



Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Meteorologia (PPGM)

**AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TEMPO
POR CONJUNTO COM
MODELO ETA-5KM PARA
A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Renata Novaes Calado

Orientadoras: D.Sc. Claudine Pereira Dereczynski
Ph. D. Chou Sin Chan

Rio de Janeiro, RJ
Fevereiro, 2018

AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TEMPO POR CONJUNTO COM MODELO ETA-5KM PARA A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

RENATA NOVAES CALADO

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

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Co-orientadora: Ph.D Chou Sin Chan

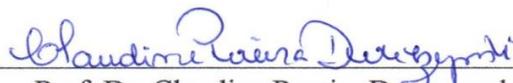
Rio de Janeiro

Fevereiro de 2018

**AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TEMPO
POR CONJUNTO COM
MODELO ETA-5KM PARA
A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL**

RENATA NOVAES CALADO

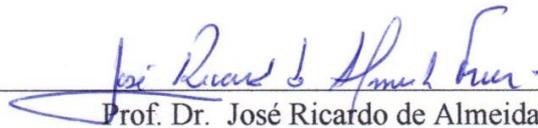
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS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



Prof. Dr. Claudine Pereira Dereczynski (Orientadora)



Prof. Dr. Chou Sin Chan (Co-orientadora)



Prof. Dr. José Ricardo de Almeida França



Prof. Dr. Hugo Abi Karam



Prof. Dr. Daniel Andres Rodriguez

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Fevereiro de 2018

CALADO, RENATA N.

**AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TEMPO POR CONJUNTO
COM MODELO ETA-5KM PARA A BACIA DO RIO
PARAÍBA DO SUL/ RENATA NOVAES CALADO.**

Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2018, 131p.

Orientadora: D.Sc Claudine Pereira Dereczynski

Co-orientadora: Ph.D Chou Sin Chan

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2018.

Referencias Bibliográficas: pp. 104-112.

1. Previsão por conjunto
2. Modelo Eta
3. Avaliação de previsões

It is possible to commit no mistakes and still lose. That is not a weakness; that is life.

Cap. Jean-Luc-Picard

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve ao meu lado, me dando forças para seguir em frente.

Ao meu esposo, meu amigo e companheiro, que sempre me apoiou e tem sido meu porto seguro ao longo de todos esses anos.

À minha família, que sempre me incentiva e me leva a ser cada vez mais.

Às minhas amigas e orientadoras, Claudine Dereczynski e Chou Sin Chan, por todo apoio, todos os conselhos e toda dedicação que sempre demonstraram.

Aos meus amigos, que fazem com que minha passagem por esse mundo seja mais alegre e prazerosa.

Aos colegas do mestrado, que foram sempre companheiros e solícitos.

Aos professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ, por todo apoio ao longo da minha carreira acadêmica.

Ao CNPq, através do projeto No. 400071/2014-2, e ao PPGM/UFRJ e à CAPES pelo apoio imprescindível para elaboração deste trabalho.

E a todos que conviveram comigo nestes 2 anos de curso de Mestrado.

RESUMO

AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TEMPO POR CONJUNTO COM MODELO ETA-5KM PARA A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Renata Novaes Calado

Fevereiro/2018

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho do conjunto de alta resolução do modelo Eta-5km, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, para prever eventos de chuva intensa na região da Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS). O conjunto de simulações é formado por quatro membros, denominados de acordo com suas parametrizações convectiva (Betts-Miller-Janjic – BMJ ou Kain-Fritsch – KF) e de microfísica (Ferrier ou Zhao), sendo respectivamente: CNTRL (BMJ/Ferrier); KF (KF/Ferrier); KFMX (KF com fluxo de momentum/Ferrier) e ZHAO (BMJ/Zhao). Dez casos de chuvas intensas, a maior parte durante eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul, são selecionados com base nos totais pluviométricos diários coletados em estações meteorológicas na BRPS. As métricas de avaliação utilizadas são o Viés categórico e o *Equitable Threat Score*, para categorias de chuva que variam desde não-chuva até chuva forte. Ademais, apresenta-se o desvio padrão, o coeficiente de correlação e a raiz do erro quadrático médio, através do diagrama de Taylor. Os resultados mostram que as simulações de 48 h de horizonte apresentam desempenho ligeiramente melhor que as de 72 h. Os membros que utilizam parametrização BMJ apresentam maior acurácia na localização espacial da chuva, enquanto que os membros que utilizam parametrização KF simulam melhor os elevados totais pluviométricos. De forma geral, o membro CNTRL apresenta os melhores resultados, seguido pela média do conjunto. Assim, conclui-se que esses membros do modelo Eta-5km são úteis para previsão de eventos de chuva extrema na BRPS.

ABSTRACT

EVALUATION OF ETA-5KM ENSEMBLE FORECASTS FOR PARAIBA DO SUL RIVER BASIN

Renata Novaes Calado

February/2018

The aim of this study is to evaluate the performance of Eta-5km ensemble, developed by the National Institute for Space Research, to forecast heavy rainfall events over Paraíba do Sul River Basin (PSRB). The ensemble consists of four members, nominated according to its convective (Betts-Miller-Jancic – BMJ or Kain-Fritsch – KF) / microphysics (Ferrier or Zhao) parametrizations, being: CNTRL (Betts-Miller-Janjic/Ferrier); KF (Kain-Fritsch/Ferrier); KFMX (Kain-Fritsch with inclusion of momentum flux/Ferrier); and ZHAO (Betts-Miller-Janjic/Zhao). Ten cases of intense rainfall, most occurring during South Atlantic Convergence Zone (SACZ), were selected for this study. The evaluating scores used are the Categorical BIAS and the Equitable Threat Score. Furthermore, we present the standard deviation, the time correlation and the Root Mean Square Error, showed through the Taylor Diagram. The results show that the 48h-simulations present slightly better performance than the 72h-simulations. The members using BMJ parametrization are better to simulate the precipitation's spatial distribution, while members using KF are better to simulate heavy precipitation totals. In general, the CTRL member presents better results, followed by the ensemble mean. Finally, we conclude that these Eta-5km members are useful to predict intense rainfall events over PSRB.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	01
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	05
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4 - METODOLOGIA E DADOS	16
5 - ANÁLISE SINÓTICA	33
6 - AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES POR CONJUNTO	72
7 - CONCLUSÕES	102
BIBLIOGRAFIA	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática da Função de Densidade de Probabilidade (PDF), onde pdf_0 representa a incerteza nas condições iniciais e pdf_t a incerteza nas previsões. Traduzido de Taylor e Buizza (2003).....	7
Figura 4.1- Bacia do rio Paraíba do Sul que se estende sobre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, na Região Sudeste do Brasil. Fonte: Brasiliense, 2016.....	16
Figura 4.2- Exemplo de um diagrama de Taylor mostrando uma comparação estatística entre 4 modelos para a variável precipitação.....	25
Figura 5.1 – Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 1º a 5 de janeiro de 2000.....	34
Figura 5.2 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 02/01/2000 e (b) 03/01/2000. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....	34
Figura 5.3 - Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-8: (a) 01/01/2000 - 12UTC; (b) 02/01/2000 - 06 UTC; (c) 03/01/2000 - 18 UTC; (d) 04/01/2000 - 12 UTC, (e) 05/01/2000 - 12 UTC e (f) 06/01/2000 – 12 UTC.....	35
Figura 5.4 – Reanálises do dia 03/01/2000 – 1200 UTC: (a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($g.kg^{-1}$, sombreado); (b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($Pa.s^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e (c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m _{gp} , sombreado) em 200 hPa.....	37
Figura 5.5 – Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no dia 04/03/2005.....	38

Figura 5.6 – Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC do dia 04/03/2005. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....	38
Figura 5.7- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 02/03/2005 - 12UTC; (b) 03/03/2005 - 12 UTC; (c) 04/03/2005 – 12 UTC e (d) 05/03/2005 – 12 UTC.....	39
Figura 5.8 - Reanálises do dia 04/03/2005 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg ⁻¹ , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s ⁻¹ , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (mcp, sombreado) em 200 hPa.....	40
Figura 5.9 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 3 a 5 de janeiro de 2007.....	41
Figura 5.10 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 03/01/2007, (b) 04/01/2007 e (c) 05/01/2007. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....	42
Figura 5.11 - Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 03/01/2007 – 12 UTC; (b) 04/01/2007 - 06 UTC; e (c) 05/01/2007 – 12 UTC.....	42
Figura 5.12 - Reanálises do dia 04/01/2007 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg ⁻¹ , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s ⁻¹ , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (mcp, sombreado) em 200 hPa.....	44
Figura 5.13 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 16 a 17 de dezembro de 2008.....	45

Figura 5.14 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 16/12/2008 e (b) 17/12/2008. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....46

Figura 5.15- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-10: (a) 16/12/2008 – 12 UTC e (b) 17/12/2008 - 12 UTC.....46

Figura 5.16 - Reanálises do dia 17/12/2008 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m_gp, sombreado) em 200 hPa.....48

Figura 5.17 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 11 a 13 de novembro de 2009.....49

Figura 5.18 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 11/11/2009, (b) 12/11/2009 e (c) 13/11/2009. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....50

Figura 5.19- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-10: (a) 11/11/2009 - 12UTC; (b) 12/11/2009 - 12 UTC e (c) 13/11/2009 – 12 UTC.....50

Figura 5.20 - Reanálises do dia 11/11/2009 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m_gp, sombreado) em 200 hPa.....52

Figura 5.21 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 31 de dezembro de 2009 a 01 de janeiro de 2010.....53

Figura 5.22 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 31/12/2009 e (b) 01/01/2010. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....	54
Figura 5.23- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 31/12/2009 – 12 UTC e (b) 01/01/2010 - 12 UTC.....	54
Figura 5.24 - Reanálises do dia 31/12/2009 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg ⁻¹ , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s ⁻¹ , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.....	56
Figura 5.25 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 27 a 28 de dezembro de 2010.....	57
Figura 5.26 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 27/12/2010 e (b) 28/12/2010. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....	58
Figura 5.27- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 27/12/2010 – 12 UTC e (b) 28/12/2010 - 12 UTC.....	58
Figura 5.28 - Reanálises do dia 28/12/2010 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg ⁻¹ , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s ⁻¹ , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.....	59
Figura 5.29 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 11 a 12 de janeiro de 2011.....	60

Figura 5.30- \rightarrow Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 11/01/2011 e (b) 12/01/2011. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....61

Figura 5.31- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 11/01/2011 – 12 UTC e (b) 12/01/2011 - 12 UTC.....61

Figura 5.32 - Reanálises do dia 12/01/2011 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m_{gp}, sombreado) em 200 hPa.....63

Figura 5.33 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 27 a 28 de novembro de 2011.....64

Figura 5.34 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 27/11/2011 e (b) 28/11/2011. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....65

Figura 5.35- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 27/11/2011 – 12 UTC e (b) 28/11/2011 - 12 UTC.....65

Figura 5.36 - Reanálises do dia 27/11/2011 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m_{gp}, sombreado) em 200 hPa.....67

Figura 5.37 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 2 a 3 de janeiro de 2012.....68

Figura 5.38 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 02/01/2012 e (b) 03/01/2012. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.....68

Figura 5.39- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 02/01/2012 – 12 UTC e (b) 03/01/2012 - 12 UTC.....69

Figura 5.40 - Reanálises do dia 02/01/2012 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m_gp, sombreado) em 200 hPa.....70

Figura 6.1 – . Precipitação (mm/dia): (a) Observada (MERGE) e simulada com modelo Eta-5km com 48 h de antecedência, pelos membros (b) KF, (c) KFMX, (d) CNTRL, e (e) ZHAO para os 10 casos de chuvas intensas na BRPS.....73

Figura 6.2 - Precipitação (mm/dia): (a) Observada (MERGE) e simulada com modelo Eta-5km com 48 h de antecedência, pelos membros (b) KF, (c) KFMX, (d) CNTRL, e (e) ZHAO para os 10 casos de chuvas intensas na BRPS.....84

Figura 6.3 – Evolução temporal dos totais pluviométricos diários (mm/dia), simulados pelo modelo Eta-5km com 48 h (esquerda) e 72 h (direita) de antecedência e observado para as localidades com maior acumulado de cada caso.....95

Figura 6.4 – Viés Categórico e ETS para cada um d membros e pela média do conjunto do modelo Eta-5km para os horizontes de 48 h (a e b) e 72 h (c e d) para todos os dez casos estudados.....99

Figura 6.5 – Diagrama de Taylor com os valores de Correlação, Desvio Padrão Normalizado e REQM para cada membro e média do conjunto para os 10 casos, no horizonte de 48 h e 72 h.....100

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Parametrizações utilizadas por cada membro do conjunto de simulações com modelo Eta-5km.....	21
Tabela 4.2 - Tabela de Contigência.....	23
Tabela 4.3 - Valores de desvio padrão (mm/dia), correlação e RMSE (mm/dia) para o exemplo da Figura 4.2.....	26
Tabela 4.4: Informações sobre as estações utilizadas para verificação das simulações do conjunto.....	28
Tabela 4.5- Informações sobre as estações meteorológicas do INMET utilizadas na seleção dos casos de chuvas intensas.....	29
Tabela 4.6- Situação das séries de dados das nove estações meteorológicas do INMET utilizadas no trabalho. As células cinza indicam anos nos quais as séries estão completas ou com menos de 5% de falhas. Os meses e/ou anos ausentes são destacados nas células brancas.....	30
Tabela 4.7- Informações sobre os 29 eventos de chuvas intensas na BRPS, sendo os 10 eventos em negrito selecionados para este trabalho.....	31
Tabela.5.1 - Resumo dos 10 eventos estudados neste trabalho.....	71
Tabela 6.1- Valores de desvio padrão (mm/dia), correlação (-1, 1) e RMSE (mm/dia) utilizados no Diagrama de Taylor das simulações de 48 h e 72 h.....	104

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

AB – Alta da Bolívia

BRPS – Bacia do rio Paraíba do Sul

CFSR – Climate Forecast System Reanalysis

CPTEC – Centro de Previsão e Estudos Climáticos

ECMWF - European Centre for Medium Range Weather Forecast

ETS – Equitable Threat Score

GFDL - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MM5 – Mesoscale Model, versão 5

MOS – Model Output Statistics

NCEP – National Center for Environmental Prediction

ONU – Organização das Nações Unidas

PCD – Plataforma de Coleta de dados

PDF – Probability density function

PNMM – Pressão ao nível médio do mar

PNT – Previsão Numérica de Tempo

REQM – Raiz do Erro Quadrático Médio

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RSM - Regional Spectral Model

SCM – Sistemas convectivos de Mesoescala

SF – Sistema Frontal

SINDA – Sistema Integrado de Dados Ambientais

TMC – Transporte de Momento Convectivo

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

UTC - Universal Time Coordinated

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

VCN – Vórtice ciclônico do Nordeste

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

1. INTRODUÇÃO

No contexto de desastres naturais, a precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes. Ela interfere diretamente tanto em ações simples e rotineiras da população, quando ocorre com intensidade fraca a moderada, quanto deflagrando deslizamentos, inundações, alagamentos e outros desastres quando ocorre com intensidade forte e em eventos de longa duração. Nesses casos extremos, as consequências podem ser drásticas para as regiões afetadas, com mortos, feridos, grandes prejuízos econômicos e sociais.

Embora a chuva seja uma das variáveis meteorológicas que mais impactam na vida cotidiana, os modelos numéricos não são capazes de prever sua localização e intensidade com exatidão. Ademais, eventos de chuva extrema acrescentam maior dificuldade ao prognóstico, pois podem estar relacionados a padrões atmosféricos de baixa previsibilidade e podem afetar regiões de forma isolada e não generalizada.

As principais dificuldades relacionadas à previsão de eventos de chuvas intensas estão relacionadas à previsão quantitativa da precipitação e de sua localização. Muitas vezes erros de poucos quilômetros na localização da chuva podem significar a diferença entre um município ou outro.

Os modelos globais de previsão numérica de tempo (PNT) têm mostrado bom desempenho para representar fenômenos meteorológicos em grande escala, contudo são limitados no que diz respeito à previsão de sistemas na meso e na micro escalas (Giorgi, 1990; 2006; Giorgi e Mearns, 1991). Os modelos regionais de PNT, com uma grade suficientemente fina, podem representar melhor os aspectos da camada limite, tais como topografia, vegetação, solos e o litoral (Feser *et al.*, 2011; Solman, 2013). Além disso, tais modelos representam de forma mais adequada os sistemas meteorológicos na meso e micro escalas. Sendo assim, com modelos numéricos de alta resolução, pode-se representar melhor eventos extremos. Tanto nos modelos globais quanto nos regionais a precipitação precisa ser parametrizada, pois os processos físicos envolvidos ocorrem em escalas menores do que as escalas envolvidas pelos modelos, e dessa forma não podem ser resolvidos explicitamente. A parametrização utilizada pelos modelos é em geral proveniente dos esquemas de parametrização de convecção cumulus (ou parametrização convectiva), juntamente com a microfísica de nuvens (Lopez, 2007).

As PNTs podem ser determinísticas ou probabilísticas. Nas previsões determinísticas elabora-se apenas uma integração do modelo, onde se objetiva prever exatamente o valor da variável em um determinado ponto de grade, sem muitas opções para auxiliar na tomada de decisões. Por outro lado, nas previsões probabilísticas o mesmo modelo ou vários modelos de PNT são integrados diversas vezes, formando-se um conjunto de previsões, sendo possível prever a probabilidade de ocorrência de um certo evento, o que resulta em melhor suporte à tomada de decisão (Toth *et al.*, 1997).

A combinação de relevo acidentado, formado por vales e serras, com chuvas intensas, estabelece condições propícias para deflagrar desastres tipo deslizamentos de terra e enchentes. A previsão acurada da chuva com antecedência de pelo menos 24 horas permite a tomada de ações, reduzindo os riscos em tais casos de chuvas intensas. Para melhor apoiar as ações dos tomadores de decisão, a inclusão da previsão de probabilidade de ocorrência de um evento somente pode ser fornecida a partir da previsão com várias realizações, ou previsão por conjunto.

Nas previsões probabilísticas são construídos conjuntos que consideram as incertezas nas condições iniciais e de contorno dos modelos e também nas parametrizações utilizadas para modelar processos atmosféricos. Tais imprecisões na descrição do estado inicial da atmosfera, juntamente com a dificuldade matemática de equacionar a dinâmica atmosférica, tendem a ser minimizadas com a técnica de previsão por conjunto (Palmer, 2000). Sendo assim, além de gerar previsão com o membro padrão, dito membro Controle, outros membros são gerados a partir de pequenas perturbações nas condições iniciais e/ou de contorno ou a partir de diferentes parametrizações dos processos físicos. As informações obtidas através da previsão por conjunto devem ser tratadas por alguma metodologia de decisão ou algoritmos de pós-processamento e visualização (Calvetti, 2011).

Os membros de um conjunto podem ser construídos considerando-se as principais dificuldades na simulação de processos convectivos, que são: i) conhecimentos ainda limitados sobre os processos de precipitação; ii) dados deficientes e/ou escassos que limitam a acurácia das condições iniciais e iii) parametrização e resolução de processos de sub-grade em modelos de mesoescala (Wang e Seaman, 1997).

O desenvolvimento da previsão por conjunto baseado em diferentes esquemas de produção de chuva e nuvem no modelo Eta mostrou-se bastante eficaz para a previsão

de enchentes na bacia do rio Taquari-Antas no Rio Grande do Sul (Siqueira *et al.*, 2016).

Após a construção de um conjunto de previsões, é necessário que haja uma avaliação para verificar se a construção foi adequada, assim como para identificar possíveis melhorias e aperfeiçoamento do conjunto. Diversas métricas de verificação da previsão são utilizadas de forma a, objetivamente, ponderar-se sobre a qualidade do prognóstico gerado. A partir dessa avaliação é possível verificar quais parametrizações contemplam melhor cada tipo de fenômeno meteorológico em cada região do domínio do modelo e assim obter um conjunto equilibrado.

Previsões por conjunto possuem elevado custo computacional, de forma que os centros que as produzem necessitam sempre aprimorar os membros de forma a justificar o investimento na técnica.

A verificação de previsões por conjunto geralmente se dá de duas formas: a avaliação diagnóstica das características da distribuição do conjunto e a verificação das previsões de probabilidade derivadas do conjunto (Wilson *et al.*, 1999).

Peel e Wilson (1999) realizaram uma criteriosa investigação sobre o Sistema de Previsão por Conjunto canadense, avaliando a qualidade das previsões de chuva tanto para períodos secos quanto para períodos úmidos. Hamill e Colucci (1998), avaliaram um conjunto do modelo Eta-Regional Spectral Model (RSM) sobre o território Norte Americano e propuseram correções do tipo distribuição-gama para todas as variáveis, exceto a precipitação.

Tenessong *et al.* (2012) avaliaram o modelo Eta sobre a África central, confrontando as previsões geradas a partir de diferentes esquemas de parametrização da convecção: Kain-Fritsch (KF - Kain e Fritsch, 1993) e Betts-Miller-Janjic (BMJ - Janjic, 1994) com dados do “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM). Seus resultados mostram que, apesar da temperatura do ar e da pressão atmosférica ao nível médio do mar terem sido bem previstas, o modelo não foi capaz de prever o máximo de precipitação observada (cerca de 80 mm/6h).

Gallus (1999) mostra que o esquema de parametrização Betts-Miller apresentou melhores resultados em relação à localização de eventos extremos de chuva, quando comparado ao esquema Kain-Fritsch. Através de simulações de casos de inundações sobre os Estados Unidos, com o modelo Eta utilizando ambos esquemas em diferentes

resoluções espaciais, o autor concluiu que em altas resoluções o esquema Kain-Fritsch tende a prever maiores acumulados de chuva. Esse estudo mostrou que, nos eventos de precipitação extrema, o esquema Betts-Miller simula melhor a localização espacial dos picos de chuva, subestimando os acumulados, enquanto que o esquema Kain-Fritsch desloca em diversos quilômetros o máximo de chuva, porém simula melhor sua intensidade.

A Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS), que abrange parte dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, possui relevo bastante acidentado, o que a torna suscetível a desastres. Além de sua importância socioeconômica para o país, a região apresenta alta frequência de desastres naturais, sendo o mais destruidor aquele ocorrido no dia 12 de janeiro de 2011, com deslizamentos de massa simultâneos, que atingiram sete municípios causando a morte de mais de 900 pessoas e desaparecimento de mais de mil pessoas. Dessa forma, foi desenvolvido pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) um sistema de previsão de tempo por conjunto com modelo Eta com resolução horizontal de 5 km, para melhorar a previsão de eventos de chuvas intensas na região.

1.1. Objetivo

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho da previsão por conjunto em alta resolução, com modelo Eta do CPTEC/INPE para prever casos de chuva intensa na BRPS. A partir dos resultados encontrados neste trabalho almeja-se contribuir para melhoria das previsões para casos de chuvas intensas na região da BRPS, reduzindo o impacto negativo desse tipo de evento na economia e na vida das pessoas.

No próximo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica e em seguida, no Capítulo 3, a revisão bibliográfica sobre avaliação de previsão por conjunto, com ênfase em aplicação para modelos de área limitada. No Capítulo 4 estão a metodologia e os dados utilizados. No Capítulo 5 é apresentada a análise sinótica dos 10 casos de chuva intensa estudados e no Capítulo 6 a avaliação do desempenho das simulações. A conclusão é apresentada no Capítulo 7.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversas razões fundamentam a necessidade da verificação das previsões. Há razões econômicas, para que se tenha sempre otimizado o custo computacional, dando credibilidade e utilidade à previsão; e há razões científicas, com o desejo de melhorar sempre o trabalho realizado.

A avaliação das previsões por conjunto deve ser feita com um detalhamento específico, pois além de avaliar o resultado final da previsão, estudos abrangem o desempenho e a contribuição de cada membro individualmente. Assim é possível monitorar a qualidade da previsão ao longo do tempo, comparar a qualidade da previsão de diferentes conjuntos, assim como aprimorar as previsões através de um melhor entendimento das fontes de erros.

A verificação pode ser feita de duas formas principais: confrontando as previsões com dados observacionais modelados (reanálises) ou com dados observacionais de satélites e através de dados observados *in situ* (Jolliffe e Stepheson, 2012). Sendo assim, os métodos de verificação da previsão devem envolver pares “observação X previsão”.

Diversos são os parâmetros que podem ser utilizados para avaliação de previsões por conjunto, de forma que diferentes conceitos podem ser considerados para a avaliação (Murphy, 1993). A análise estatística das previsões se faz útil uma vez que auxilia a apontar seus pontos fortes e fracos, fornecendo informação para sua melhoria.

De acordo com Wilks, (2006), alguns atributos contribuem para investigar a qualidade da previsão:

1. **Enviesamento:** Correspondência entre a média da previsão e a média da observação. Difere de acurácia, onde são avaliados pares individuais de previsão/observação;
2. **Associação:** Grau de relação linear entre as previsões e as observações (correlação);
3. **Acurácia:** Nível de concordância entre a previsão e a verdade (representada pela observação);
4. **Habilidade:** Acurácia relativa entre a previsão e outra previsão de referência. A previsão de referência geralmente não tem habilidade, dada

pelo acaso, ou simplesmente pela climatologia. Dessa forma, sistemas de previsão podem ter maior precisão em cenários de alta previsibilidade, como em situações de tempo bom. A habilidade considera esse fator;

5. **Confiabilidade:** Também chamado de Viés condicional (para determinada categoria de dados e não para o conjunto completo), refere-se à concordância média entre valores previstos e valores observados. É calculada sobre valores específicos, em categorias. Se for calculada sobre todas as previsões, se igualará ao Viés. A Confiabilidade de um conjunto tende a ser melhorada através da calibração;
6. **Resolução:** Habilidade da previsão em resolver diversos eventos com diferentes distribuições de frequência. Ou seja, a previsão quando ocorre um evento “A” é diferente da previsão quando ocorre um evento “B”. Dessa forma, mesmo que o modelo erre a previsão, pode possuir resolução para diferenciar diferentes tipos de eventos. Assim, a resolução de um conjunto é condicionada pelas previsões;
7. **Acuidade (*sharpness*):** Capacidade em prever valores extremos, com baixa frequência de ocorrência. Dessa forma, por exemplo, a climatologia não possui acuidade. Esta métrica é melhor avaliada em conjunto com a confiabilidade, avaliando-se a confiabilidade das previsões;
8. **Discriminação:** Habilidade da previsão em discernir entre as observações. Ou seja, apresentar uma frequência maior para um evento sempre que ele ocorrer. Assim, a discriminação de um conjunto é condicionada pelas observações e não pode ser melhorada por processos de calibração.

2.1. Técnicas de previsão por Conjunto

As primeiras previsões numéricas por conjunto foram introduzidas na meteorologia por Epstein (1969) e Leith (1974), com o intuito de minimizar a propagação de erros nos resultados de previsão numérica. Conforme proposto por Lorenz (1963), previsões para longos horizontes possuem baixíssimo grau de acurácia, devido à natureza caótica da atmosfera e à dinâmica dos fluidos envolvida. Assim, pequenas perturbações nas condições iniciais da atmosfera podem levar a resultados completamente diferentes. Soma-se a isso, o fato de haver diversas limitações nos dados

observados, tanto espacial quanto temporalmente, o que eleva o grau de incerteza das previsões (Cox, 2002).

De acordo com Epstein (1969), a atmosfera não pode ser totalmente descrita por uma previsão determinística, devido às incertezas associadas à previsão numérica. Dessa forma, o autor propõe um modelo estocástico que apresenta variâncias e médias para o estado previsto da atmosfera.

A técnica de previsão por conjunto, considerando tais incertezas, pode nos prover informações úteis, descrevendo a evolução no tempo das condições atmosféricas através de uma função de densidade de probabilidade (PDF – do inglês *probability density function*), conforme Figura 2.1.

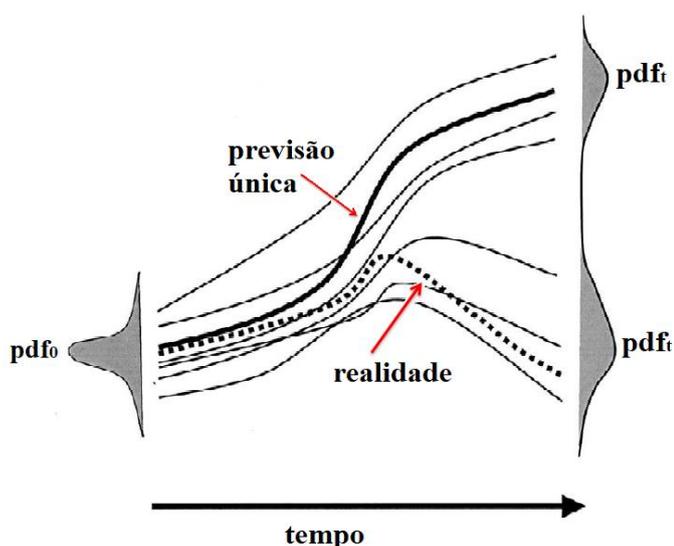


Figura 2.1 – Representação esquemática da Função de Densidade de Probabilidade (PDF), onde pdf_0 representa a incerteza nas condições iniciais e pdf_t a incerteza nas previsões. Traduzido de Taylor e Buizza (2003).

A PDF_0 representa a incerteza inicial, pois um único modelo não é capaz de contabilizar erros nas condições iniciais e em sua própria métrica. Assim, previsões perturbadas contêm essas incertezas, sendo mais provável que a realidade futura esteja inserida na PDF_t (Zhu *et al.*, 1996).

Em modelagem de tempo, as incertezas são advindas principalmente de duas fontes, ambas sendo amplificadas com o tempo (Ehrendorfer, 1997):

- i) condições iniciais – processos de assimilação de dados; incerteza nas observações e baixa densidade da rede de dados;

- ii) processos físicos – processos em subgrade, parametrizações e microfísica das nuvens.

As incertezas associadas às condições iniciais são devido às limitações das observações da atmosfera, seja em observações *in situ* ou por sensoriamento remoto (Golding, 2000; Wandishin *et al.*, 2001). De forma que não é possível ter pleno conhecimento das condições iniciais da atmosfera (Kalnay, 2003). A técnica de previsão por conjunto pode considerar tais incertezas através de membros com diferentes condições iniciais geradas através da perturbação das condições iniciais de uma análise padrão, denominada Controle. Buizza *et al.* (1999) e Leutbecher e Palmer (2008) avaliam diferentes técnicas de perturbação para construção de membros para previsão por conjunto. As perturbações devem representar, de maneira realística, o espaço amostral estatisticamente provável. Kalnay (1993) afirma que o número de membros em um conjunto deve ser suficiente para representar todos os possíveis estados iniciais da atmosfera.

Dessa forma, se faz conveniente o uso de técnicas de perturbação para que sejam gerados membros de condição inicial perturbada. É desejável, por questões computacionais e financeiras, que haja um número mínimo de membros que abranjam uma variedade maior de condições iniciais. Porém, determinar o melhor método de perturbação de condição inicial não é trivial.

Leith (1974), nos primórdios do uso da técnica de previsão por conjunto, propôs o método de Monte Carlo, que utiliza variações aleatórias em torno dos valores utilizados na etapa de análise. O método consiste em adicionar aos dados, valores aleatórios que caracterizem os erros das observações.

Hoffman e Kalnay (1983) propõem um método no qual as condições iniciais utilizadas para inicialização dos membros são obtidas através de rodadas anteriores do mesmo modelo para a data inicial.

Buizza *et al.* (1999) sugerem uma técnica de perturbação estocástica nas condições iniciais para construção do conjunto. A técnica se baseia na noção de que o tipo de erro aleatório na forçante de parametrização será coerente entre os diferentes esquemas e terá certo nível de coerência com as escalas de tempo e espaço associadas aos esquemas de convecção. A noção de coerência entre os módulos permite que a perturbação estocástica se baseie na tendência total dos esquemas de parametrização e

não nas tendências individuais de cada membro de parametrização. Nos conjuntos com perturbação estocástica nas condições iniciais, os erros aleatórios provenientes das incertezas nas condições iniciais são associados aos esquemas de parametrização de processos em subgrade.

Diversas outras técnicas vêm sendo propostas, como em Wei *et al.* (2006), Ott *et al.* (2004) e Mendonça e Bonatti (2009).

Por outro lado, as incertezas associadas aos processos físicos do modelo são devido às limitações do modelo em descrever com precisão a física da atmosfera. O processo de representação da atmosfera através de equações matemáticas envolve diversos tipos de simplificações, como os esquemas de parametrizações, que introduzem incertezas à previsão. Assim, os modelos numéricos de previsão de tempo não são capazes de representar exatamente os processos físicos que governam a atmosfera (Mendonça e Bonatti, 2002). Dessa forma, para se construir um conjunto que considere tais incertezas em seus membros temos diversas formas de construir um conjunto.

Apesar do rápido avanço computacional que temos vivido atualmente, que permite o desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais avançados, a previsão de condições de tempo severo, especialmente de caráter localizado, ainda são restritas a cerca de 2 dias (Buizza, 2001). Essa limitação está relacionada, além da própria limitação física do modelo, ao baixo grau de previsibilidade desse tipo de evento.

As incertezas na dinâmica do modelo estão relacionadas com a dificuldade em se descrever de forma matemática todos os processos atmosféricos que influenciam as condições de tempo. Por conseguinte, não é possível para um modelo de previsão numérica codificar toda a dinâmica atmosférica (Epstein, 1969). Para que essa incerteza seja considerada no processo de previsão, são construídos conjuntos de modelos com múltiplos métodos numéricos diferentes, como por exemplo, modelos espectrais; modelos de ponto de grade; modelos de ponto de grade com diferentes ajustes; etc. Conjuntos de multi-modelos são comumente chamados de “conjunto *poor man*” (Mylne *et al.*, 2002). A grande dificuldade nesse tipo de conjunto é o elevado custo computacional envolvido.

Incertezas na física do modelo estão associadas à processos que ocorrem em escala menor do que a escala resolvida pelo modelo – processos em subgrade – que são

resolvidos através de parametrizações físicas. Assim, conjuntos com membros com diferentes parametrizações físicas são construídos.

Tais técnicas de construção de conjuntos geralmente são combinadas, de forma que diferentes fontes de incertezas são consideradas. Stensrud *et al.* (2000) utilizaram o modelo MM5 (*Meso-scale Model*, versão 5) para construir um conjunto de condições iniciais, juntamente com um conjunto de parametrizações físicas, formando um total de 19 membros. Os autores estudaram o desenvolvimento de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) e os resultados mostraram melhoria na previsão desse tipo de evento com a técnica empregada.

Os primeiros centros a utilizarem previsões por conjunto foram o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP, Tracton e Kalnay, 1993) e o *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF, Buizza *et al.*, 1993 e Molteni *et al.*, 1996). Atualmente diversos centros utilizam essa técnica em suas previsões, como por exemplo, o Serviço Meteorológico do Reino Unido (Harrison *et al.*, 1995) e o Serviço Meteorológico do Canadá (Houtekamer *et al.*, 1996). O CPTEC/INPE disponibiliza desde 2001 a previsão global por conjunto com 14 membros de condição inicial perturbada, além do membro controle (Coutinho, 1999; Mendonça e Bonatti, 2009). As previsões são disponibilizadas para horizontes de até 15 dias com a resolução TQ0126L28 (aproximadamente 100 km).

As previsões geradas por conjunto podem ser apresentadas de três maneiras principais: i) cenário mais provável ou consenso; ii) medida de incerteza e iii) distribuição de todas as soluções possíveis.

O cenário mais provável é dado simplesmente pela média, moda ou mediana dos membros. Porém, para que haja consenso, a solução mais provável pode ser obtida através de técnicas mais sofisticadas. Dessa forma são utilizados diversos métodos, como o MOS (Model Output Statistics, Gneiting *et al.*, 2005), performance de média ponderada (Woodcock e Engel, 2005), *clustering* (Greybush *et al.*, 2008) e Modelo Bayesiano (Raftery *et al.*, 2005). A maior vantagem da apresentação da previsão com o valor mais provável é que a informação é passada de maneira direta e compactada. As desvantagens incluem a perda de detalhes, superestimativa de chuva leve e subestimativa de chuvas fortes (Du *et al.*, 1997).

A medida da incerteza ou espalhamento de um conjunto é geralmente dada pela variância entre os membros (calculada pelo desvio padrão dos membros em relação à média do conjunto). Pouco (muito) espalhamento indica alta (baixa) confiabilidade na previsão. As vantagens desse tipo de apresentação incluem a facilidade no entendimento e a compactação da informação. Desvantagens incluem pouca informação sobre os membros (Hart e Grumm, 2001).

Quando a distribuição de todos os cenários possíveis é apresentada, o previsor obtém o máximo de informação do conjunto. Para tal, diversos produtos podem ser extraídos da previsão por conjunto, como por exemplo, a probabilidade de ocorrência do evento, *cluster*, diagramas *spaguetti*, diagrama de pluma, valores extremos (ou envelope), além de representações em duas ou mais dimensões.

Um conjunto que apresenta espalhamento suficiente é dito dispersivo, pelo contrário, quando apresenta pouco espalhamento é dito subdispersivo. Se um conjunto possui elevado viés ou é subdispersivo, a probabilidade da realidade futura estar fora do leque de previsões é grande, pois a PDF será estreita. Por outro lado, se um conjunto é dispersivo, a chance da realidade futura não estar contida nas previsões é menor (Clark *et al.*, 2010).

De maneira geral, dispersão é um aspecto bastante importante de um conjunto, pois sem a informação da incerteza associada, a previsão é incompleta. A previsão por conjunto oferece uma base para comunicação de tal incerteza, além da confiabilidade da previsão, de forma que os tomadores de decisão que façam uso da previsão tenham mais informações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre avaliações de previsões por conjunto, com ênfase em aplicação para modelos de área limitada.

3.1. Avaliação de previsões por conjunto

Peel e Wilson (2008) realizaram uma avaliação do sistema de previsão por conjunto do sistema meteorológico do Canadá. Os autores avaliaram a qualidade das previsões para eventos de chuva abaixo do percentil 10 e acima dos percentis 90, 95 e 99, além das previsões de longo prazo comparadas à climatologia. As previsões foram comparadas com dados observacionais de estações distribuídas pelo país. As métricas de avaliação utilizadas pelos autores foram o diagrama de atributos (Murphy, 1986; Wilks, 2006), o Brier Skill Score (BSS, Stanski *et al.*, 1989; Wilks, 2006) e o diagrama ROC – *Receiver Operation Characteristic* – (Mason, 1982; Harvey *et al.*, 1992). A avaliação se mostrou capaz de identificar vieses e possíveis melhorias no sistema de previsão por conjunto avaliado. As características da previsão em diferentes estações e para diferentes padrões meteorológicos também foram estudadas. Os autores concluíram que há maior previsibilidade na estação quente, sendo que as previsões geradas pelo conjunto possuem habilidade de previsão de até 5 dias na estação quente e de 3 dias na estação fria.

