



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

**AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DO
MODELO ETA PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO
EM MINAS GERAIS**

RAPHAEL MOREIRA GOMES VIEIRA

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Rio de Janeiro, RJ.

Julho, 2013.

AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO ETA PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO EM MINAS GERAIS

RAPHAEL MOREIRA GOMES VIEIRA

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

Rio de Janeiro

Julho de 2013

AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO ETA PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO EM MINAS GERAIS

RAPHAEL MOREIRA GOMES VIEIRA

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

Examinada por:

D.Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Ph.D. Chou Sin Chan

D.Sc. Ana Maria Bueno Nunes

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2013

VIEIRA, RAPHAEL M., G.

**AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DO
MODELO ETA PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO EM
MINAS GERAIS / RAPHAEL MOREIRA GOMES VIEIRA.**

Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2013. 98p.

Orientadora: D.Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Dissertação (Mestrado) - UFR J/PPGM/IGEO/CCMN

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2013.

Referências Bibliográficas: pp.77-82.

1. Avaliação da precipitação
2. Modelo Eta
3. Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus; Ser a quem humildemente solicito a sua proteção e força para seguir em frente; agindo com a razão.

Aos meus pais Rodrigo e Itaciara pelos conselhos de vida, educação passada e dedicação, cujos ensinamentos auxiliaram-me a possuir a atual índole.

À professora Claudine Pereira Dereczynski, pela oportunidade concedida para tornar-me um profissional mais qualificado através desta dissertação. Além disso, por ser muito prestativa, auxiliando-me nas dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Chou Sin Chan pelas instruções passadas no CPTEC e autorizações para eu trabalhar nos fins de semana.

A todos os outros professores do Departamento que contribuíram para a minha formação.

Aos colegas de faculdade pelo convívio durante o mestrado.

Ao pessoal do CPTEC pela ajuda em várias situações.

ÍNDICE

Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Siglas.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	5
2. REVISÃO BIBLOGRÁFICA.....	8
3. DADOS E METODOLOGIA.....	18
3.1 Dados da Reanálise ERA-Interim e Outros Produtos.....	18
3.2 Elaboração da Climatologia da Precipitação.....	19
3.3 Seleção e Estudo dos Casos de Chuvas Intensas.....	20
3.4 Modelo Eta.....	23
3.5 Métricas para Avaliação Objetiva.....	38
3.6 Elaboração da Avaliação Subjetiva.....	44
4. CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO	45
5. RESULTADOS.....	52
5.1 Avaliação Objetiva da Precipitação Prevista com 72 h de Antecedência.....	52
5.2 Avaliação Subjetiva do Eta-40km e Eta-8km com 72 h de Antecedência.....	56
6. CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

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

AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DO
MODELO ETA PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO
EM MINAS GERAIS

RAPHAEL MOREIRA GOMES VIEIRA

Julho/2013

Orientadora: D.Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Neste trabalho, as previsões do modelo regional Eta do CPTEC/INPE, em duas resoluções espaciais de 8 km e 40 km, foram avaliadas em 25 casos de chuvas intensas ocorridos no período de 2005-2012 na Bacia do Rio São Francisco, à montante da Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias, em Minas Gerais. O objetivo do trabalho é contribuir para a melhoria das previsões de chuva intensa na área em estudo. As previsões de chuva do modelo Eta com 72 horas de antecedência são comparadas com dados observacionais. Além disso, a situação sinótica prevista é confrontada com a Reanálise ERA-Interim. Inicialmente elaborou-se a climatologia da precipitação na área em estudo, detectando-se a ocorrência do período chuvoso entre outubro à março, quando concentra-se quase 90% do total pluviométrico anual (entre 1300 e 1700 mm). Os resultados da avaliação objetiva indicam que o Eta-40km e o Eta-8km superestimam (subestimam) a quantidade de eventos de chuvas fracas (fortes). O Eta-8km exibe melhor desempenho do que o Eta-40km, com menor raiz do erro quadrático médio e maior correlação espacial. Baseado na avaliação subjetiva, nota-se que quando as previsões do modelo Global do CPTEC/INPE erra o posicionamento do sistema meteorológico atuante, ambas as versões do modelo Eta são afetadas. Nos casos em que os sistemas meteorológicos são mais pronunciados, aumenta o grau de acerto das versões do modelo, com o Eta-8km apresentando melhores resultados do que o Eta-40km.

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

EVALUATION OF ETA MODEL RAINFALL FORECASTS
AT SÃO FRANCISCO RIVER BASIN IN MINAS GERAIS

RAPHAEL MOREIRA GOMES VIEIRA

July/2013

Advisor: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

In this work, the CPTEC/INPE's Eta regional model (8 km and 40 km) forecasts were evaluated for 25 intense rainfall cases, occurred in the period 2005-2012, at São Francisco River Basin, upstream Três Marias Hydroelectric Power Plant, in Minas Gerais. The objective is to contribute to the improvement of intense rainfall forecasts in the studied area. The 72 h rainfall forecasts are compared to observational data. Moreover, the synoptic situation is confronted with ERA-Interim Reanalysis. Initially, the precipitation climatology revealed that almost 90% of total annual rainfall (between 1300 and 1700 mm) in the studied area occurs during the rainy season, from October to March. The results from the precipitation's objective evaluation indicate that Eta-40km and Eta-8km overestimate (underestimate) the amount of weak (strong) rainfall events. Eta-8km shows better performance compared to Eta-40km, with lower root mean square error and higher spatial correlation. Based on the subjective evaluation, it is noted that when CPTEC/INPE's Global Model forecasts fails in positioning the meteorological system, both versions of Eta model are affected. In cases where meteorological systems are more pronounced, it increases the accuracy of both Eta model versions, with Eta-8km showing better results than Eta-40km.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Localização geográfica do Rio São Francisco, com destaque para a área à montante da UHE de Três Marias, na região denominada de Alto São Francisco. 4
- Figura 1.2 – Foto da UHE de Três Marias (Fonte: www.cemig.com.br). 5
- Figura 1.3 – Fotos das consequências das chuvas na região de estudo no período de 2005 a 2012. 6
- Figura 2.1 – Vetor vento e anomalia de altura geopotencial (a cada 10 m) geopotencial em 200 hPa com (a) e sem (b) a presença dos Andes. Fonte: Figueroa et al. (1995). 9
- Figura 2.2 – Vetor vento e divergência do vento (a cada 1.10^{-6} s^{-1}) em 850 hPa com (a) e sem (b) a presença dos Andes. Fonte: Figueroa et al. (1995). 10
- Figura 2.3 - Precipitação acumulada em 24 horas válida para 18/01/2003 às 06 UTC. (a) Observação; (b) simulação e (c) previsão do Eta-10km; (d) previsão do modelo operacional Eta-40km. Fonte: Rozante (2008). 11
- Figura 2.4 - Valores de BIAS relativos às previsões de chuvas do Eta-40km em 24 horas e associados aos antigos (linha azul) e novos (linha rosa) parâmetros atuantes no esquema Betts-Miller. Fonte: Seluchi e Chou (2001). 13

