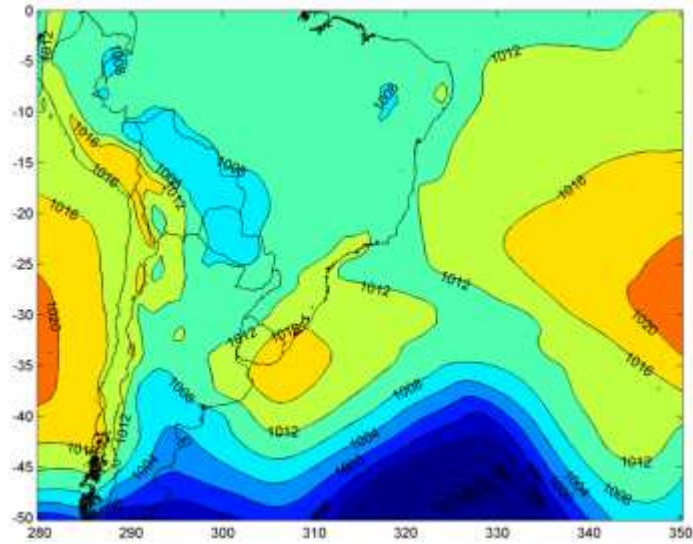


(c)

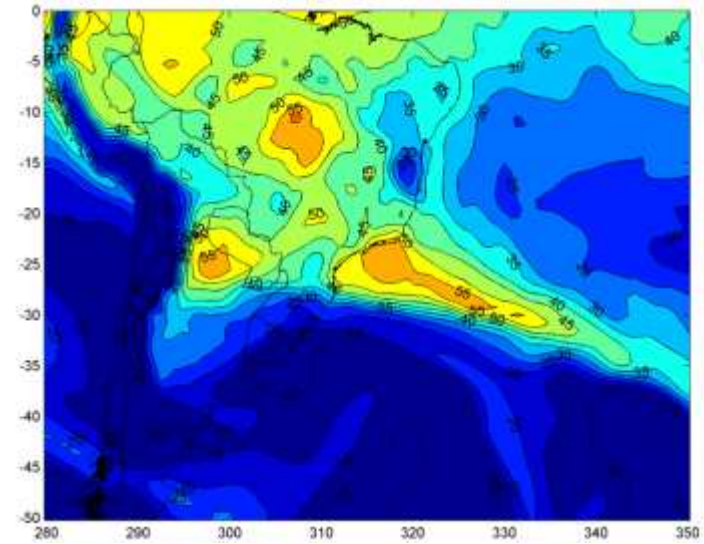


(d)

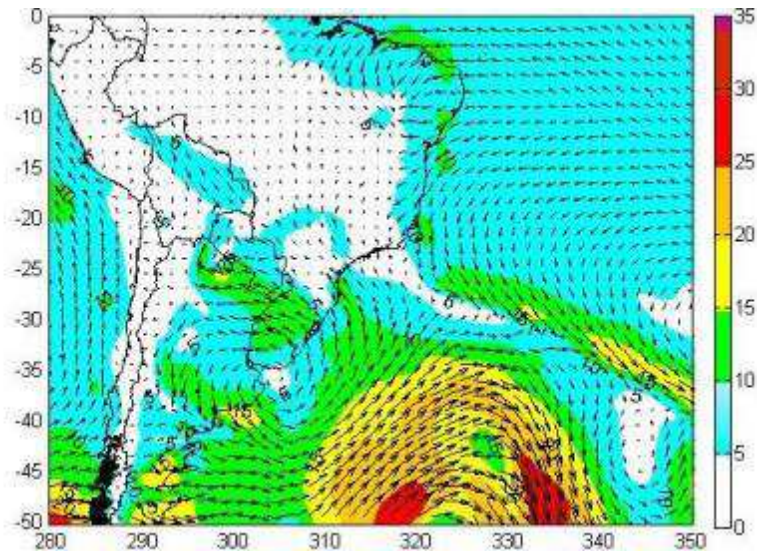
Evento 28 - Campos observados do dia 25/01/2003 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