3.2. Previsão por conjunto aplicada na América do Sul

Chou e Justi da Silva (1999) avaliaram as previsões do modelo Eta entre 1997 e 1998. As autoras mostraram que o modelo tende a superestimar chuvas fracas e subestimar chuvas extremamente fortes, apresentando viés próximo de 1 nas categorias de chuvas moderadas. Os resultados mostraram que as previsões iniciadas às 1200 UTC apresentavam melhor desempenho, o que as autoras atribuíram à maior densidade de observação realizadas nesse horário. Ao confrontar previsões com 24 e 48 h de antecedência para o mesmo evento, as autoras notaram que as previsões com 48 h apresentaram melhor resultado, prevendo melhor o posicionamento da precipitação.

Bustamante (2009) avaliou a previsibilidade de eventos severos de precipitação sobre a região da Serra do Mar através de um conjunto com 6 membros do modelo Eta com 10 km de resolução horizontal. Foram testados 4 conjuntos de previsão de curto prazo. Dois desses conjuntos foram construídos para verificar o papel das incertezas nas condições iniciais. Um terceiro conjunto foi construído para incluir as incertezas nas

descrições de processos físicos nos modelos, e um quarto experimento, foi constituído da combinação dos conjuntos de previsões com um total de 11 membros, o que possibilitou a avaliação do impacto do número de membros sobre as previsões por conjunto.

A autora realizou dois experimentos de alta resolução conduzidos de forma determinística, com 5 km de resolução horizontal, a fim de verificar se previsões determinísticas de alta resolução fornecem maior grau de acerto dos fenômenos de chuva intensa na região da Serra do Mar do que as previsões por conjunto com resolução mais baixa. Foram realizadas avaliações subjetivas dos campos de precipitação prevista comparada à observada.

Os resultados de Bustamante mostraram que as diferentes formas de perturbação nas condições iniciais acrescentam maiores ou menores incertezas à previsão, de forma que as perturbações na umidade específica acarretaram em maior incerteza do que perturbações nos campos de vento e temperatura.

Em comparação com previsões determinísticas, os resultados mostraram que, após os horários iniciais da integração, os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) da média do conjunto foram menores que os valores do membro controle. Considerando os eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e de Sistemas Frontais (SFs), nota-se que no primeiro caso, todos os experimentos apresentam espalhamento semelhante, porém para os casos de SFs, os experimentos mais úmidos apresentaram espalhamento nitidamente maior. Dessa forma, a autora concluiu que a previsibilidade de eventos de ZCAS e de SFs pode ser conhecida pela aplicação da técnica de previsões por conjunto, devendo o sistema de previsões incorporar as duas fontes de incertezas: na condição inicial e na física do modelo.

Chou e Seluchi (2001) avaliaram o desempenho do modelo Eta, confrontando duas versões do modelo com análises do NCEP e sondagens de ar superior. Foram selecionados 15 casos com diferentes condições meteorológicas ao longo do ano e abrangendo diferentes classes de eventos meteorológicos. Como método de avaliação da variável precipitação, os autores utilizaram o *Equitable Threat Score* (ETS) e o Viés (calculados para diversos limiares). Os resultados de Chou e Seluchi mostraram que as diferenças entre os erros das duas versões do modelo Eta são negligenciáveis (exceto para a temperatura da superfície) durante as primeiras 24 h. Os autores concluíram que,

para a precipitação, a versão mais nova apresentou melhores resultados comparada à versão anterior.

Vieira (2013) e Vieira *et al.* (2015) apresentaram uma avaliação das previsões de precipitação do modelo Eta para a região de Minas Gerais. Foram analisadas duas versões do modelo: 8 km e 40 km, para horizontes de até 72 h. Para a análise foram considerados 25 casos de chuvas intensas entre 2005 e 2012. As previsões foram comparadas com dados obtidos através de reanálises, imagens de satélite, e dados observacionais de estações meteorológicas. Uma avaliação objetiva foi elaborada utilizando as métricas Viés, ETS, Erro Médio, REQM e correlação. Além disso, foi elaborada uma avaliação subjetiva, confrontando-se visualmente a localização das bandas de chuva entre as diferentes versões do modelo e a observação. Os resultados para a precipitação simulada com 72 h de antecedência mostraram que ambas as resoluções do modelo (8 e 40 km) superestimaram chuvas fracas e moderadas e subestimaram chuvas acima de 60 mm/dia. A versão de 8 km apresentou ETS mais próximo da unidade, assim como maiores valores de correlação linear temporal.

Da avaliação subjetiva, os autores concluíram que na maioria dos casos ambas as versões do Eta foram capazes de prever corretamente o posicionamento da banda de precipitação. Os pesquisadores ressaltaram, porém, que a versão de 8 km apresentou maior detalhamento da chuva, sendo as previsões de ambas versões influenciadas pelas características dos sistemas meteorológicos atuantes.

Moura (2016) estudou as previsões do modelo Eta para a região Sudeste do Brasil com o intuito de avaliar os efeitos do transporte de momentum convectivo (TMC) na distribuição de chuva. O autor comparou versões do modelo Eta, utilizando a parametrização Kain-Fritsch com modificações para incluir o termo do gradiente de perturbação da pressão, e foram testados dois coeficientes para ajuste do TMC. Os resultados mostraram que a inclusão do TMC aprimorou a representação de chuvas intensas, porém o esquema sem a inclusão do TMC foi melhor para representar chuvas fracas e moderadas.

Previsões por conjunto são amplamente utilizadas para fins de hidrologia, onde a previsão probabilística permite a representação das incertezas associadas, melhorando a previsão de eventos de cheia. Fan *et al.* (2015) discorrem sobre o uso de previsões probabilísticas em previsões hidrológicas. Devido ao fato das previsões hidrológicas de longo e médio prazo possuírem elevado grau de incerteza, grande parte dessas

incertezas advinda da previsão meteorológica, os autores recomendam o uso de previsões meteorológicas probabilísticas para que as incertezas sejam consideradas no processo de tomada de decisão.

Siqueira *et al.* (2016) estudaram o desempenho de um modelo hidrológico acoplado a um conjunto de 5 membros do Modelo Regional Eta de alta resolução, em eventos de cheias na Bacia Taquari-Antas, na região Sul do Brasil. Os autores utilizaram diferentes condições de contorno e parametrizações de convecção cumulus (Betts-Miller, Kain-Fritsch e Kain-Fritz com TMC) e de microfísica de nuvens (Ferrier e Zhao). Os autores concluíram que o modelo Eta é bastante sensível às mudanças em sua parametrização de convecção cumulus. Os resultados mostraram que a previsão utilizando a técnica por conjunto apresentou maior acurácia e maior probabilidade de detecção nos limiares utilizados. Os autores mostraram benefícios da utilização da técnica de previsão por conjunto no monitoramento de eventos de cheias.

4. METODOLOGIA E DADOS

Neste capítulo são apresentados: i) a região de estudo; ii) as características gerais do modelo Eta-5km do CPTEC/INPE; iii) o sistema de simulação por conjunto com modelo Eta-5km; iv) as métricas de avaliação utilizadas; v) os dados utilizados e vi) os casos de chuvas intensas selecionados para o trabalho.

4.3 A Região de Estudo

A região estudada neste trabalho é a área da BRPS, localizada na região Sudeste do país, abrangendo partes dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, conforme Figura 4.1.

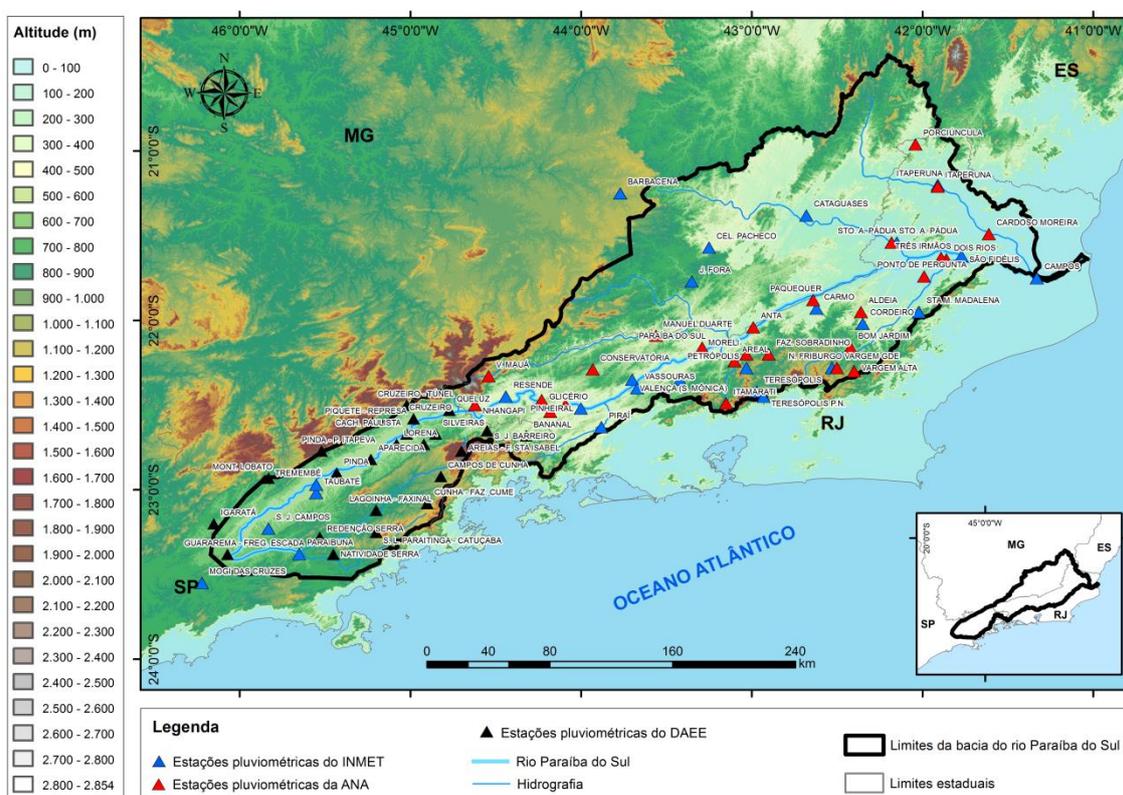


Figura 4.1- Bacia do rio Paraíba do Sul que se estende sobre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, na Região Sudeste do Brasil. Fonte: Brasiliense, 2016.

A BRPS tem sua importância no cenário socioeconômico brasileiro, pois ocupa áreas de três estados importantes: São Paulo, no Vale do Paraíba Paulista; parte de Minas Gerais, denominada Zona da Mata Mineira e metade do estado do Rio de Janeiro, com um total de 57000 km² de área. A região abrange 184 municípios dos três estados, sendo 88 de Minas Gerais, 57 do Rio de Janeiro e 39 municípios de São Paulo. A bacia

está localizada entre grandes polos industriais e em uma região de grande densidade populacional.

O rio Paraíba do Sul resulta da confluência dos rios Paraibuna, considerado Alto Paraíba, e Paraitinga, que nascem em São Paulo na Serra da Bocaina com seu curso desaguando no Oceano Atlântico, em São João da Barra, no estado do Rio de Janeiro, de forma que o rio escoar no sentido oeste-leste, em grande parte do seu curso (mas não em sua totalidade). O rio possui aproximadamente 1150 km de extensão (CEIVAP, 2001). Suas águas são utilizadas principalmente para abastecimento da população, diluição de esgotos, irrigação e geração de energia elétrica. Em seu leito, estão instalados importantes reservatórios de usinas hidrelétricas, como Paraibuna, Santa Branca e Funil; tendo importante papel no abastecimento de cerca de 9 milhões de habitantes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

A BRPS possui forma alongada, com comprimento cerca de três vezes maior que a largura máxima, estendendo-se na direção leste-oeste. A região possui relevo bastante acidentado, conforme mostra a Figura 4.1, com picos elevados, acima de 2000 m, incluindo o Pico das Agulhas Negras a 2787 m de altitude. Em seus domínios, há áreas planas, como a região do delta do Paraíba, com planície fluvio-marinha abrangendo diversas cidades ao longo do rio.

O curso do rio Paraíba do Sul pode ser dividido da seguinte forma (CEIVAP, 2001):

- i. curso superior: da nascente do rio até a cidade de Guararema (SP) a 572 m de altitude. Esse trecho apresenta fortes declives e regime torrencial, com declividade média de $4,9 \text{ m.km}^{-1}$ e 317 km de extensão;
- ii. curso médio superior: a partir de Guararema até Cachoeira Paulista (SP), com cerca de 515 m de altitude. Esse trecho é sinuoso, onde o rio percorre terrenos sedimentados de grandes várzeas. Nessa parte do curso a declividade é de $0,19 \text{ m.km}^{-1}$ tendo 480 km de extensão;
- iii. curso médio inferior: entre as cidades de Cachoeira Paulista e São Fidélis (RJ), com apenas 20 m de altitude e $1,0 \text{ m.km}^{-1}$ de declividade. Nesse trecho de 480 km o rio apresenta trechos encachoeirados; e

- iv. curso inferior: entre as cidades de São Fidélis e a foz, com 95 km de extensão e declividade de $0,22 \text{ m.km}^{-1}$. Esse trecho atravessa a Baixada Campista e possui extensa planície litorânea.

Nos dois terços superiores do rio, os reservatórios de cabeceira (Paraitinga, Paraibuna e Jaguari) em SP, juntamente com o reservatório de Funil (RJ), proporcionam certo controle a enchentes regionais nessa região, porém em casos de chuvas extremas podem ocorrer inundações. Dessa forma, inundações nessa região são devido, majoritariamente, a transbordamento dos cursos afluentes do rio Paraíba do Sul, que fazem parte do sistema de drenagem das cidades. No terço inferior do rio, há importantes afluentes que atravessam diversos municípios, como o rio Muriaé, que contribuem para recorrentes inundações nos municípios da região.

A BRPS apresenta clima variado, devido à sua topografia acidentada. As temperaturas são mais elevadas no norte/noroeste fluminense e mais baixas na Região Serrana do Rio de Janeiro. As maiores amplitudes térmicas ocorrem na cidade de São José dos Campos (SP). De acordo com a climatologia da precipitação elaborada por Brasiliense (2016), a distribuição espacial média das chuvas é bastante irregular. Os valores máximos ocorrem nas regiões montanhosas da Serra da Mantiqueira, onde as estações pluviométricas se situam acima de 1000 m de altitude. Os valores mais baixos, por sua vez, ocorrem na depressão do rio Paraíba do Sul, no norte/noroeste fluminense. Estando em uma região de clima tropical, a maior parte da precipitação é observada entre primavera e verão (73%), sendo o verão responsável por cerca de 48% do total pluviométrico anual médio da bacia.

4.4 O Modelo Eta

O modelo Eta é um modelo atmosférico que foi desenvolvido inicialmente em conjunto pela Universidade de Belgrado e pelo Instituto de Hidrometeorologia da antiga Iugoslávia utilizado para propósitos operacionais e de pesquisa (Mesinger *et al.*, 1988). Sua principal característica é o uso da coordenada vertical eta (Mesinger, 1984), que resulta em uma coordenada de superfície quasi-horizontal, e reduz erros no cálculo do gradiente de pressão em região de topografia complexa. Portanto, tal característica é bastante vantajosa na área de estudo deste trabalho. O modelo Eta é utilizado no Brasil desde 1996 (Chou, 1996). O modelo utiliza a grade do tipo E de Arakawa e atualizações foram introduzidas no modelo de forma que hoje este é um modelo em volume finito, com refinamento adicional na coordenada vertical (“*cut-cell*”), que utiliza o esquema

“*piecewise linear*” para advecção vertical, não-hidrostático, entre outras modificações descritas em Mesinger *et al.* (2012). A integração do modelo é explícita em dois níveis no tempo. O esquema de radiação resolve as ondas curtas e as ondas longas a partir de um pacote desenvolvido pelo GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) (Lacis e Hansen, 1974; Schwarzkopf e Fels, 1991). A superfície continental é resolvida pelo esquema NOAH (Ek *et al.*, 2003) que distingue 13 tipos de cobertura vegetal e 18 tipos de solo, atualizado por Doyle *et al.* (2013).

A coordenada eta é definida pela Equação 4.1:

$$\eta = \left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right) \left(\frac{p_{ref}(Z_{sfc}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right) \quad (4.1)$$

onde:

p_T = pressão no topo do domínio

p_{sfc} = pressão à superfície

z_{sfc} = elevação do relevo

p_{ref} = pressão de referência (função da elevação acima do nível do mar)

A resolução vertical é mais alta nos baixos níveis e diminui com a altura; a primeira camada tem cerca de 20 m de espessura. Um máximo secundário de resolução vertical ocorre próximo à tropopausa para melhor descrever a inversão térmica em altos níveis. O modelo possui representação complexa dos processos físicos que são tratados através de esquemas de parametrização, descritos na próxima seção.

4.5 Sistema de Simulação por Conjunto do Modelo Eta – 5 km

Neste estudo são utilizadas simulações na resolução horizontal de 5 km e 50 camadas verticais. As condições iniciais e de contorno lateral para construção dos membros do conjunto são provenientes da reanálise do NCEP denominada *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR, Saha *et al.*, 2010), de 0,5° x 0,5° de resolução horizontal. A condição de contorno lateral é atualizada a intervalos de 6 h. Diferente dos demais modelos regionais, o modelo Eta não utiliza esquema de relaxação na condição de contorno lateral. Tal condição no Eta é resolvida como um problema matemático de condição de contorno (Mesinger, 1977). A comparação entre os dois métodos de

condição de contorno lateral mostra previsão com melhor desempenho utilizando o método de Mesinger (Mesinger e Veljovic, 2013).

Aninhamentos consecutivos não são necessários no modelo Eta, conforme apresentado em Rozante (2001). O domínio grande para o modelo Eta é vantajoso porque permite espaço para que o modelo regional desenvolva a estrutura de escala mais fina do que a condição da forçante lateral. Esse é o papel de um modelo de mesoescala, fornecer estrutura mais fina do que a da forçante do contorno lateral. Portanto, o modelo Eta não utiliza *nudging* interno para desenvolver livremente a estrutura fina. O trabalho de Mesinger e Veljovic (2017) mostra o ganho do desempenho da previsão do modelo Eta sobre as previsões do modelo do ECMWF utilizadas no contorno lateral.

A precipitação no modelo Eta é produzida de forma implícita a partir da parametrização de convecção cumulus e a explícita a partir da parametrização de microfísica de nuvens. A chuva da microfísica de nuvens é gerada a partir da saturação do ar e crescimento das gotas ou gelo de nuvem, não sendo condicionada à instabilidade convectiva. Por outro lado, a precipitação convectiva é gerada por cumulus e cumulonimbus e está relacionada a massas de ar convectivamente instáveis. Diferentes tipos de precipitação geram distintos perfis de calor latente na atmosfera, o que implica em diferentes resultados nas escalas de tempo e clima.

4.5.1 Membros do conjunto

Os membros do conjunto da previsão são construídos a partir de diferentes representações dos processos físicos, em particular que afetam a produção de chuva, do modelo Eta. São utilizados os esquemas de convecção Betts-Miller-Janjic (BMJ, Janjic, 1994); Kain-Fritsch (KF, Kain, 2004); Kain-Fritsch com fluxo de momentum (KFMX, Carvalho, 2007) e os esquemas de microfísica de nuvens Ferrier (Ferrier *et al.*, 2002; Ferrier 1994) e Zhao (Zhao e Carr, 1997), conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Parametrizações utilizadas por cada membro do conjunto de simulações com modelo Eta-5km.

Membro	Parametrizações	
	Convecção cumulus	Microfísica de nuvens
CNTRL	Betts-Miller-Janjic	Ferrier
KF	Kain-Fritsch	Ferrier
KFMX	Kain-Fritsch com inclusão de fluxo de momentum	Ferrier
ZHAO	Betts-Miller-Janjic	Zhao

O membro CNTRL possui parametrização convectiva de Betts-Miller-Janjic. Esse esquema de parametrização é do tipo de ajuste convectivo baseado no conceito de *lapse-rate* atmosférico. Essa parametrização utiliza um perfil termodinâmico de referência para representar a estrutura vertical em situações convectivas. O perfil de referência é ajustado de acordo com três parâmetros: déficit de pressão de saturação (determina o perfil de umidade); coeficiente de estabilidade (determina o perfil da temperatura) e o tempo do ajuste convectivo.

A parametrização de convecção cumulos Kain-Fritsch é um esquema do tipo fluxo de massa lagrangeano, que simula o entranhamento e detranhamento nas correntes convectivas para permitir uma interação entre a nuvem e o ambiente. A parametrização Kain-Fritsch possui três partes fundamentais: i) a função de gatilho, que identifica as camadas com potencial convectivo e calcula a flutuabilidade da parcela, os efeitos de entranhamento e detranhamento; ii) a formulação do fluxo de massa, que representa os fluxos convectivos e iii) o fechamento, que redistribui a massa na coluna, reduzindo a energia potencial inicial disponível para a convecção.

Nas integrações realizadas para este estudo, foi incluído, nos membros que utilizam parametrização Kain-Fritsch, um parâmetro para controlar a proporção de água líquida/gelo a ser convertida em precipitação, conforme proposto por Gomes e Chou (2010). Essa modificação é feita com o intuito de ajustar a produção de precipitação em mesoescala.

O membro KFMX proposto por Carvalho (2007) resulta da inclusão do transporte de momentum convectivo no esquema Kain-Fritsch. Tal modificação considera os efeitos das correntes ascendentes e descendentes, entranhamento e detranhamento sobre o momentum, que permitem a interação entre a nuvem e o ambiente, conservando massa, calor e momentum. Carvalho (2007) ressalta que tal modificação intensifica a vortacidade ciclônica em baixos níveis e a geração de regiões com vortacidade anticiclônica em altos níveis, promovendo o desenvolvimento de áreas de atividade convectiva profunda. Dessa forma, no campo de precipitação, são esperados acumulados mais intensos em situações pré-frontais.

Os membros CNTRL, KF e KFMX utilizam o esquema de microfísica de nuvens de Ferrier (Ferrier *et al.*, 2002). Esse esquema foi formulado para prever a variação de seis formas da água, representando assim a nuvem e a chuva da escala de grade do modelo. Além disso, o esquema considera diversos processos microfísicos da água na nuvem com interações entre as partículas de água da nuvem, cristais de gelo e umidade do ar. O esquema prevê mudanças na razão de mistura do vapor d'água e possui algoritmos de condensação do vapor e fluxo de precipitação e armazenamento da água na nuvem. Essa parametrização gera precipitação na forma de chuva, chuva congelada e gelo, levando em consideração os processos de mistura de fases, congelamento e derretimento.

O membro ZHAO utiliza o esquema de microfísica de nuvens Zhao (Zhao e Carr, 1997). Esse esquema apresenta como característica principal a inclusão da previsão de conteúdo de gelo ou água na nuvem com uma única variável preditiva, a taxa de mistura, que representa ambos. Dessa forma, o conteúdo de vapor d'água na nuvem, que envolve a formação e evaporação de nuvens e de precipitação, é calculado de forma explícita. Esse método permite uma melhor representação dos efeitos termodinâmicos de condensação em escala de subgrade (precipitação e não precipitação), assim como uma relação mais estreita entre os processos radiativos, dinâmicos e hidrológicos no modelo. O esquema de microfísica Zhao trata menos variedades de hidrometeoros que o esquema de Ferrier, além de não possuir a fase mista da água/gelo.

As simulações são integradas para um horizonte de 120 h, em um domínio que cobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil, estendendo-se de 34°S a 12°S e de 59°W a 36°W.

4.6 Métricas de Avaliação

O método de avaliação empregado consiste de duas formas distintas. A primeira, uma avaliação subjetiva, feita de forma visual, onde os campos de precipitação gerados por cada membro isolado são comparados ao campo de precipitação observada. Essa comparação é feita em diferentes datas e para os horizontes de previsão de 48 e 72 h. Somando-se a essa avaliação, são geradas evoluções temporais da precipitação (observada e simulada) para as localidades onde foram registrados os maiores acumulados de precipitação. Dessa forma, visa-se avaliar localmente o desempenho do modelo.

A segunda forma consiste de uma avaliação objetiva, realizada através de parâmetros estatísticos calculados ao se confrontar os valores simulados por cada membro do conjunto com dados observados em estações *in situ*. Foram comparados

acumulados diários, entre 1200 UTC do dia anterior até 1200 UTC do referido dia, para os horizontes de previsão de 48 e 72 h.

4.6.1 Métricas de avaliação objetiva

Nesta seção são descritas as métricas utilizadas neste trabalho. Para melhor detalhar a avaliação aqui apresentada, a chuva é considerada como uma variável categórica. Dessa forma, os índices são calculados para cada uma das seguintes categorias de total pluviométrico diário: i) $\geq 0,3$ mm/dia; ii) $\geq 10,0$ mm/dia; iii) $\geq 20,0$ mm/dia; iv) $\geq 30,0$ mm/dia; v) $\geq 40,0$ mm/dia; vi) $\geq 50,0$ mm/dia; vii) $\geq 60,0$ mm/dia; viii) $\geq 70,0$ mm/dia e ix) $\geq 80,0$ mm/dia. Consequentemente, estando o valor simulado pelo modelo na mesma categoria que o valor observado no pluviômetro, a simulação é considerada correta.

Sendo assim, é construída a tabela de contingência, conforme apresentado na Tabela 4.2. Essa tabela apresenta células que representam cada uma das quatro possíveis combinações de previsão e observação. Análises de variáveis categóricas através da tabela de contingência são apresentadas por Everitt (1992) e Agresti (2007).

Tabela 4.2 - Tabela de Contingência

		Observação		Total
		SIM	NÃO	
Previsão	SIM	A	B	A+B
	NÃO	C	D	C+D
Total		A+C	B+D	n=A+B+C+D

Dessa forma, a soma de todas as células ($A+B+C+D = n$) é chamada de “tamanho da amostra” e se faz importante para quantificar a incerteza da amostra na estatística de verificação. Os valores apresentados na Tabela 4.2 podem ser tomados como frequências relativas ao serem divididos por n .

i. Viés

O viés categórico (ou *Bias*) é definido pela razão entre o número de ocorrências do evento previsto e o número de ocorrências observado. Sua formulação matemática é apresentada na Equação 4.2:

$$Viés = \frac{F}{O} \quad (4.2)$$

Onde, para cada limiar de precipitação, F é o número de eventos previstos (da tabela de contingência, $A+B$), e O o número de eventos observados (da tabela de contingência, $A+C$).

Dessa forma, quando o modelo prevê o mesmo número de eventos que realmente ocorre, o viés é igual a 1. Valores acima da unidade indicam superestimativa de ocorrência de eventos enquanto que valores abaixo da unidade indicam subestimativa. É importante ressaltar que somente a análise do Viés não é suficiente para avaliar a habilidade do modelo.

Na previsão de eventos extremos, os sistemas de alerta podem emitir alarmes falsos, mas é extremamente indesejável que haja omissões de alerta. Dessa forma, para esse tipo de previsão, é desejável que o viés seja maior que 1.

ii. Índice de Sucesso Equitativo

Conforme citado anteriormente, o viés não é suficiente para avaliar a habilidade do conjunto. Dessa forma, Mesinger e Black (1992) sugerem o uso do Índice de Sucesso Equitativo (do inglês - *Equitable Threat Score*, ETS) coordenado com o viés para avaliação das previsões.

Essa métrica, proposta por Mesinger e Black (1992) é baseada no *Threat Score* proposto por Anthes (1983), que por sua vez equivale ao *Critical Success Index* proposto por Donaldson *et al.* (1975). O ETS é dado pela Equação 4.3:

$$ETS = \frac{H-CH}{F+O-H-CH} \quad (4.3)$$

onde, para cada limiar de precipitação, F é o número de eventos previstos, O o número de eventos observados, H o número de acertos e CH é o fator de correção dado pela Equação 4.4:

$$CH = \frac{FxO}{n} \quad (4.4)$$

em que n representa o número total de eventos, ou seja, o número de pares observação x previsão.

Assim, o ETS mede a fração de eventos corretamente prevista. Em uma previsão perfeita o ETS e o viés apresentam valor igual a 1.

iii. Diagrama de Taylor

O diagrama de Taylor (Taylor, 2001) fornece um resumo gráfico de quão próximo o modelo (ou um grupo de modelos) está da observação. Essa similaridade é quantificada em termos da correlação, da raiz do erro quadrático médio e do desvio padrão. Tais diagramas são especialmente úteis na avaliação de múltiplos aspectos de modelos complexos ou na avaliação da habilidade de diferentes modelos.

Um exemplo do diagrama de Taylor para previsões de precipitação obtidas por quatro modelos é mostrado na Figura 4.2.

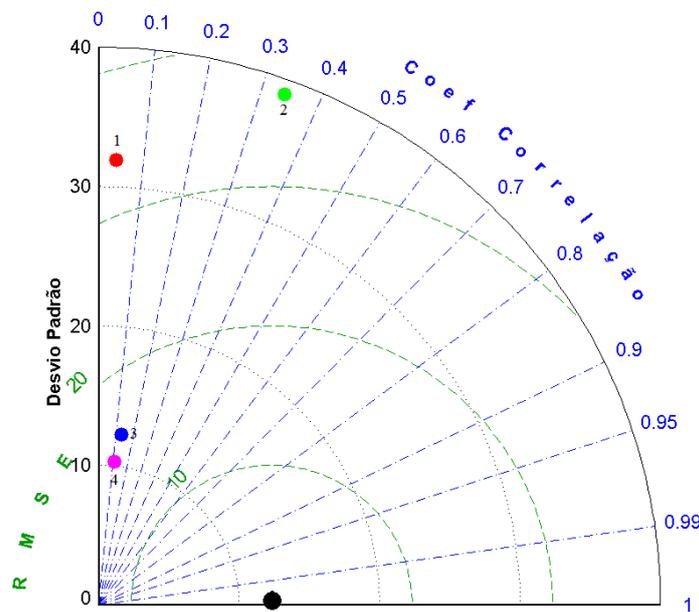


Figura 4.2- Exemplo de um diagrama de Taylor mostrando uma comparação estatística entre 4 modelos para a variável precipitação.

Neste exemplo hipotético podemos comparar as previsões de precipitação obtidas para os modelos 1 (círculo vermelho), 2 (círculo verde), 3 (círculo azul) e 4 (círculo rosa) com a observação (círculo preto). O diagrama reúne os valores do desvio padrão

(S) em mm/dia apresentado na Equação 4.5, do coeficiente de correlação temporal (r) apresentado na Equação 4.6 e da REQM em mm/dia mostrado na Equação 4.7.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (F_i - \bar{F})^2} \quad (4.5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F}) \cdot (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4.6)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2} \quad (4.7)$$

Onde n representa o número de eventos, F o valor previsto pelo modelo e O o valor observado na estação. A Equação 4.5 apresenta o Desvio Padrão para as previsões (F), mas também é calculado sobre as observações (O).

Neste exemplo os valores obtidos para o desvio padrão de cada previsão podem ser lidos nos semicírculos pontilhados pretos. A correlação é lida nos raios tracejados azuis e a REQM nos semicírculos tracejados em verde. Os valores para cada um dos 4 modelos são apresentados na Tabela 4.3. Nesse exemplo o desvio padrão da observação é 15 mm/dia.

Tabela 4.3 - Valores de desvio padrão (mm/dia), correlação e RMSE (mm/dia) para o exemplo da Figura 4.2.

Modelo	Desvio padrão (mm/dia)	Correlação	RMSE (mm/dia)
1	32	0,04	32
2	39	0,34	36
3	12	0,13	16
4	10	0,11	15

Assim, através do diagrama de Taylor podemos comparar visualmente os quatro modelos e decidir qual a melhor previsão. Uma previsão perfeita estaria sobre o eixo das abcissas (correlação 1), no centro do semicírculo de linhas verdes pontilhadas (RMSE zero) e desvio padrão igual ao da observação. Quanto mais próximo desse ponto, onde hipoteticamente estaria a observação, melhor a previsão. Dessa forma, neste exemplo, o modelo 4 (círculo rosa) apresenta a melhor previsão, dentre as apresentadas.

4.7 Dados utilizados

4.7.1 Mapas de precipitação do MERGE

Para a avaliação subjetiva são construídos mapas de precipitação diária, a partir dos dados observacionais gerados por Rozante *et al.* (2010), por eles denominado MERGE. Tal conjunto de dados, gerado para o período de 1998 a 2016, possui resolução temporal de 3 horas e resolução espacial de 25 km, e inclui dados observados de precipitação e dados do TRMM para toda a América do Sul e oceano adjacente.

4.7.2 Imagens de Satélite

Para avaliação sinótica dos casos estudados neste trabalho foram utilizadas imagens do canal infravermelho dos satélites GOES-8 e GOES-12, obtidos no sítio eletrônico do CPTEC/INPE (<http://satelite.cptec.inpe.br>).

4.7.3 Dados de precipitação observada

No presente estudo são utilizados totais pluviométricos diários de 34 estações na região da BRPS, conforme Tabela 4.4. Os dados acumulados em 24 h (das 1200 UTC do dia anterior até 1200 UTC do dia em questão) são comparados com as previsões com 48 h e 72 h de antecedência, de forma que para cada estação há 2 pares observação x previsão, para cada membro do conjunto, para cada data. Os dados das estações são utilizados conforme disponibilidade dos mesmos no período do evento. Conseqüentemente, para cada caso um número diferente de estações é utilizado.

Tabela 4.4: Informações sobre as estações utilizadas para verificação das simulações do conjunto.

Nome da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Localização	Órgão responsável
Aparecida	-22,95	-45,25	690	Médio Paraíba	DAEE-SP
Bananal - Bananal	-22,683	-44,316	460	Médio Paraíba	DAEE-SP
Bananal - Bocaina	-22,8	-44,467	1180	Médio Paraíba	DAEE-SP
Barbacena	-21,25	-43,77	1171	Médio Paraíba	INMET
Barra Mansa	-22,536	-44,172	518	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Cachoeira Paulista	-22,675	-45,002	563	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Campos dos Goytacazes	-21,75	-41,33	11	Baixo Paraíba	INMET
Cordeiro	-22,02	-42,35	506	Médio Paraíba	INMET
Coronel Pacheco	-21,57	-43,25	435	Médio Paraíba	INMET
Cruzeiro	-22,575	-44,967	518	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Cunha	-23,074	-44,974	1002	Alto Paraíba	CPTEC/INPE
Guaratinguetá	-22,081	-45,189	539	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Itaperuna	-21,2	-41,91	124	Baixo Paraíba	INMET
Juiz de Fora	-21,77	-43,35	940	Médio Paraíba	INMET
Leopoldina	-21,468	-42,723	305	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Monteiro Lobato	-22,953	-45,838	731	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Nova Friburgo	-22,28	-42,53	857	Médio Paraíba	INMET
Paraibuna	-23,407	-45,588	762	Alto Paraíba	CPTEC/INPE
Paty do Alferes - Avelar	-22,35	-43,42	507	Médio Paraíba	INEA
Pindamonhangaba Fazenda Sapucaia	-22,8167	-45,22	540	Médio Paraíba	DAEE-SP
Pindamonhangaba Pico do Itapeva	-22,767	-45,5167	1840	Médio Paraíba	DAEE-SP
Resende	-22,45	-44,44	440	Médio Paraíba	INMET
Santo Antônio de Pádua	-21,54	-42,18	70	Médio Paraíba	ANA
São José do Barreiro	-22,64	-44,584	1372	Alto Paraíba	CPTEC/INPE
Silveiras	-22,804	-44,584	1219	Médio Paraíba	CPTEC/INPE
Taubaté	-23,02	-45,55	577	Médio Paraíba	INMET
Jacareí	-23,973	-45,973	567	Médio Paraíba	INMET
Mendes	-22,521	-43,721	475	Médio Paraíba	INMET
Olaria	-22,309	-42,542	862	Médio Paraíba	INEA
Pico Caledônia	-22,359	-42,567	1587	Médio Paraíba	INEA
Santa Maria Madalena	-21,953	-42,005	615	Médio Paraíba	INMET
Suspiro	-22,279	-42,535	853	Médio Paraíba	INEA
Teresópolis	-22,407	-42,793	871	Médio Paraíba	INMET
Ypu	-22,295	-42,526	900	Médio Paraíba	INEA

4.8 Casos de chuvas intensas

A seleção dos casos de chuvas intensas é baseada em dados de precipitação diária de nove estações meteorológicas do INMET. Os acumulados diários são sempre contabilizados às 1200 UTC. A partir das séries de dados de chuva disponíveis para cada estação, são calculados os percentis 99 para cada uma das estações. As informações sobre as estações e os percentis 99 obtidos para cada estação estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Informações sobre as estações meteorológicas do INMET utilizadas na seleção dos casos de chuvas intensas.

Nome Estação	Estado	Número	Período dos dados	Percentil 99 (mm/dia)
Paty do Alferes	RJ	83049	1992-2014	46,2
Campos dos Goytacazes	RJ	83698	1961-1983 1992-2014	43,2
Cordeiro	RJ	83718	1971-1983 1995-2014	48,6
Itaperuna	RJ	83695	1967-1983 1992-2014	49,1
Resende	RJ	83738	1961-1983 1992-2014	51,9
Taubaté	SP	83784	1961-1977 1992-2014	44,5
Barbacena	MG	83689	1961-2014	48,6
Cel. Pacheco	MG	83037	1966-1987 1990-2009	56,7
Juiz de Fora	MG	83692	1961-1985 1991-2014	52,8

Ressalta-se que a pesquisa foi feita entre anos de 2000 e 2014, sendo que as falhas nos dados observados são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Situação das séries de dados das nove estações meteorológicas do INMET utilizadas no trabalho. As células cinza indicam anos nos quais as séries estão completas ou com menos de 5% de falhas. Os meses e/ou anos ausentes são destacados nas células brancas.