Figura 2.5 - Valores de ETS relativos às previsões de chuvas do Eta-40km em 24 horas e associados aos antigos (linha azul) e novos (linha rosa) parâmetros atuantes no esquema Betts-Miller. Fonte: Seluchi e Chou (2001).	13
Figura 2.6 - Valores de BIAS relativos às previsões de chuvas do modelo Eta-20km (linha grossa), Eta-10km (linha fina) e Eta-5km (linha pontilhada) com 132 horas de antecedência. Fonte: Gomes e Chou (2010).	15
Figura 2.7 - Valores de ETS relativos às previsões de chuvas do modelo Eta-20km (linha grossa), Eta-10km (linha fina) e Eta-5km (linha pontilhada) com 132 horas de antecedência. Fonte: Gomes e Chou (2010).	16
Figura 2.8 – Valores do REQM (mm/dia) calculados entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010 para cada prazo de previsão (com 24 até 168 horas de antecedência) na cidade de Uberlândia em Minas Gerais. Fonte: Meira (2010).	17
Figura 3.1 - Grade horizontal E de Arakawa Fonte: Arakawa (1977).	24
Figura 3.2 – Exemplo de distribuição de 50 camadas no modelo Eta Fonte: Black (1994).	26
Figura 3.3 - Uma seção vertical idealizada da topografia do modelo Eta. Fonte: Black (1994).	27
Figura 3.4 – Integração do modelo Eta-40 km.	34

Figura 3.5 – Integração do modelo Eta-8km e topografia (em metros) da região.	35
Figura 3.6 – Estações da ANA (em vermelho), CEMIG (em verde) e do INMET (em azul), utilizadas para avaliação objetiva da precipitação.	43
Figura 4.1 - Campo de precipitação: climatologia Xie e Arkin (1997) para o período de 1979 a 2008 para (a) Out-Mar e (b) Abr-Set.	46
Figura 4.2: Mapa com a localização da região em estudo.	47
Figura 4.3 – Dados pluviométricos mensais climatológicos para as estações de (a) Bambuí; (b) Fazenda Escola Florestal; (c) Ibitité e (d) Silva Campos. Fonte: ANA.	48
Figura 4.4 – Totais pluviométricos anuais climatológicos para as estações de (a) Bambuí; (b) Fazenda Escola Florestal; (c) Ibitité e (d) Silva Campos. Fonte: ANA.	49
Figura 4.5 – Maiores totais pluviométricos diários (mm), a cada ano, para as estações de (a) Bambuí; (b) Fazenda Escola Florestal; (c) Ibitité e (d) Silva Campos. Fonte: ANA.	51
Figura 5.1 – Valores de BIAS relativos às previsões de chuvas do Eta-8km e Eta-40km para 72 horas nos 25 casos extremos.	53
Figura 5.2 – Valores de ETS relativos às previsões de chuvas do Eta-8km e Eta-40km para 72 horas nos 25 casos extremos.	54

Figura 5.3 – Comparação entre os dez maiores totais pluviométricos (mm/dia) observados (preto) e previstos com o Eta-40km (azul) e Eta-8km (vermelho).	56
Figura 5.4 – Precipitação acumulada (mm) em 24 horas para os casos listados na Tabela 3.1.	57
Figura 5.5 – Pressão atmosférica ao nível médio do mar (sombreado) a cada 4 hPa e ventos à 10 m para os dias 17/12/2011 e 02/01/2012 às 12 UTC.	67
Figura 5.6 – Linhas de corrente (m/s) em 200 hPa para os dias 17/12/2011 e 02/01/2012 às 12 UTC.	68
Figura 5.7 – Pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar (sombreado) a cada 4 hPa e ventos (m/s) à 10 m para os dias 04/11/2007 e 13/02/2009 às 12 UTC.	69
Figura 5.8 – Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado na camada 1000-300 hPa ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) para os dias 04/11/2007 e 13/02/2009 às 12 UTC.	70
Figura 5.9 – Pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar (sombreado) a cada 4 hPa e ventos (m/s) à 10 m para o dia 05/01/2007 às 12 UTC.	71
Figura 5.10 – Linhas de corrente (m/s) em 200 hPa para o dia 05/01/2007 às 12 UTC.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Casos de chuvas intensas em Minas Gerais no período de outubro a março, entre os anos de 2005 e 2012, selecionados para estudo.	22
Tabela 3.2 – Características gerais do modelo Eta-8km.	36
Tabela 3.3 – Datas das condições iniciais das previsões geradas com o modelo Eta-8km para cada um dos 25 casos analisados.	37
Tabela 3.4 – Limiares em mm por dia e classificação da intensidade da precipitação.	39
Tabela 3.5 – Informações referentes às 35 estações da ANA, INMET e CEMIG utilizadas para avaliação objetiva das previsões de chuva geradas pelo Eta-40km e Eta-8km.	42
Tabela 5.1 – Métricas de avaliação das previsões de precipitação em 72 horas para Eta-40km e Eta-8km nos 25 casos de chuvas intensas.	54
Tabela 5.2 - Estações e casos de chuvas intensas onde os 10 maiores valores de precipitação observada foram registrados.	55
Tabela 5.3 – Localização relativa à observação do posicionamento previsto em 72 horas pelos modelos Eta-8km e Eta-40km do sistema de precipitação atuante. Estão destacados em negrito os casos em que a posição prevista do sistema precipitante foi corretamente prevista.	64

Tabela 5.4 – Métricas de avaliação das previsões de precipitação em 72 horas para Eta-40km e Eta-8km para os 18 casos nos quais a localização do sistema meteorológico é prevista corretamente, e todos os 25 casos. 65

LISTA DE SIGLAS

AB – Alta da Bolívia
ANA - Agência Nacional de Águas
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
AS – América do Sul
ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BC – Baixa do Chaco
BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BMJ - Betts-Miller-Janjic
C – Áreas de Convergência
CCL - Condições de Contorno Lateral
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CESP - Companhia Energética de São Paulo
CHM – Centro de Hidrografia da Marinha
CI - Condições Iniciais
CMAP – CPC Merged Analysis of Precipitation
COLA - Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies
COPEL - Companhia Paranaense de Energia
CORR – Correlação
CPC - Climate Prediction Center
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação
ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ECT – Energia Cinética Turbulenta
EM – Erro Médio
ETS – Equitable Threat Score
FR – Ferrier
FUVI – Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado
GFDL - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GOES - Geostationary Operational Environment Satellite

H - Hit
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAN – Jato de Altos Níveis
JBN – Jato de Baixos Níveis
KF – Kain Fritsch
MCGA - Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MG – Minas Gerais
NCEP - National Centers for Environmental Prediction
PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar
REQM – Raiz do Erro Quadrático Médio
RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte
S - South
SCM – Sistemas Convectivos de Mesoescala
SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná
SP - São Paulo
TS – Threat Score
TSM - Temperatura da Superfície do Mar
UHE – Usina Hidrelétrica
UTC – Universal Time Coordinate
W - West
ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a demanda por previsões meteorológicas de qualidade aumentou substancialmente. Com o início da utilização dos produtos de modelagem numérica de previsão do tempo, em meados da década de 1990 no Brasil, os meteorologistas saíram da fase da previsão de tempo “subjetiva” e passaram para a fase da previsão “objetiva”. Na fase subjetiva os meteorologistas que trabalhavam nos centros de previsão do tempo, precisavam projetar a posição e intensidade dos principais sistemas de tempo (ciclones, frentes frias, zonas de convergência e outros) para o futuro, o que só era possível com no máximo dois dias de antecedência. À medida que as previsões numéricas de tempo, geradas inicialmente pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir de 1996, começaram a ser divulgadas pela internet, os meteorologistas nos demais centros de previsão do país passaram a ter acesso a tais previsões objetivas com até cinco dias de antecedência. Isto contribuiu para uma grande melhoria na qualidade dos serviços prestados. Assim, ao mesmo tempo em que o país se modernizava, necessitando de mais e melhores informações meteorológicas esta ciência também evoluiu, acompanhando a crescente demanda do país.