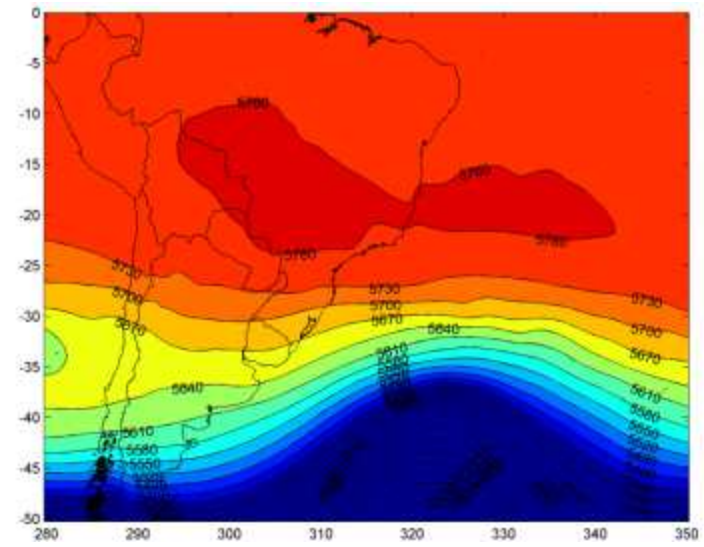
(a)



(b)

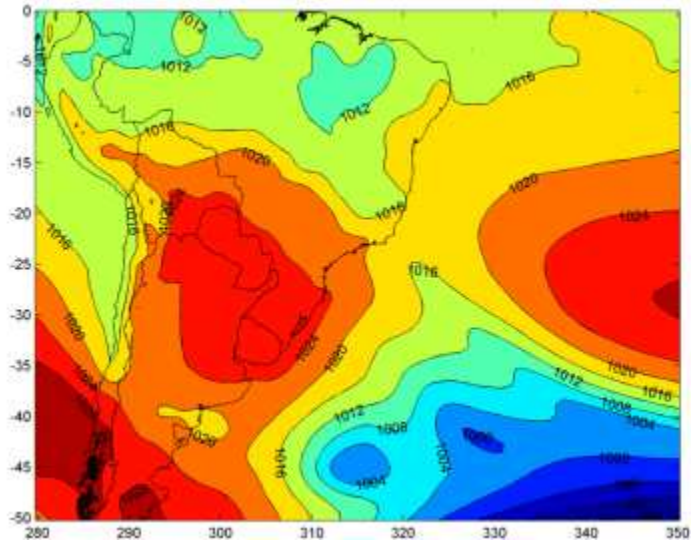


(c)

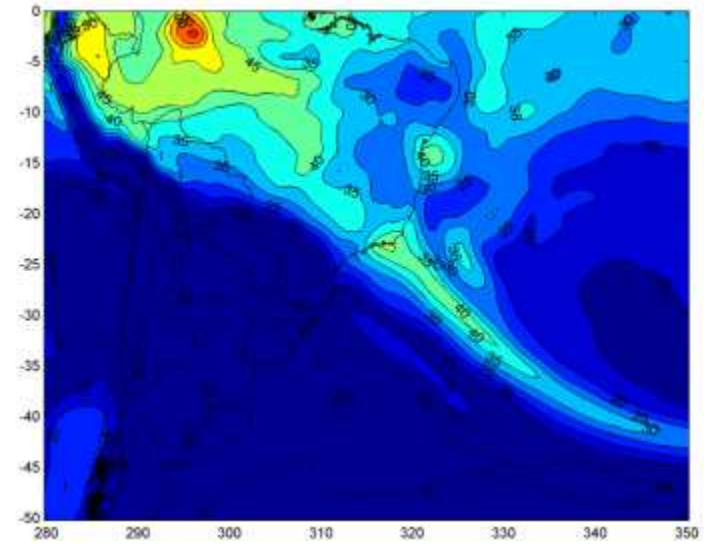


(d)

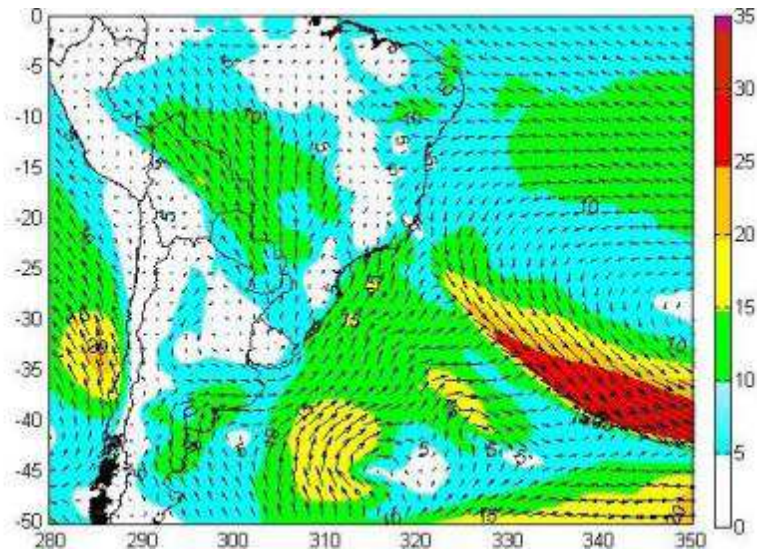
Evento 30 - Campos observados do dia 06/12/2010 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