Ano	Paty do Alferes	Campos dos Goytacazes	Cordeiro	Itaperuna	Resende	Taubaté	Barbacena	Juiz de Fora	Coronel Pacheco
2000								Set	
2001	Jul a Dez	Jul a Dez	Jul a Dez	Jul a Dez	Jul a Dez				
2002	Jan a Abr	Jan a Abr	Jan a Abr		Jan a Abr				
2003									
2004									
2005									
2006						Jan			
2007						Jan			
2008						Jan			Nov e Dez
2009									Mai a Dez
2010						Jan			Ausente
2011						Jan			Ausente
2012			Set			Jan			Ausente
2013	Jul		Out			Jan			Ausente
2014	Dez	Dez	Abr e Dez	Dez	Dez	Jan, Ago a Dez		Dez	Ausente

Os casos são selecionados quando pelo menos duas estações ultrapassam seus respectivos percentis 99 de chuva diária, ocorrendo no mesmo dia ou em dias consecutivos. Dessa forma, são selecionados 29 casos onde tal critério foi obedecido. A Tabela 4.7 lista os casos selecionados e as estações cuja precipitação diária ultrapassa o percentil 99 em cada evento. Desses 29 eventos, os dez que foram selecionados para o presente estudo e são utilizados para validação das simulações elaboradas pelo conjunto do Modelo Eta-5km estão destacados em negrito. Tais casos foram selecionados por terem provocado grandes transtornos à população, não sendo necessariamente os casos que apresentam os maiores totais pluviométricos diários.

Tabela 4.7- Informações sobre os 29 eventos de chuvas intensas na BRPS, sendo os 10 eventos em negrito selecionados para este trabalho.

Nº	Período do Evento	Estações que Ultrapassaram o Percentil 99	Maior Total Pluviométrico Diário (mm)	Estação com Maior Total Pluviométrico Diário (mm)
1	01-05/01/2000	Resende / Taubaté	138,7	Resende
2	19-20/03/2000	Juiz de Fora / Resende / Coronel Pacheco	94,6	Coronel Pacheco
3	15/11/2000	Campos dos Goytacazes / Itaperuna / Resende	72,5	Campos dos Goytacazes
4	10-12/03/2001	Itaperuna / Paty dos Alferes / Coronel Pacheco / Juiz de Fora	147,4	Juiz de Fora
5	12-15/12/2002	Paty dos Alferes / Cordeiro / Juiz de Fora	84,2	Juiz de Fora
6	20-21/11/2003	Coronel Pacheco / Juiz de Fora	113,2	Coronel Pacheco
7	29-30/11/2003	Itaperuna / Resende / Coronel Pacheco	96	Itaperuna
8	13-16/01/2004	Itaperuna / Juiz de Fora / Coronel Pacheco / Resende	105	Coronel Pacheco
9	15-17/02/2004	Juiz de Fora / Taubaté / Cordeiro	76	Cordeiro
10	19/01/2005	Campos / Cordeiro / Juiz de Fora / Paty dos Alferes	117,2	Paty dos Alferes
11	04/03/2005	Campos dos Goytacazes / Coronel Pacheco / Itaperuna / Juiz de Fora / Cordeiro	94,8	Cordeiro
12	26/11/2005	Coronel Pacheco / Juiz de Fora / Taubaté	86	Juiz de Fora
13	03-05/01/2007	Campos dos Goytacazes / Cordeiro / Coronel Pacheco / Juiz de Fora / Paty dos Alferes	157,7	Cordeiro
14	25-26/10/2007	Resende / Taubaté / Campos dos Goytacazes / Coronel Pacheco	66,6	Coronel Pacheco
15	20-24/12/2007	Cordeiro / Coronel Pacheco / Itaperuna / Juiz de Fora	87,1	Juiz de Fora

Tabela 4.7- Final.

Nº	Período do Evento	Estações que Ultrapassaram o Percentil 99	Maior Total Pluviométrico Diário (mm)	Estação com Maior Total Pluviométrico Diário (mm)
16	21/01/2008	Coronel Pacheco / Juiz de Fora / Paty dos Alferes / Resende	84,1	Coronel Pacheco
17	24-25/11/2008	Itaperuna / Taubaté / Paty dos Alferes	111,3	Paty dos Alferes
18	28-30/11/2008	Campos dos Goytacazes / Resende	102,8	Campos dos Goytacazes
19	16-18/12/2008	Itaperuna / Cordeiro / Campos dos Goytacazes	79,6	Itaperuna
20	13/02/2009	Itaperuna / Juiz de Fora / Resende / Taubaté	69,4	Taubaté
21	10-13/11/2009	Paty dos Alferes / Cordeiro / Juiz de Fora	140,8	Paty dos Alferes
22	28/12/2009-01/01/2010	Cordeiro / Paty dos Alferes / Juiz de Fora / Resende / Taubaté	123,8	Resende
23	27-28/12/2010	Itaperuna / Juiz de Fora	72,2	Itaperuna
24	11-12/01/2011	Cordeiro / Juiz de Fora	81,2	Juiz de Fora
25	15-16/03/2011	Resende / Itaperuna	83,4	Resende
26	27-28/11/2011	Cordeiro / Juiz de Fora	86,8	Juiz de Fora
27	01-09/01/2012	Cordeiro / Itaperuna / Juiz de Fora / Campos dos Goytacazes / Paty dos Alferes / Resende	113,7	Cordeiro
28	29-30/01/2012	Juiz de Fora / Cordeiro	61,9	Cordeiro
29	16-17/03/2012	Cordeiro / Resende / Itaperuna	82,2	Itaperuna

5. ANÁLISE SINÓTICA

Neste capítulo são elaboradas sínteses sinóticas dos dez casos de chuvas intensas analisados neste trabalho. Para o período mais chuvoso de cada evento são apresentados: i) os totais pluviométricos diários observados em estações meteorológicas selecionadas, localizadas na BRPS; ii) os mapas da distribuição espacial da precipitação no entorno da BRPS confeccionadas a partir do MERGE de Rozante *et al.*(2010); iii) As imagens de satélite sobre a América do Sul e iv) os seguintes campos atmosféricos: pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM) e umidade específica em 850 hPa; linha de corrente, movimento vertical e temperatura potencial equivalente em 500 hPa e linha de corrente e altura geopotencial em 200 hPa.

5.1. Caso 1

O Caso 1 ocorreu entre os dias 1º e 5 de janeiro de 2000, atingindo principalmente a porção sul da Bacia, na região do Médio Paraíba. O maior total pluviométrico diário foi de 192 mm em Resende. As chuvas fortes causaram diversos deslizamentos e enchentes no sul de MG, em SP e no RJ (Jornal do Brasil, 3 de janeiro de 2000).

De acordo com Brasiliense *et al.* (2017), as chuvas foram causadas durante a atuação de um evento de ZCAS, intensificada pela presença de um vórtice ciclônico híbrido, com características subtropicais nos primeiros dias e extratropicais no final do período. Os maiores totais pluviométricos diários observados nas estações meteorológicas dentro da BRPS são apresentados na Figura 5.1. Pode-se notar que os maiores acumulados ocorreram no dia 3 de janeiro, com valores acima de 100 mm/dia.

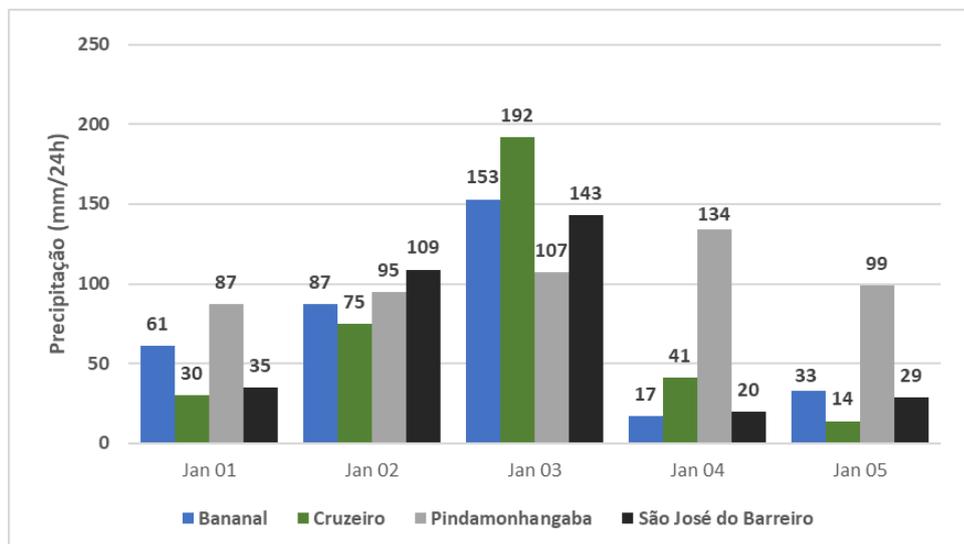


Figura 5.1 – Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 1º a 5 de janeiro de 2000.

A distribuição espacial dos acumulados diários de chuva no entorno da BRPS nos dias 2 e 3 de janeiro são mostrados na Figura 5.2. No dia 2 de janeiro a chuva atingiu o sul da BRPS com valores em torno de 90 mm/dia, intensificando-se no dia seguinte (3 de janeiro), com valores da ordem de 200 mm/dia principalmente na Região do Vale do Rio Paraíba e Sul de MG.

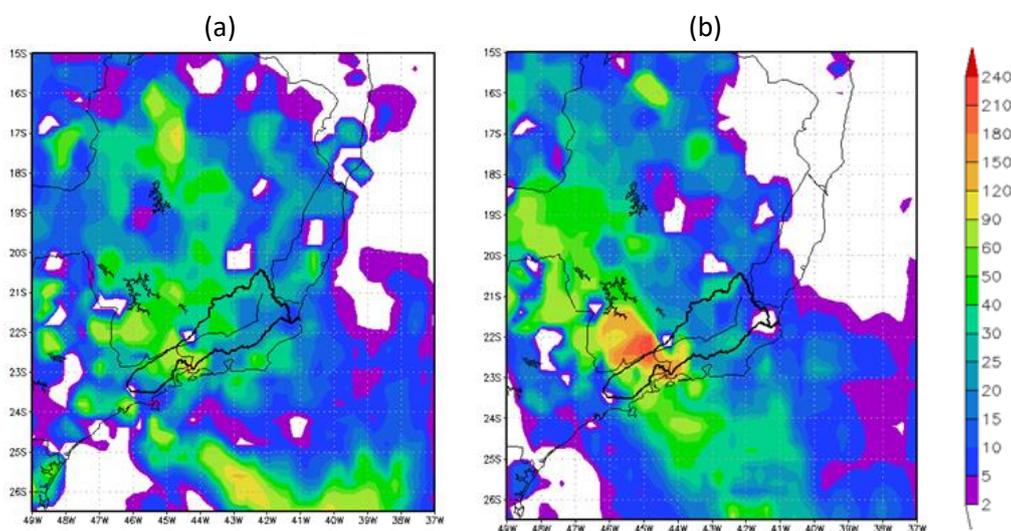


Figura 5.2 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 02/01/2000 e (b) 03/01/2000. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do satélite GOES-8 no canal infravermelho entre 1º e 5 de janeiro são mostradas na Figura 5.3. Nota-se a nebulosidade associada à ZCAS durante todo o período e, a partir do dia 2 de janeiro a formação de um vórtice ciclônico junto à costa do RJ e SP. A presença desse vórtice foi um fator determinante nos elevados

acumulados de chuva (Brasiliense *et al.*, 2017). A ZCAS se manteve ativa entre os dias 1º e 6 de janeiro de 2000 (Climanálise, 2000).

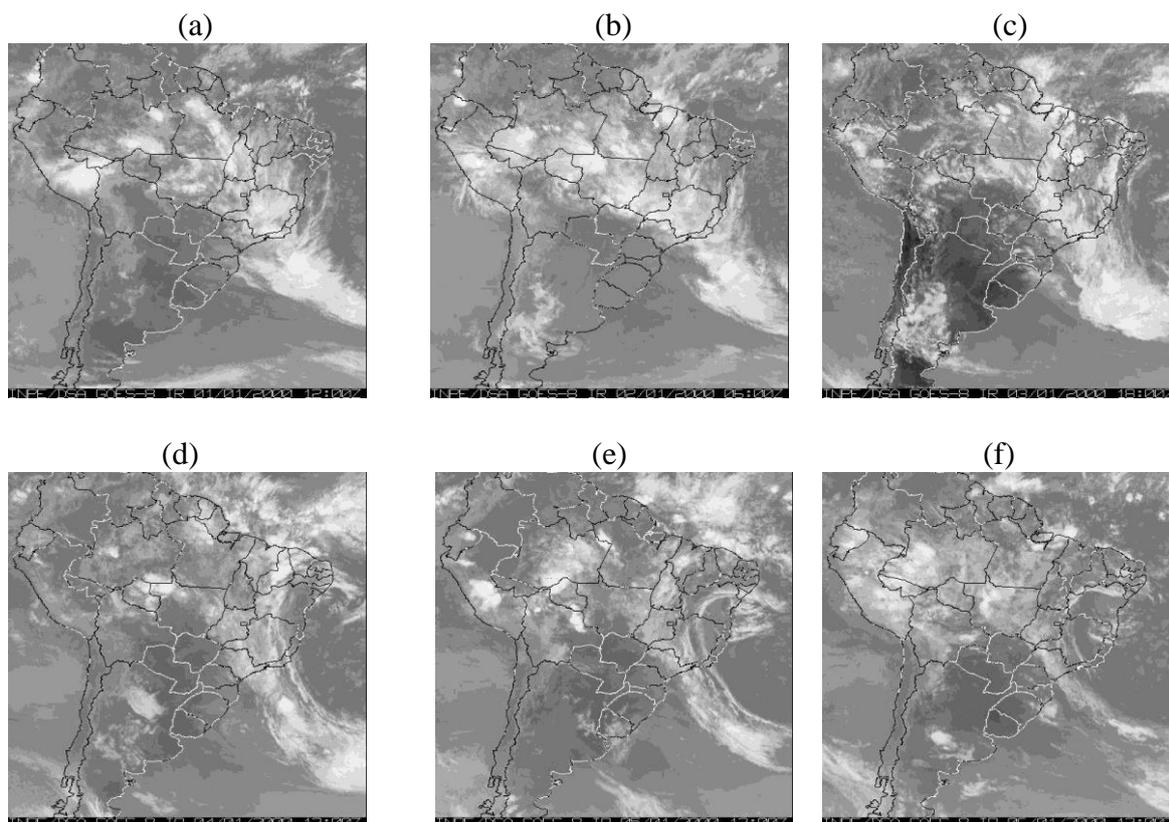


Figura 5.3 - Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-8: (a) 01/01/2000 - 12UTC; (b) 02/01/2000 - 06 UTC; (c) 03/01/2000 - 18 UTC; (d) 04/01/2000 - 12 UTC, (e) 05/01/2000 - 12 UTC e (f) 06/01/2000 - 12 UTC.

A Figura 5.4 apresenta os campos de PNMM e umidade específica em 850 hPa (Figura 5.4a); linha de corrente, movimento vertical e temperatura potencial equivalente em 500 hPa (Figura 5.4b) e linha de corrente e altura geopotencial em 200 hPa (Figura 5.4c) para o dia mais chuvoso (3 de janeiro). Na Figura 5.4a observa-se grande quantidade de umidade disponível sobre a maior parte do Brasil central, inclusive sobre a região de estudo. No campo de PNMM observa-se a presença do ciclone próximo à costa. Na Figura 5.4b, nota-se intenso movimento vertical sobre os estados de RJ e ES, orientado na mesma direção da ZCAS e a leste do vórtice ciclônico, configurado no campo de linha de corrente em 500 hPa. Também é possível notar nesta mesma figura, valores elevados de temperatura potencial equivalente sobre a região da BRPS e um forte gradiente de temperatura potencial equivalente ao sul da faixa de nebulosidade convectiva, assim como também destacado em Quadro (1994). No campo de linha de corrente em 200 hPa (Figura 5.4c) verifica-se uma configuração típica de ZCAS, com a

Alta da Bolívia (AB) bem pronunciada. O vórtice ciclônico do Nordeste (VCN) não aparece em destaque na Figura 5.4c, já que seu centro localiza-se a leste de 30°O. Dessa forma, a análise das condições sinóticas do Caso 1 sugere resumidamente a presença de um vórtice ciclônico embebido na ZCAS, intensificando a chuva na região da BRPS.

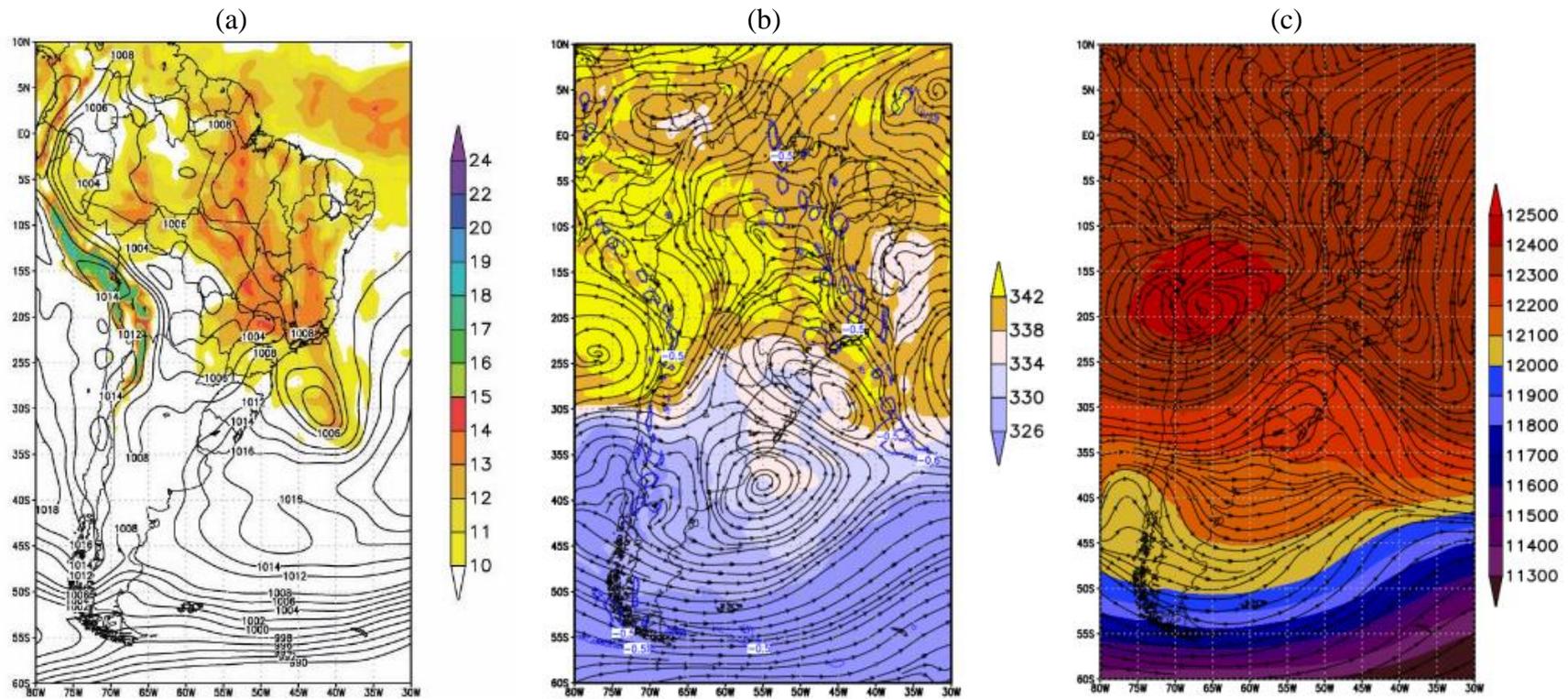


Figura 5.4 – Reanálises do dia 03/01/2000 – 1200 UTC: (a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); (b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e (c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (mgp, sombreado) em 200 hPa.

5.2. Caso 2

O Caso 2 ocorreu no dia 4 de março de 2005 e atingiu a porção norte da BRPS. O maior registro de chuva diária foi de 95 mm em Cordeiro. As fortes chuvas causaram diversos prejuízos principalmente nas cidades de Campos dos Goytacazes, Juiz de Fora, Cordeiro, Coronel Pacheco e Itaperuna. Houve o registro de enchentes e inundações com mais de 8 mil pessoas afetadas (INEA, 2014).

Os valores mais elevados de precipitação observada nas estações da BRPS são mostrados na Figura 5.5, onde pode-se notar a ocorrência de chuva forte, com valores superiores a 80 mm/dia.

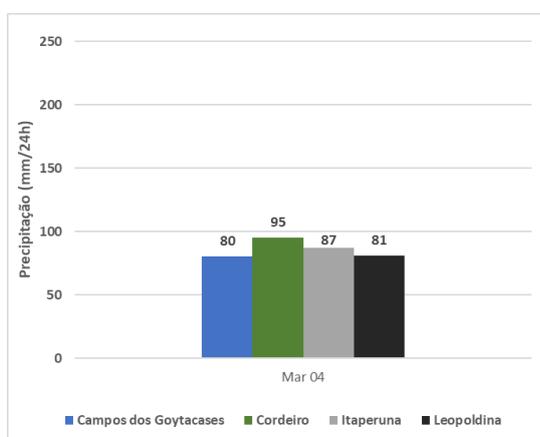


Figura 5.5 – Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no dia 04/03/2005.

O mapa com a distribuição dos acumulados diários de chuva no dia 4 de março é mostrado na Figura 5.6, onde se observa um núcleo de precipitação intensa na região NE da Bacia, estendendo-se sobre MG e oceano junto à costa, com máximo de cerca de 90 mm/dia.

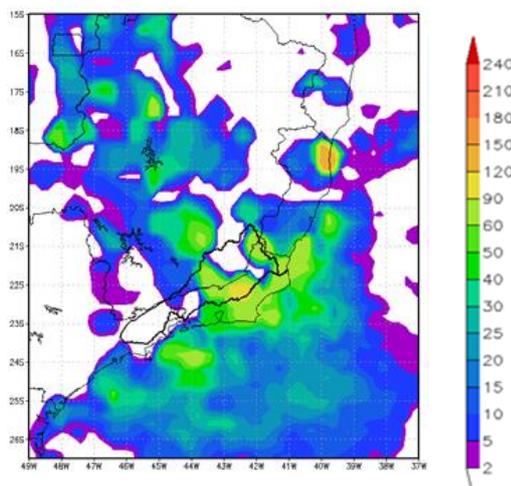


Figura 5.6 – Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC do dia 04/03/2005. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-12, no canal infravermelho, entre os dias 2 e 5 de março são apresentadas na Figura 5.7. Nessa figura é possível notar uma banda de nebulosidade com orientação NO-SE ao longo do Brasil central. Na região Sudeste, essa banda cobre a parte Norte do RJ e o ES, encobrindo a porção norte da BRPS. Este foi o primeiro caso de ZCAS de março de 2005, estabelecida entre 01 e 07 de março de 2005 (Climanálise, 2005).

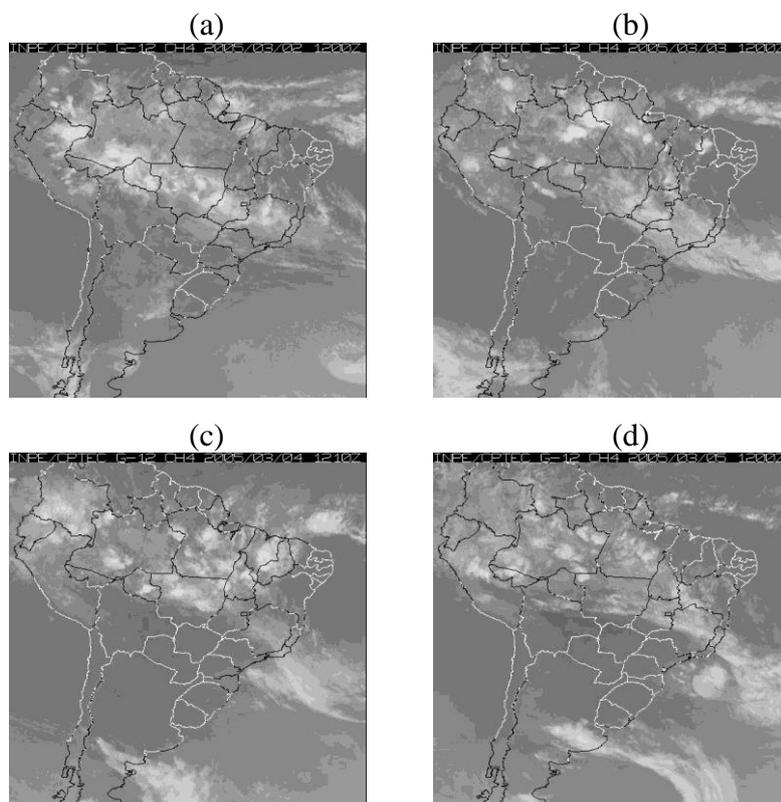


Figura 5.7- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 02/03/2005 - 12UTC; (b) 03/03/2005 - 12 UTC; (c) 04/03/2005 – 12 UTC e (d) 05/03/2005 – 12 UTC.

A Figura 5.8 apresenta os mesmos campos meteorológicos da Figura 5.4, exceto para o dia 04/03/2005. No campo de umidade específica em 850 hPa (Figura 5.8a) nota-se grande disponibilidade de umidade sobre as Regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, sobre a região da ZCAS. Na Figura 5.8b nota-se movimento ascendente no norte da Bacia, região onde foram registrados os máximos de precipitação e forte gradiente de temperatura potencial equivalente ao sul da ZCAS. No campo de linha de corrente em 200 hPa (Figura 5.8c) nota-se, além da AB e do VCN, a presença de um cavado sobre a Região Sul do Brasil. Dessa forma, a alta disponibilidade de umidade aliada à forte convergência e movimento vertical ascendente, causados pela presença da ZCAS, foram os ingredientes que propiciaram a ocorrência do evento.

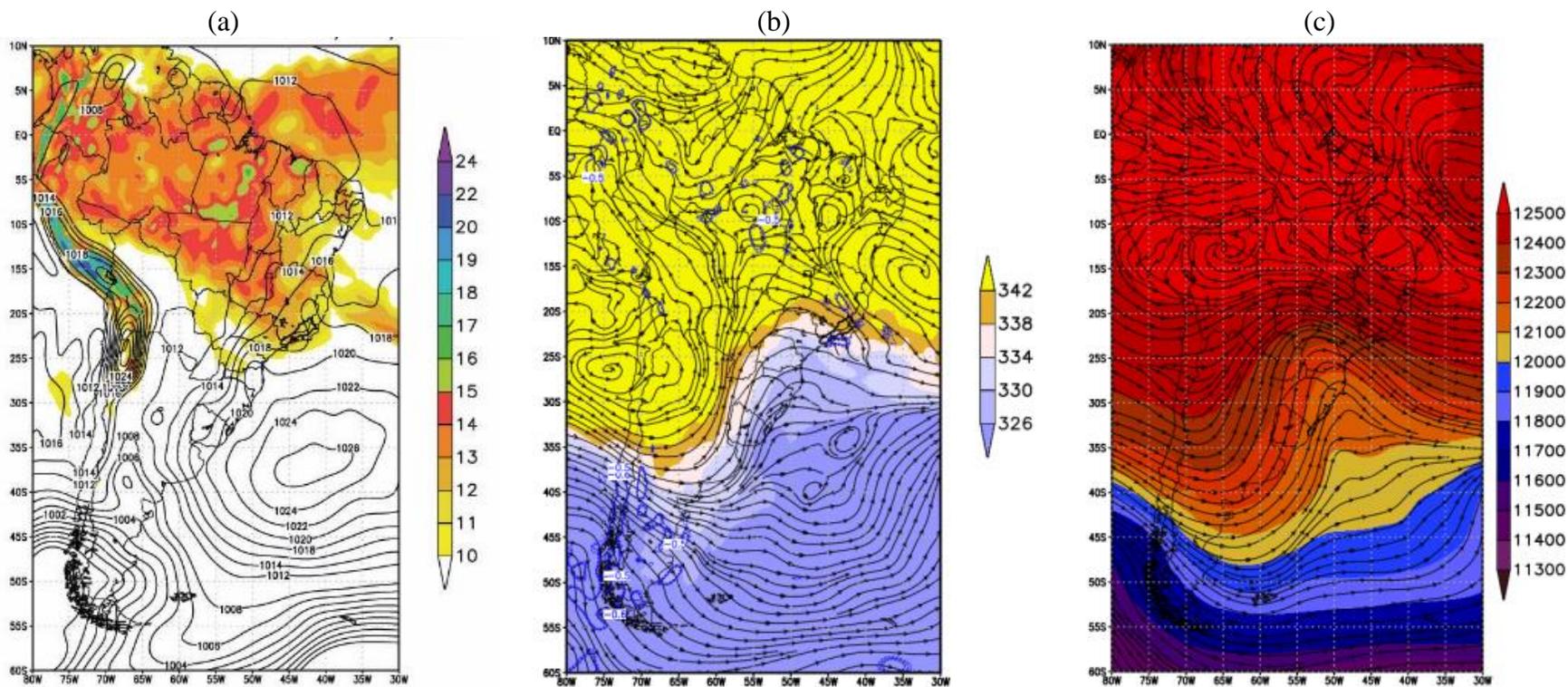


Figura 5.8 - Reanálises do dia 04/03/2005 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.3. Caso 3

O Caso 3 ocorreu entre os dias 3 e 5 de janeiro de 2007, atingindo principalmente a porção norte da Bacia. O maior registro pluviométrico em 24 h foi de 156 mm em Cordeiro. Houve registro de transbordamentos de diversos rios e canais, assim como de rompimento de dique de contenção na cidade de São João da Barra, com 4 óbitos (INEA, 2014).

A precipitação observada nas estações dentro da BRPS durante o evento é mostrada na Figura 5.9. É possível notar que os maiores acumulados ocorreram no dia 04 de janeiro, com valores acima de 100 mm/dia.

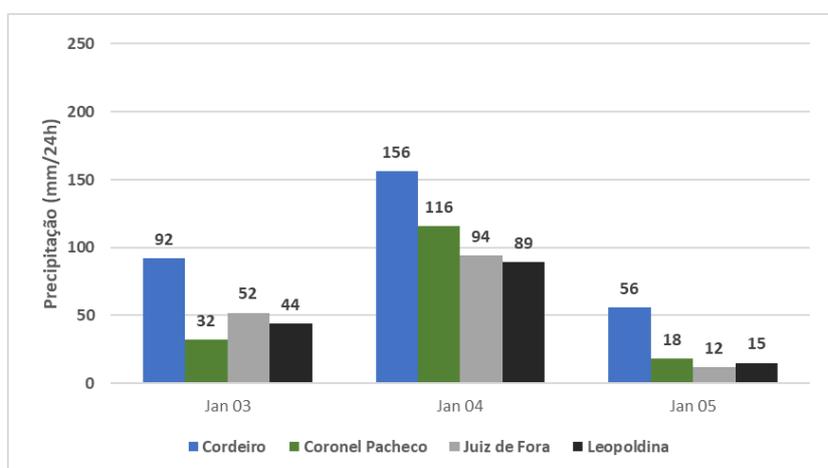


Figura 5.9 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 3 a 5 de janeiro de 2007.

Os mapas com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente nos dias 3, 4 e 5 de janeiro são mostrados na Figura 5.10. Verifica-se que em todos os dias o máximo de precipitação esteve aproximadamente na mesma localização, sendo os acumulados mais significativos registrados no dia 4 de janeiro, com valores maiores do que 100 mm/dia na área ao norte da Região Serrana do Rio de Janeiro.

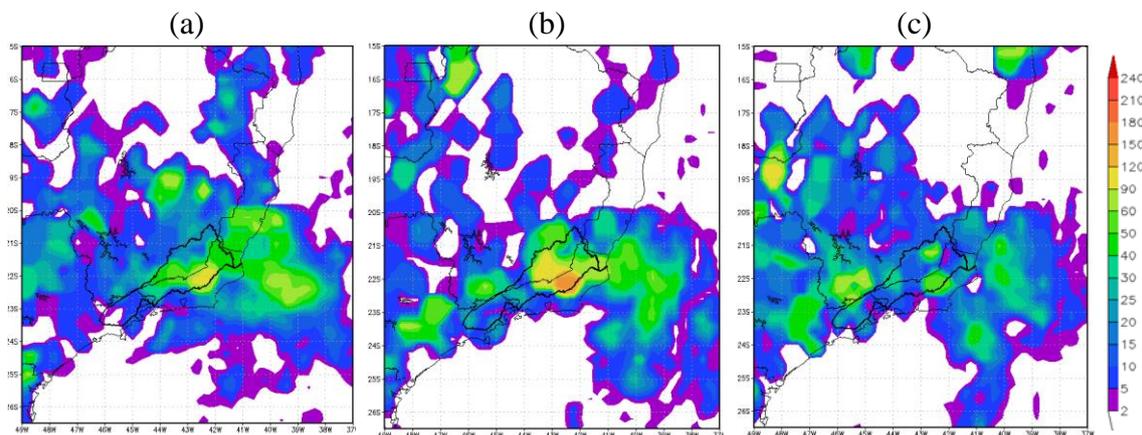


Figura 5.10 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 03/01/2007, (b) 04/01/2007 e (c) 05/01/2007. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho entre 3 e 5 de janeiro são mostradas na Figura 5.11. Observa-se a nebulosidade associada à ZCAS durante todo esse período e a formação de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), também denominado de vórtice ciclônico do tipo Palmén (Palmén, 1949), originado em latitudes extratropicais próximo à costa sul/sudeste do Brasil. A presença desse vórtice contribuiu para a intensificação da ZCAS e das chuvas fortes no Sudeste. A ZCAS se manteve ativa entre os dias 28/12/2006 e 07/01/2007, enquanto que o VCAN se estabeleceu entre os dias 03/01 e 07/01 (Climanálise, 2007).

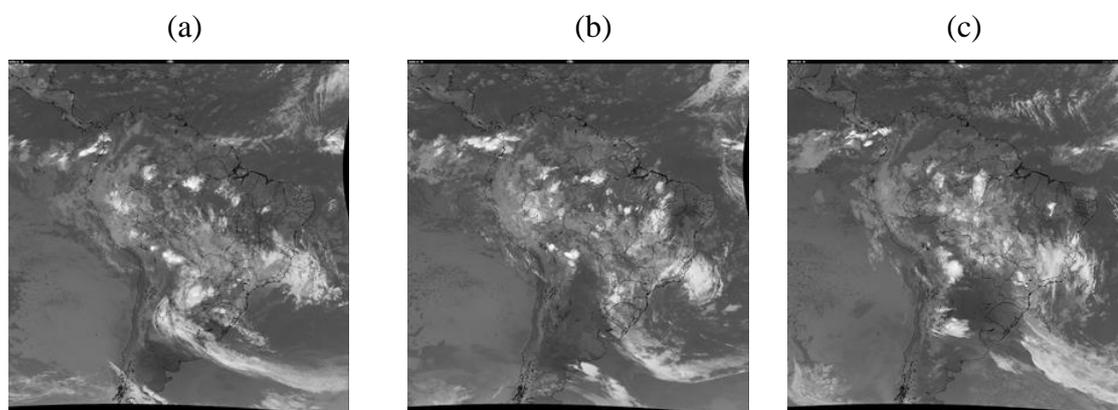


Figura 5.11 - Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 03/01/2007 – 12 UTC; (b) 04/01/2007 - 06 UTC; e (c) 05/01/2007 – 12 UTC.

A Figura 5.12 apresenta os campos meteorológicos para o dia 04/01/2007. Nota-se da Figura 5.12a, a presença de um cavado em superfície sobre a costa do RJ, com altos valores de umidade disponível sobre a Bacia. Na Figura 5.12b observa-se o forte movimento ascendente sobre todo RJ aliado a elevados valores de temperatura potencial equivalente e a presença do VCAN que se estende desde os níveis médios até altos

níveis da troposfera (Figura 5.12c). Provavelmente, neste caso a presença do VCAN embebido na ZCAS contribuiu para as fortes chuvas na Região Sudeste do Brasil.

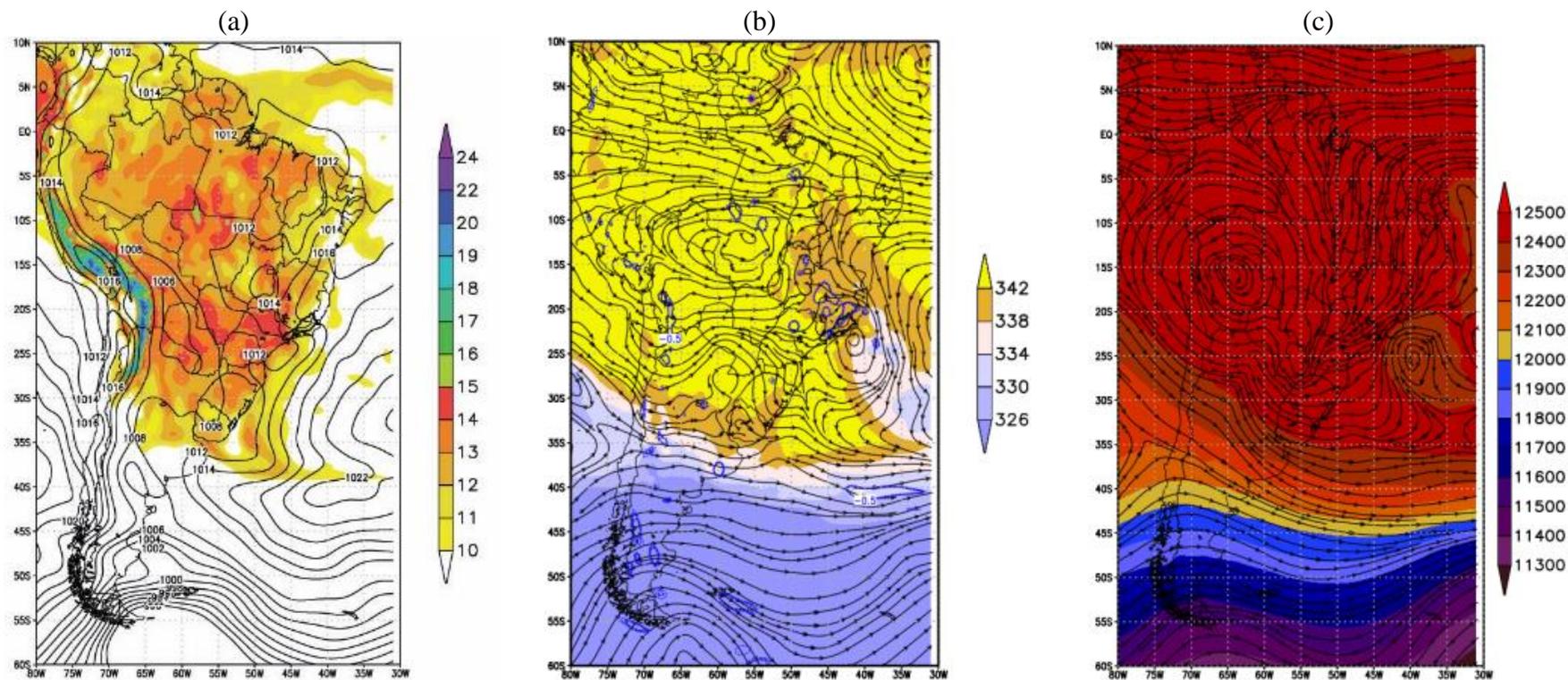


Figura 5.12 - Reanálises do dia 04/01/2007 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m), sombreado) em 200 hPa.