Atualmente previsões meteorológicas geradas através de modelagem numérica global e regional, com resoluções espaciais e temporais muito elevadas são emitidas por diversos centros meteorológicos. Vários setores da economia tem se beneficiado de tais previsões, como por exemplo: transporte, indústria, agricultura, comércio, turismo e também os setores relacionados à geração de energia elétrica, que é o foco deste trabalho.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o Brasil detém um dos maiores potenciais hidrelétricos do mundo, sendo que, atualmente, sua matriz energética é composta, predominantemente, por esta fonte, ficando o restante distribuído entre as outras fontes de geração (térmica, nuclear, eólica e biomassa). Em 2008, 74% de toda a energia elétrica gerada no país era proveniente das hidrelétricas (ANEEL, 2008).

Em Lima (2005) encontra-se um retrospecto resumido do histórico do setor elétrico brasileiro, ressaltando-se que a participação efetiva da meteorologia nas atividades do setor ocorreu apenas após o acidente com as usinas do Rio Pardo (SP) em janeiro de 1977, quando se romperam as barragens de Euclides da Cunha e Armando Salles Oliveira (Pessoa e Mine, 1994). De acordo com Lima (2005) muitas empresas do setor passaram a se estruturar, formando pequenos núcleos de meteorologia, como foi o caso da Companhia Energética de São Paulo (CESP), de FURNAS Centrais Elétricas e da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG); ou se unirem a Sistemas Estaduais de Meteorologia, como foi o caso da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) que se associou ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), atual Instituto SIMEPAR.

O papel da meteorologia nas empresas do setor elétrico é de fundamental importância e tem crescido nos últimos anos, produzindo informações específicas para a geração, transmissão e distribuição da energia. Machado et al. (2007) descrevem as aplicações de informações meteorológicas necessárias para planejamentos eletroenergéticos de curtíssimo (algumas horas) e curto (alguns dias) prazos e para operação em tempo real. O uso de tais informações propicia também suporte em situações de condições meteorológicas ou climáticas críticas, acerca dos intercâmbios de energia entre os subsistemas eletroenergéticos. Os autores relatam que a previsão de ocorrência e o monitoramento de tempestades sobre as linhas de transmissão permitem na operação em tempo real modificar o carregamento de uma determinada linha, evitando perturbações no sistema seja por descargas atmosféricas ou em caso mais extremo por queda de torre. Além disso, Machado et al (2007) afirmam que é fundamental o conhecimento da climatologia das tempestades nas linhas em que ocorreram quedas de torre, caracterizando o tipo e a frequência destas tempestades e o estabelecimento de índices, os quais associem o grau de severidade de uma tempestade às descargas atmosféricas.

Na Meteorologia, a compreensão de fenômenos que produzem condições adversas de tempo é de grande importância para fornecer suporte técnico aos órgãos e empresas que dependem deste tipo de conhecimento. Os principais casos são considerados aqueles de maior impacto nas atividades humanas, algumas vezes provocando mortes, desabrigados e desalojados.

As previsões de tempo para usinas hidrelétricas (UHEs), utilizadas por empresas do setor elétrico, principalmente em eventos de chuvas intensas, precisam ser aprimoradas. Tais UHEs são muito importantes tanto para sua operação diária, através do controle de afluência e defluência (incluindo a geração e o vertimento), como para o controle de cheias. Os eventos que ocorrem no período chuvoso provocam alterações no regime hidrológico, afetando a operação hidráulica da usina. Um exemplo recente foi o caso das fortes chuvas ocorridas em janeiro de 2012 em todo o Estado de Minas Gerais. Na ocasião, a CEMIG atuou intensamente no monitoramento dos níveis dos reservatórios das usinas da Empresa a fim de amenizar os efeitos das cheias, que atingiram várias comunidades ribeirinhas. Devido ao intenso período de chuvas o trabalho realizado pela Empresa se intensificou. Técnicos da CEMIG acompanharam a todo o momento a chuva e os níveis dos rios e reservatórios.

A partir das informações coletadas, juntamente com a previsão meteorológica, a Empresa pôde decidir sobre qual o procedimento deveria-se adotar em cada represa, reter ou liberar água dos reservatórios, de forma a minimizar os impactos sobre a população que mora no entorno da barragem.

Para a UHE de Três Marias, pertencente à CEMIG, o volume de água que estava chegando ao reservatório era da ordem de $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo liberado cerca de $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$, o que colaborou para diminuir os efeitos das enchentes na região, pois a quantidade de água liberada era inferior ao que chegava à usina. A CEMIG também estava em constante contato com a Defesa Civil dos municípios (Fonte: www.em.com.br).

Diante dos argumentos apresentados, neste trabalho a região selecionada para este estudo compreende a área da Bacia do Rio São Francisco, à montante da UHE de Três Marias, em Minas Gerais a 270 km de Belo Horizonte (Figura 1.1). O entorno da UHE Três Marias possui extensão territorial de 18.710 quilômetros quadrados, e envolve 23 cidades com uma população estimada de 334.737 habitantes (<http://www.agbpeixe vivo.org.br/>). O Rio São Francisco tem sua nascente histórica na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas e sua nascente real na cidade de Medeiros, em Minas Gerais. A foz localiza-se no Oceano Atlântico, entre os Estados de Sergipe e Alagoas. A área em estudo localiza-se no Alto São Francisco.



Figura 1.1 – Localização geográfica do Rio São Francisco, com destaque para a área à montante da UHE de Três Marias, na região denominada de Alto São Francisco.

A UHE de Três Marias (Figura 1.2) operada pela CEMIG, com potência instalada de 396000 kW, completou 50 anos em 22 de maio de 2012. O volume do reservatório (lago da represa) tem 21 bilhões de metros cúbicos de água, sendo sete vezes maior que a Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro.



Figura 1.2 – Foto da UHE de Três Marias (Fonte: www.cemig.com.br).

1.1 Objetivos

Neste trabalho, o modelo Eta (Mesinger et al., 2012) do CPTEC/INPE foi configurado sobre a região da Bacia do Rio São Francisco, à montante da UHE Três Marias em Minas Gerais em duas versões: 8 km e 40 km de resolução espacial. Previsões para o horizonte de 72 horas foram elaboradas, com ambas as versões do modelo, a partir de previsões do Modelo Global também utilizado pelo CPTEC/INPE, para 25 casos de chuvas intensas na região em estudo, ocorridos durante o período de 2005 a 2012. A performance do modelo é avaliada com objetivo de contribuir para a melhoria das previsões de chuvas intensas na região.

A Figura 1.3 apresenta as consequências das chuvas para alguns casos durante o período citado.



Figura 1.3 – Fotos das consequências das chuvas na região de estudo no período de 2005 a 2012: (a) Bairro São Geraldo, na cidade de Pouso Alegre (sul de Minas Gerais), em 14/02/2009; Municípios de (b) Uberaba (Triângulo Mineiro) em 29/12/2009; (c) Florestal (Região Metropolitana de Belo Horizonte) em 17/12/2011 e (d) Muriaé (Zona da Mata Mineira) em 02/01/2012.

As questões listadas abaixo serão respondidas ao longo do trabalho:

a) O aumento da resolução espacial do modelo Eta (de 40 km para 8 km), melhora a previsão de chuva em situações de eventos extremos?

b) As características dos sistemas meteorológicos atuantes influenciam na previsibilidade dos modelos de previsão numérica de tempo?

c) Caso o modelo Global erre a previsão do posicionamento do sistema meteorológico atuante, existe alguma possibilidade do modelo regional realizar uma boa previsão? Esta seria a principal origem dos erros do modelo regional?

d) Quais as principais características da climatologia da precipitação da área em estudo?