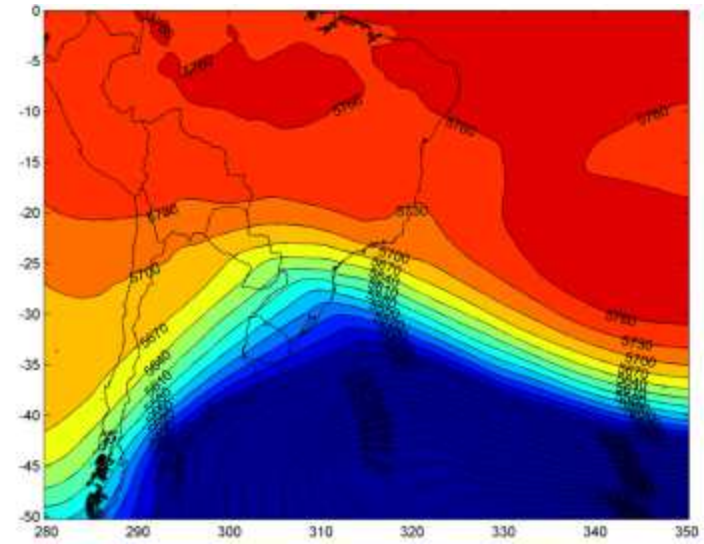
(a)



(b)

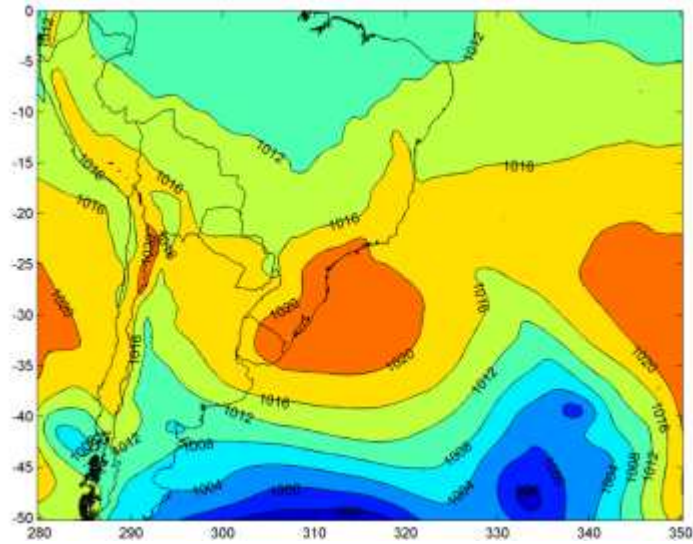


(c)

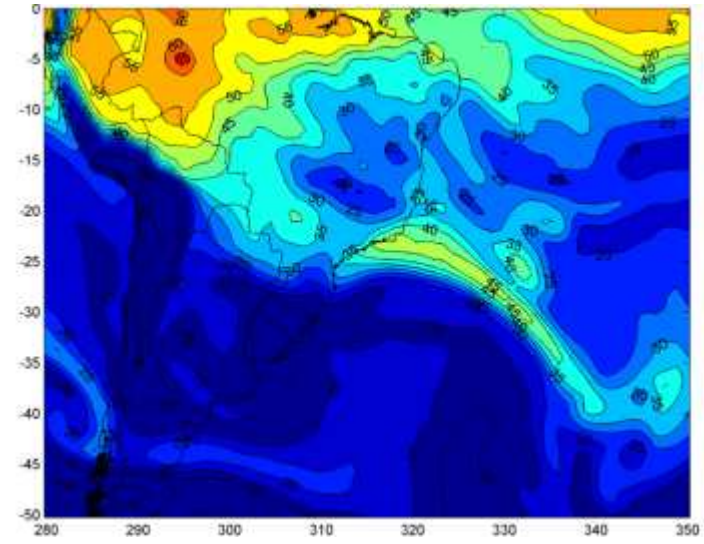


(d)

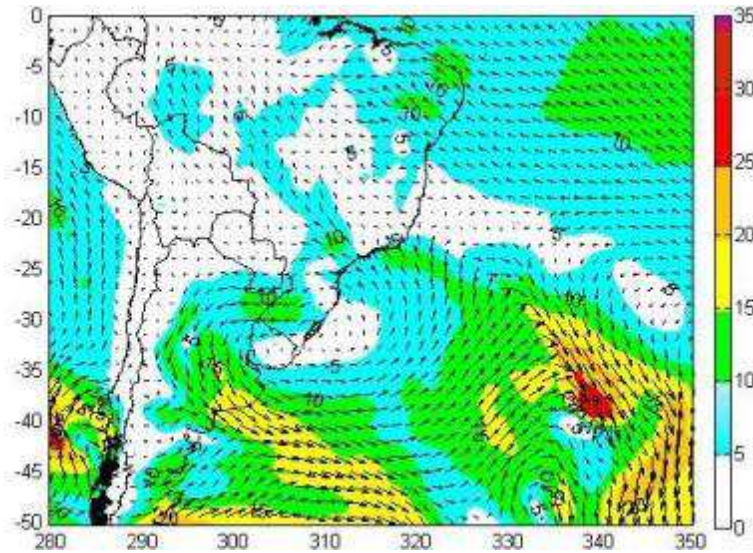
Evento 31 - Campos observados do dia 26/08/2003 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