5.4. Caso 4

O Caso 4 ocorreu entre os dias 16 e 18 de dezembro de 2008 e atingiu a porção norte da BRPS. O maior registro de chuva diária foi de 119 mm em Leopoldina. O evento causou danos em diversos municípios, como Itaperuna, Cordeiro e Campos dos Goytacazes. Na cidade de Três Rios houve deslizamento de terra com 3 óbitos (INEA, 2014).

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.13, com acumulados significativos em ambos os dias de evento.

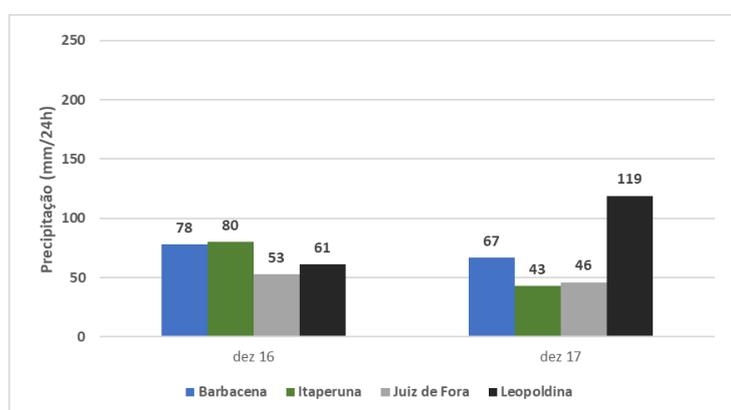


Figura 5.13 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 16 a 17 de dezembro de 2008.

Os mapas com a distribuição espacial dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente nos dias 16 e 17 de dezembro são mostrados na Figura 5.14. No dia 16 pode-se notar um máximo de precipitação sobre o sul de MG, atingindo o norte da Bacia com valores entre 60 e 90 mm e precipitação significativa também sobre o oceano. No dia 17, o máximo de chuva permanece sobre o sul de MG, estendendo-se sobre a BRPS e oceano adjacente, também com valores da ordem de 60 a 90 mm/dia na região da Bacia.

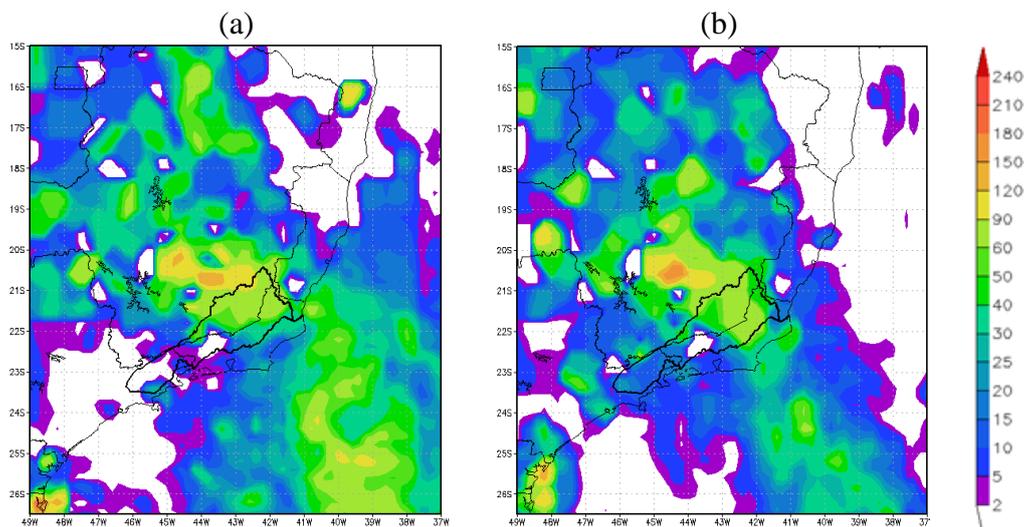


Figura 5.14 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 16/12/2008 e (b) 17/12/2008. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-10, no canal infravermelho, entre os dias 16 e 17 são mostradas na Figura 5.15, onde nota-se uma banda de nebulosidade com orientação NO-SE atingindo a maior parte da Região Sudeste do Brasil. No dia 16 observa-se bastante atividade convectiva sobre a área de estudo. A ZCAS se estabeleceu entre os dias entre 12 e 21 de dezembro de 2008 (Climanálise, 2008).

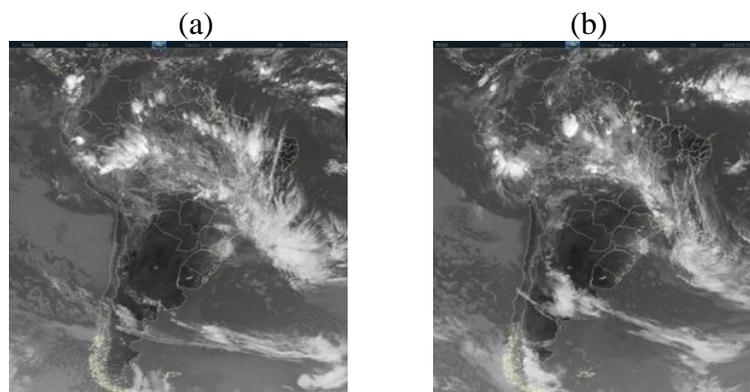


Figura 5.15- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-10: (a) 16/12/2008 – 12 UTC e (b) 17/12/2008 - 12 UTC.

A Figura 5.16 apresenta os campos meteorológicos para o dia 17/12/2008. No campo de PNMM (Figura 5.16a), nota-se a presença de um centro de baixas pressões e um cavado sobre o oceano, associado à presença da ZCAS, assim como elevados valores de umidade específica. Na Figura 5.16b, o campo de movimento vertical apresenta valores inferiores a $-0,5 \text{ Pa.s}^{-1}$ sobre o norte da Bacia e sul de Minas Gerais e o campo de linha de corrente mostra um vórtice ciclônico que se estende até 250 hPa (Figura 5.16c). Tal configuração deixa a BRPS em posição favorável para ocorrência de

instabilidades dinâmicas. Dessa forma, a configuração da ZCAS disponibilizou umidade e causou convergência e levantamento de ar sobre a porção norte da Bacia, que foram os ingredientes necessários para a ocorrência dos elevados acumulados de precipitação.

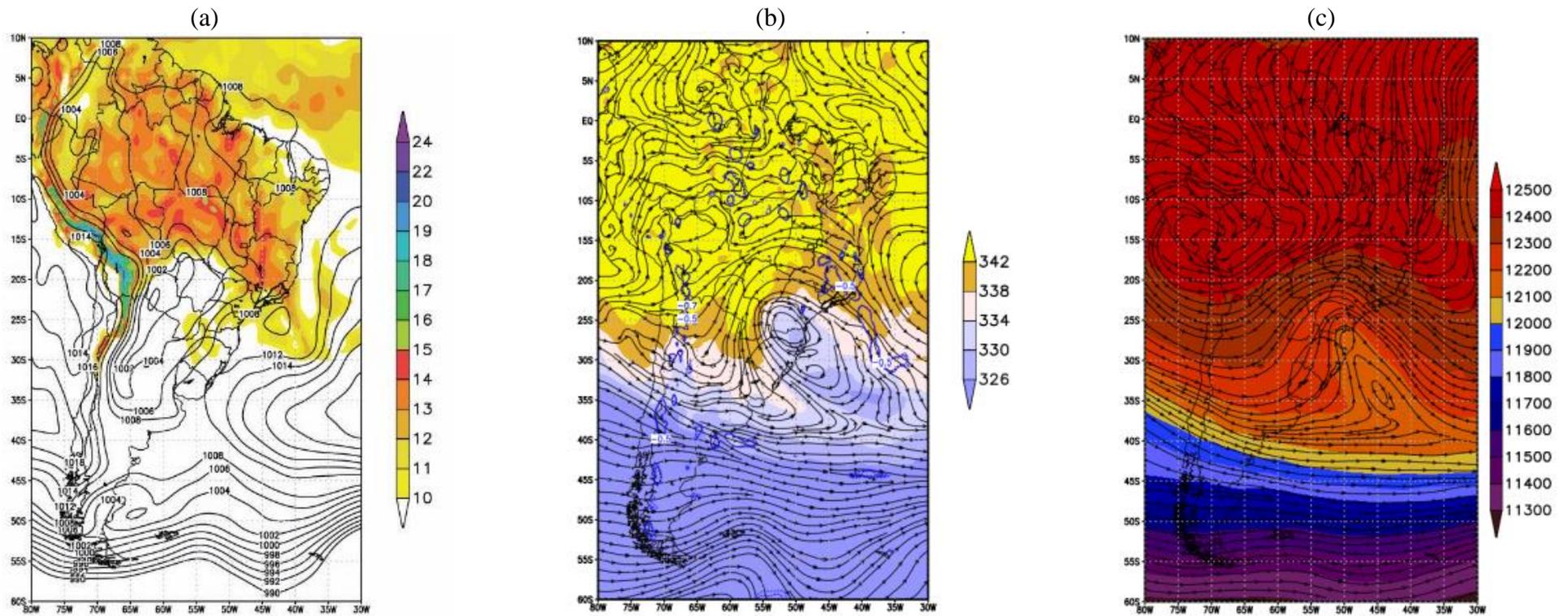


Figura 5.16 - Reanálises do dia 17/12/2008 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg⁻¹, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s⁻¹, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.5. Caso 5

O Caso 5 ocorreu entre os dias 10 e 13 de novembro de 2009 e atingiu a Região Serrana do Rio de Janeiro e a porção norte da BRPS. O evento causou danos e deslizamentos de terra na Via Dutra que resultaram na morte de 3 trabalhadores (INEA, 2014).

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.17, com o maior acumulado, ocorrido em Paty do Alferes, registrado no dia 11.

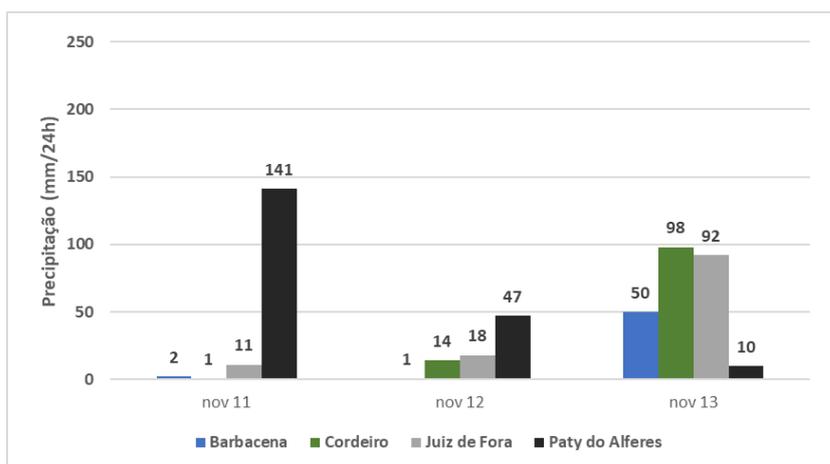


Figura 5.17 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 11 a 13 de novembro de 2009.

Os mapas com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente entre os dias 11 e 13 de novembro são mostrados na Figura 5.18. No dia 11, pode-se notar que o MERGE não foi capaz de configurar o máximo de precipitação ocorrida, provavelmente devido ao caráter isolado da chuva, apresentando valores máximos da ordem de 30 a 40 mm na região da Bacia. No dia 12, observa-se um núcleo de precipitação intensa nos domínios da BRPS, que se desloca para norte no dia 13, atingindo a Região Serrana do Rio de Janeiro.

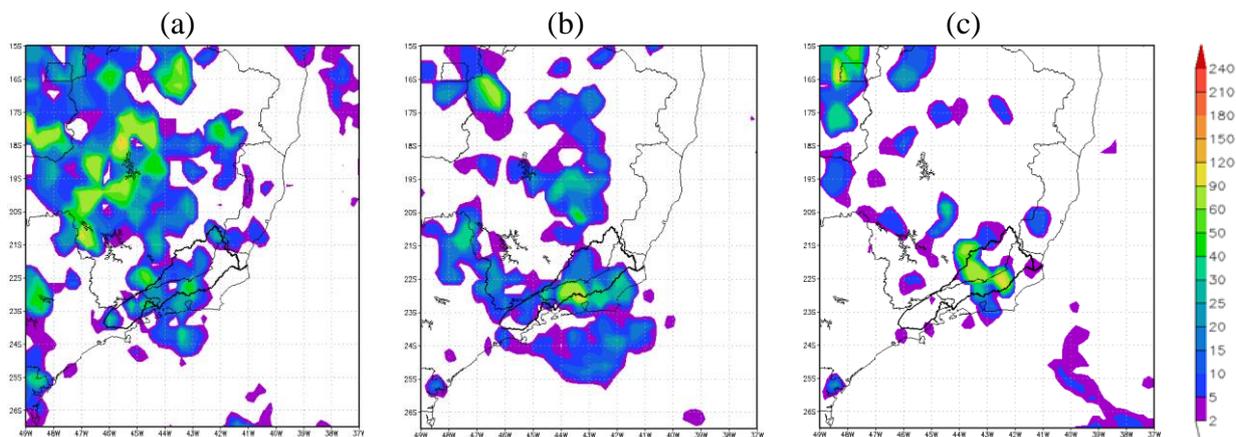


Figura 5.18 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 11/11/2009, (b) 12/11/2009 e (c) 13/11/2009. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-10, no canal infravermelho, entre os dias 11 e 13 são mostradas na Figura 5.19. É possível notar uma banda de nebulosidade sobre a Região Sudeste, porém sem um padrão organizado durante o período. Sobre o oceano é possível identificar o ramo frio de um sistema frontal que passara pela região Sul do Brasil poucos dias antes.

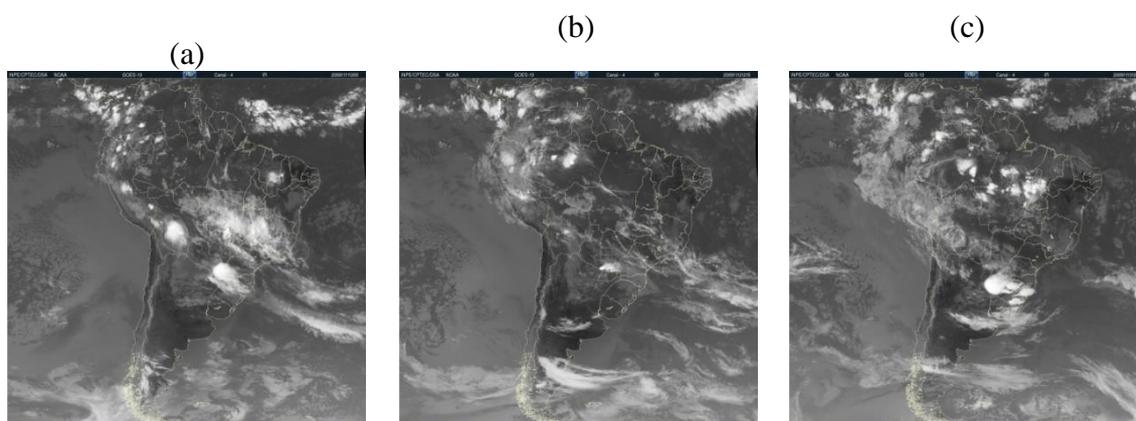


Figura 5.19- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-10: (a) 11/11/2009 - 12UTC; (b) 12/11/2009 - 12 UTC e (c) 13/11/2009 - 12 UTC.

A Figura 5.20 apresenta os campos meteorológicos para o dia 11/11/2009. No campo de umidade específica em 850 hPa (Figura 5.20a) pode-se notar valores bastante elevados sobre o Brasil central e valores menores, porém ainda elevados, sobre toda região da BRPS. Em médios níveis (Figura 5.20b), nota-se um cavado na região Sul do Brasil e oceano adjacente, após a passagem de um sistema frontal. Em altos níveis (Figura 5.20c), observa-se predomínio de escoamento anticiclônico. Dessa forma, a passagem de um sistema frontal pela região Sul do Brasil causou instabilidade e

possibilitou a organização da convecção sobre o continente. Como consequência, diversas áreas de instabilidade atuaram sobre o Brasil central e Região Sudeste causando chuva significativa em diversas localidades.

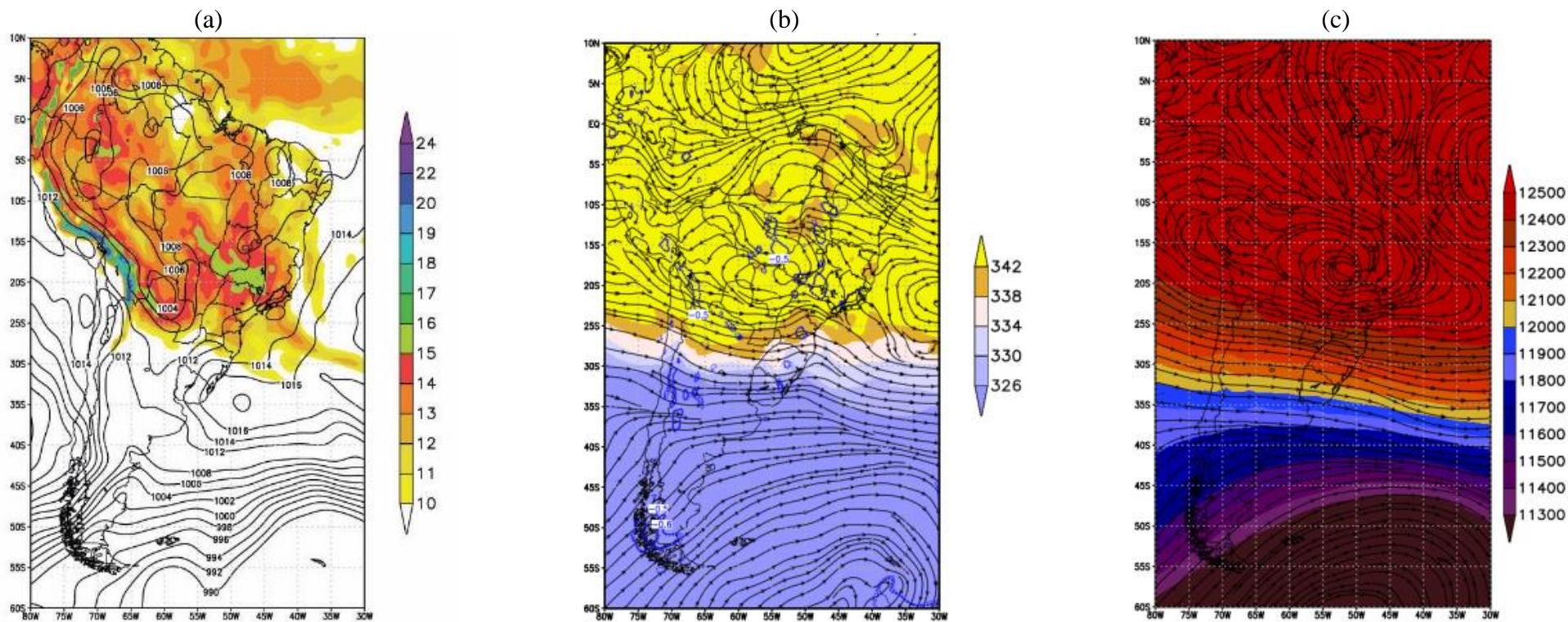


Figura 5.20 - Reanálises do dia 11/11/2009 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.6. Caso 6

O Caso 6 ocorreu entre os dias 28 de dezembro de 2009 e 1º de janeiro de 2010 e atingiu a Região Serrana do Rio de Janeiro e algumas cidades fora do domínio da Bacia. O maior registro de chuva em 24 h foi de 160 mm em Cunha. O evento causou deslizamento de terra em Ilha Grande (Angra dos Reis – RJ), atingindo uma pousada e causando a morte de 35 pessoas durante a virada do ano. Na região do Vale do Paraíba ocorreram enchentes em Guaratinguetá, Aparecida, São Luiz do Paraitinga e Cunha; nesse último com 5 pessoas soterradas (INEA, 2014).

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.21. Pode-se notar que houve registro de precipitação significativa nos dois dias selecionados, com valores máximos no dia 1º de janeiro de 2010.

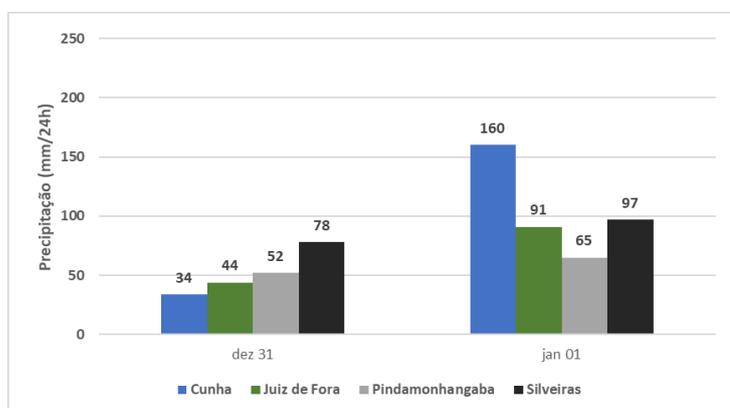


Figura 5.21 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 31 de dezembro de 2009 a 01 de janeiro de 2010.

Os mapas com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente entre os dias 31/12 e 01/01 são mostrados na Figura 5.22. Pode-se notar os elevados índices ocorridos no dia 31, nas regiões serrana e metropolitana do Rio de Janeiro, enquanto que no dia 1º os maiores valores estão sobre o sul de MG.

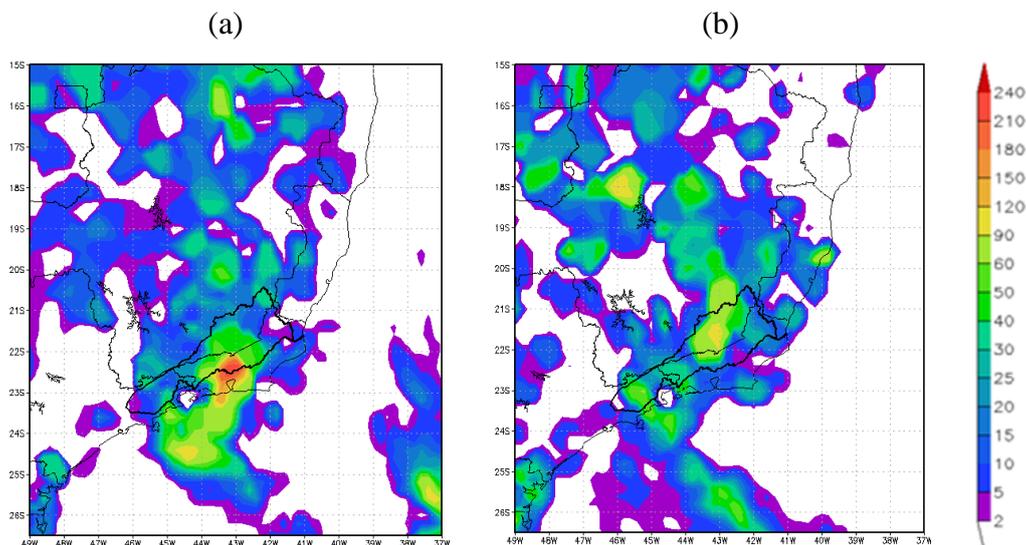


Figura 5.22 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 31/12/2009 e (b) 01/01/2010. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-12, no canal infravermelho, entre os dias 31/12 e 01/01 são mostradas na Figura 5.23. É possível observar bastante nebulosidade sobre o Brasil, e a presença do VCN. Ressalta-se, também, a presença de SCMs e uma baixa pressão sobre o Rio de Janeiro. Na região de Baía Blanca (Argentina) observa-se uma frente fria no dia 1º que contribuiu para instabilização da atmosfera.

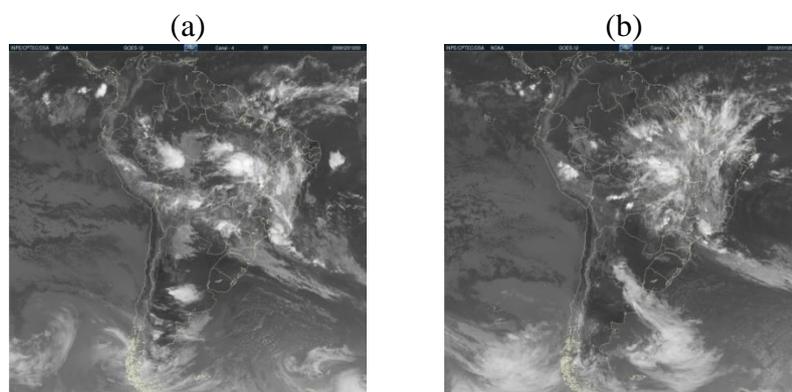


Figura 5.23- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 31/12/2009 – 12 UTC e (b) 01/01/2010 - 12 UTC.

A Figura 5.24 apresenta os campos meteorológicos para o dia 31/12/2009. No campo de umidade específica em 850 hPa (Figura 5.24a) nota-se um corredor de umidade desde a região Amazônica, passando pelo Sudeste do Brasil e estendendo-se até o oceano adjacente. Em médios níveis (Figura 5.24b), observa-se pronunciado movimento ascendente sobre a região da BRPS e valores elevados de temperatura potencial equivalente sobre toda a região central, passando pelo Sudeste e estendendo-se pelo Atlântico. Na Figura 5.24c observa-se a AB estendendo-se sobre todo o

Sul/Sudeste e o VCN bem configurado. Dessa forma, este caso foi causado pela presença de SCMs formados dentro da massa de ar úmido e instável que dominava a Região Sudeste do Brasil.

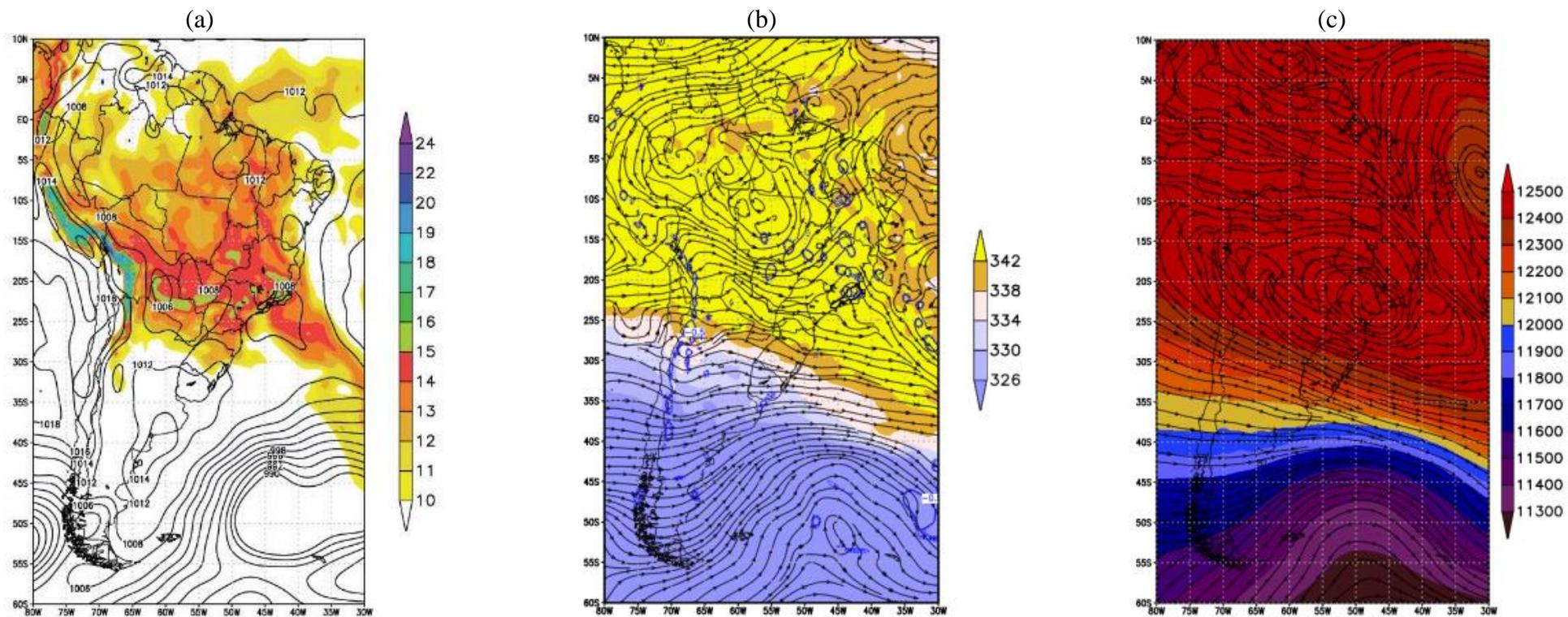


Figura 5.24 - Reanálises do dia 31/12/2009 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa (g.kg^{-1} , sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical (Pa.s^{-1} , linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.7. Caso 7

O Caso 7 ocorreu entre os dias 27 e 28 de dezembro de 2010 e atingiu toda a BRPS. O maior registro de chuva diária foi de 72 mm em Itaperuna. O evento causou transbordamento de rios, enchentes e alagamentos em diversas cidades, principalmente em Itaperuna (INEA, 2014) (<http://radioitaperunafm.com/site/em-itaperuna-nivel-do-rio-muriae-esta-70-cm-acima-da-cota-de-transbordo/>).

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.25. Neste evento os acumulados foram moderados, porém conforme descrito na metodologia, ficaram acima do percentil 99 das estações. Os máximos foram registrados no dia 27.

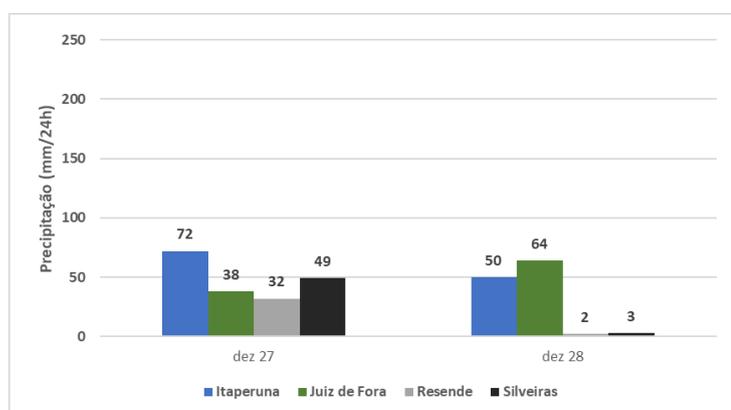


Figura 5.25 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 27 a 28 de dezembro de 2010.

Os mapas com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente nos dias 27 e 28 de dezembro são mostrados na Figura 5.26. Em ambos os dias pode-se notar que há ocorrência de chuva em todo o domínio da BRPS, principalmente na região do sul de MG e centro-sul fluminense.

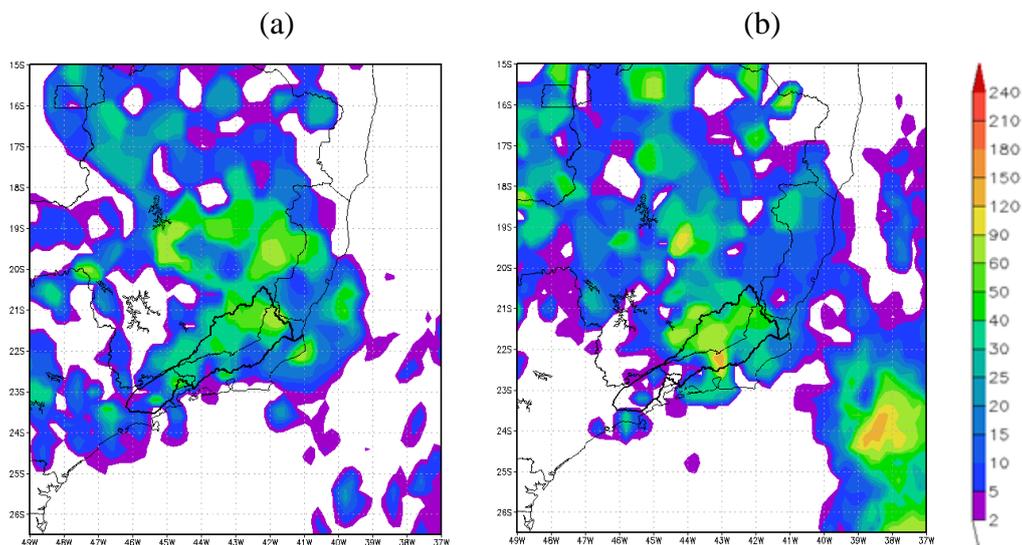


Figura 5.26 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 27/12/2010 e (b) 28/12/2010. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-12, no canal infravermelho, entre os dias 27 e 28 são mostradas na Figura 5.27. É possível notar uma banda de nebulosidade com orientação NO-SE, típico de ZCAS com características oceânicas (Carvalho *et al.*, 2004), que se estabeleceu entre os dias entre 27 de dezembro de 2010 e 7 de janeiro de 2011 (Climanálise, 2011).

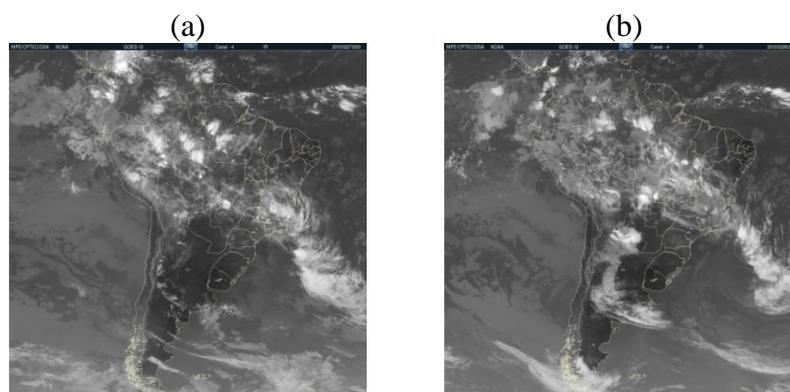


Figura 5.27- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 27/12/2010 – 12 UTC e (b) 28/12/2010 - 12 UTC.

A Figura 5.28 apresenta os campos meteorológicos para o dia 28/12/2010. No campo de umidade específica (Figura 5.28a), nota-se elevados valores sobre grande parte do Brasil e oceano adjacente, devido ao transporte de umidade característico da ZCAS. Em médios níveis (Figura 5.28b) observa-se forte movimento vertical ascendente sobre a região da BRPS. No campo de linha de corrente em 200 hPa (Figura 5.28c) nota-se o escoamento característico da ZCAS, com movimento anticiclônico relacionado à AB e a presença do cavado do Nordeste. Dessa forma, este caso ocorreu devido à atuação da ZCAS que, com alta disponibilidade de umidade e convergência, propiciou as condições para ocorrência das chuvas.

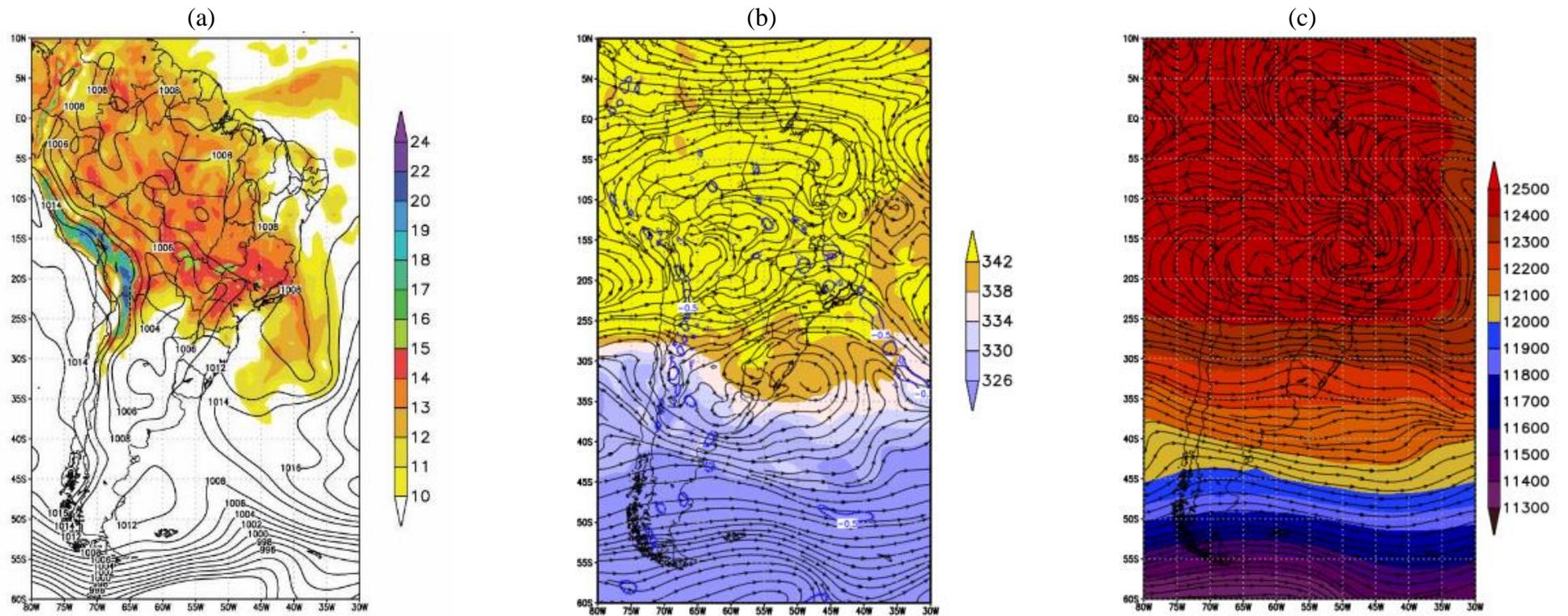


Figura 5.28 - Reanálises do dia 28/12/2010 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.8. Caso 8

O Caso 8 ocorreu entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011 e atingiu as porções Sul e Médio Paraíba. O maior registro de chuva diária foi de 243 mm em Ypu. O caso foi considerado pela ONU um dos dez piores deslizamentos do mundo desde 2000 (<https://www.unisdr.org/archive/24792>). Houve um total de 916 óbitos, 345 pessoas desaparecidas e mais de 30.000 desalojados ou desabrigados na Região Serrana do Rio de Janeiro. Estima-se um prejuízo financeiro de 1 bilhão de dólares (<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/chuvas-no-rj/noticia/2011/01/tragedia-na-regiao-serrana-do-rj-ja-deixa-mais-de-500-mortos.html>).