A fim de responder as questões listadas acima, a dissertação está organizada nos seguintes capítulos: o capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura, proporcionando algum embasamento teórico sobre o assunto. No capítulo 3 deste documento, consta a metodologia e os dados para o estudo em questão. O capítulo 4 descreve a climatologia da precipitação na área em estudo. No capítulo 5, mostram-se os resultados das avaliações objetivas e subjetivas para os 25 casos estudados, e finalmente o capítulo 6 expõe as conclusões do trabalho realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aborda questões relacionadas à performance de modelos numéricos de previsão de tempo, com foco nas diferenças de resoluções espaciais.

A maior parte da região tropical e subtropical da América do Sul recebe mais de 50% do total anual de precipitação no verão austral na forma de chuva convectiva com forte variação diurna (Figuroa e Nobre, 1990). Diante disto, a liberação de calor latente é uma grande fonte de aquecimento na região, e provavelmente responsável pelas características da circulação regional nesta época.

Alguns trabalhos com modelos tem mostrado que as características básicas da circulação da alta troposfera podem ser reproduzidas pelas fontes de calor estacionária e transiente sobre a Amazônia e a região central da América do Sul durante o verão (Silva Dias et al., 1983; De Maria, 1985; Paegle et al., 1987). Todavia, a circulação regional nos baixos níveis sobre a América do Sul não tem sido reproduzida adequadamente pelos modelos numéricos primitivos. Eles ignoram o conjunto de efeitos topográficos (DeMaria, 1985) ou os têm incluído de maneira simples (Kleeman, 1989).

Para avaliar a circulação regional de maneira mais realista, é necessário controlar a inclinação da topografia na região dos Andes mais adequadamente. Mesinger e Janjic (1985) desenvolveram uma coordenada vertical η , que elimina os problemas da coordenada sigma próximo à topografia muito íngremes.

Com base nos estudos anteriores descritos, Figuroa et al. (1995) propuseram o uso do modelo de coordenada η , acrescentando os efeitos da liberação de calor latente para simular os aspectos da circulação em escala regional sobre a América do Sul, com ênfase especial na formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Os resultados mostraram que a posição e intensidade da ZCAS modulada através dos experimentos realizados dependem se o aumento da convecção diurna é transiente ou persistente. Apesar das limitações do estudo (modelo sem chuva, área limitada, ausência de aquecimento

radiativo diurno, e sem transporte de movimento ascendente a partir de nuvens cumulus), apenas as forçantes dinâmicas foram capazes de mostrar a interação entre os efeitos do aquecimento diabático e o fluxo atmosférico sobre as montanhas íngremes dos Andes, vistos a partir dos experimentos realizados cuja simulação reproduziu bem as características da circulação de verão como nos altos (baixos) níveis da troposfera (Figuras 2.1 e 2.2): Alta da Bolívia - AB e cavado do Nordeste (Baixa do Chaco - BC e áreas de convergência - C).

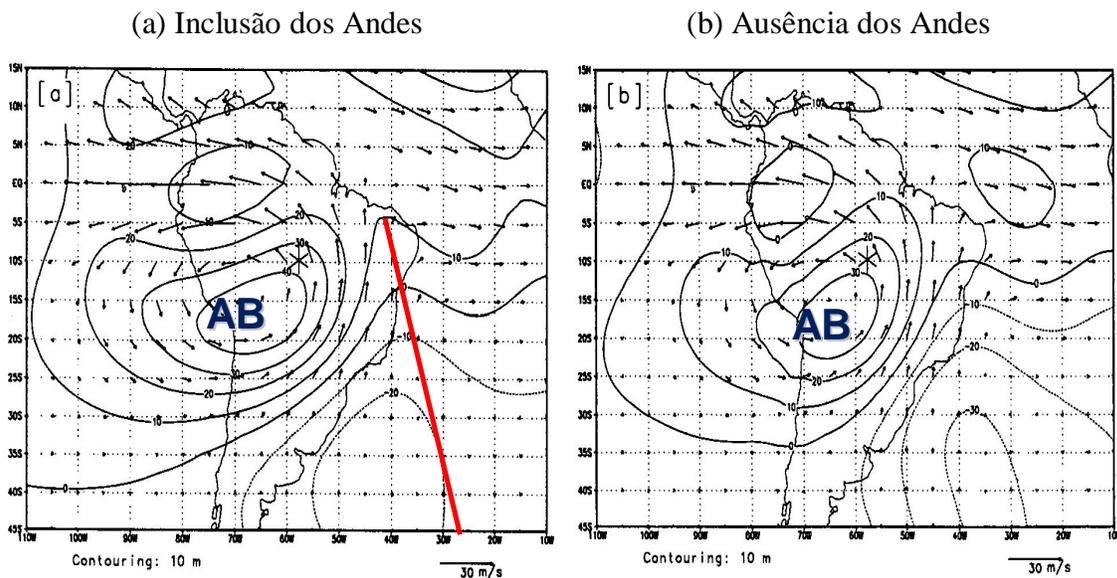


Figura 2.1 – Vetor vento e anomalia de altura geopotencial (a cada 10 m) em 200 hPa com (a) e sem (b) a presença dos Andes. Fonte: Figueroa et al. (1995).

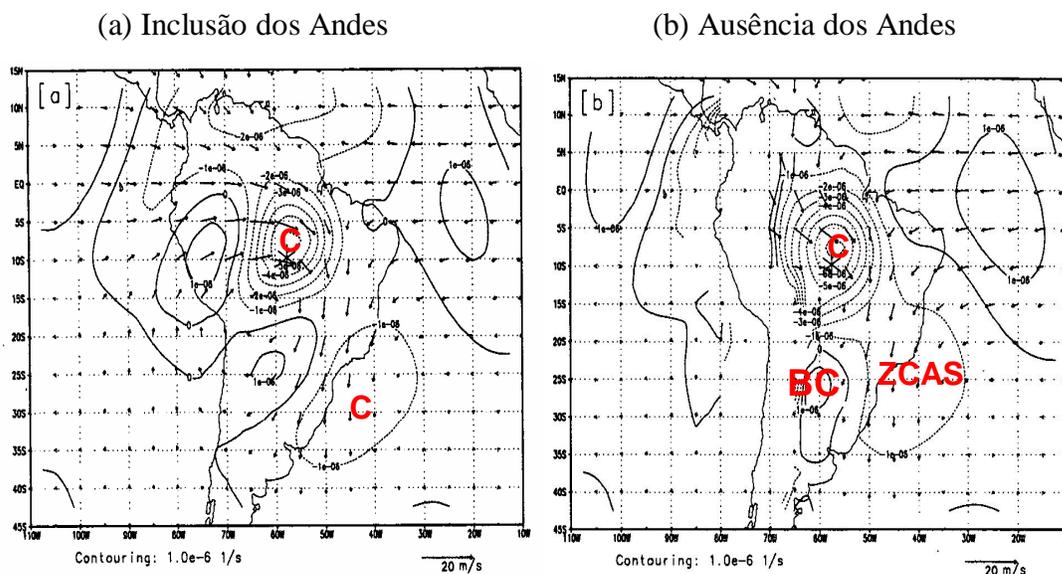


Figura 2.2 – Vetor vento e divergência do vento (a cada 1.10^{-6} s^{-1}) em 850 hPa com (a) e sem (b) a presença dos Andes. Fonte: Figueroa et al. (1995).