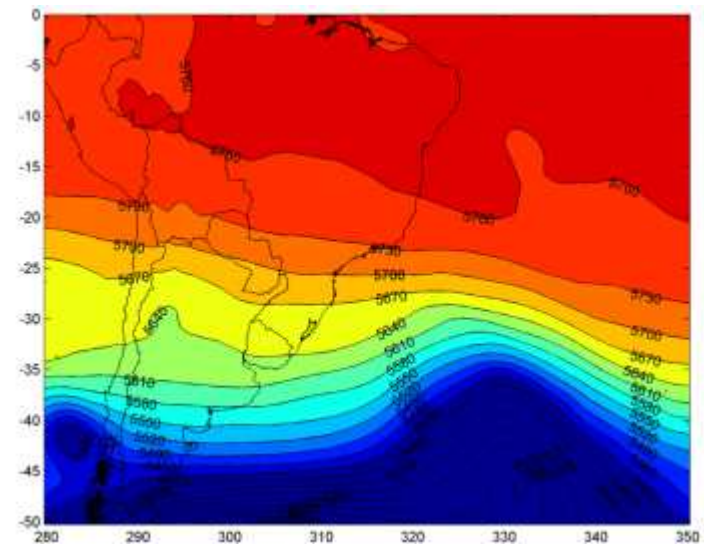
(a)



(b)

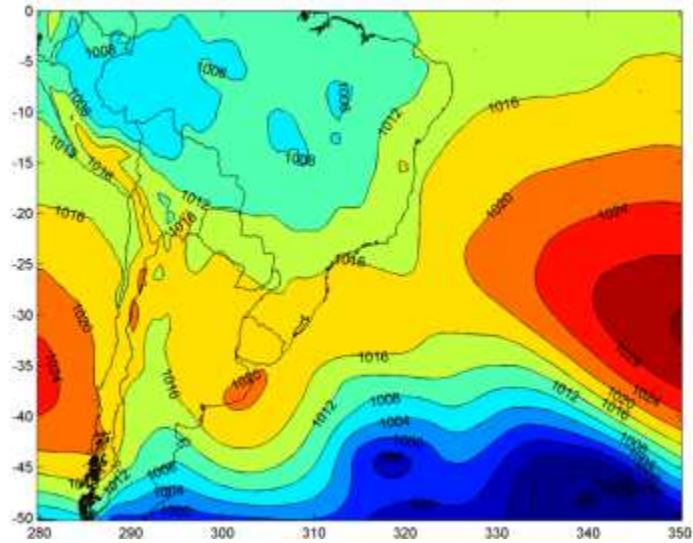


(c)

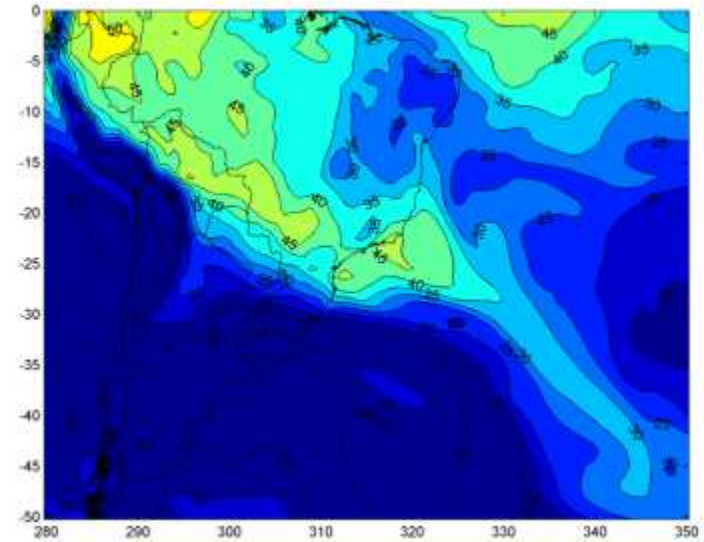


(d)