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.29. Nota-se valores bastante elevados de precipitação, nas 4 estações selecionadas, principalmente no dia 12.

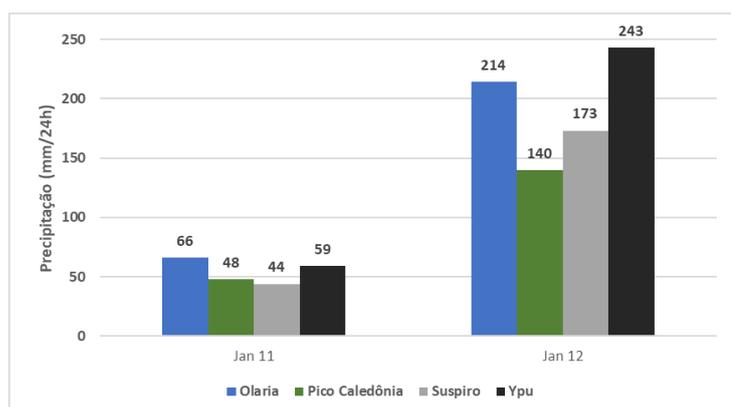


Figura 5.29 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 11 a 12 de janeiro de 2011.

Os mapas com a distribuição espacial dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente nos dias 11 e 12 de janeiro são mostrados na Figura 5.30. A figura mostra precipitação moderada a forte sobre a Região Serrana do Rio de Janeiro. Neste caso também o MERGE não foi capaz de configurar adequadamente os máximos de precipitação, exibindo máximos entre 90 e 120 mm/dia sobre a BRPS.

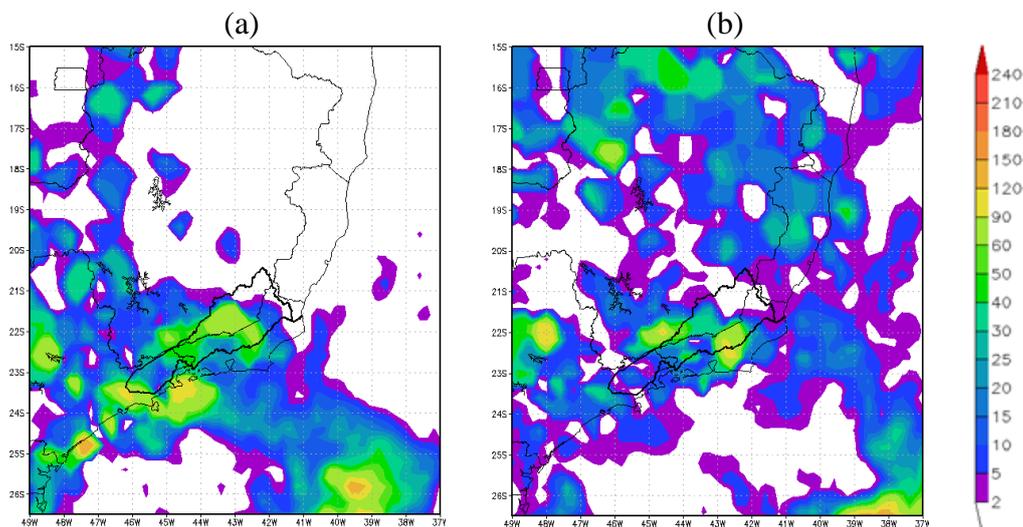


Figura 5.30- Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 11/01/2011 e (b) 12/01/2011. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-12, no canal infravermelho, entre os dias 11 e 12 são mostradas na Figura 5.31. Pode-se notar a presença de um sistema frontal, que se deslocou lentamente pela região, com um ciclone associado bem definido. A presença da ZCAS sobre o continente e oceano adjacente também pode ser notada.

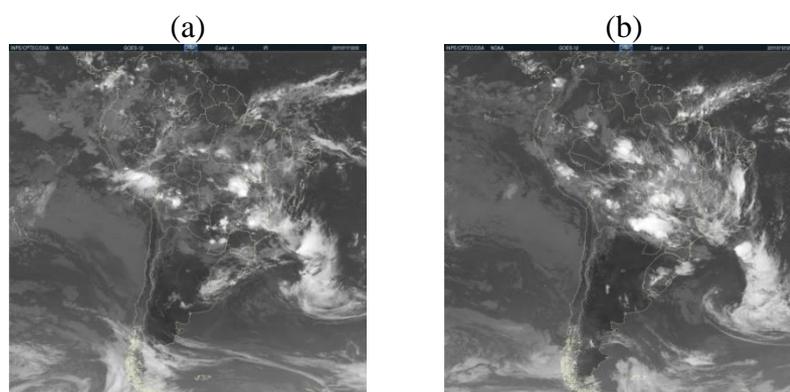


Figura 5.31- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 11/01/2011 – 12 UTC e (b) 12/01/2011 - 12 UTC.

A Figura 5.32 apresenta os campos meteorológicos para o dia 12/01/2011. Na Figura 5.32a verifica-se a alta disponibilidade de umidade sobre todo Brasil central e oceano adjacente, assim como a presença de um sistema de baixa pressão junto à costa associado com a passagem de um sistema frontal. Em médios níveis (Figura 5.32b), nota-se regiões de forte movimento vertical ascendente sobre o Brasil central e sobre a BRPS e ainda a presença do vórtice ciclônico. Na Figura 5.32c observa-se a presença da AB que, com divergência e vorticidade acentuadas (campos não apresentados), provocou a intensificação da convergência em baixos níveis. O vórtice ciclônico

descrito anteriormente estende-se por toda a troposfera e nos altos níveis situa-se sobre o Atlântico, a leste do Uruguai. Dessa forma, o forte movimento ascendente, juntamente com a atmosfera aquecida e a grande disponibilidade de umidade forneceram condições favoráveis em escala sinótica para a ocorrência das fortes chuvas.

A região, com orografia complexa, contribuiu para a instabilização da atmosfera através do levantamento orográfico e liberação de calor latente. A precipitação contínua sobre a região nos dias anteriores deixou o solo saturado e corroborou com a ocorrência de deslizamentos. Nos vales, com a dificuldade de escoamento de água, houve inúmeras enchentes.

De acordo com Marengo e Alves (2012), o evento se deu devido à atuação da ZCAS e pelo sinal favorável à convecção e precipitação da oscilação de Madden-Julian. O padrão de grande escala foi caracterizado pelo enfraquecimento da La Niña no Pacífico Equatorial, enquanto que sobre o Atlântico Sul, as temperaturas da superfície do mar estavam cerca de 2°C acima do normal.

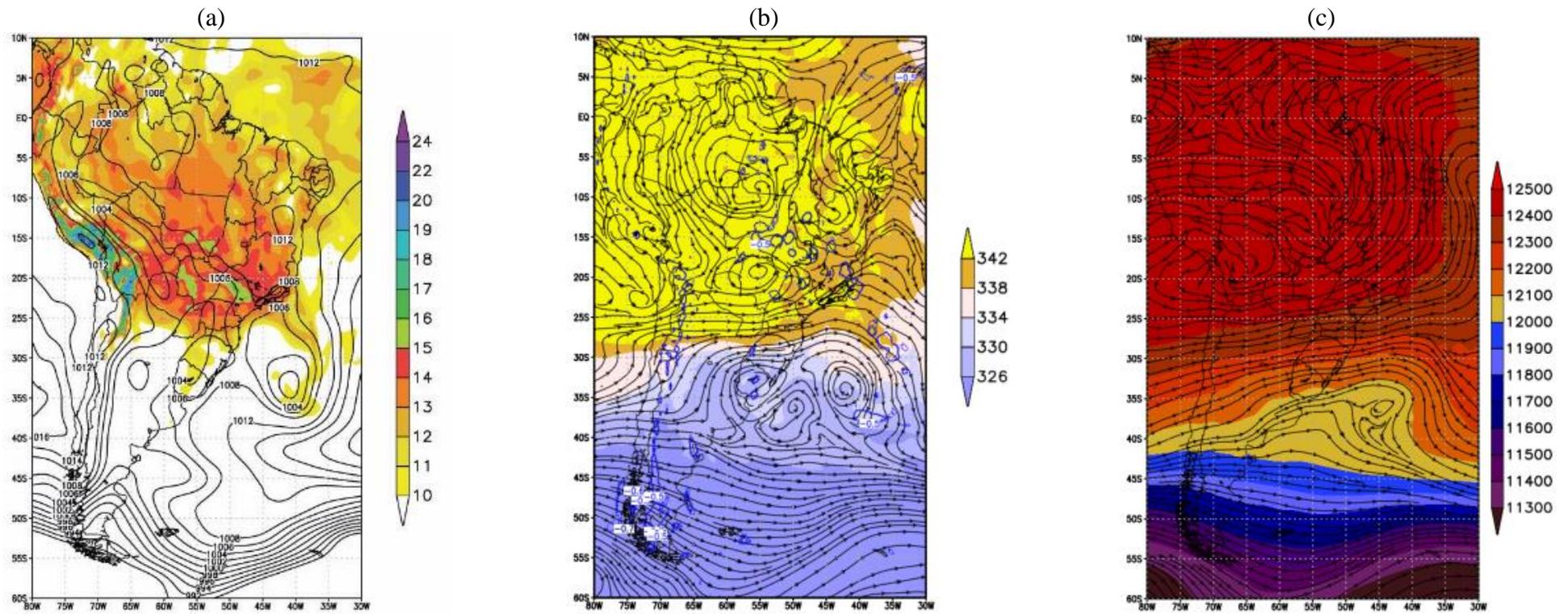


Figura 5.32 - Reanálises do dia 12/01/2011 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.9. Caso 9

O Caso 9 ocorreu entre os dias 27 e 28 de novembro de 2011 e atingiu a porção norte da BRPS. O maior registro de chuva diária foi de 114 mm em Leopoldina. As chuvas causaram deslizamentos de terra, alagamentos e transbordamento de rio principalmente em Cordeiro e Juiz de Fora (<https://www.correiodobrasil.com.br/jf-tem-150-ocorrencias-devido-a-chuva-deslizamentos-de-muro-e-casa-foram-registrados/>). De acordo com Climanálise (2011) um evento de ZCAS bem caracterizado estabeleceu-se entre os dias 22 e 29 de novembro de 2011.

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.33, onde nota-se que o dia 27 foi o mais chuvoso.

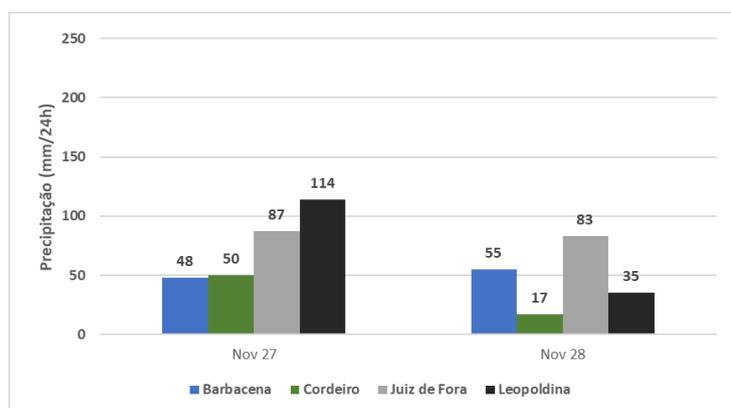


Figura 5.33 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 27 a 28 de novembro de 2011.

Os mapas com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente nos dias 27 e 28 de novembro são mostrados na Figura 5.34. Pode-se notar um máximo de chuva na porção norte da Bacia, o sul de MG e norte do RJ, além de uma larga banda de precipitação sobre o oceano.

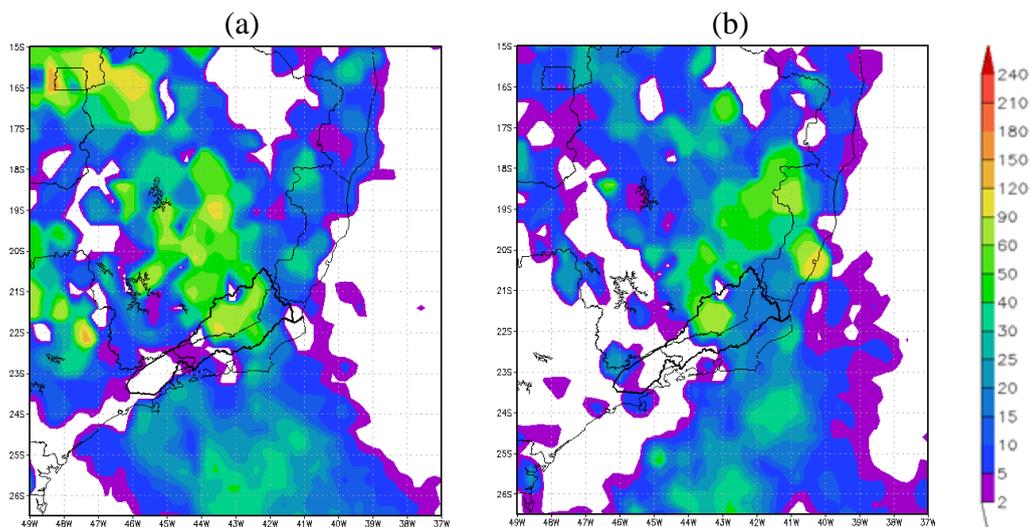


Figura 5.34 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 27/11/2011 e (b) 28/11/2011. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque.

As imagens do Satélite GOES-12, no canal infravermelho, entre os dias 27 e 28 são mostradas na Figura 5.35. Pode-se notar a presença de uma banda de nebulosidade estendendo-se da Região Norte, passando pelo Sudeste atravessando a porção norte da Bacia, até o oceano.

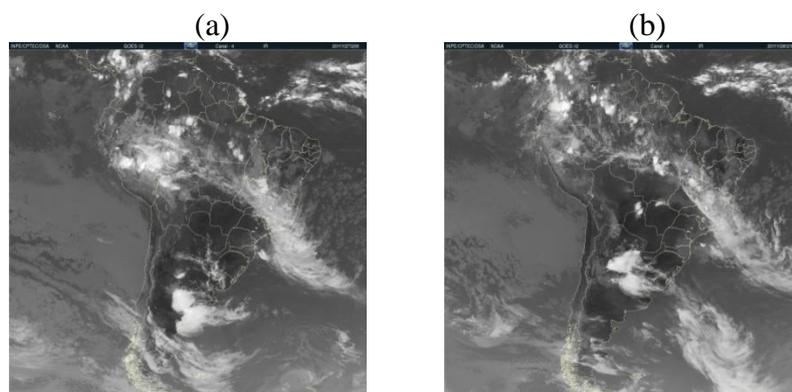


Figura 5.35- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 27/11/2011 – 12 UTC e (b) 28/11/2011 - 12 UTC.

A Figura 5.36 apresenta os campos meteorológicos para o dia 27/11/2011. No campo de umidade específica em 850 hPa (Figura 5.36a) nota-se a grande disponibilidade de umidade sobre a região Amazônica, estendendo-se até a Região Sudeste. No campo de PNMM observa-se a presença de um cavado sobre a BRPS, com um centro de baixas pressões a leste de São Paulo. Em médios níveis (Figura 5.36b), nota-se regiões de forte movimento vertical ascendente sobre parte da BRPS, forte gradiente de temperatura potencial equivalente e circulação ciclônica sobre a BRPS. Além disso, observa-se um cavado em 500 hPa a leste da Região Sul do Brasil. No campo de linha de corrente em 200 hPa (Figura 5.36c), nota-se a presença da AB, do

cavado do Nordeste do Brasil, além do cavado sobre a Região Sul do Brasil. Dessa forma, as chuvas foram causadas durante um evento de ZCAS, intensificado pela presença de um vórtice ciclônico nos níveis baixos e médios e um cavado nos altos níveis.

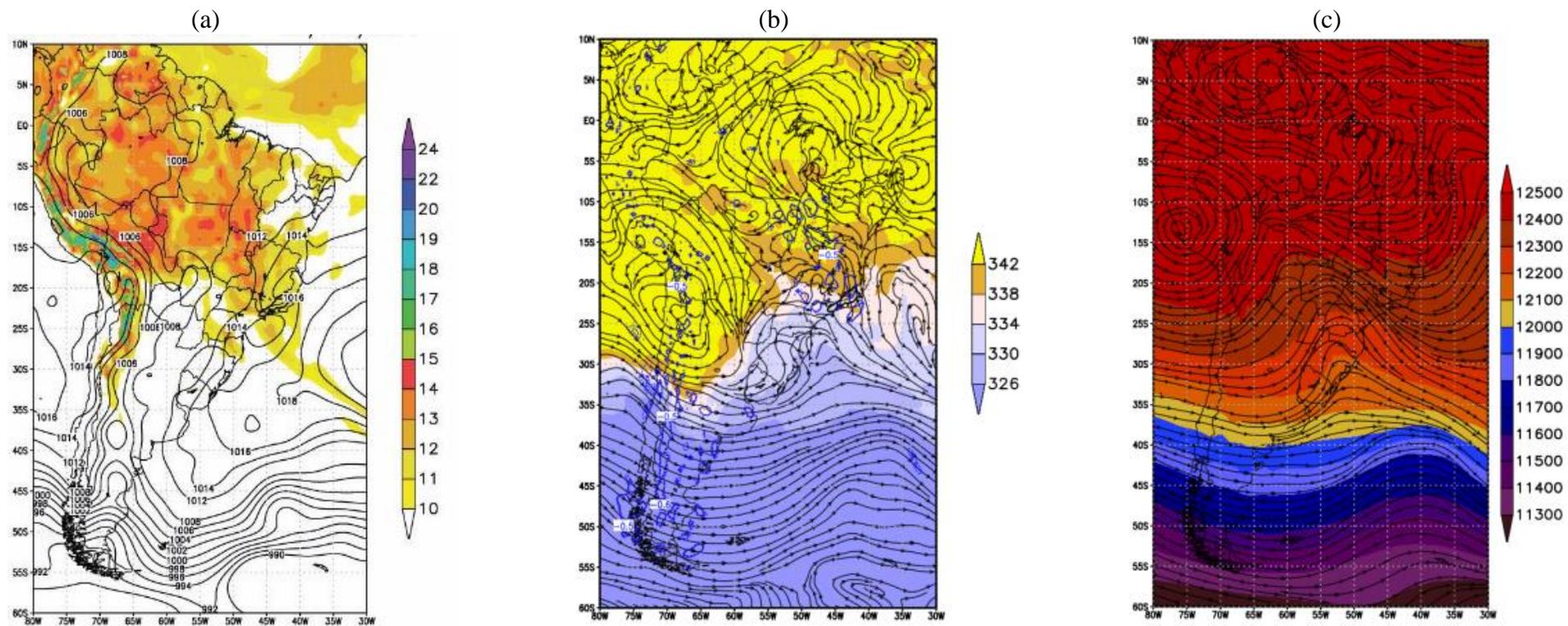


Figura 5.36 - Reanálises do dia 27/11/2011 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m), sombreado) em 200 hPa.

5.10. Caso 10

O Caso 10 ocorreu entre os dias 1º e 9 de janeiro de 2012 e atingiu a todo o domínio da Bacia, com maiores acumulados na porção norte. O maior registro de chuva diária foi de 114 mm em Cordeiro no dia 3 de janeiro. As chuvas causaram alagamentos e deslizamentos deixando vários desalojados (INEA, 2014).

A precipitação observada na Bacia é mostrada na Figura 5.37. Pela figura, pode-se notar que em ambos os dias houve acumulados significativos de precipitação, sendo mais intensos no dia 3 de janeiro.

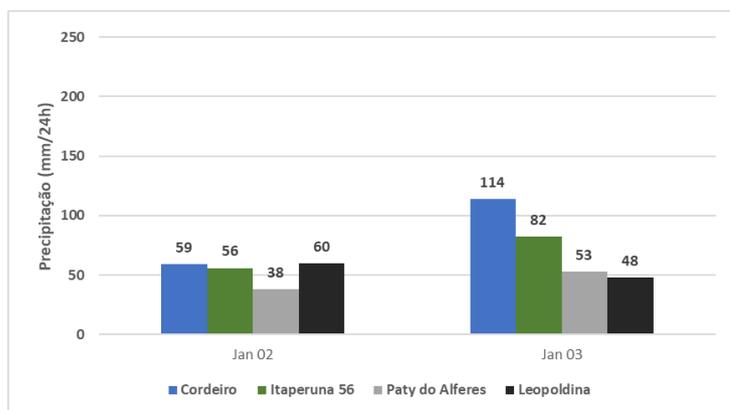


Figura 5.37 - Totais pluviométricos diários (mm/dia) observados na BRPS no período de 2 a 3 de janeiro de 2012.

Os mapas com a distribuição dos acumulados diários de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil e oceano adjacente nos dias 2 e 3 de janeiro são mostrados na Figura 5.38. Nota-se regiões de máximos de precipitação sobre toda a região norte e central da Bacia. No dia 2, as regiões mais chuvosas apresentam valores superiores a 120 mm/dia.

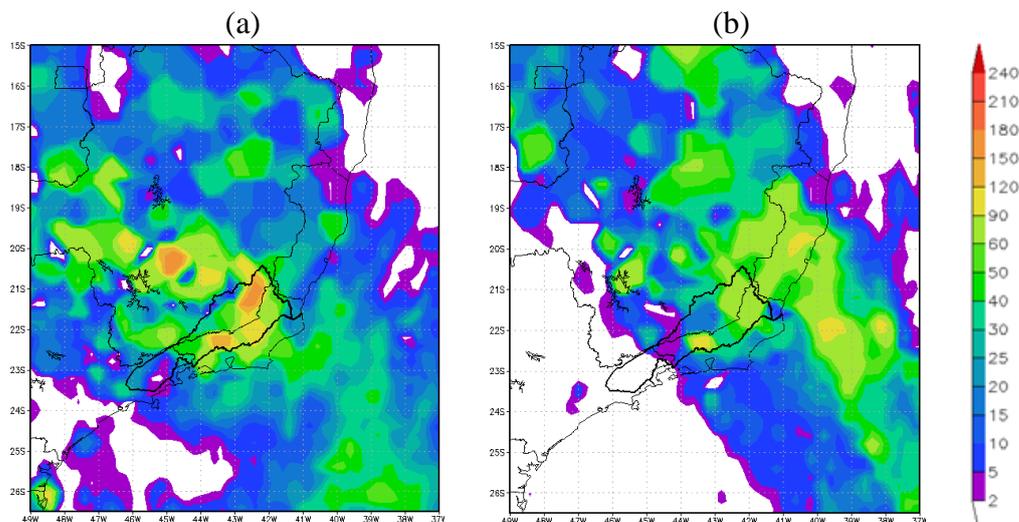


Figura 5.38 - Mapas com precipitação acumulada em 24 h (mm/dia) observada às 12 UTC dos dias: (a) 02/01/2012 e (b) 03/01/2012. O contorno da Bacia do Rio Paraíba do Sul aparece em destaque

As imagens do Satélite GOES-12, no canal infravermelho, entre os dias 2 e 3 são mostradas na Figura 5.39. Pode-se notar a presença de uma banda de nebulosidade com orientação NO-SE, típica de ZCAS, com a frente fria acoplada e centro ciclônico bem definido.

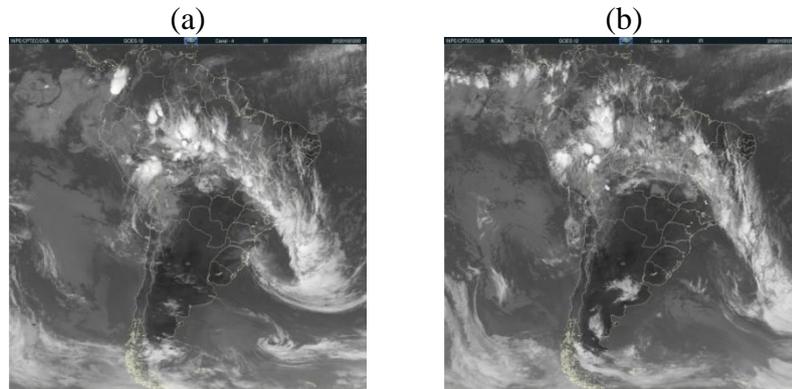


Figura 5.39- Imagens do canal Infravermelho do Satélite GOES-12: (a) 02/01/2012 – 12 UTC e (b) 03/01/2012 - 12 UTC.

A Figura 5.40 apresenta os campos meteorológicos para o dia 02/01/2012. Na Figura 5.40a nota-se a presença de um sistema de baixa pressão junto à costa, que se estende por toda a troposfera (ver Figura 5.40b e c) e a alta disponibilidade de umidade estendendo-se desde a região Amazônica até o oceano, característicos da ZCAS. No campo de movimento vertical (Figura 5.40b) nota-se forte movimento ascendente sobre parte da BRPS e toda região a leste da circulação ciclônica. Em altos níveis (Figura 5.40c) observa-se a circulação anticiclônica da AB, o cavado do Nordeste e presença do vórtice ciclônico sobre o oceano, próximo à costa sul do Brasil. A ZCAS se manteve configurada entre 1º e 8 de janeiro de 2012 (Climanálise, 2012).

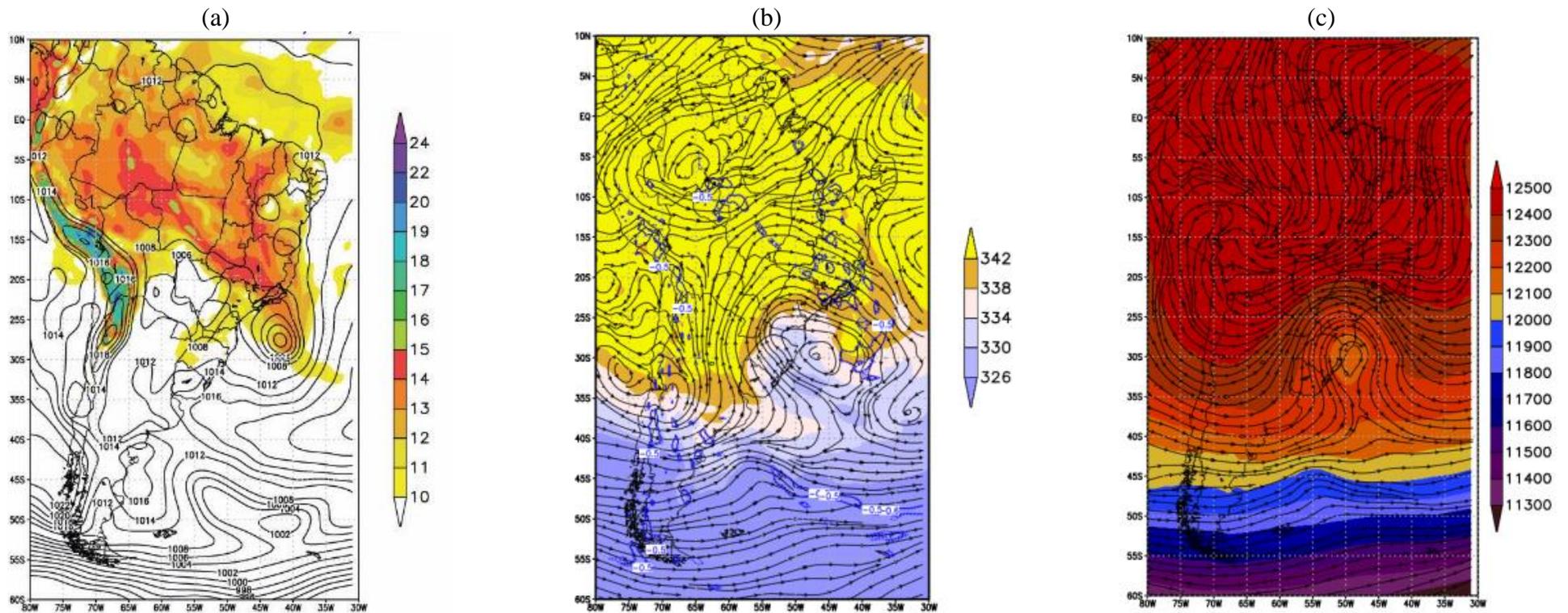


Figura 5.40 - Reanálises do dia 02/01/2012 – 1200 UTC: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa, linhas) e umidade específica em 850 hPa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, sombreado); b) linha de corrente (setas), movimento vertical ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, linhas azuis) e temperatura potencial equivalente (K, sombreado) em 500 hPa e c) linha de corrente (setas) e altura geopotencial (m, sombreado) em 200 hPa.

5.11. Resumo dos dez casos

A Tabela.5.1 mostra um resumo dos casos estudados neste trabalho. Pode-se notar que 8 dos 10 casos ocorreram durante eventos de ZCAS, e os outros dois foram provocados por instabilidades isoladas. Como já destacados por outros pesquisadores, a ZCAS é o principal sistema responsável pelas chuvas fortes na Região Sudeste do Brasil durante o período do verão (Carvalho *et al.*, 2002; Dereczynski *et al.*, 2009; Seluchi e Chou, 2009). Dos 8 eventos de ZCAS listados, 5 tiveram a presença de vórtices ciclônicos embebidos, sendo que em um deles (caso 3) houve a presença do VCAN do tipo Palmén. De acordo com Quadro (2012), os vórtices ciclônicos são gerados dentro de um ambiente estratiforme na região da ZCAS, absorvendo a umidade e acelerando os ventos na vertical, promovendo intensa precipitação e, como consequência, afetando drasticamente as regiões atingidas. Dessa forma, os eventos severos aqui estudados estão relacionados a sistemas meteorológicos de baixa previsibilidade embebidos na ZCAS, e a previsão desses apresenta alto grau de dificuldade. Soma-se a esse fato a topografia complexa de grande parte da Bacia, principalmente das regiões serranas, que se mostraram determinantes para a acentuação da precipitação em diversos eventos.

Tabela.5.1 - Resumo dos 10 eventos estudados neste trabalho.

Nº	Período do Evento	Maior Total Pluviométrico Diário (mm)	Estação com Maior Total Pluviométrico Diário (mm)	Sistema Meteorológico Atuante
1	01-05/01/2000	192	Resende	ZCAS/vórtice ciclônico
2	04/03/2005	95	Cordeiro	ZCAS
3	03-05/01/2007	158	Cordeiro	ZCAS/VCAN
4	16-18/12/2008	119	Leopoldina	ZCAS/vórtice ciclônico
5	10-13/11/2009	141	Paty do Alferes	Áreas de instabilidade
6	28/12/2009-01/01/2010	160	Cunha	Áreas de instabilidade (SCMs)
7	27-28/12/2010	72	Itaperuna	ZCAS
8	11-12/01/2011	243	Ypu	ZCAS/vórtice ciclônico
9	27-28/11/2011	114	Leopoldina	ZCAS/vórtice ciclônico
10	01-09/01/2012	114	Cordeiro	ZCAS/vórtice ciclônico

6. AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES POR CONJUNTO

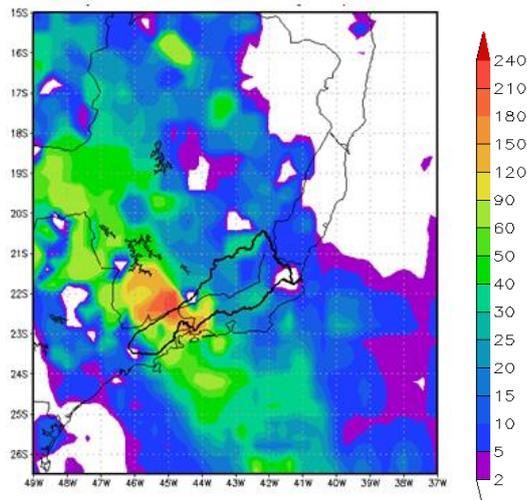
Neste capítulo são apresentadas as avaliações objetiva e subjetiva dos 10 casos de chuvas intensas estudados neste trabalho.

6.1. Avaliação Subjetiva

A avaliação subjetiva é elaborada confrontando-se os campos de precipitação simulados pelos membros do modelo Eta-5km com 48 e 72 h de antecedência para o dia mais chuvoso de cada evento com os campos de precipitação observada (MERGE). A Figura 6.1 mostra a precipitação simulada por cada membro do conjunto com 48 h de antecedência e os dados observados (MERGE) para cada caso.

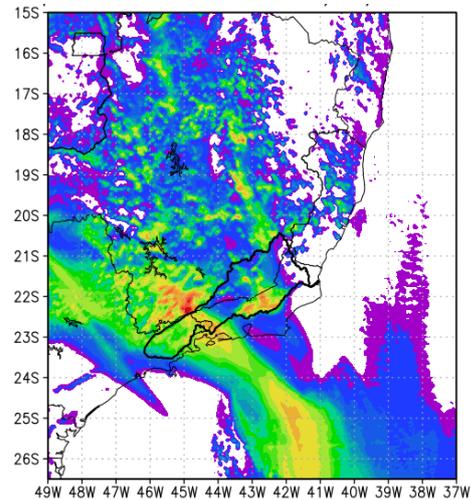
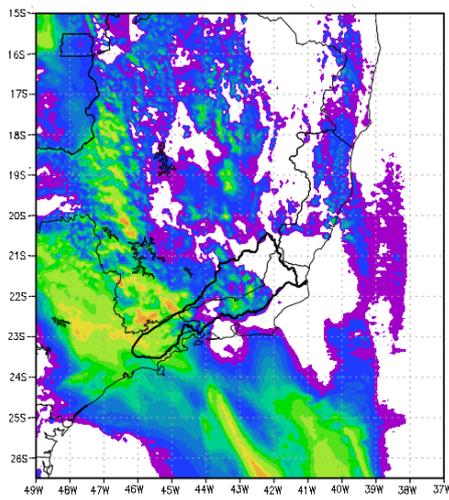
Caso 1 – 03/01/2000

(a) OBS



(b) KF

(c) KFMX



(d) CNTRL

(e) ZHAO

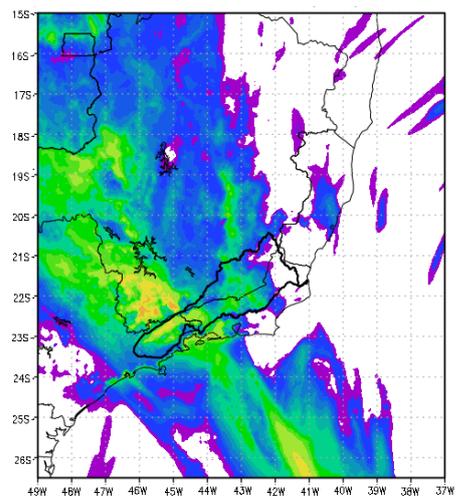
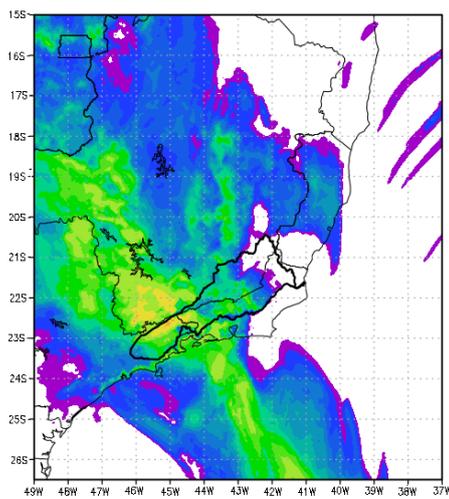
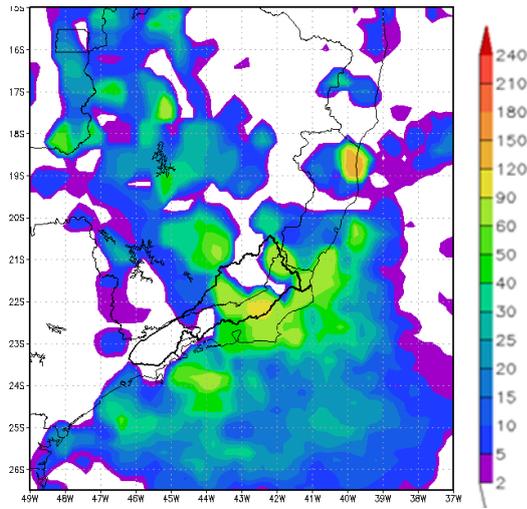


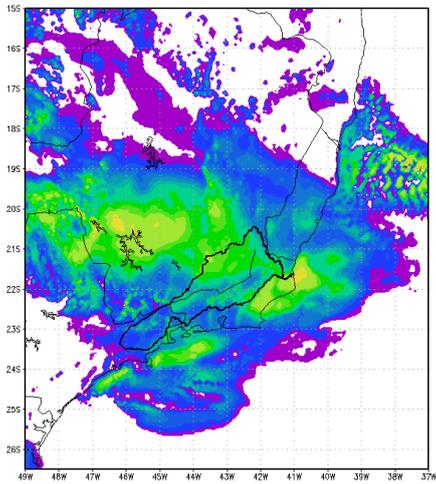
Figura 6.1 - Precipitação (mm/dia): (a) Observada (MERGE) e simulada com modelo Eta-5km com 48 h de antecedência, pelos membros (b) KF, (c) KFMX, (d) CNTRL, e (e) ZHAO para os 10 casos de chuvas intensas na BRPS.