Outros trabalhos, tais como Rozante (2008), abordam o comportamento do modelo Eta em alta resolução considerando-se diferenças na utilização da aproximação hidrostática (hidrostático x não-hidrostático), do esquema de convecção (Betts-Miller-Janjic x Kain-Fritsch) e da umidade do solo (climatológica x estimada). Rozante (2008) realizou experimentos (simulações e previsões) com o modelo regional Eta-10km e 38 níveis na vertical entre janeiro e fevereiro de 2003, período de atuação do jato de baixos níveis (JBN) na América do Sul e mecanismos de mesoescala associados ao desenvolvimento de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM).

De acordo com Rozante (2008), a melhor representação dos SCMs é obtida utilizando-se não-hidrostático, Kain-Fritsch e estimada, verificando-se que o JBN e o jato em altos níveis (JAN) são corretamente simulados com tal configuração. A circulação local gerada a leste dos Andes devido ao gradiente de temperatura, e a oscilação inercial devido à força de Coriolis, a qual agiu no fortalecimento do JBN, contribuíram positivamente para o processo de formação da convecção associada aos SCMs.

Os resultados de Rozante (2008), para um caso de SCM (usando Eta-10km e como condições inicial e de contorno a análise e previsão de um Modelo de Circulação Geral da Atmosfera – MCGA) ocorrido em 18 de janeiro de 2003, com as integrações feitas a partir de 15/01/2003 às 12 UTC, indicaram que o modelo regional é capaz de prever bem esse sistema, desde que as condições de contorno laterais sejam apropriadas. A Figura 2.3 apresenta o campo de precipitação associado ao SCM deste evento que é bem simulado pelo Eta-10km, comparado à observação (Figura 2.3a). A previsão do modelo Eta-10km captou a intensidade do SCM corretamente, porém o posicionando-o ligeiramente à oeste. Tanto a simulação (Figura 2.3b) quanto a previsão (Figura 2.3c) foram avaliados para o dia 18 de janeiro de 2003 às 06 UTC. Ressalta-se que a escolha deste episódio deve-se principalmente ao fato de ter sido um sistema que não foi previsto por nenhum dos modelos operacionais utilizados no CPTEC/INPE, tais como o modelo operacional Eta-40km (Figura 2.3d).

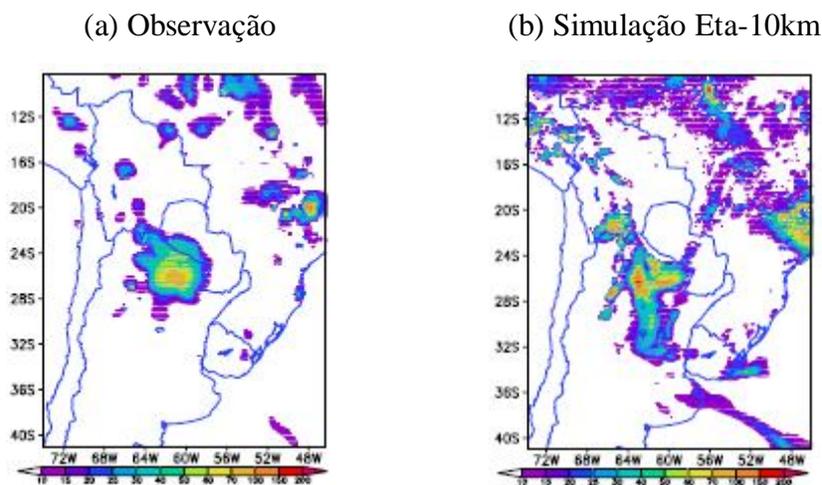
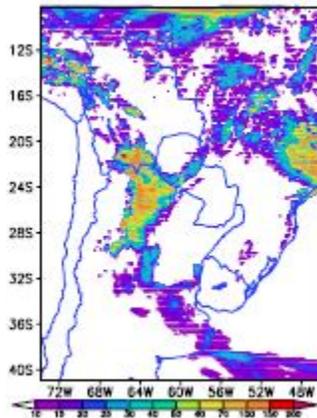


Figura 2.3 - Precipitação acumulada em 24 horas válida para 18/01/2003 às 06 UTC. (a) Observação; (b) simulação e (c) previsão do Eta-10km; (d) previsão do modelo operacional Eta-40km. Fonte: Rozante (2008).

(c) Previsão Eta-10km



(d) Eta-40km Operacional

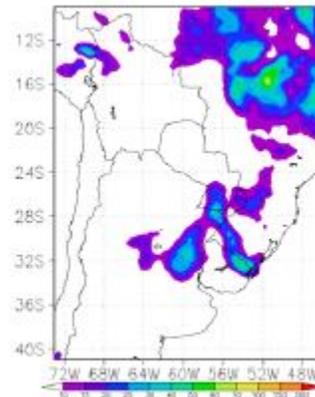


Figura 2.3 - Final

Seluchi e Chou (2001) avaliaram o modelo regional Eta-40km a partir da variação de parâmetros atuantes apenas no esquema de Betts-Miller para 15 situações sinóticas distintas (ocorridas entre junho de 1998 e abril de 1999) na América do Sul. Anteriormente Seluchi e Chou (2000) já haviam demonstrado que este esquema é o principal responsável pelos erros sistemáticos presentes nas previsões do modelo. Diante disto, os autores ajustaram cada um dos coeficientes que determinam o perfil termodinâmico de referência. Os experimentos realizados mostraram que um novo conjunto de parâmetros gerou uma previsão de melhor qualidade na previsão de precipitação, com 24 horas de antecedência, através de melhores resultados referentes ao índice BIAS (Figura 2.4) que está mais próximo à unidade.

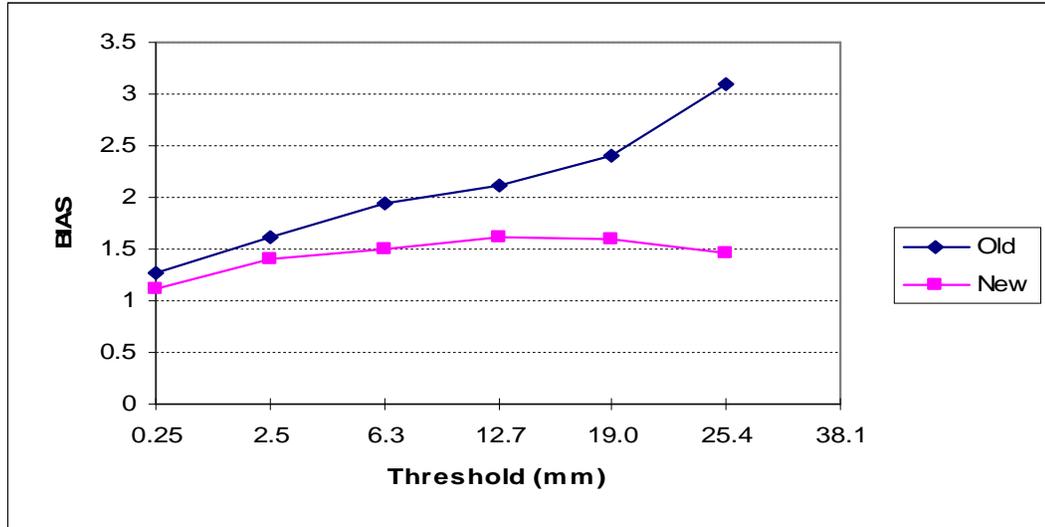


Figura 2.4 - Valores de BIAS relativos às previsões de chuvas do Eta-40km em 24 horas e associados aos antigos (linha azul) e novos (linha rosa) parâmetros atuantes no esquema Betts-Miller. Fonte: Seluchi e Chou (2001).