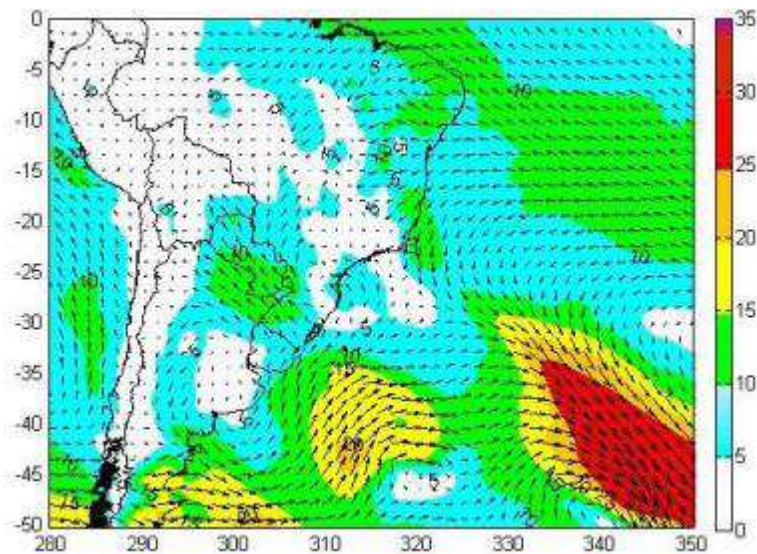
Evento 33 - Campos observados do dia 20/05/2007 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



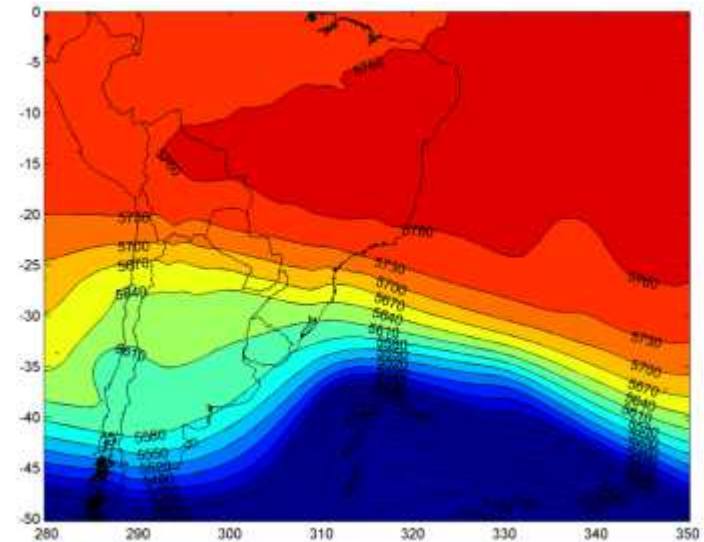
(a)



(b)

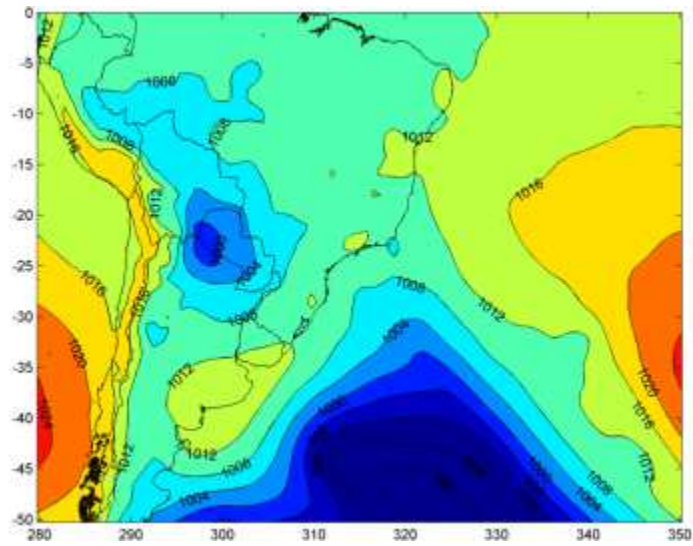


(c)

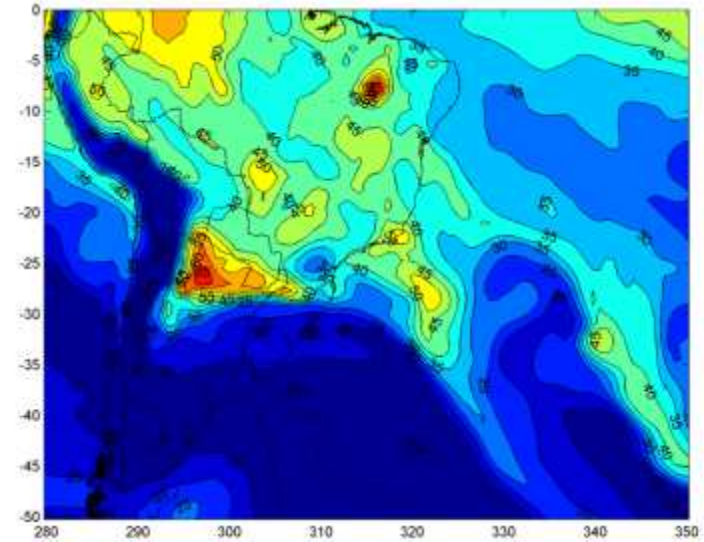


(d)