Caso 2 – 04/03/2005

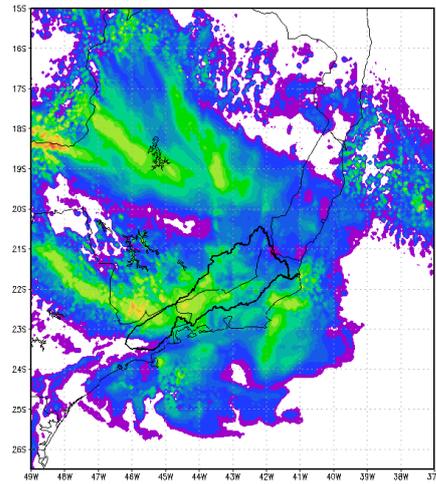
(a) OBS



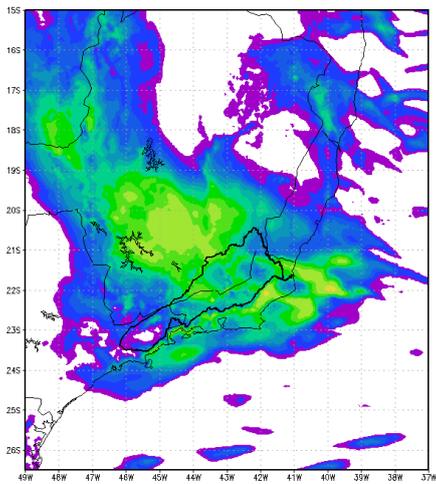
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

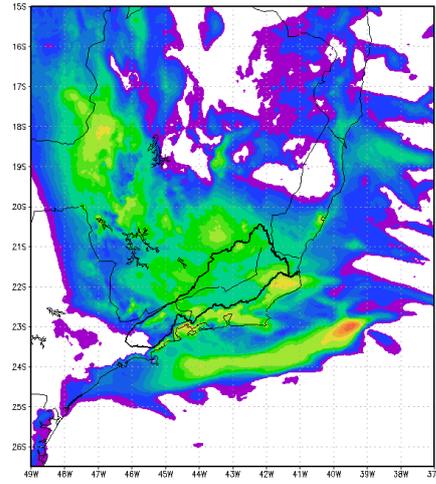
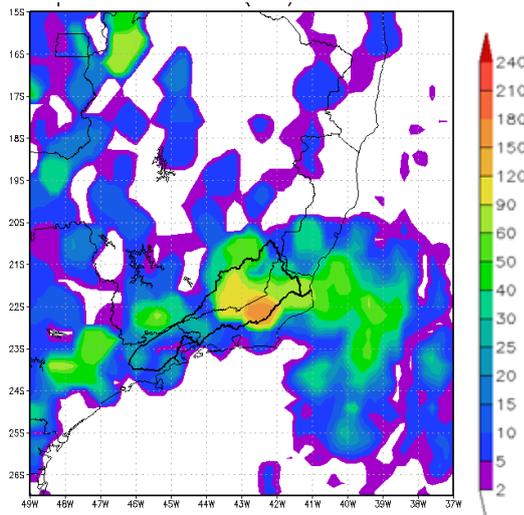


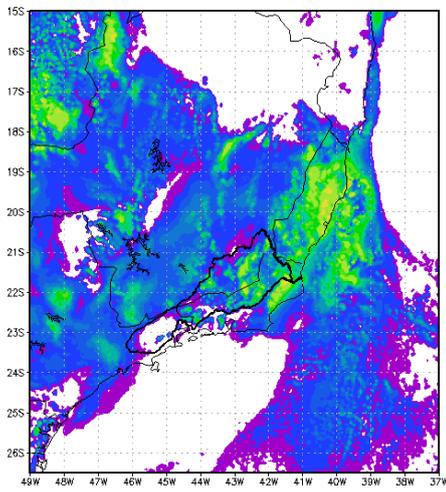
Figura 6.1 – Continuação.

Caso 3 – 04/01/2007

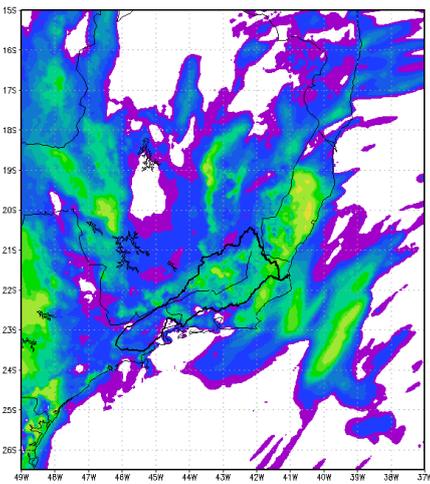
(a) OBS



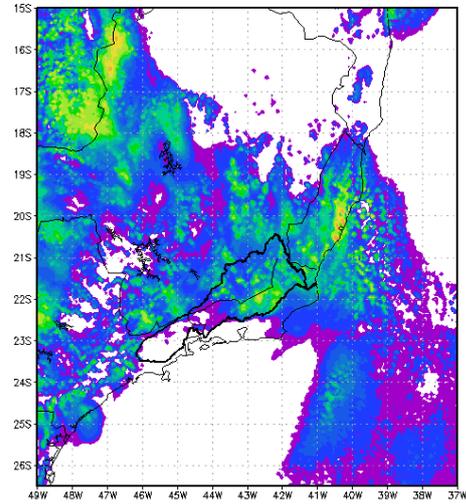
(b) KF



(d) CNTRL



(c) KFMX



(e) ZHAO

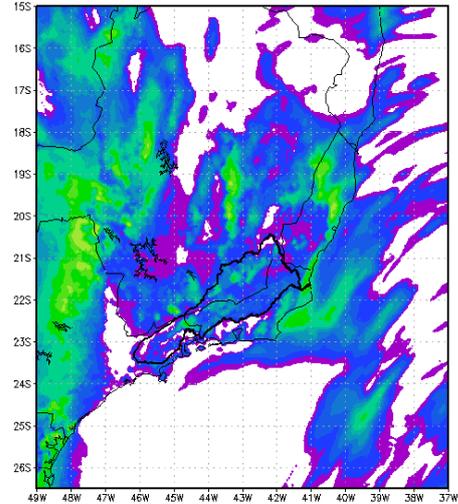
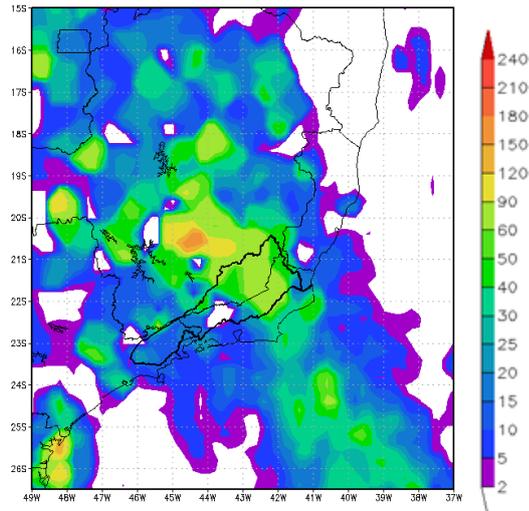


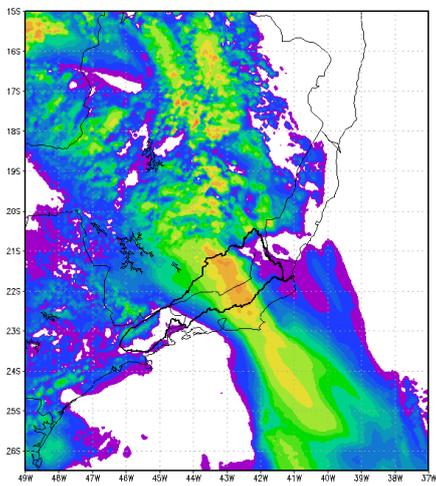
Figura 6.1 – Continuação.

Caso 4 – 17/12/2008

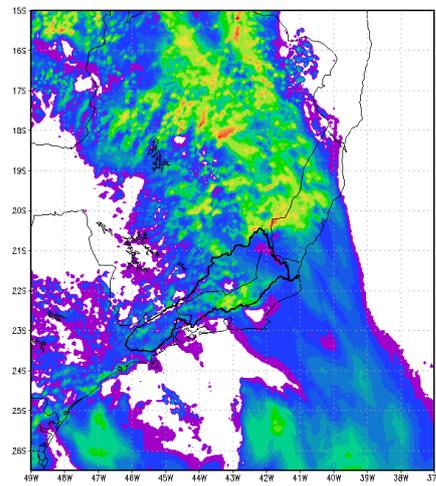
(a) OBS



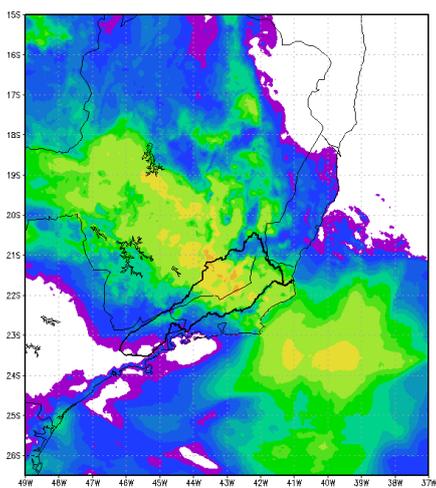
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

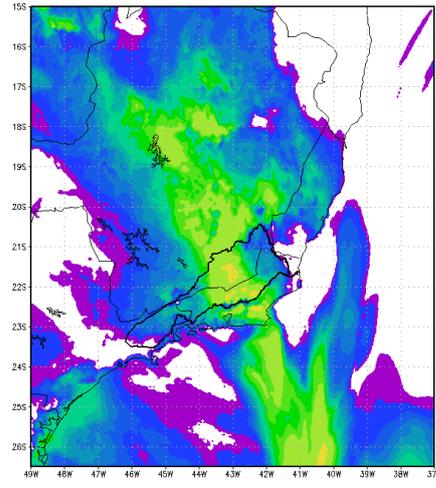
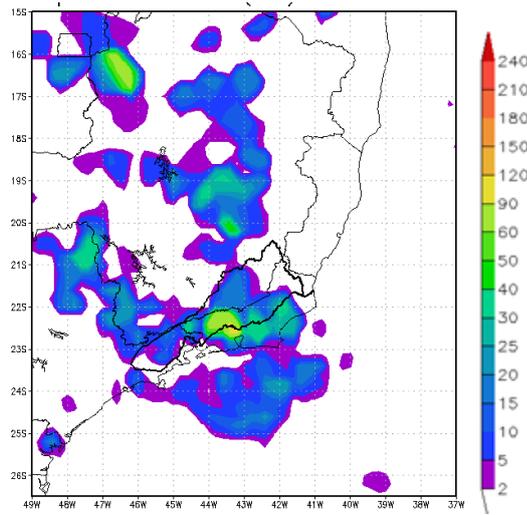


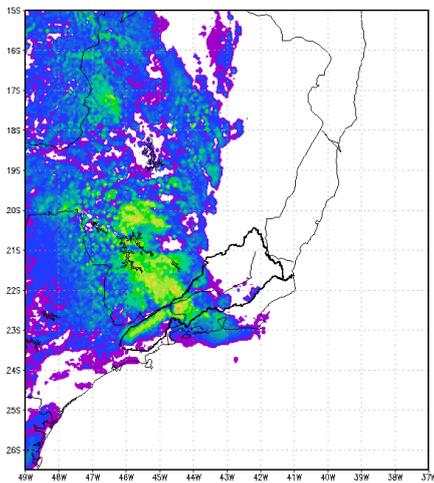
Figura 6.1 – Continuação

Caso 5 – 12/11/2009

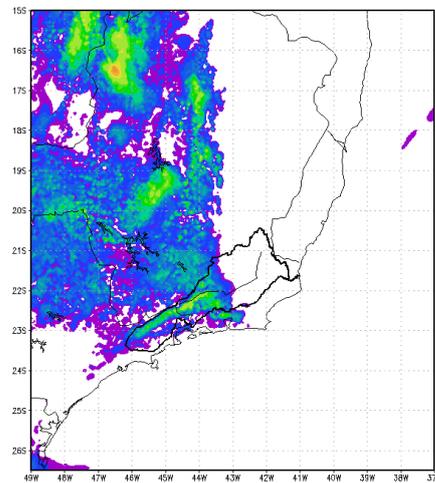
(a) OBS



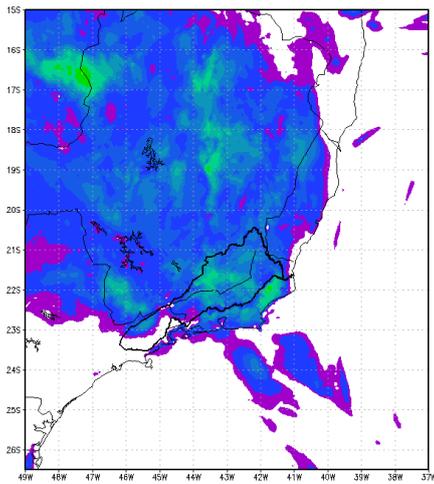
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

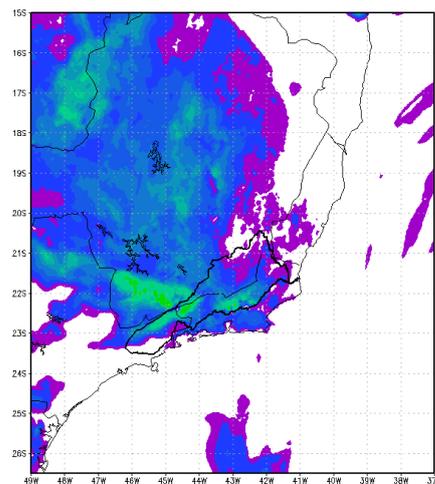
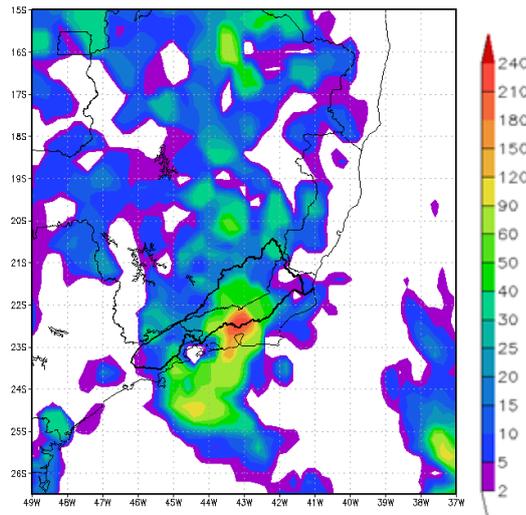


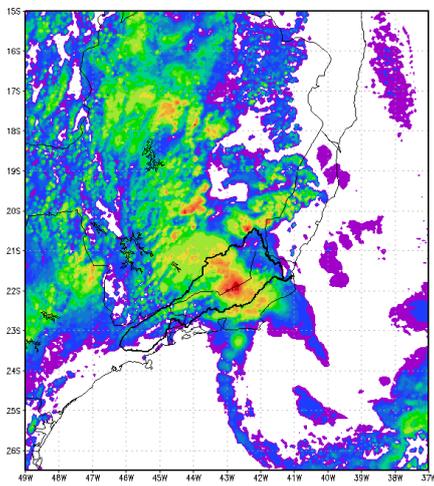
Figura 6.1 – Continuação

Caso 6 – 31/12/2009

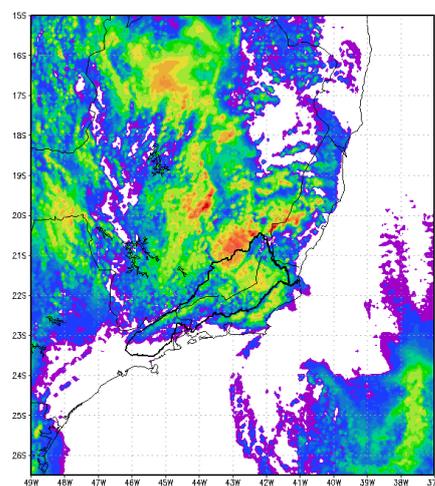
(a) OBS



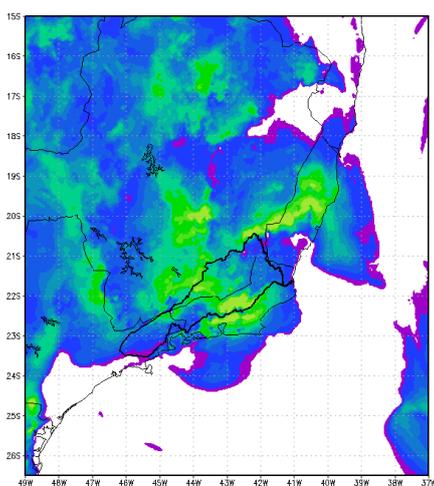
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

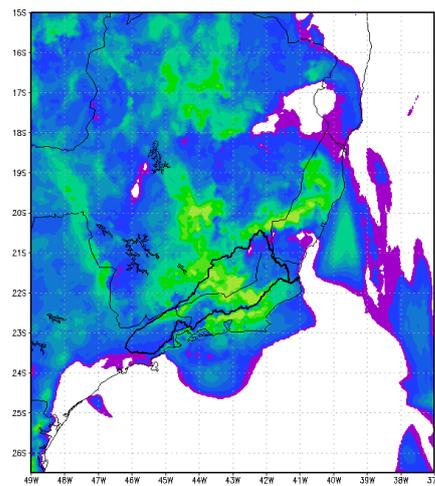
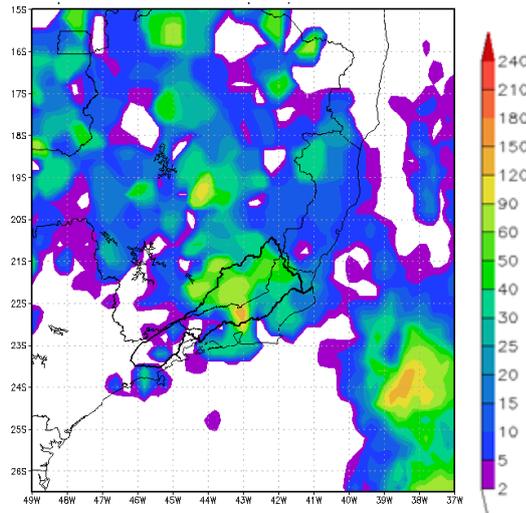


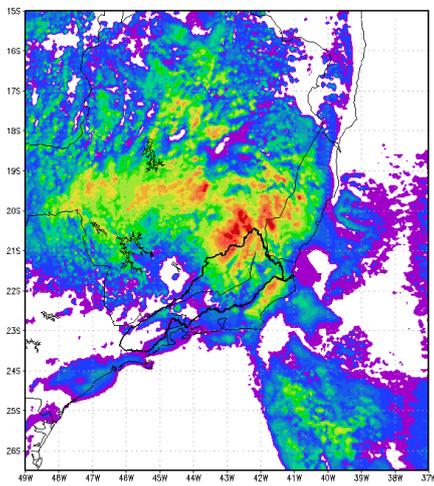
Figura 6.1 – Continuação

Caso 7 – 28/12/2010

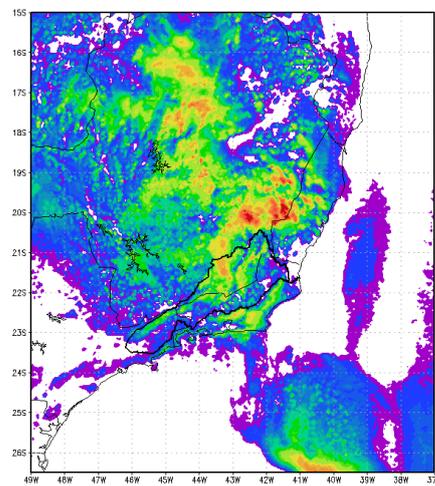
(a) OBS



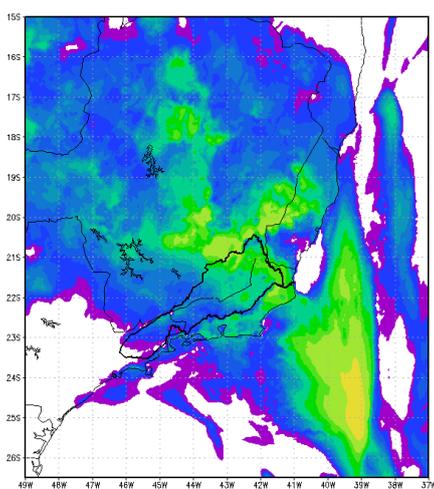
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

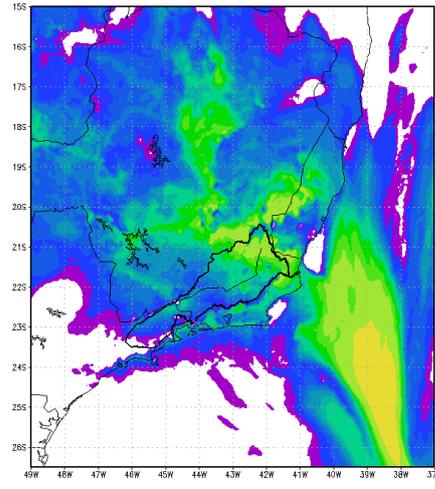
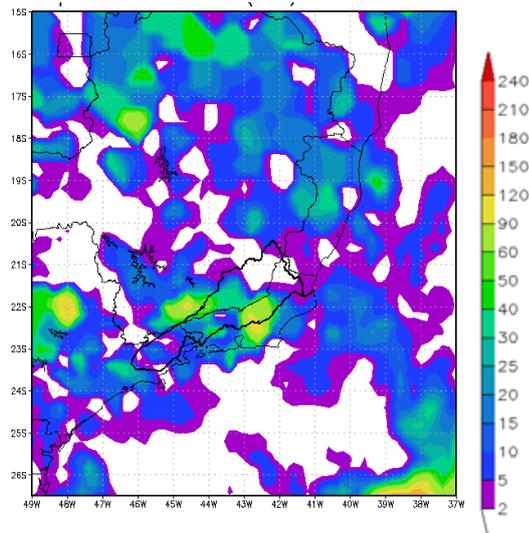


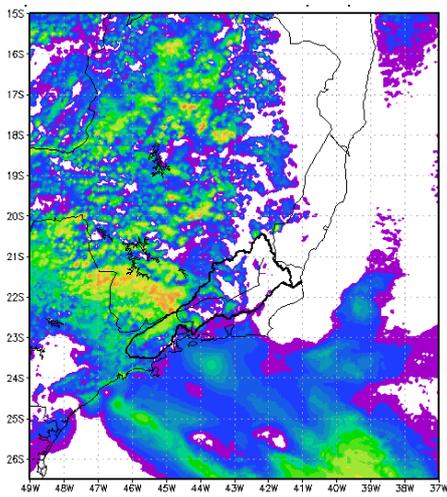
Figura 6.1 – Continuação

Caso 8 – 12/01/2011

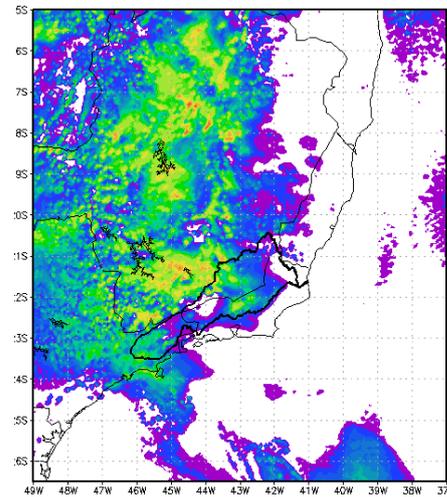
(a) OBS



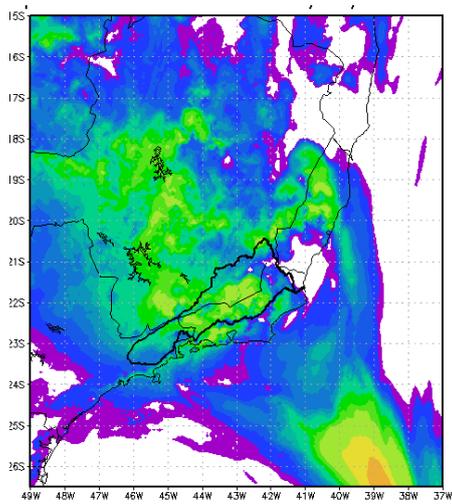
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

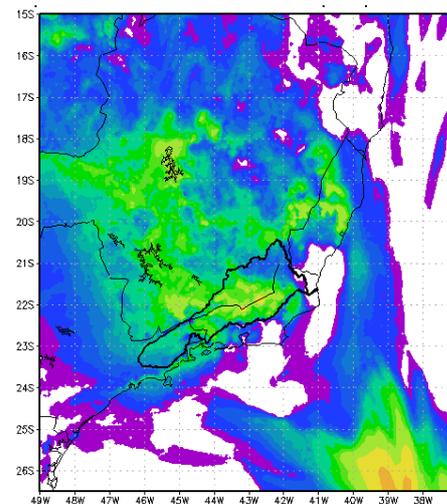
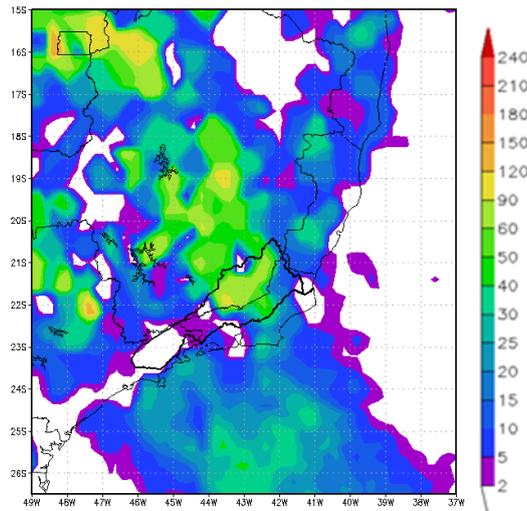


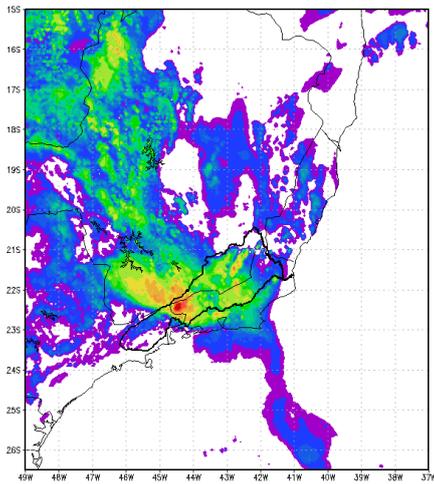
Figura 6.1 – Continuação

Caso 9 – 27/11/2011

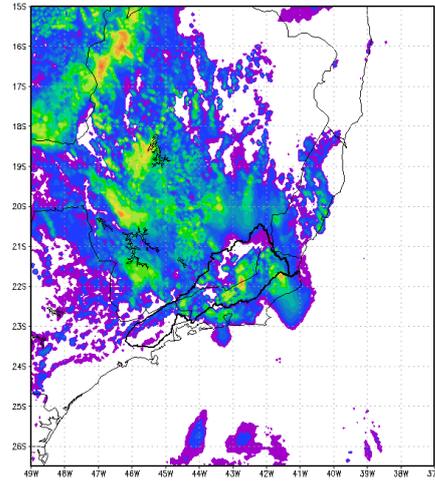
(a) OBS



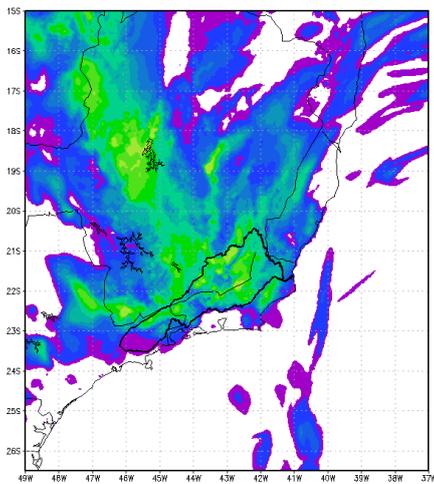
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

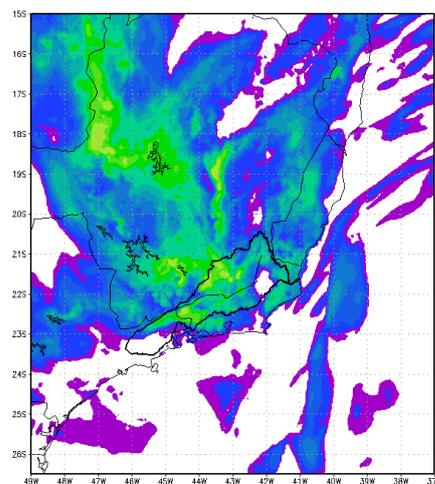
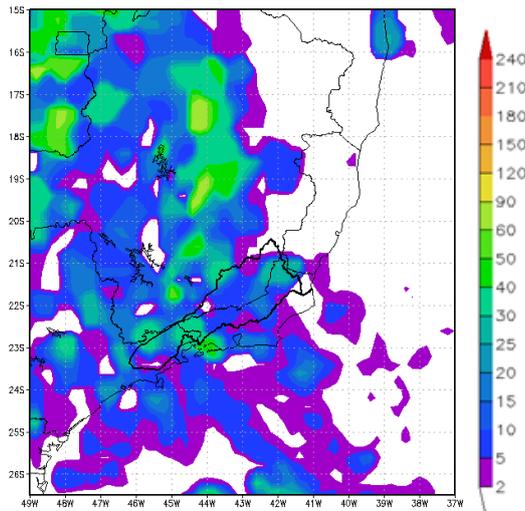


Figura 6.1 – Continuação

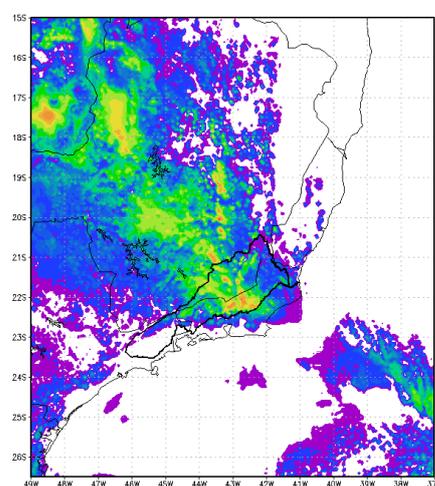
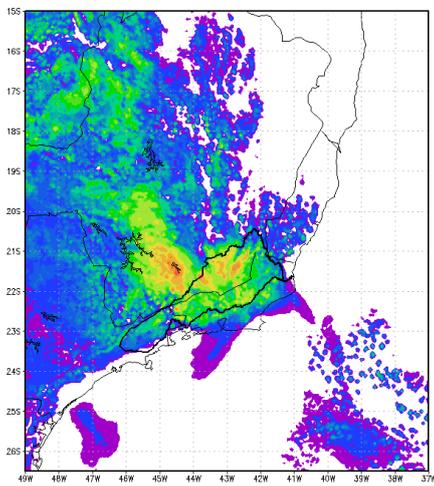
Caso 10 – 07/01/2012

(a) OBS



(b) KF

(c) KFMX



(d) CNTRL

(e) ZHAO

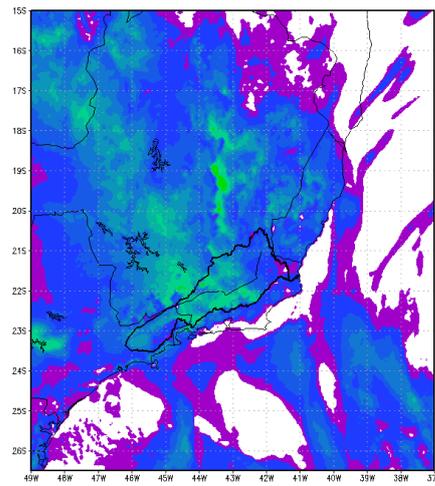
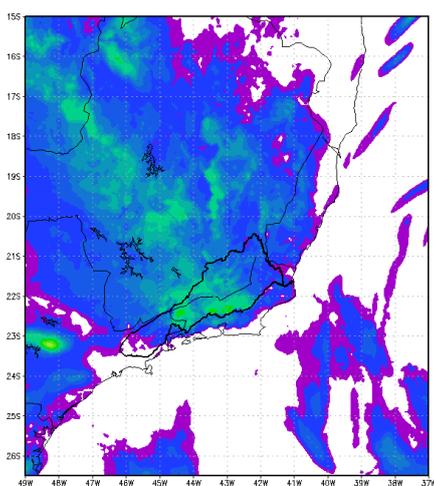


Figura 6.1 – Final.

Nota-se da Figura 6.1 que os membros com parametrização convectiva Kain-Fritsch (KF e KFMX) produzem precipitação com aspecto granulado e tendem a simular maiores acumulados que os demais membros, como observado principalmente nos casos 6, 7 e 10. Todos os membros simulam com boa acurácia a localização dos máximos de precipitação na maioria dos casos. De forma geral, os membros que utilizam parametrização convectiva Betts-Miller (CNTRL e ZHAO) simulam melhor a localização da precipitação do que os membros KF e KFMX e exibem a precipitação de forma mais homogênea, ou seja, não tão granulada. Todos os membros simulam melhor a precipitação sobre o continente do que sobre o oceano, porém sobre o oceano a confiabilidade das observações é menor.

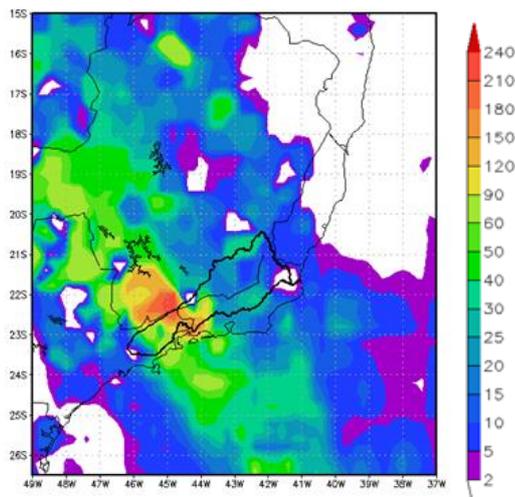
Nos casos nos quais é identificada a atuação de ZCAS (ver capítulo 5), casos 1-4 e 7-10, os membros são capazes de simular corretamente o posicionamento da banda de precipitação na maioria desses. Dentre esses casos, há mais desvios da posição da ZCAS para norte (casos 2, 3 e 7) do que para sul (caso 9). Os casos em que os membros simulam a precipitação mais ao norte, são os casos de ZCAS em que não é observada a atuação de vórtice ciclônico. Nos casos de ZCAS restantes, os membros são capazes de simular com boa acurácia o posicionamento da banda de precipitação (casos 1, 4 8 e 10). Dessa forma, os membros apresentam habilidade em prever o posicionamento da banda de precipitação em casos de ZCAS com atuação de vórtices ciclônicos (ver capítulo 5).

Os casos nos quais é observada a atuação de áreas de instabilidade (casos 5 e 6), os membros apresentam dificuldade em simular tanto o posicionamento dos núcleos de máxima precipitação quanto sua intensidade. Os membros com parametrização Betts-Miller (CNTRL e ZHAO) simulam melhor o posicionamento dos núcleos, enquanto os membros com parametrização Kain-Fritsch (KF e KFMX) simulam melhor a intensidade desses núcleos.

A Figura 6.2 apresenta a comparação entre a precipitação simulada pelos membros do conjunto com 72 h de antecedência e a precipitação observada.

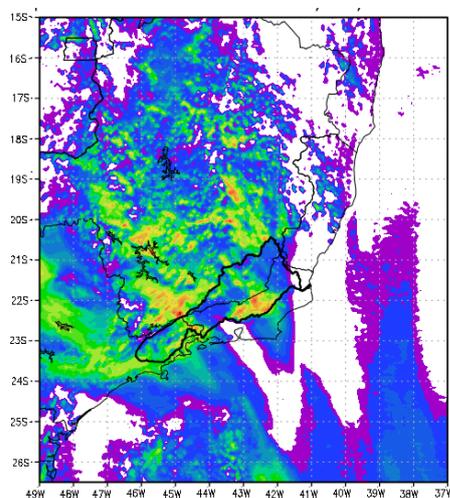
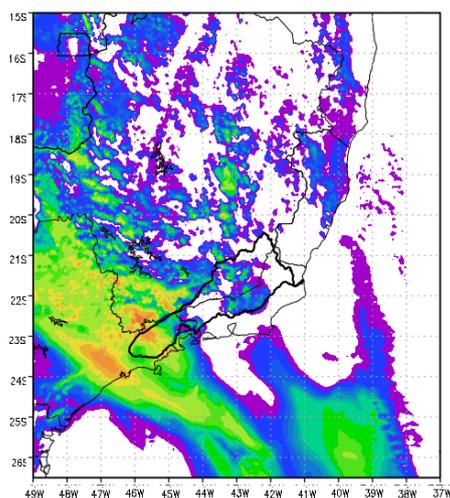
Caso 1 – 03/01/2000

(a) OBS



(b) KF

(c) KFMX



(d) CNTRL

(e) ZHAO

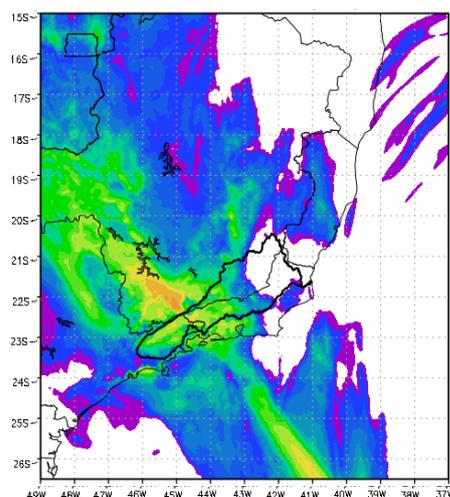
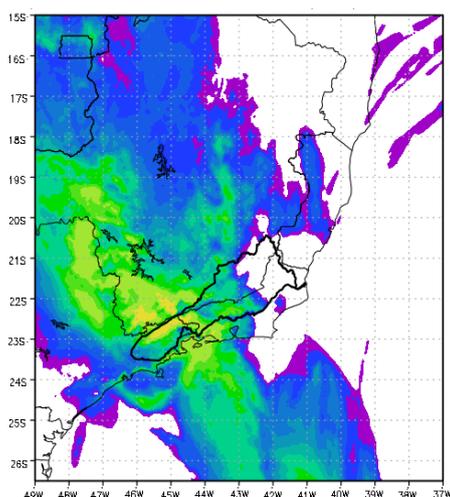
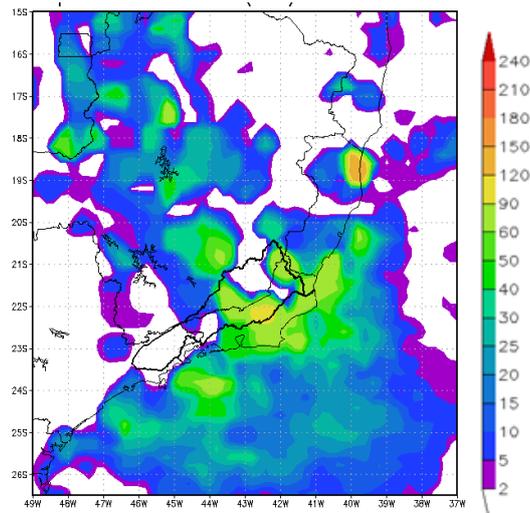


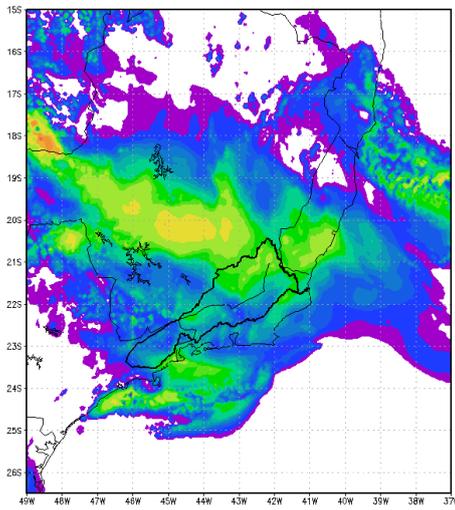
Figura 6.2 - Precipitação (mm/dia): (a) Observada (MERGE) e simulada com modelo Eta-5km com 48 h de antecedência, pelos membros (b) KF, (c) KFMX, (d) CNTRL, e (e) ZHAO para os 10 casos de chuvas intensas na BRPS.