Para o ETS (Figura 2.5), Seluchi e Chou (2001) mostram que há uma ligeira melhora nos sete limiares de precipitação definidos nos novos parâmetros, principalmente para a chuva acima de 38,1 mm.

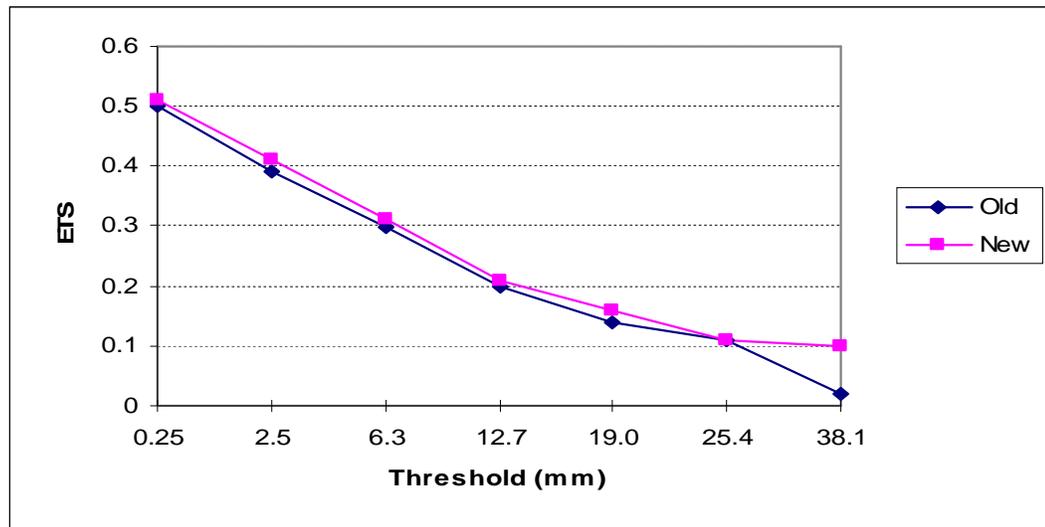


Figura 2.5 - Valores de ETS relativos às previsões de chuvas do Eta-40km em 24 horas e associados aos antigos (linha azul) e novos (linha rosa) parâmetros atuantes no esquema Betts-Miller. Fonte: Seluchi e Chou (2001).

Gallus (1999) utilizou o modelo Eta do NCEP para simular três episódios de excessiva precipitação nos Estados Unidos. As simulações para cada episódio utilizavam resoluções horizontais de 12, 22, 39 e 78 km. A causa das chuvas intensas apresentadas no estudo foram os seguintes sistemas meteorológicos: ciclone extratropical de escala sinótica com núcleo quente; SCM e tempestade provocada por tornado. Devido ao fato do comportamento de diferentes parametrizações convectivas variarem com as mudanças na resolução horizontal, foram usados dois diferentes esquemas convectivos: Betts-Miller-Janjic (BMJ) e Kain-Fritsch (KF).

Para o caso do ciclone, Gallus (1999) usando o esquema de BMJ, verificou que o aumento da resolução não produziu impacto significativo na simulação do pico da precipitação. Nas regiões em que a precipitação é em maior parte causada pelo esquema convectivo, e o fornecimento de umidade e a convergência em baixos níveis ocorrem em grande escala, o aumento na resolução não melhora de modo quantitativo a simulação da precipitação. Em regiões onde a forçante é de pequena escala, o aumento na resolução não sobrepõe outras deficiências do modelo, tais como uma simulação inadequada da instabilidade nos baixos níveis da atmosfera. Entretanto, uma simulação razoável dessa instabilidade permitiu mudanças dramáticas na quantidade de precipitação prevista em simulações de maior resolução, como ocorrido nas rodadas com o esquema KF, onde apesar dos valores máximos de precipitação serem menores em comparação ao esquema BMJ, houve um aumento em torno de 25% no total de precipitação conforme o aumento de resolução variou de 78 até 12 km.

No caso da enchente causada pelo SCM, houve significativas variações no impacto do refinamento da resolução horizontal para diferentes parametrizações convectivas. As simulações com o esquema BMJ mostraram uma diminuição no pico de precipitação conforme a resolução aumentava. Neste caso, aproximadamente toda a precipitação é gerada pelo esquema convectivo. Simulações com o esquema KF, entretanto, são fortemente sensíveis à resolução horizontal, com grande parte do total de precipitação ocorrendo em altas resoluções.

Para o episódio de tempestade de tornado, as simulações com esquema BMJ evidenciaram grandes variações no pico de quantidade de precipitação prevista conforme a variação da resolução horizontal. A forte convergência nos baixos níveis favoreceu significativamente a precipitação na escala da grade configurada de acordo com a ativação da parametrização convectiva. A extrema instabilidade presente neste caso resultou em tempestades cuja intensidade aumentou fortemente com o aumento da resolução. As simulações com o esquema KF, entretanto, são relativamente insensíveis a variações de 78 km a 12 km.

Ainda tratando-se da avaliação do modelo Eta em diferentes resoluções horizontais, Gomes e Chou (2010) estudaram a geração e a partição de chuva, simulando 4 casos de ZCAS (integrações de 132 horas) e 6 casos de sistemas frontais (integrações de 48 horas). Os pesquisadores integraram o modelo regional Eta com 38 níveis na vertical e utilizaram a Análise do NCEP como condição inicial e de contorno.

Os índices BIAS e ETS encontrados por Gomes e Chou (2010), relativos à simulação de chuva acumulada em 24 horas, com 132 horas de antecedência, são apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7 para um dos quatro eventos de ZCAS deste estudo (ocorrido entre 24 e 29 de janeiro de 2004).

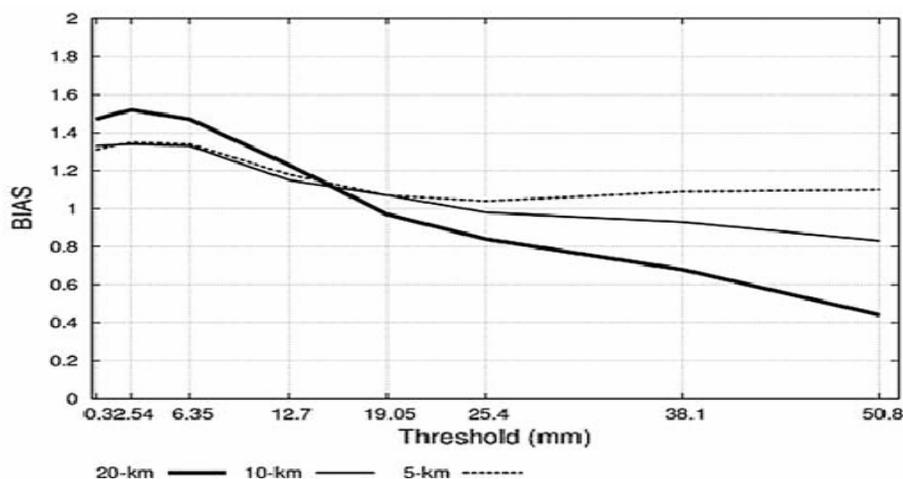


Figura 2.6 - Valores de BIAS relativos às previsões de chuvas do modelo Eta-20km (linha grossa), Eta-10km (linha fina) e Eta-5km (linha pontilhada) com 132 horas de antecedência. Fonte: Gomes e Chou (2010).