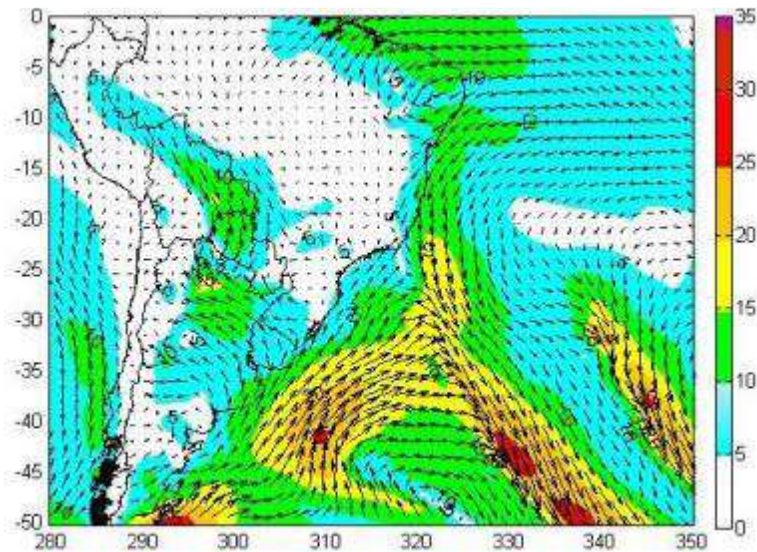
Evento 37 - Campos observados do dia 07/10/1998 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



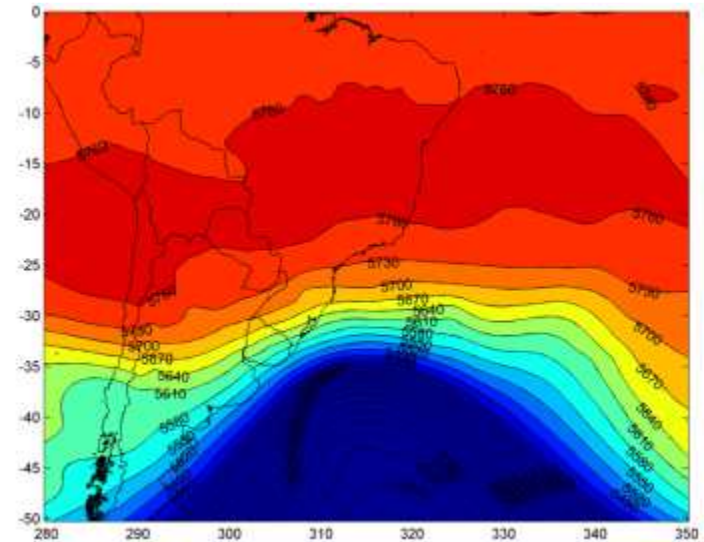
(a)



(b)

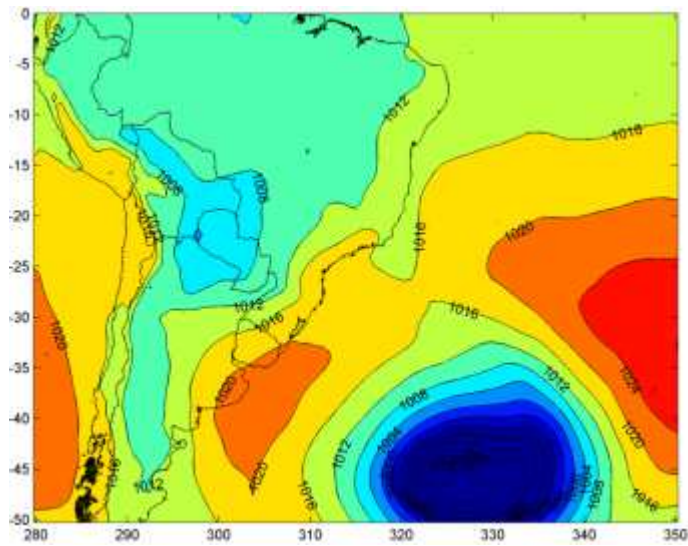


(c)