Caso 2 – 04/03/2005

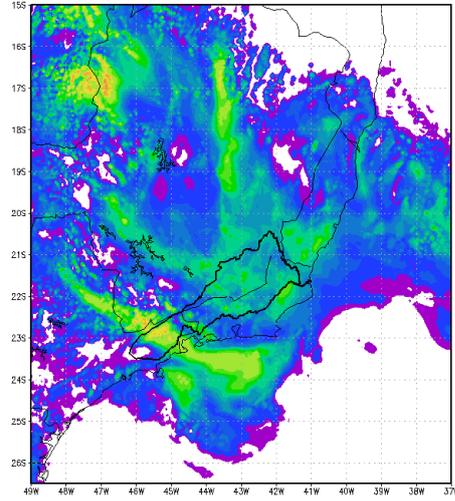
(a) OBS



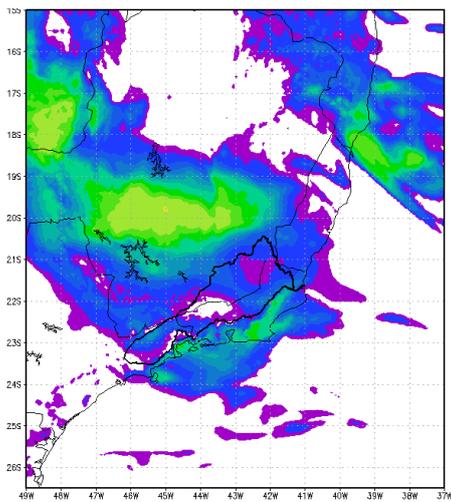
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

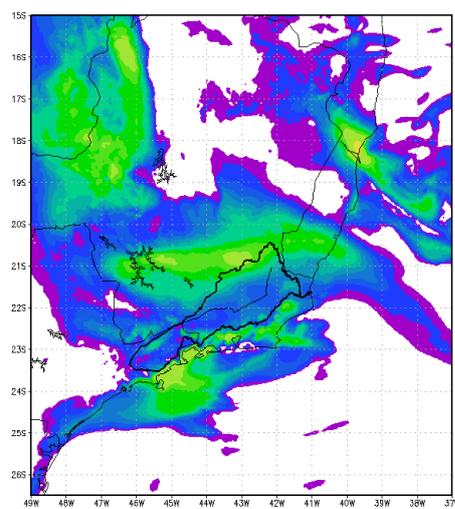
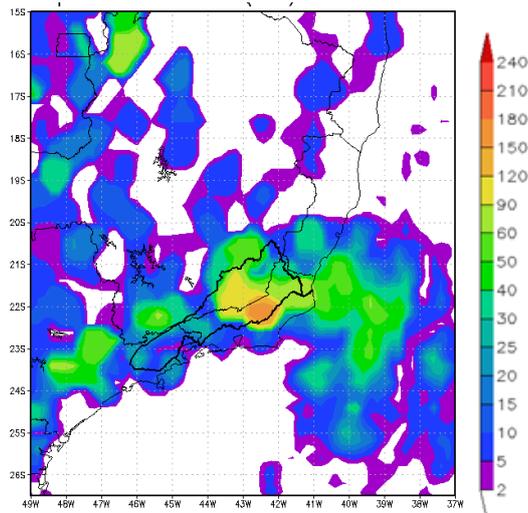


Figura 6.2 – Continuação.

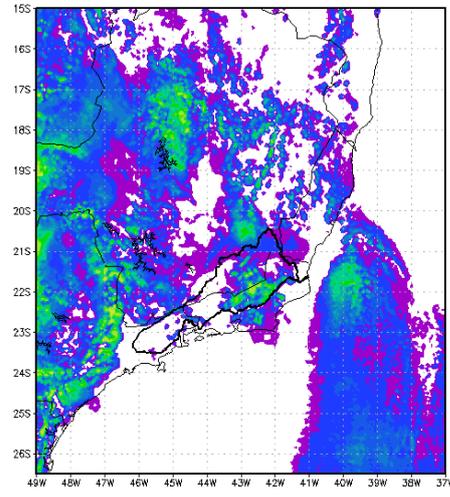
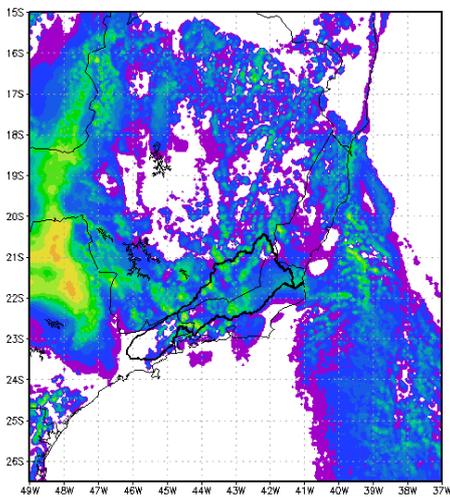
Caso 3 – 04/01/2007

(a) OBS



(b) KF

(c) KFMX



(d) CNTRL

(e) ZHAO

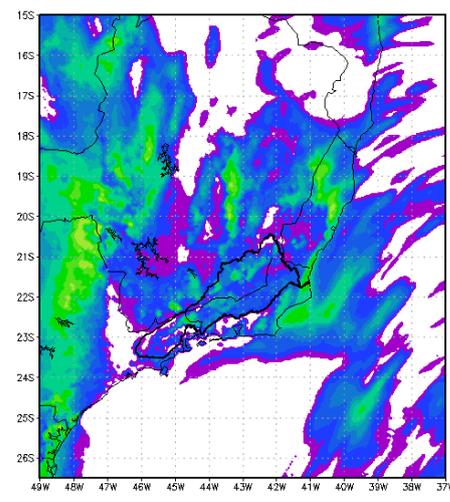
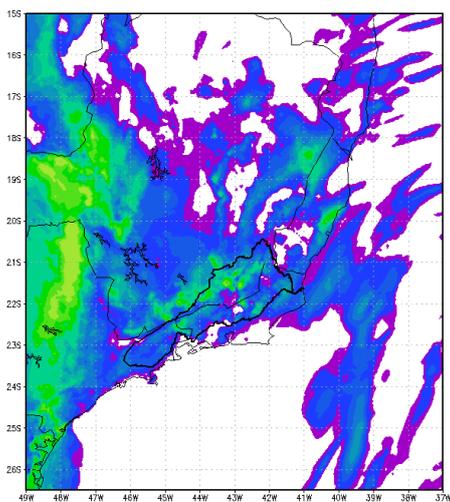
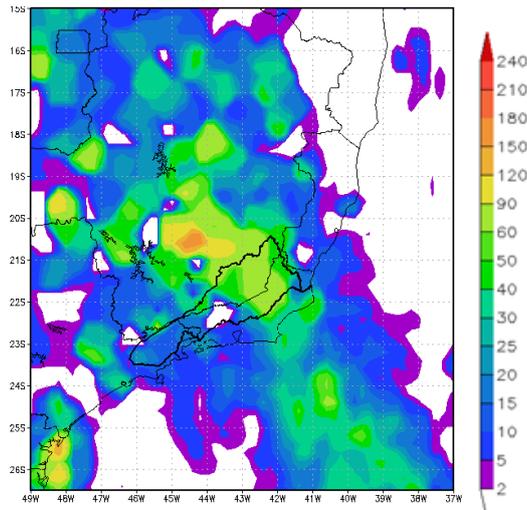


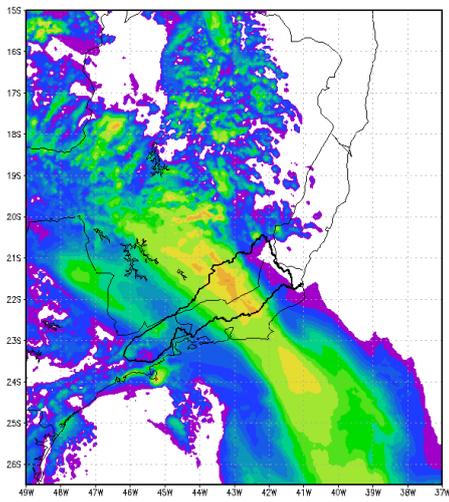
Figura 6.2 – Continuação.

Caso 4 – 17/12/2008

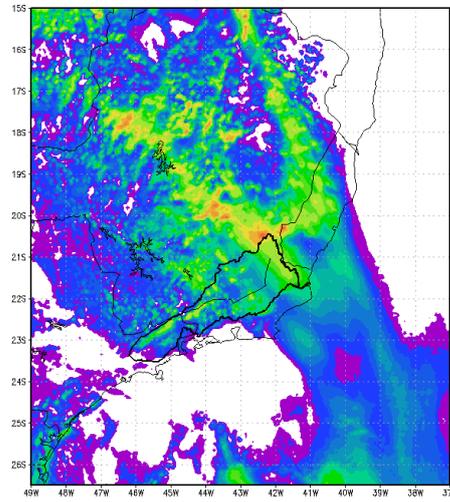
(a) OBS



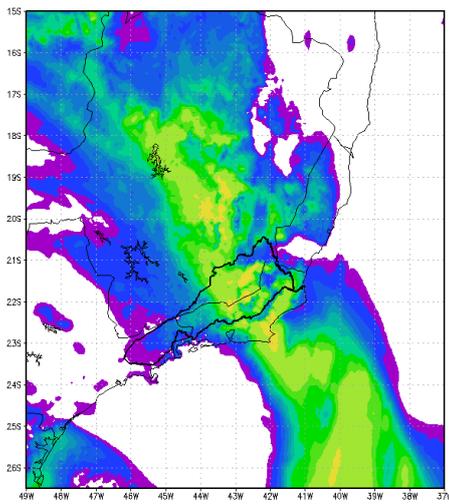
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

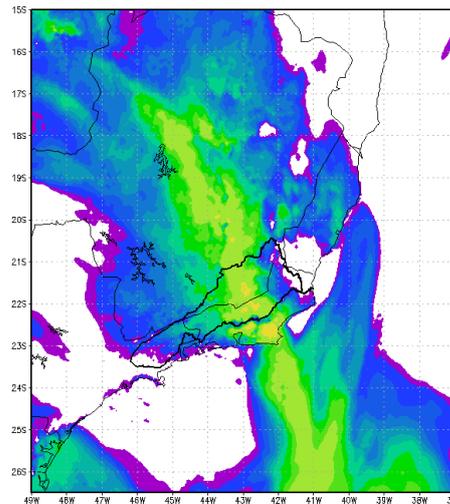
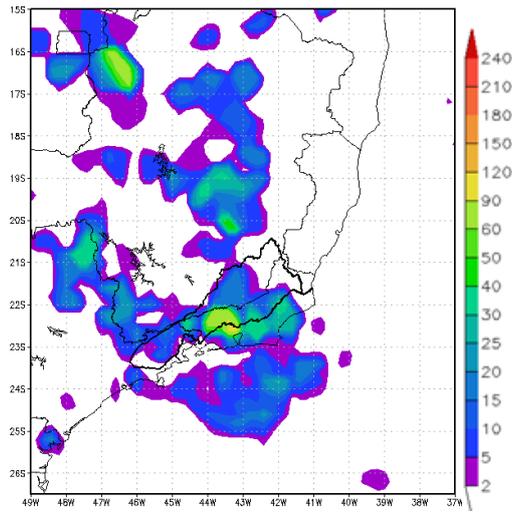


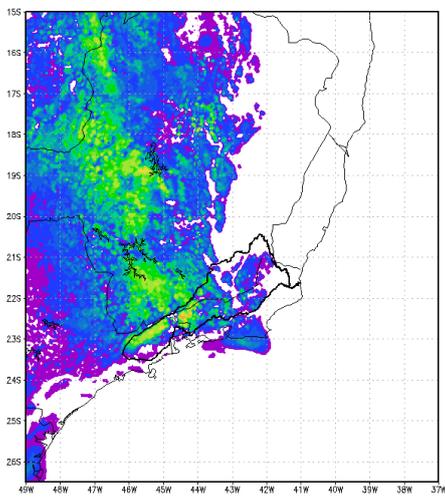
Figura 6.2 – Continuação.

Caso 5 – 12/12/2009

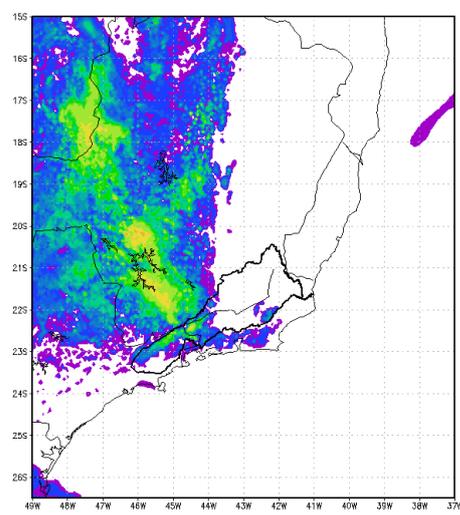
(a) OBS



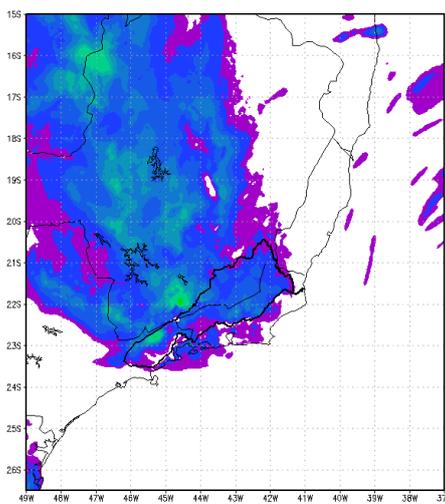
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

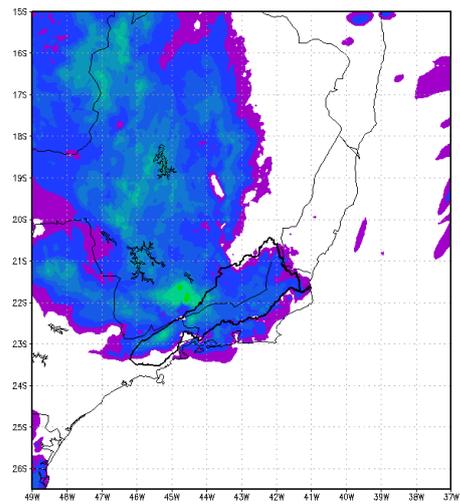
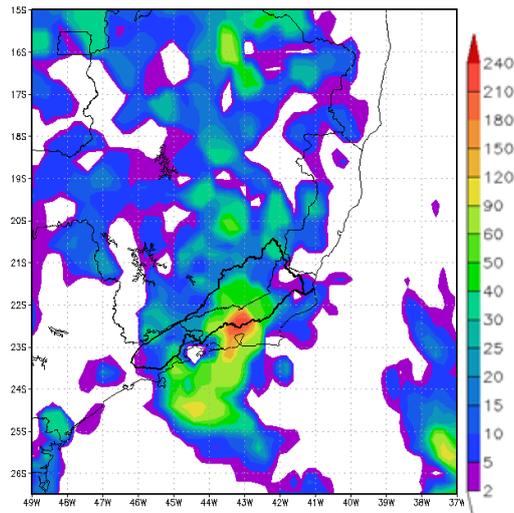


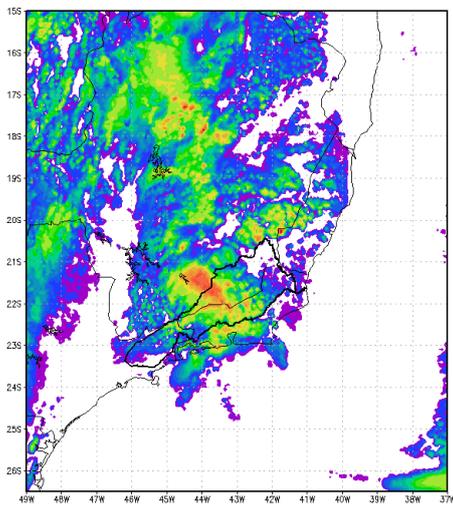
Figura 6.2 – Continuação.

Caso 6 – 31/12/2009

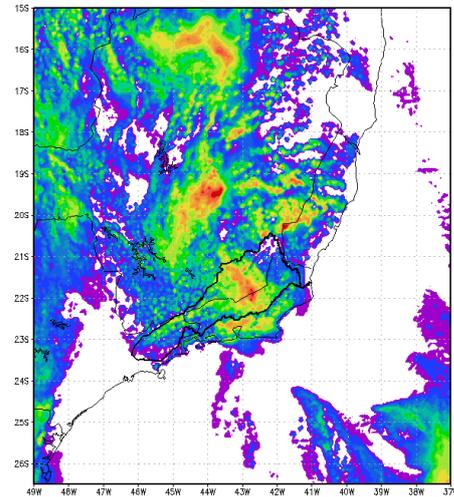
(a) OBS



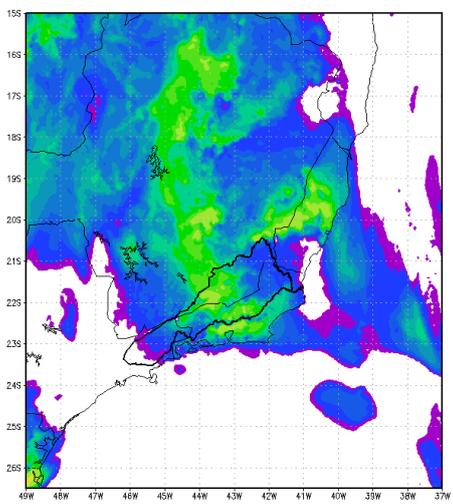
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

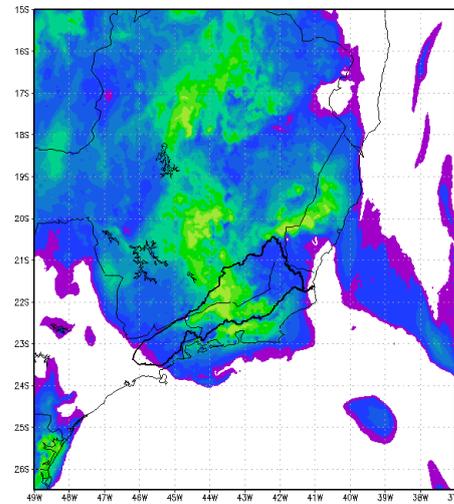
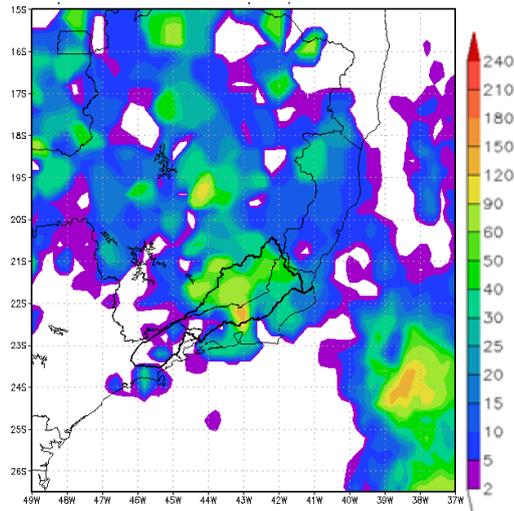


Figura 6.2 – Continuação.

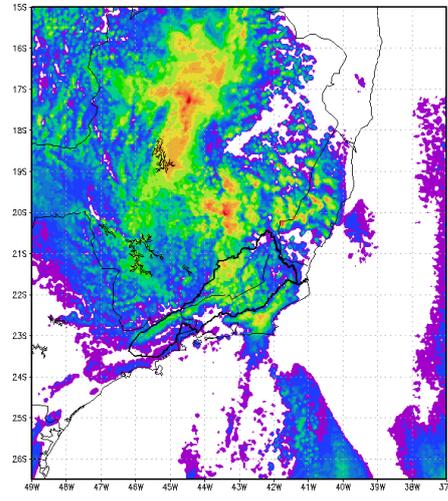
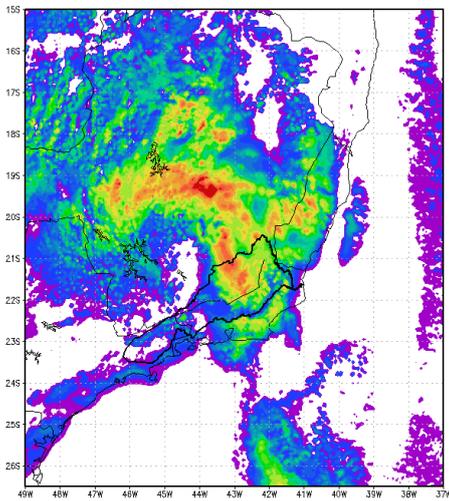
Caso 7 – 28/12/2010

(a) OBS



(b) KF

(c) KFMX



(d) CNTRL

(e) ZHAO

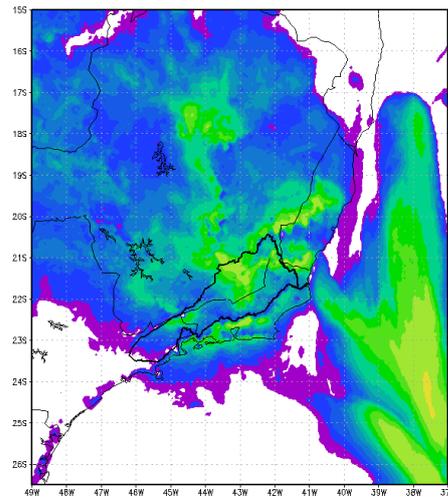
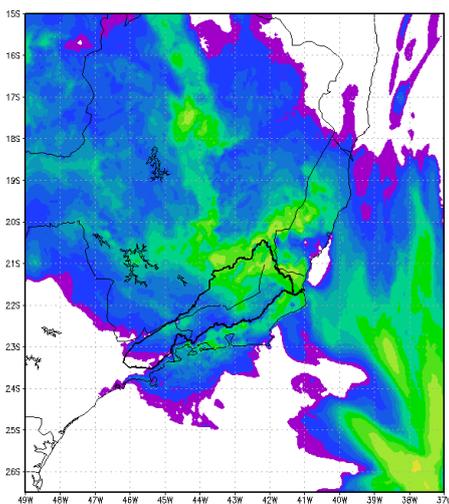
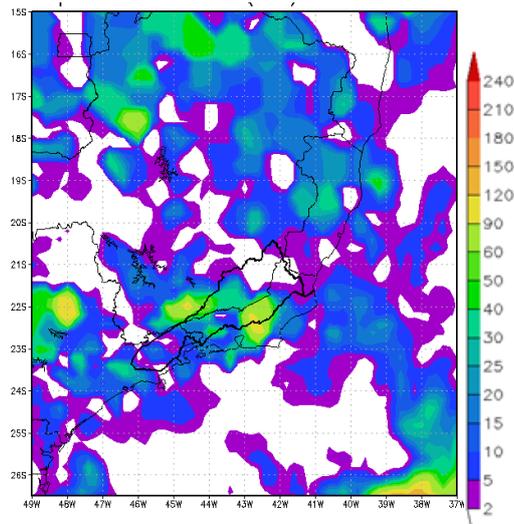


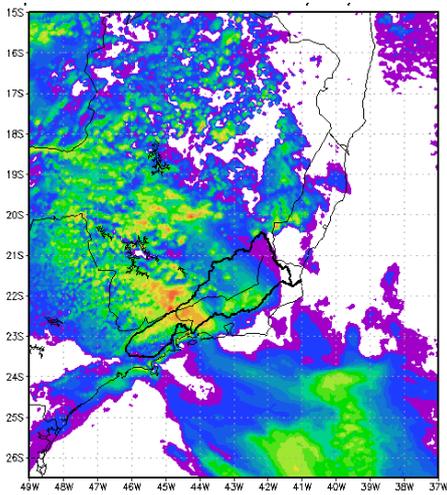
Figura 6.2 – Continuação.

Caso 8 – 12/01/2011

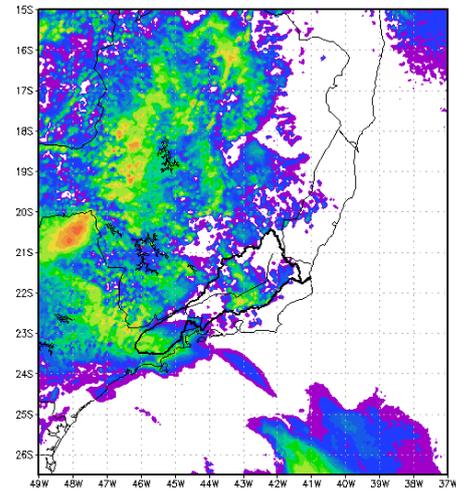
(a) OBS



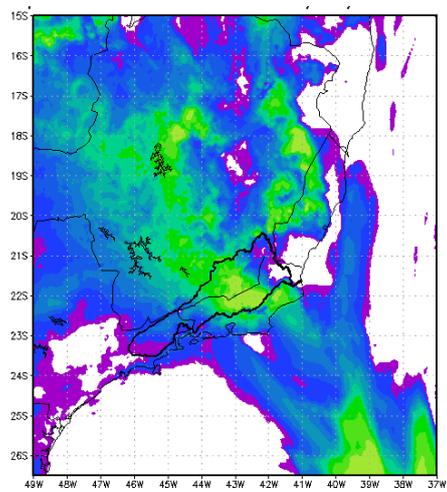
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

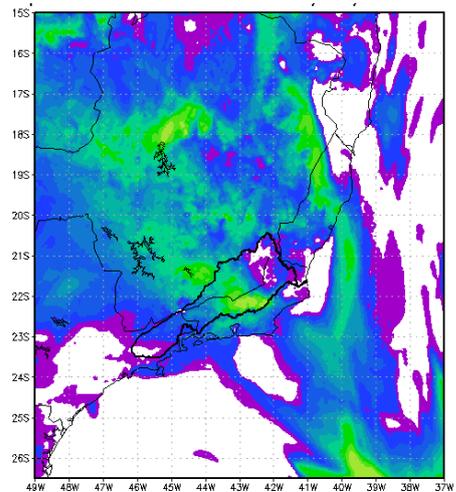
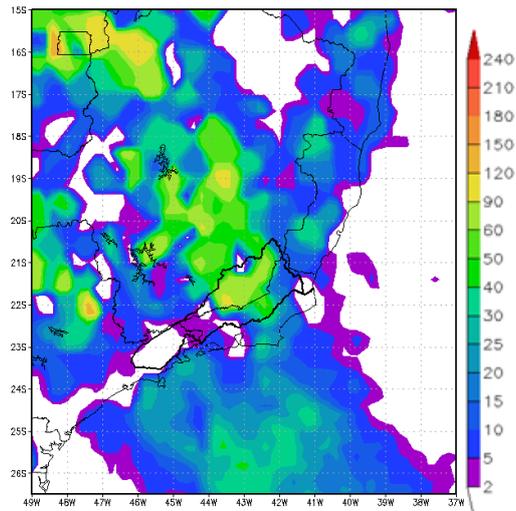


Figura 6.2 – Continuação.

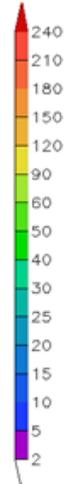
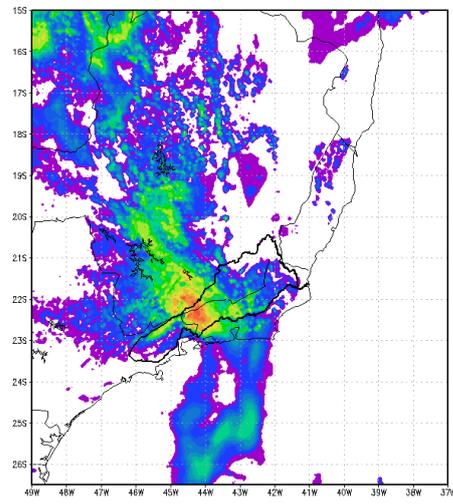
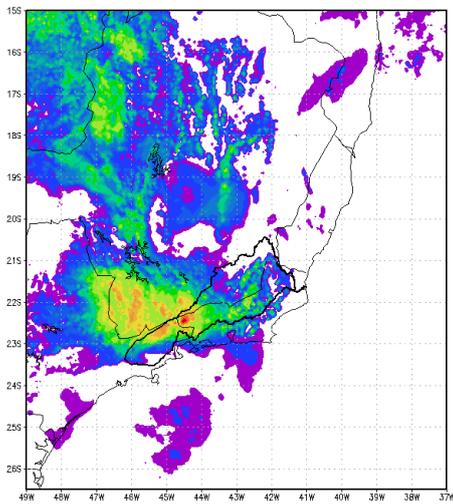
Caso 9 – 27/11/2011

(a) OBS



(b) KF

(c) KFMX



(d) CNTRL

(e) ZHAO

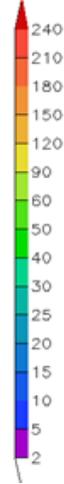
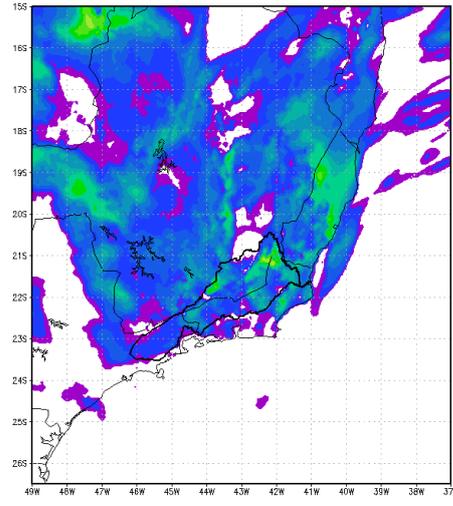
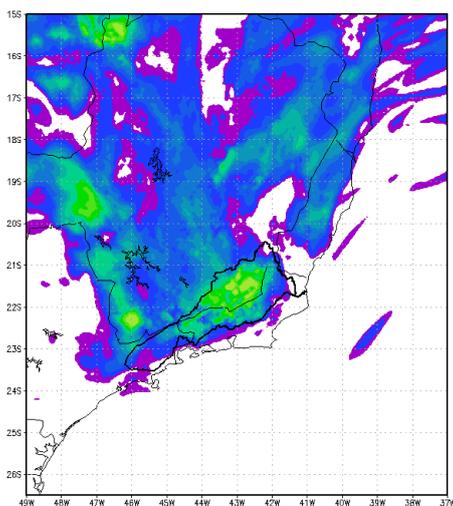
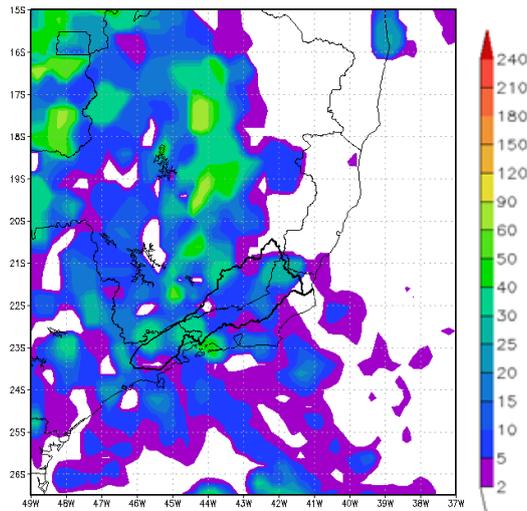


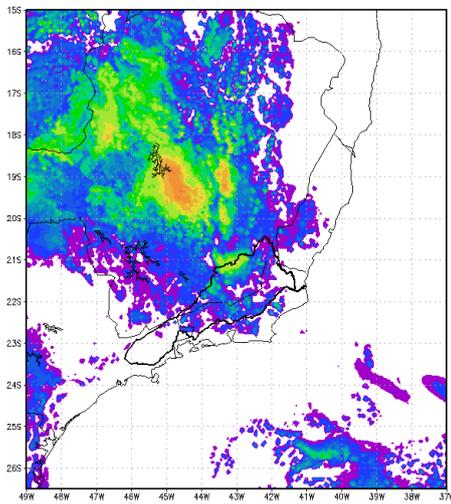
Figura 6.2 – Continuação.

Caso 10 – 0701/2012

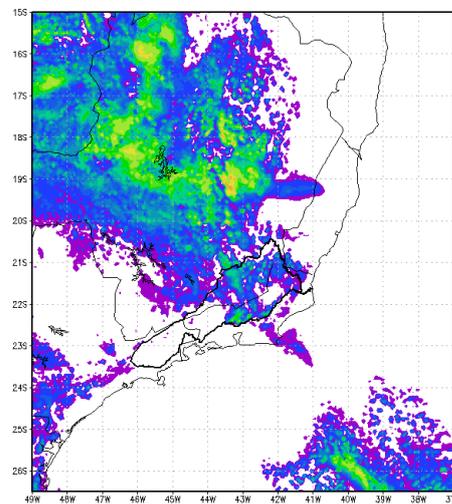
(a) OBS



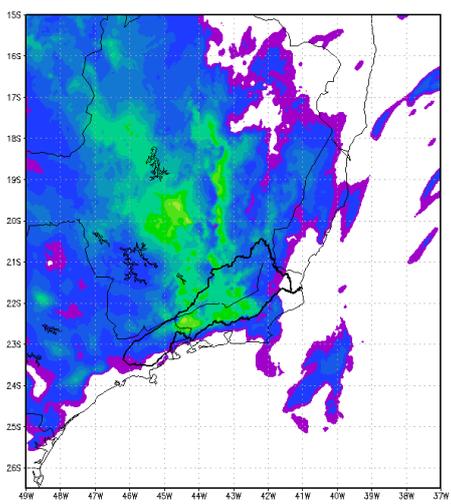
(b) KF



(c) KFMX



(d) CNTRL



(e) ZHAO

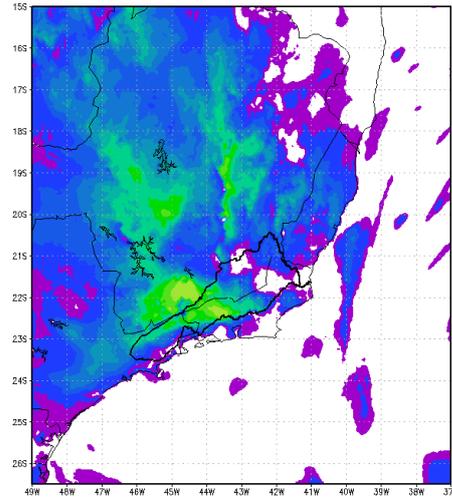


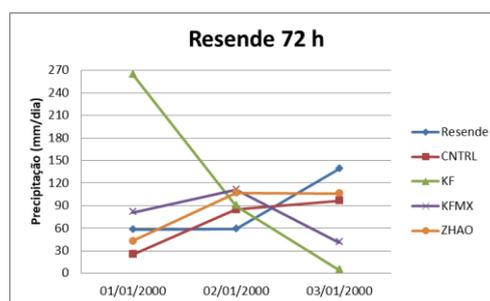
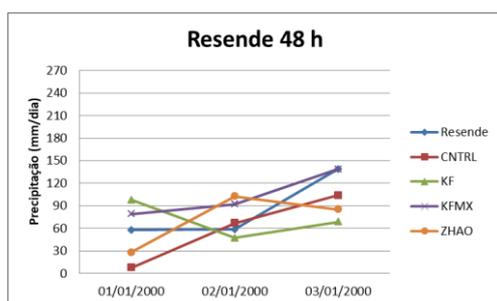
Figura 6.2 – Final.

A Figura 6.2 mostra que, com 72 h de antecedência, os membros do conjunto são capazes de simular a precipitação sobre a BRPS. No caso 2, todos os membros superestimam a chuva, porém de forma geral, assim como na simulação com 48 h de antecedência, os membros com parametrização Kain-Fritsch simulam maiores acumulados enquanto que os membros com parametrização Betts-Miller simulam melhor a localização da chuva. Esse fato pode ser observado, por exemplo, nas figuras para o caso 7.

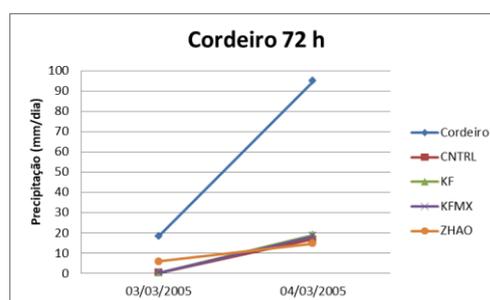
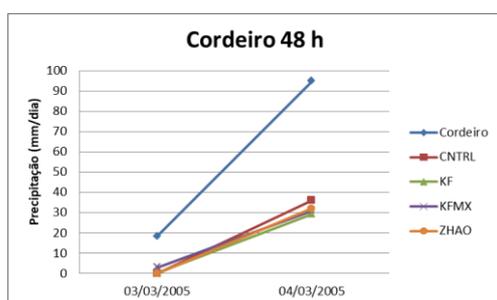
Nos casos com atuação de ZCAS, os membros localizam com boa acurácia o posicionamento da banda de precipitação, como nos casos 3, 4, 7 e 9. Por outro lado, alguns membros apresentam dificuldades em simular a precipitação sobre o oceano, por exemplo nos casos 9 e 10. Nos casos com atuação de áreas de instabilidade (casos 5 e 6), os membros são capazes de simular a localização dos núcleos de chuva sobre a BRPS.

A Figura 6.3 apresenta a evolução temporal da precipitação para os dias mais chuvosos dos 10 casos. A série temporal é construída para a estação na qual foi observado o máximo de precipitação (mm/dia), conforme discutido no capítulo 5.