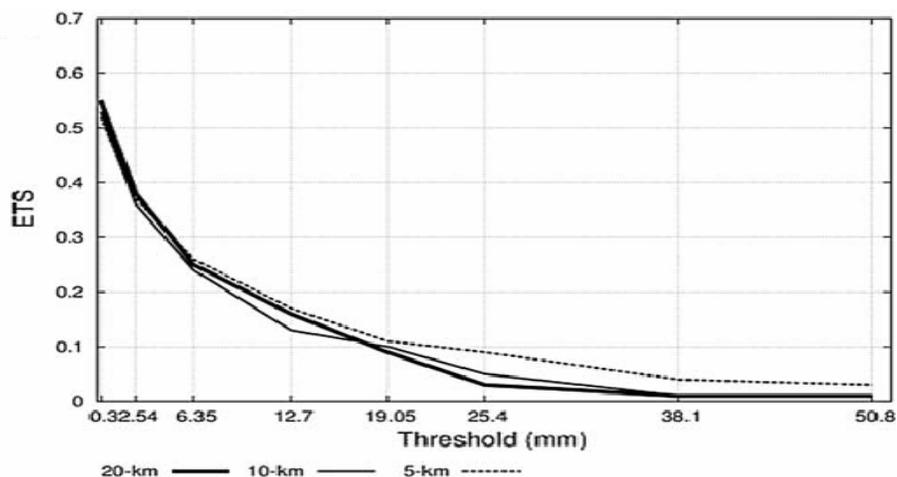


Figura 2.7 - Valores de ETS relativos às previsões de chuvas do modelo Eta-20km (linha grossa), Eta-10km (linha fina) e Eta-5km (linha pontilhada) com 132 horas de antecedência. Fonte: Gomes e Chou (2010).

Para o BIAS (Figura 2.6) percebe-se que a chuva é superestimada nos menores limiares de precipitação para as três versões do modelo Eta. A partir da categoria 19,05 mm o modelo Eta-20km (linha grossa) começa a subestimar a chuva. Já no Eta-10km (linha fina) isto ocorre no limiar 25,4 mm. Ao contrário das duas resoluções citadas anteriormente, o Eta-5km (linha pontilhada) superestima a chuva em todos os sete limiares apresentados e possui os melhores resultados, comparadas às versões de 20 e 10 km do modelo Eta, nas faixas de maior precipitação (38,1 e 50,8 mm).

Em relação ao ETS (Figura 2.7), a previsão da precipitação, com 132 horas de antecedência, mostra quase o mesmo desempenho para os limiares de chuva fraca nas três resoluções. Para limiares acima de 19,05 mm, a versão de 5 km do modelo Eta apresenta melhor performance comparada ao das outras duas grades (versões Eta-20km e Eta-10km), que continuam a ter resultados similares.

Meira (2010) avaliou a performance das previsões de tempo com 24 até 168 horas de antecedência para algumas variáveis meteorológicas, como precipitação e temperatura, disponibilizadas pelo modelo Eta-40km, em duas localidades (Piracicaba-SP e Uberlândia-MG) entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010. Os resultados mostram o melhor prazo de

previsão em 24 horas comparado à previsão de 168 horas, pois percebe-se o menor valor de raiz do erro quadrático médio (REQM). Nota-se na Figura 2.8 que o menor valor de REQM (aproximadamente 12 mm/dia) ocorre com 72 horas de antecedência. Tal prazo de previsão será avaliado nesta dissertação.



Figura 2.8 – Valores do REQM (mm/dia) calculados entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010 para cada prazo de previsão (com 24 até 168 horas de antecedência) na cidade de Uberlândia em Minas Gerais. Fonte: Meira (2010).

3. DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os dados e as metodologias empregadas para elaborar a climatologia da precipitação, seleção e estudos dos casos de chuvas intensas e as características gerais do modelo Eta. Além disso, as avaliações objetiva e subjetiva das previsões do modelo regional Eta são descritas neste capítulo.

3.1 Dados da Reanálise ERA-Interim e Outros Produtos

Os dados utilizados na etapa de elaboração dos estudos de casos foram obtidos da Reanálise do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), denominada ERA-Interim; imagens do satélite Geostationary Operational Environment Satellite (GOES-10 e GOES-12) no canal infravermelho e associadas ao Hidroestimador do CPTEC/INPE; dados de chuva da ANA, do CPTEC e do INMET e cartas sinóticas divulgadas pelo CPTEC e pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.

As Reanálises do projeto ERA-Interim do ECMWF (Dee et al., 2011) são uma extensão do projeto ERA-40 (Uppala et al. 2005) com alguns avanços na assimilação de dados, no uso de observações e na física do modelo. Os dados estão disponíveis no sítio http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/ a cada 1,5° x 1,5° de latitude e longitude, para o período de 1 de janeiro de 1979 até os dias atuais.

A resolução espacial horizontal do modelo atmosférico corresponde a aproximadamente 79 km (resolução espectral horizontal T255). Com relação à resolução vertical, o modelo tem 60 camadas com o topo localizado a 0,1 hPa. Diversas variáveis de superfície são disponibilizadas a cada 3 horas, sendo que nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC estão disponíveis os campos analisados e para os demais horários (03, 09, 15 e 21 UTC) estão os campos previstos a partir de 00 e 12 UTC.

Imagens dos satélites GOES-10 e GOES-12 no canal infravermelho, e outras combinadas ao Hidroestimador do CPTEC/INPE foram utilizadas para acompanhar visualmente a formação e evolução dos eventos extremos em questão. Essas imagens são disponibilizadas na página oficial do CPTEC/INPE (<http://www.cptec.inpe.br>).

Análises sinóticas do CPTEC/INPE nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC e cartas sinóticas do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) nos horários de 00 e 12 UTC, disponíveis em <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo.index.htm>, também foram utilizadas.

Mapas com precipitação diária da América do Sul, disponibilizadas pelo CPTEC/INPE no sítio http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento_ams.shtml foram utilizados para a visualização da distribuição espacial da chuva nos casos analisados.

Os totais pluviométricos diários da ANA das estações Bambuí (2045001), Fazenda Escola Florestal (1944007), Ibitité (2044012) e Silva Campos (1944063) e do INMET em Bambuí (83582), Ibitité (83632) e Pompéu (83570) acessados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET, também foram utilizados para os estudos de casos de eventos extremos. É importante ressaltar que nas estações da ANA o total pluviométrico diário de um determinado dia é acumulado entre 7 h local do dia anterior até as 7 h local do dia em questão. Desta forma, nos períodos em que (não) vigora o horário de verão, o acúmulo é entre (10 UTC) 11 UTC do dia anterior até (10 UTC) 11 UTC do dia em questão. Por outro lado, nas estações do INMET os totais pluviométricos são acumulados sempre das 12 UTC do dia anterior até as 12 UTC do dia em questão.

3.2 Elaboração da Climatologia da Precipitação

Para a construção da climatologia da precipitação sobre toda América do Sul utilizam-se os dados do Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation (CMAP). Os totais pluviométricos mensais do CMAP apresentam resolução horizontal de 2,5 x 2,5° de latitude x longitude, gerados a partir de várias fontes: pluviômetros, estimativas por satélite, e previsões de precipitação da Reanálise do National Centres for

Environmental Prediction (NCEP). Neste trabalho foi utilizado como média climatológica o conjunto de dados de janeiro de 1979 à dezembro de 2008, disponibilizados em <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cmap.html>.

Na área em estudo, a climatologia da precipitação foi elaborada a partir dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA) para o período de 1961 a 1990, abrangendo a região da Bacia do Rio São Francisco, à montante da Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias.