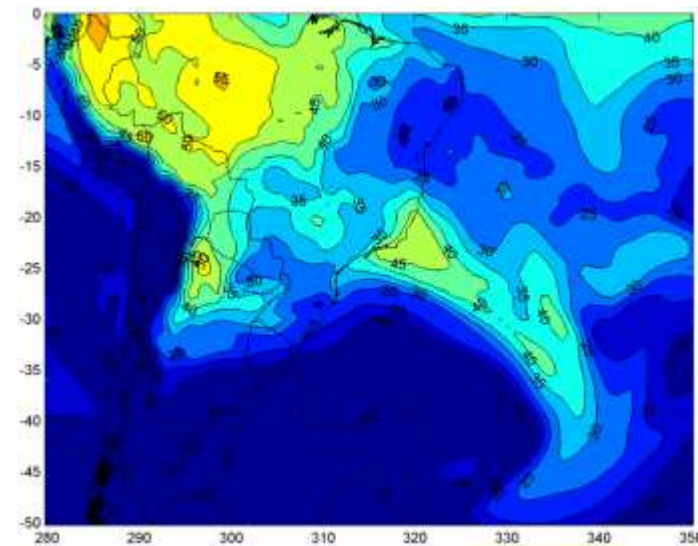


(d)

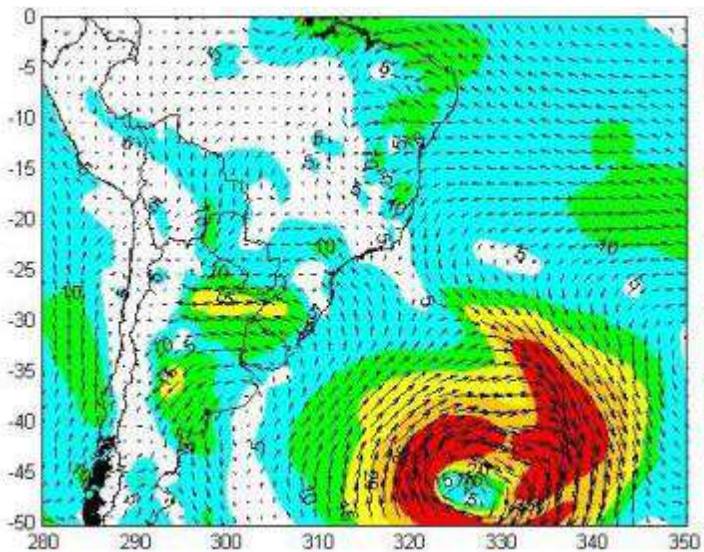
Evento 40 - Campos observados do dia 06/12/2013 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



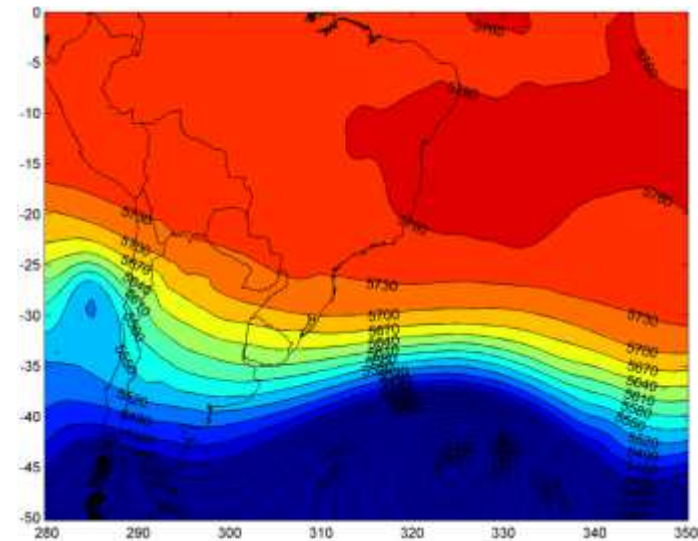
(a)



(b)

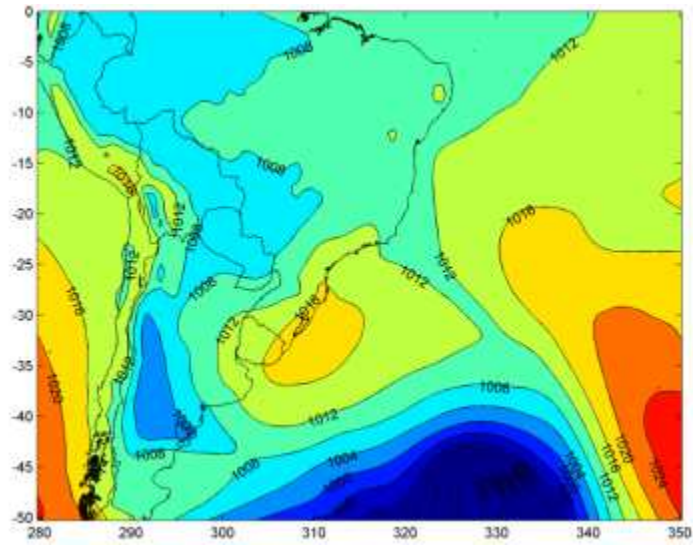


(c)