Caso 1



Caso 2



Caso 3

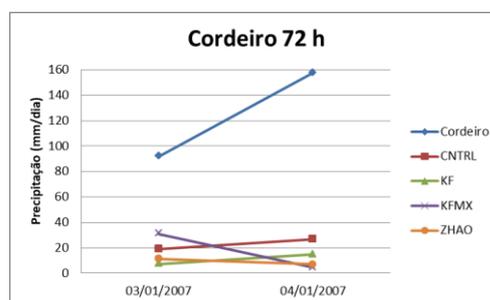
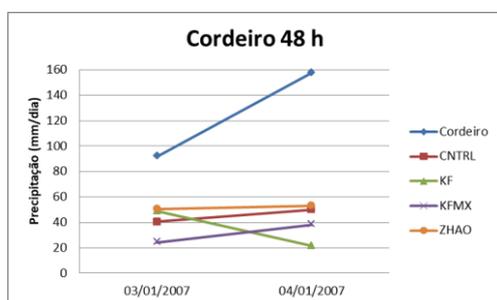
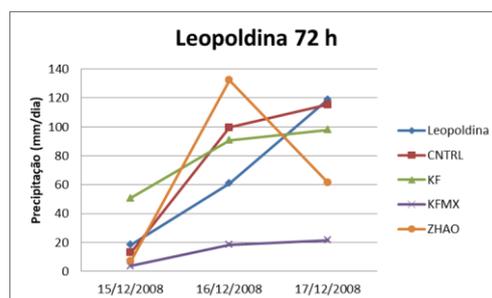
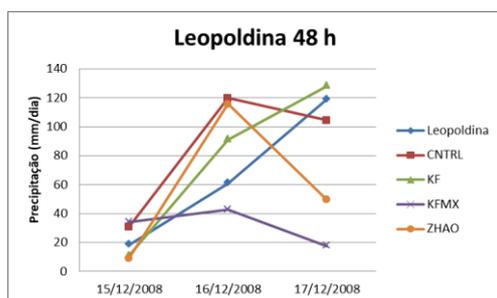
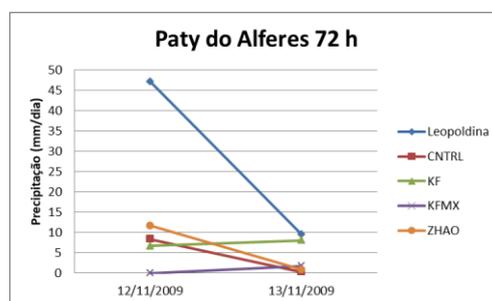
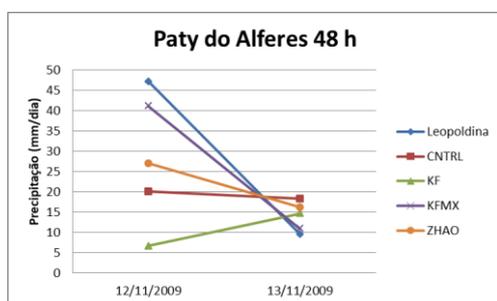


Figura 6.3 – Evolução temporal dos totais pluviométricos diários (mm/dia), simulados pelo modelo Eta-5km com 48 h (esquerda) e 72 h (direita) de antecedência e observado para as localidades com maior acumulado de cada caso.

Caso 4



Caso 5



Caso 6

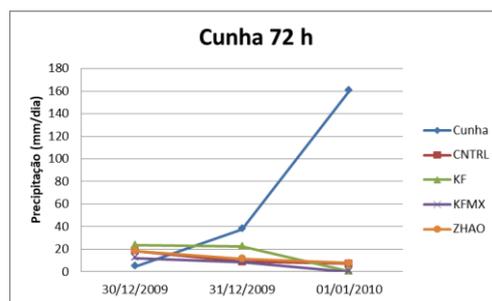
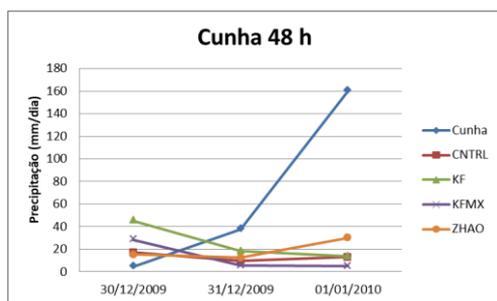
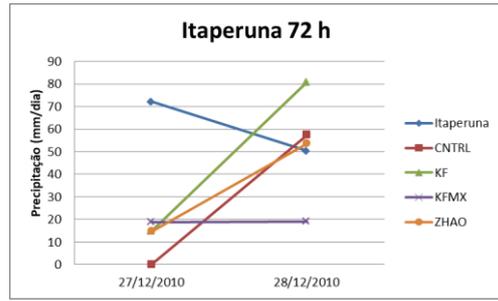
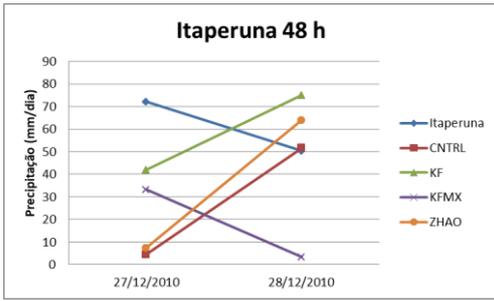
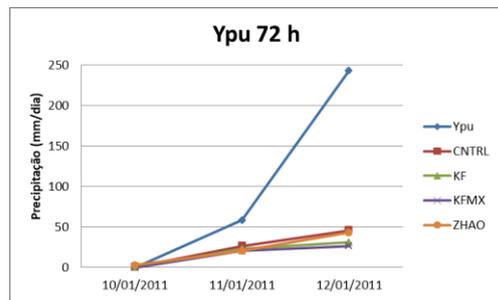
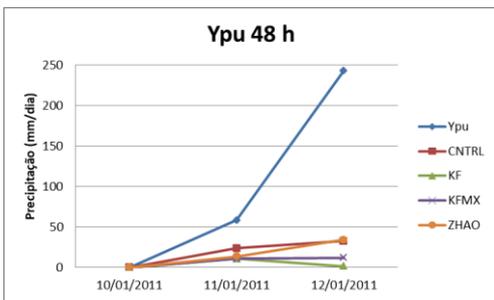


Figura 6.3 – Continuação.

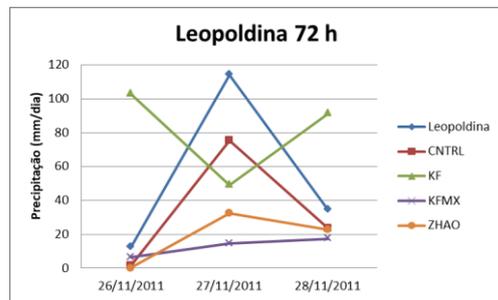
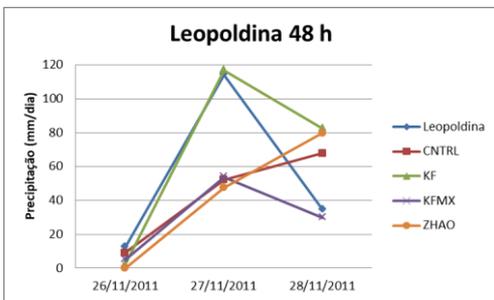
Caso 7



Caso 8



Caso 9



Caso 10

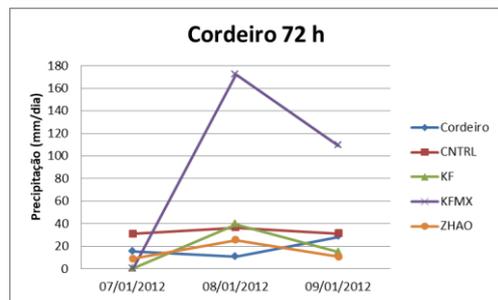
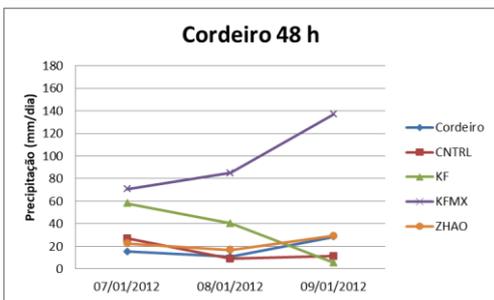


Figura 6.3 – Final.

A Figura 6.3 mostra que a simulação com 48 h de antecedência apresenta desempenho ligeiramente melhor que a simulação com 72 h. Na maioria dos casos, os membros são capazes de identificar a variabilidade temporal da precipitação, acompanhando os máximos e mínimos, porém subestimando os valores; como, por exemplo, no caso 2. Nota-se que há uma tendência geral de subestimativa dos valores máximos de precipitação como, por exemplo, no caso 2, onde os membros simulam corretamente o padrão temporal da precipitação, mas não sua intensidade. Há casos nos quais os membros adiantam a ocorrência do máximo de precipitação, como no caso 4, no qual o maior registro ocorre no dia 17 e os membros simulam para o dia 16. De maneira geral, os membros são capazes de prever o padrão temporal da precipitação e subestimam sua intensidade.

6.2. Avaliação Objetiva

As métricas de avaliação objetiva são calculadas para todos os casos, ou seja, para todos os pares previsão x observação. Dessa forma, o conjunto é avaliado de forma geral, em seu desempenho para todos os casos, e não cada caso isoladamente.

6.2.1. ETS e Viés categórico

As métricas Viés categórico e ETS para os 10 casos estudados são apresentadas na Figura 6.4. Conforme descrito na metodologia os cálculos são feitos para diferentes categorias de precipitação, desde chuva mais intensa ou igual a 0,3 mm/dia até chuva igual ou acima de 80 mm/dia. As categorias de intensidade da chuva estão apresentadas na primeira linha do eixo das abcissas, enquanto o número de observações em cada categoria está na segunda linha. Assim, para os dez casos avaliados, existem 398 observações com total pluviométrico diário superior a 0,3 mm/dia e 75 observações abaixo desse limiar, (não apresentado na figura) totalizando 473 pares de dados. Ao analisar tais gráficos, é importante lembrar que uma previsão perfeita apresenta valores de Viés Categórico e ETS iguais a 1, valores de Viés Categórico inferiores (superiores) a 1 indicam que o modelo está subestimando (superestimando) a frequência de ocorrência do evento.

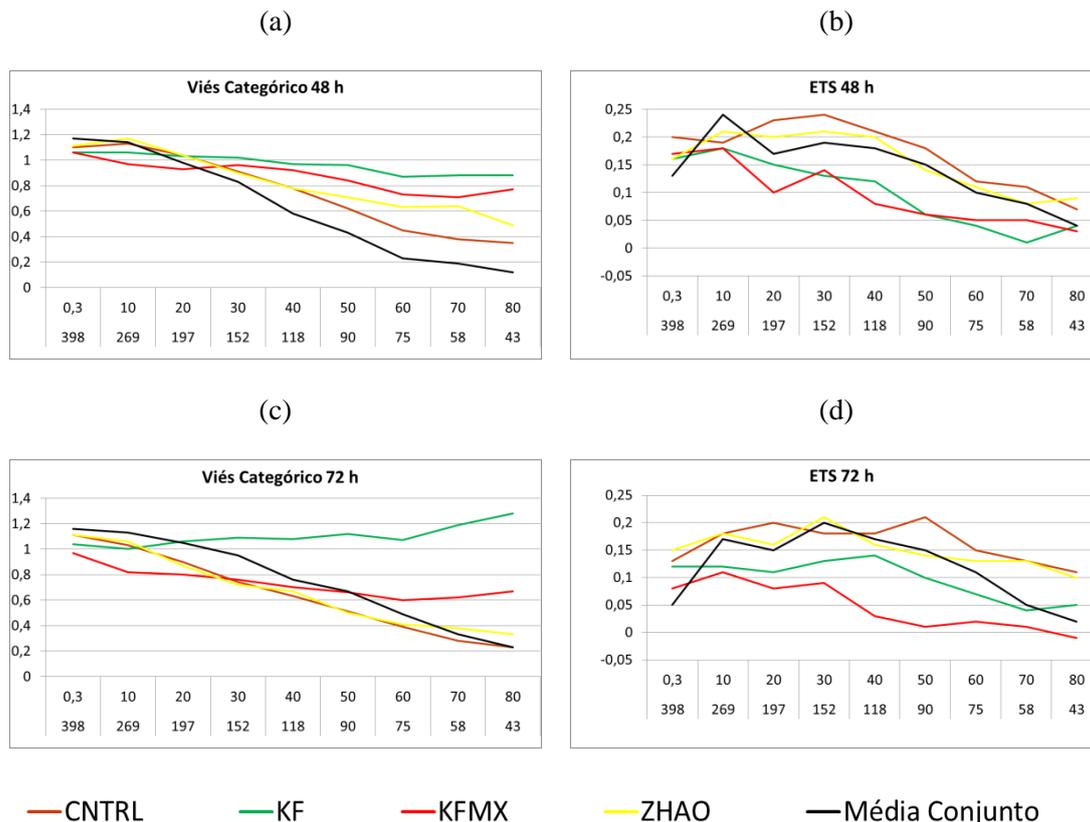


Figura 6.4 – Viés Categórico e ETS para cada um dos membros e para a média do conjunto do modelo Eta-5km para os horizontes de 48 h (a e b) e 72 h (c e d) para todos os dez casos estudados.

Nota-se que no horizonte de 48 h de simulação os membros mantêm viés próximo à unidade nas categorias até 20 mm/dia (Figura 6.4a), decaindo para valores menores que 1 com o aumento na pluviometria, o que indica uma subestimativa na precipitação de eventos severos. Os membros que utilizam parametrização Kain-Fritsch apresentam viés próximo à unidade em todas as categorias. Na Figura 6.4b, encontram-se os resultados de ETS para as simulações no horizonte de 48 h. Nota-se que o membro CNTRL apresenta valores de ETS superiores aos demais membros, em quase todas as categorias. As melhores simulações, aquelas que apresentam valores mais elevados de ETS, ocorrem nas categorias de chuva entre 10,0 e 50,0 mm/dia. Com o aumento da intensidade da chuva, percebe-se que, de maneira geral, todos os membros têm seu desempenho reduzido. Cabe ressaltar, que o número de eventos com precipitação acima de 50 mm/dia é bem menor que o número de eventos com precipitação abaixo desse patamar, como pode ser observado na segunda linha do eixo das abcissas na Figura 6.4.

Quando o horizonte de integração é de 72 h (Figuras 6.4c e 6.4d), o desempenho é bastante semelhante. Na figura 6.4c, nota-se que o membro KF é o único com viés acima da unidade nas categorias com chuvas maiores que 20 mm/dia. De maneira geral, há subestima da ocorrência de eventos nas categorias de chuvas fortes. No gráfico de ETS, nota-se que os maiores valores ocorrem entre 20 e 40 mm/dia. Pode-se notar que o membro CNTRL apresenta os maiores valores de ETS na maioria das categorias.

6.2.2. Diagrama de Taylor

A figura 6.5 apresenta o diagrama de Taylor com o desempenho de cada membro e para a média de todos os membros (conjunto – obtido pela média dos valores simulados pelos 4 membros), para as simulações no horizonte de 48 h (pontos) e 72 h (asteriscos). O ponto em preto no eixo das abcissas representa o conjunto das observações. O diagrama de Taylor apresenta os valores de correlação espacial, desvio padrão normalizado e REQM para cada membro e para a média do conjunto, conforme descrito na metodologia. Uma previsão perfeita deverá possuir correlação espacial igual a um, REQM nulo e Desvio Padrão igual ao das observações.

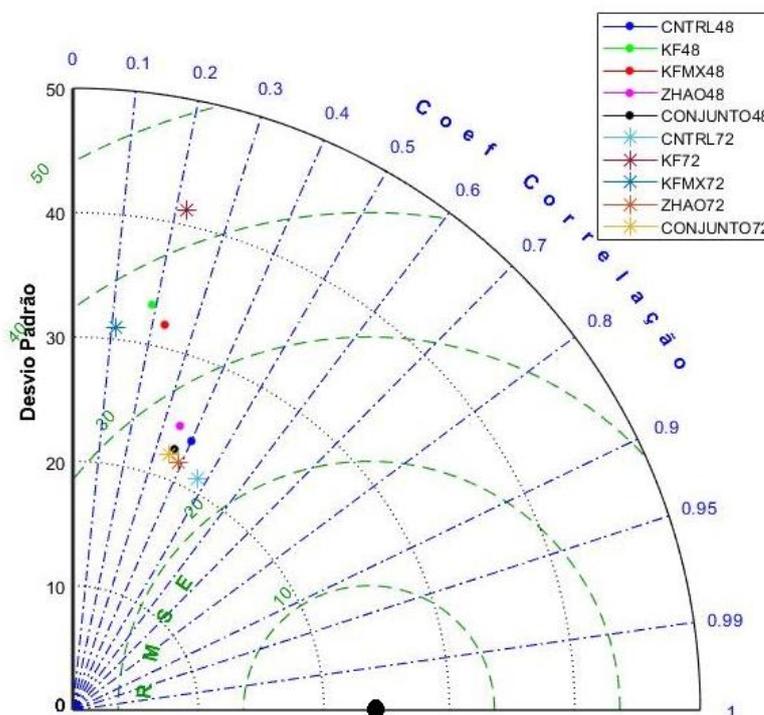


Figura 6.5 – Diagrama de Taylor com os valores de Correlação, Desvio Padrão Normalizado e REQM para cada membro e média do conjunto para os 10 casos, no horizonte de 48 h e 72 h.

Tabela 6.1- Valores de desvio padrão (mm/dia), correlação (-1, 1) e RMSE (mm/dia) utilizados no Diagrama de Taylor das simulações de 48 h e 72 h.

Modelo horizonte	Desvio padrão (mm/dia)		Correlação (-1, 1)		REQM (mm/dia)	
	48 h	72 h	48 h	72 h	48h	72 h
CNTRL	23,6	21,1	0,43	0,47	26,2	20,9
KF	33,2	41,2	0,19	0,22	37,3	41,2
KFMX	31,8	30,9	0,23	0,11	35,1	35,5
ZHAO	24,4	21,7	0,35	0,39	28,2	23,8
CONJUNTO	22,5	21,9	0,36	0,35	27,5	24,1
OBSERVAÇÃO	24,2		1		0	

Nota-se que o membro controle está bem próximo ao conjunto e do ZHAO. Os membros mais afastados são o KF e o KFMX. Dessa forma, nota-se que o conjunto se mostrou mais próximo dos membros com parametrização Betts-Miller. O membro CNTRL apresenta maior correlação com os dados observados e menor REQM. Por outro lado, o membro KF apresenta menor correlação e maior REQM. O membro ZHAO apresenta desvio padrão mais próximo do desvio padrão das observações. Conclui-se portanto, da avaliação do diagrama de Taylor apresentado, que os melhores resultados são exibidos pelo membro CNTRL seguido pelo Conjunto, com valores bastante próximos um do outro.

Para as simulações no horizonte de 72 h, nota-se que a média do conjunto está mais próxima dos membros com parametrização Betts-Miller, assim como no horizonte de 48 h. O membro CNTRL apresenta maior correlação com os dados observados e menor REQM. Por outro lado, o membro KF apresenta menor correlação e maior REQM também neste caso. O membro ZHAO apresenta valores bastante próximos à média do conjunto. Com o horizonte de 72 h, os melhores resultados são obtidos pelo membro CNTRL, seguido pelo membro ZHAO.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se uma avaliação das simulações por conjunto do Eta-5km para 10 casos de chuvas intensas na BRPS. A avaliação das simulações foi feita de duas formas: i) avaliação subjetiva: através da comparação dos campos de precipitação gerados pelas simulações com os campos de chuva observada (MERGE) e pela evolução temporal da precipitações simuladas comparadas à evolução temporal das observações em estações meteorológicas; e ii). Avaliação objetiva: realizada através das métricas Viés Categórico e ETS, além da análise do diagrama de Taylor (que sumariza Coeficiente de correlação, REQM e Desvio Padrão). Além disso, a análise sinótica dos dez casos de chuva intensa é apresentada.

A análise sinótica dos casos mostra que o maior agente causador de chuvas intensas associadas a inundações na BRPS é a ZCAS. Dos 10 casos, 8 são causados pela atuação deste sistema sinótico, sendo que destes 8, em 6 houve presença de vórtices ciclônicos embebidos na ZCAS (casos 1, 3, 4, 8, 9 e 10). Os outros 2 casos foram causados pela atuação de áreas de instabilidades (SCM e instabilidades pós-frontais).. Em relação à distribuição sazonal dos casos, 7 ocorreram nos meses de verão (dezembro/janeiro), 2 na primavera (novembro) e apenas 1 no outono (março).

A avaliação subjetiva das simulações por conjunto mostra que as simulações de 48 h de antecedência são ligeiramente superiores às simulações de 72 h de antecedência. Os membros com parametrização Kain-Fritsch apresentam melhor desempenho em simular os maiores acumulados, enquanto que os membros que utilizam parametrização Betts-Miller simulam melhor a localização dos núcleos de chuva. A avaliação subjetiva também mostrou que, nos casos em que houve atuação da ZCAS, os membros simularam melhor a localização da chuva do que nos casos de áreas de instabilidade. Nos casos em que há atuação da ZCAS sem vórtice ciclônico embebido, os membros tendem a simular os máximos de precipitação mais ao norte do que observado.

A avaliação objetiva mostra que, para ambos os horizontes de simulação, os melhores resultados são obtidos para precipitações entre 10 e 50 mm/ dia. O diagrama de Taylor mostra que o membro CNTRL possuiu maior correlação e menor REQM em ambos os horizontes. A média dos membros também apresenta bons resultados.

Dessa forma, conclui-se que as simulações por conjunto do modelo Eta-5km são úteis para previsão de eventos severos na BRPS. O membro CNTRL apresenta os melhores resultados, seguido pela média do conjunto.

Para trabalhos futuros sugere-se a avaliação do conjunto em períodos maiores, como um mês ou uma estação do ano, com o intuito de se avaliar o desempenho em longos períodos. Outra sugestão é a comparação do desempenho do conjunto no inverno e no verão, comparando-os.

BIBLIOGRAFIA

- AGRESTI, A. **An introduction to Categorical Data Analysis**. 2ª ed. Wiley, 2007.
- ANTHES, R.A. **Regional Models of the Atmosphere in Middle Latitudes**. Monthly Weather Review. v. 111, p. 1306 – 1335, 1983.
- BRASILIENSE, C.S. **Vórtice Ciclônico híbrido embebido na ZCAS associado a um caso de chuva intensa na Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, UFRJ. 2016.
- BRASILIENSE, C.S.; DEREZYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; DA SILVA SANTOS, V. R.; CALADO, R. N. **Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil**. Meteorological Applications, v. 25, n. 1, p. 66-77, 2017.
- BUIZZA, R.; MILLER, M.; PALMER, T.N. **Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. v. 125, p. 2887-2908, 1999.
- BUIZZA, R., TRIBBIA, J., MOLTENI, F. e PALMER, T. **Computation of optimal unstable structures for a numerical weather prediction model**. Tellus. Vol. 45A p.388-407, 1993.
- BUSTAMANTE, J.F.F. **Estudo da previsibilidade de eventos severos sobre a região da Serra do Mar usando previsão de curto prazo por ensemble**. Tese de Doutorado em Meteorologia, INPE, 2009.
- CALVETTI, L. **Previsão hidrometeorológica probabilística na Bacia do Alto Iguaçu-PR com os modelos WRF e TopModel**. Tese de Doutorado em Meteorologia, USP, 2011.
- CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **Extreme precipitation events in Southeastern South America and Large-Scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone**. Journal of Climate, v.15, p.2377-2394, 2002.
- CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and extreme rainfall**. Journal of Climate, v.17, p.88-108, 2004.
- CARVALHO, P.R.B. **Inclusão da Perturbação de Momentum no Esquema de Parametrização de Cumulus Kain-Fritsch e Impactos Sobre um Caso de Chuva Convectiva**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 2007.

- CEIVAP:. COMITÊ DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **Bacia do rio Paraíba do Sul: livro da bacia**. Brasília. Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília, Distrito Federal, 2001.
- CLARK, D.B.; FEDDERSEN, F.; GUZA, R.T. **Cross-shore surfzone tracer dispersion in an alongshore current**. Journal of Geophysical Research, v. 115, C11028, 2010.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.15, n.1, 2000.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.20, n.3, 2005.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.22, n.1, 2007.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.23, n.12, 2008.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.26, n.1, 2011.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.26, n.11, 2011.
- CLIMANÁLISE – **Boletim de monitoramento e análise climática**. v.27, n.1, 2012.
- CHOU, S.C. **Modelo regional Eta** . Climanálise Especial comemorativa de 10 anos, INPE, São José dos Campos, 1996.
- CHOU, S.C.; JUSTI DA SILVA, M.G.A. **Objective evaluation of ETA model precipitation forecasts over South America**. Revista Climanálise. ano 1, n.1, p. 1-17, 1999.
- CHOU, S. C. e SELUCHI, M. E. **Evaluation of two Eta Model verions for weather forecast over South America**. Geofísica Internacional, vol 40, n.3, p 219-237, 2001.
- COUTINHO, M.M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. Tese de Doutorado em Meteorologia, INPE, 1999.
- COX, J.D. **Storm Watchers – The turbulent History of Weather Prediction from Freanklin’s Kite to El Niño**. Wiley & Sons, 2002.
- DERECZYNSKI, C.P; OLIVEIRA, J.S.; MACHADO, C.O. **Climatologia da precipitação no Município do Rio de Janeiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, n. 1, p. 3171-3185, 2009.
- DONALDSON, R.J; DYER, R.M.; KRAUS, M.J. **An Objective evaluator of techniques for predicting severe weather events**. Preprints, Ninth Conference on Severe Local Weather Storms. Norman, Oklahoma. American Meteorological Society. pp. 321-326, 1975.
- DOYLE, M.; TOMASELLA J.; RODRIGUEZ, D.A.; CHOU, S.C. **Experiments Using New Initial Soil Moisture Conditions and Soil Map in the Eta Model Over La Plata Basin**.

Meteorology and Atmospheric Physics. v.121, n.3, p119-136. 2013. DOI: 10.1007/s00703-013-0265-5

DU, J.; MULLEN, S.L.; SANDERS, F. **Short-Range Ensemble Forecasting of Quantitative Precipitation.** Monthly Weather Review, v. 125, n. 10, p. 2427-2459, 1997.

EHRENDORFER, M. **Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts: a review.** Meteorol. Zeitschrift. Vol 6 n.4 p.147-183, 1997.

EK, M.; MITCHELL, M. K.; LIU, Y.; ROGERS, E.; GRUNMAN, P.; KOREN, V.; GAYANO, G.;TARPLEY, J. D. **Implementation of Noah Land Model advances in the NCEP operational Eta Model.** Journal of Geophysical Research. v.108, n.D22, p.8851-8867, 2003.

EPSTEIN, E.S. **A scoring system for probability forecasts of ranked categories.** J. Appl. Meteor. Vol 8, p 985-987, 1969.

EVERITT, B.S. **The Analysis of Contingency Tables.** 2^a ed. Chapman & Hall, 1992.

FAN, F.M.; RAMOS, M-H.; COLLISCHONN, W. **Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 20, n. 4, p. 914-926, 2015.

FERRIER, B. S. **A double-moment Multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description.** Journal of the Atmospheric Sciences. v.51, n.2, p.251- 280, 1994.

FERRIER, B. S.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. **Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model.** Conference on Numerical Weather Prediction, 15, San Antonio, TX, 2002. American Meteorological Society, p. 280-283.

FESER, F.; ROCKEL, B.; STORCH, H.; WINTERFELDT, J.; ZAHN, M. **Regional climate models add value to global model data. A review and selected examples.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 92, n. 9, p. 1181-1192, 2011.

GALLUS, W.A.JR. **Eta Simulations of Three Extreme Precipitation Events: Sensitivity to Resolution and Convective Parameterization.** Weather and Forecasting, v. 14, p. 405-426, 1999.

GIORGI, F. **Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model.** Journal of Climate, v. 3, p. 941–963, 1990.

GIORGI, F.; MEARNS, L.O. **Approaches to the simulation of regional climate change: A review.** Reviews of Geophysics, v. 29, n. 2, p. 191–216, 1991.

GNEITING, T.; RAFTERY, A.; WESTVELD, A.H.; GOLDMANN, T. **Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation.** Monthly Weather Review, v. 133, p. 1098-1118, 2005.

GOLDING, B.W. **Quantitative precipitation forecasting in the UK.** Journal of Hydrology, v. 239, p. 286-305, 2000.

GOMES, J. L. e CHOU, S. C., **Dependence of partitioning of model implicit and explicit precipitation on horizontal resolution.** Meteorology and atmospheric physics. Vol. 106 p.01-18, 2010.

GREYBUSH, S.J.; HAUPT, S.E.; YOUNG, G.S. **The regime dependence of optimally weighted ensemble model consensus forecasting.** Weather Forecasting, v. 23, n. 6, p. 1146-1161, 2008.

HAMILL, T.M.; COLUCCI, S.J. **Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecasts.** Monthly Weather Review, v. 126, p. 711-724, 1998.

HARRISON, M. S. J., RICHARDSON, D. S., ROBERTSON, K. e WOODCOOK, A., **Medium-range ensembles using both the ECMWF T63 and Unified models – An initial report.** U.K. Meteorological Office Tech. Rep., vol 153, 25pp, 1995.

HART, R.E.; GRUMM, R.H. **Using normalized climatological anomalies to rank synoptic-scale events objectively.** Monthly Weather Review, v. 129, p. 2426-2442, 2001.

HARVEY, L.O, HAMMOND, K.R.JR.; LUSK, C.M. **The application of signal detection theory to weather forecasting behavior.** Monthly Weather Review, n.120, p.863-883, 1992.

HOFFMAN, R.N.; KALNAY, E. **Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting.** Tellus, v. 35A, p.155-164, 1983.

HOUTEKAMER, P. L, LEFAIVRE, L., DEROME, J., RITCHIE, H., MITCHELL, H. L., **A system simulation approach to ensemble prediction.** Monthly Weather Review. Vol.120 p.863-883, 1996.

INEA **Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro. R3-A – Temas Técnicos Estratégicos, RT-03 – Vulnerabilidade a Eventos Críticos.** v.2, 2014. Disponível em:< <http://www.agevap.org.br/downloads/Diagnostico-Vulnerabilidades-VoII-Corpo.pdf>>, acesso em 01/08/2017.

JANJIC, Z. I. **The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes.** Monthly Weather Review, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.

JOLLIFFE, I.T.; STEPHENSON, D.B. **Forecast Verification – A practitioner’s Guide in Atmospheric Science.** 2^a ed. Wiley-Blackwell, 2012.

KALNAY, E. **Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability.** University Press, UK, 2003.

KAIN, J. S. **The Kain–Fritsch convective parameterization: An update.** Journal of Applied Meteorology. v.43 p.170–181, 2004.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. **A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth’s atmosphere.** Journal of the Atmospheric Sciences. v.31, p118-133, 1974.

LEITH, C.E., **Theoretical skill of Monte-Carlo forecasts.** Monthly Weather Review, Vol.102 p.409-418, 1974.

LEUTBECHER, M.; PALMER, T.N. Ensemble Forecasting. **Journal of Computational Physics.** v. 227, p. 3515-3539, 2008.

LOPEZ, P. **Cloud and Precipitation Parameterizations in Modeling and Variational Data Assimilation: A Review.** Journal of the Atmospheric Sciences - Special Section, v. 64, p. 3766-3784, 2007.

LORENZ, E. N., **Deterministic nonperiodic flow.** Journal of Atmospheric. Sciences. Vol.20, p.130-140, 1963.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. **The intense Rainfall and floods in Rio de Janeiro.** In: State of the Climate in 2011. Bulletin of the American Meteorological Society. v. 93, n. 7, p. S176, 2012.

MASON, I. **A model for assessment of Weather forecast.** Australian Meteorological Magazine, v. 30, p.291-303, 1982.

- MENDONÇA, A.M.; BONATTI, J.P. **O Sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC**. Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu. 2002.
- MENDONÇA, A.M.; BONATTI, E.J.P. **Experiments with EOF-Based Perturbation Methods and Their Impact on the CPTEC/INPE Ensemble Prediction System**. Monthly Weather Review v. 137, n.4, p.1438-1459, 2009.
- MESINGER, F. **Forward-backward scheme, and its use in a limited area model**. Atmospheric Physics. v.50, p.200-210, 1977.
- MESINGER, F. **A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models**. Riv. Meteor. Aeronautica. Vol.44 p.195-202, 1984.
- MESINGER, F.; BLACK, T.L. **On the impact on forecast accuracy of the step-mountain (eta) vs. sigma coordinate**. Meteorology and Atmospheric Physics, v. 50, p. 47-60. 1992.
- MESINGER, F. JANJIC, Z.I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D. & DEAVEN, D.G. **The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment**. Monthly Weather Review, v.116, p.1493-1518, 1988.
- MESINGER, F.; VELJOVIC, K. **Limited area NWP and regional climate modeling: a test of the relaxation vs Eta lateral boundary conditions**. Meteorol Atmos Phys v.119, p.1–16. 2013. doi:10.1007/s00703-012-0217-5
- MESINGER, F.; VELJOVIC, K. **Eta vs. sigma: review of past results, Gallus–Klemp test, and large-scale wind skill in ensemble experiments**. Meteorol Atmos Phys. 2017 doi 10.1007/s00703-016-0496-3
- MOLTENI, F., BUIZZA, R., PALMER, T. N. e PETROLIAGIS, T. **The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation**. Q. J. R. Meteorol. Soc. Vol.122 p.73-119, 1996.
- MOURA, J. D. O. **Efeitos do transporte de momentum convectivo na distribuição de chuva**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 2016.
- MURPHY, A.H.; **The attributes diagram: A geometric framework for assessing the quality of probability forecasts**. International Journal Forecasting, n. 2, p.285-293, 1986.
- MURPHY, A.H.; **What's a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting**. Weather and Forecast. v.8, p.281-293, 1993.

MYLNE, K.R.; EVANS, R.E.; CLARK, R.T. **Multi-Model multi-analysis ensembles in quasi-operational medium-range forecasting.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 128, p. 361-384, 2002.

OTT, E.; HUNT, B.R.; SZUNYOGH, I.; ZIMIN, A.V.; KOSTELICH, E.J.; CORAZZA, M.; KALNAY, E.; PATIL, D.J.; YORKE, J.A. **A local Ensemble Kalman Filter for Atmospheric Data assimilation.** Tellus, v. 56, n. 5, p. 415-428, 2004

PALMÉN, E. **Origin and Structure of High-Level Cyclones South of the Maximum Westerlies.** Tellus, v. 1, n.1, p. 1-64, 1949.

PALMER, T. N. **Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate.** Reports on Progress in Physics, v.63, n.2, p.71-116, 2000.

PEEL, S.; WILSON, L. J. **A diagnostic verification of the precipitation forecasts produced by the Canadian Ensemble Prediction System.** Weather and Forecasting. v.23 p.596-616, 2008.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de Episódios de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 1994.

QUADRO, M, F. L. **Estudo de Vórtices Ciclônicos de Mesoescala Associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul.** Tese de Doutorado em Meteorologia, USP, 2012.

RAFTERY, A.E.; GNEITING, T., BALABDAQUI, F; POLAKOWSKI, M. **Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles.** Monthly Weather Review, v.133, p.1155-1174, 2005.

ROZANTE J.R. **Aninhamento do modelo regional Eta sobre América do Sul.** Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2001

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G; VILA, D. A. **Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America.** Weather and Forecasting, v. 25, p. 885-894, 2010.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H-L.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; HOU, Y-T.; CHUANG, H-Y.; JUANG, H-M.H.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; VAN-DELST, P.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; VAN DEN DOOL, H.; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J-K.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.; ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C-Z.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R.W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. **The NCEP Climate**

Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society. p. 1015–1057. 2010.

SCHWARZKOPF, M. D.; FELS, S.B. **The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes.** Journal of Geophysical Research. v.96, p.9075–9096, 1991.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. **Synoptic Patterns Associated with Landslide Events in the Serra do Mar, Brazil.** Theoretical and Applied Climatology, v. 98, p. 67-77, 2009.

SIQUEIRA, V.A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.M.; CHOU, C.S. **Ensemble flood forecasting based on operational forecast of the regional Eta EPS in the Taquari-Antas Basin.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 3, p. 587-602, 106, 2016.

SOLMAN, S.A. **Regional climate modeling over South America: A review.** Advances in Meteorology, v. 2013, p.1-13, 2013.

STANSKI, H.R., WILSON, L.J., BURROWS, W.R. **Survey of common verification methods in meteorology.** World weather technical report n.8. Genebra: Organização Meteorológica Mundial. 1989.

STENSRUD, D.J.; BAO, J-W.; WARNER, T.T. **Using initial conditions and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems.** Monthly Weather Review, v. 128, p. 2077-2107, 2000.

TAYLOR, K. E., **Summarizing multiple aspects of model performance in a simple diagram.** J. Geophys. Res., vol.106, p.7183-7192, 2001.

TAYLOR, J.M.; BUIZZA, R. **Using weather ensemble predictions in electricity demand forecasting.** International Journal of Forecasting, v. 19, p. 57-70, 2003.

TENESSONG, R. S., VOUNDOU, D. A., INGRI, P. M., KAMGA, F. M., **Evaluation of Eta weather forecast model over central Africa.** Atmospheric and Climate Sciences. ,v.2, p. 532-537, 2012.

TRACTON, M. S. e KALNAY, E. **Ensemble forecasting at NMC: Operational implementation.** Weather and forecasting. Vol.8 p.379-398, 1993.

VIEIRA, R.M.G. **Avaliação das previsões de precipitação do modelo Eta para bacia do rio São Francisco em Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, UFRJ, 2013.

VIEIRA, R.M.G.; DEREZYNSKI, C.P.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; PAIVA NETO, A.C. **Avaliação das previsões de precipitação do modelo Eta para a Bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais, Brasil.** Anuário do Instituto de Geociências, v. 38, n. 2, p. 15-23, 2015.

WANDISHIN, M.S.; MULLEN, S.L.; STENSRUD, D.J.; BROOKS, H.E. **Evaluation of a short-range multimodel ensemble system.** Monthly Weather Review. v. 129, p. 729-747, 2001.

WANG, W.; SEAMAN, N.L. **A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model.** Monthly Weather Review, v.125, p. 252- 278, 1997.

WEI, H.L.; BILLINGS, S.A.; BALIKHIN, M.A. **Wavelet based non-parametric NARX models for nonlinear input-output system identifications.** International Journal of Systems Science, v. 37, n. 15, p. 1089-1096, 2006

WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** 2^a ed, 2006.

WILSON, L.J.; BURROWS, W.R.; LANZINGER, A. **A strategy for verification of weather element forecasts from an ensemble prediction system.** Monthly weather review, v. 127, p. 956-970, 1999.

WOODCOCK, F.; ENGEL, C. **Operational Consensus Forecasts.** Weather and Forecasting, v. 20, p. 101-111, 2005.

ZHAO, Q. Y., F. H. CARR, **A prognostic cloud scheme for operational NWP models.** Monthly Weather Review, v. 125, p.1931–1953, 1997.

ZHU, Y., IYENGAR, G., TOTH, M. S., TRACTON, T. **Objective evaluation of the NCEP global ensemble forecasting system.** 15^o Conf. on Weather Analysis and forecasting, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., p.J79-J82, 1996.