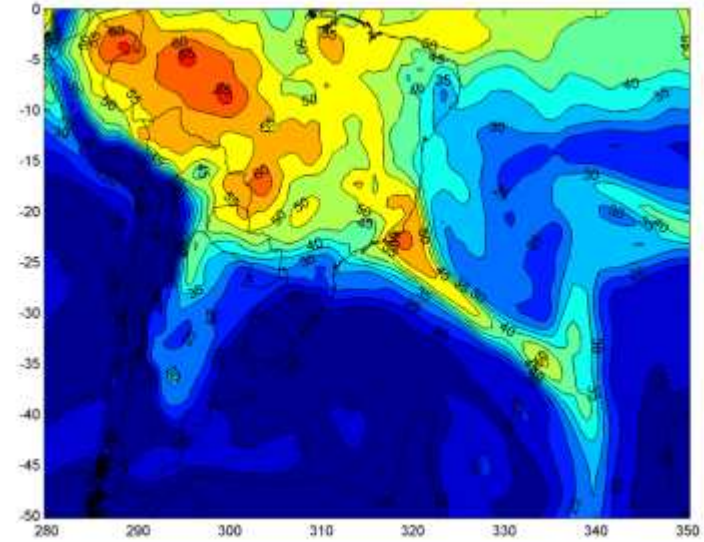


(d)

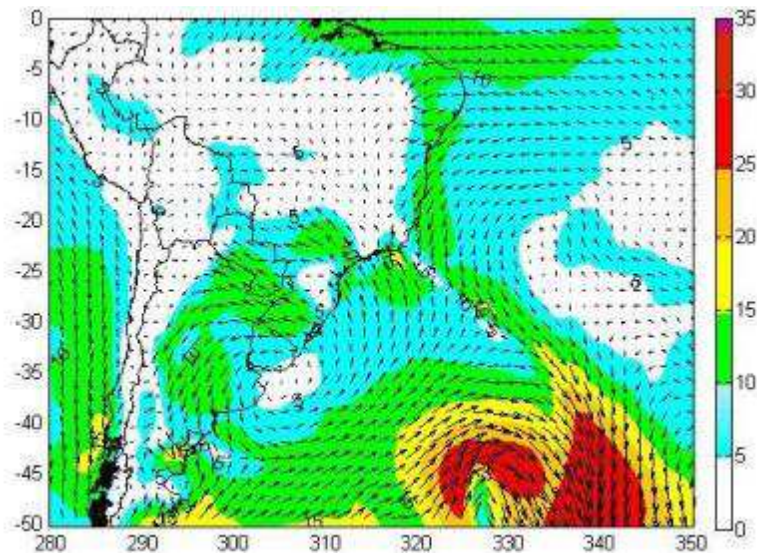
Evento 43 - Campos observados do dia 24/10/2005 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).



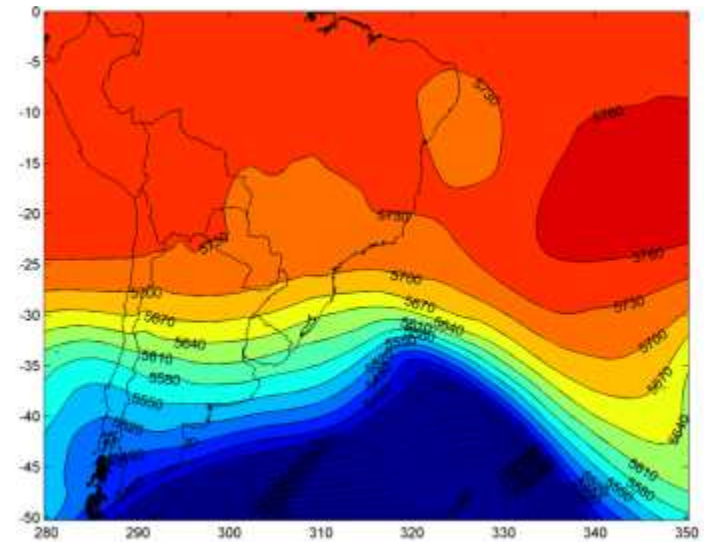
(a)



(b)



(c)



(d)

Evento 46 - Campos observados do dia 05/12/2009 às 00 UTC: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) água precipitável (mm), (c) velocidade do vento (m/s) e direção em 925hPa e (d) altura geopotencial em 500hPa (m).