3.3 Seleção e Estudo dos Casos de Chuvas Intensas

Para Liebmann et al. (2001) cujo estudo aborda a variabilidade interanual de precipitações diárias, eventos de chuvas intensas são alguns dos mais destrutivos fenômenos atmosféricos, pois afetam tanto a população urbana (com enchentes e deslizamentos) quanto a rural (prejuízos na agricultura com o excesso de chuva). Além disso, a definição de um evento de chuva intensa não é simples. Algumas vezes o que é considerado intenso em uma localidade pode ser ocorrência comum em outra. Liebmann et al. (2001) mostram três exemplos: a) Se um evento de 80 mm/dia ocorre várias vezes em um local, a infraestrutura naquela região já foi provavelmente desenvolvida para mitigar os desastres; b) Por outro lado, se o mesmo evento ocorre apenas 1 vez a cada 5 anos, ele pode resultar num desastre; c) Além destas situações, uma estação com precipitação total anual grande pode ter chuva fraca todos os dias, sem ocorrência de chuvas intensas. Os autores consideraram, diante da dificuldade apresentada, que um caso seria considerado como extremo, quando a chuva diária excedesse um certo percentual da média climatológica para este mesmo período. Tal critério será utilizado nesta dissertação.

A seleção dos casos de chuvas intensas teve como ponto de partida os dados observacionais convencionais da ANA e INMET e a indicação dos “Casos Significativos do Mês” listados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e disponibilizados a partir do endereço (http://www7.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/caso_sig_out2011_1.pdf).

A seleção foi elaborada para o período chuvoso (outubro a março), entre os anos de 2005 e 2012, em Minas Gerais. Decidiu-se aplicar um critério objetivo, levando-se em conta os totais pluviométricos diários e as normais climatológicas das estações da Agência Nacional de Águas (ANA), com dados no período de 1961 a 1990: Bambuí, Fazenda Escola Florestal e Ibité. Tal critério, adaptado de Liebmann et al. (2001), considera como evento de chuvas intensas aquele em que o total pluviométrico diário é superior à 3% do total do período chuvoso (outubro à março), utilizando-se a climatologia de 1961 a 1990. Tais dados (totais pluviométricos diários) foram obtidos no sítio da ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) para este período chuvoso.

Caso o critério adaptado de Liebmann et al. (2001) seja satisfeito para pelo menos uma das estações pluviométricas Bambuí, Fazenda Escola Florestal ou Ibité, cujos limiares são respectivamente 38,3; 38,2 e 46,3 mm, o caso é pré-selecionado.

Aplicando-se este critério foram pré-selecionados 49 casos. A seguir, verificando-se os “Casos Significativos do Mês”, publicado mensalmente pelo CPTEC/INPE, foram descartados 24 casos por não estarem associados às sérias conseqüências na região estudada. Os 25 casos selecionados para análise estão listados na Tabela 3.1. Ressalta que se dois sistemas meteorológicos são citados na causa de um evento de chuvas intensas, a causa principal de cada evento é aquele que é primeiramente citado.

Tabela 3.1 – Casos de chuvas intensas em Minas Gerais no período de outubro a março, entre os anos de 2005 e 2012, selecionados para estudo.

Caso	Período	Causa	Dia do maior total pluviométrico diário do período	Maior total pluviométrico diário (mm)
1	01 a 05/03/2005	ZCAS	03/03/2005	84,6
2	17 a 21/11/2005	ZCAS e Frente Fria	20/11/2005	82,7
3	24 a 27/11/2005	ZCAS e Frente Fria	24/11/2005	74,0
4	07 e 08/12/2005	Chegada de Frente Fria e Intensa Instabilidade Atmosférica	08/12/2005	69,7
5	11 a 15/12/2005	Frente Fria e ZCAS	15/12/2005	71,0
6	03 a 08/01/2006	ZCAS	05/01/2006	101,2
7	07 e 08/03/2006	ZCAS	07/03/2006	97,0
8	11 e 12/03/2006	Chegada de Frente Fria	11/03/2006	70,2
9	27 e 28/12/2006	Intensa Instabilidade Atmosférica	28/12/2006	75,2
10	05/01/2007	Intensa Instabilidade Atmosférica	05/01/2007	40,4
11	12 a 16/02/2007	ZCAS e Frente Fria	12/02/2007	69,9
12	18 a 20/10/2007	Intensa Instabilidade Atmosférica	19/10/2007	93,4
13	04 a 07/11/2007	Chegada de Frente Fria e ZCAS	04/11/2007	71,7
14	19 a 24/12/2007	ZCAS e Cavado em Médios e Altos Níveis	20/12/2007	139,0
15	20 a 25/01/2008	ZCAS, Frente Fria e Intensa Instabilidade Atmosférica	25/01/2008	104,0
16	03 e 04/02/2008	ZCAS e Frente Fria	04/02/2008	70,3
17	12 e 13/03/2008	Chegada de Frente Fria	13/03/2008	76,5
18	15 e 16/03/2008	ZCAS	16/03/2008	77,0
19	13 e 14/02/2009	Chegada de Frente Fria e ZCAS	13/02/2009	68,8
20	20 a 22/10/2009	Intensa Instabilidade Atmosférica	22/10/2009	91,9
21	29 a 31/12/2009	Intensa Instabilidade Atmosférica	30/12/2009	62,0
22	25 e 26/01/2010	Intensa Instabilidade Atmosférica	25/01/2010	132,3
23	03 e 04/03/2010	ZCAS	04/03/2010	108,4
24	15 a 19/12/2011	ZCAS	17/12/2011	164,0
25	31/12/2011 a 06/01/2012	ZCAS	02/01/2012	174,0

3.4 Modelo Eta

A previsão numérica do tempo em mesoescala é uma componente importante no suporte a prognósticos meteorológicos regionais, uma vez que é uma ferramenta operacional de fácil acesso e, portanto, bastante utilizada pelos previsores. A modelagem regional dos vinte e cinco casos de chuvas intensas é elaborada usando o modelo de área limitada Eta, desenvolvido na Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (Mesinger et al., 1988; Black, 1994).

O modelo Eta vem sendo utilizado desde 1996 no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), para previsões de curto e médio prazo. Este modelo é mais vantajoso em regiões de orografia complexa devido à coordenada vertical eta, pois esta trata adequadamente os problemas numéricos próximos de regiões com inclinação topográfica. O modelo regional se propõe a prever com maiores detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisas marítimas, tempestades severas, etc., enfim, sistemas organizados em mesoescala. Operacionalmente o modelo utiliza no CPTEC as análises do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) como condição inicial e as previsões do modelo global CPTEC/COLA (Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies), atualizadas a cada 6 horas, como condição de contorno.

As integrações com o modelo Eta para este trabalho são elaboradas utilizando a versão de tempo com as configurações de Mesinger (1984) e mais detalhamentos de Mesinger et al (2012). Um resumo das configurações desta versão do Modelo Eta são descritas a seguir:

a) Grade horizontal

Na horizontal, a discretização do domínio é realizada pela grade E de Arakawa (Winninghoff, 1968; Arakawa e Lamb, 1977), esquematizada na Figura 3.1. Os pontos denotados por h carregam pressão em superfície, temperatura, umidade específica, água de nuvem, velocidade vertical, energia cinética turbulenta bem como substâncias passivas.

Os pontos v carregam as componentes u e v do vento horizontal. Dois sistemas de coordenadas são mostrados na figura, o principal (x,y) e o auxiliar (x',y') .

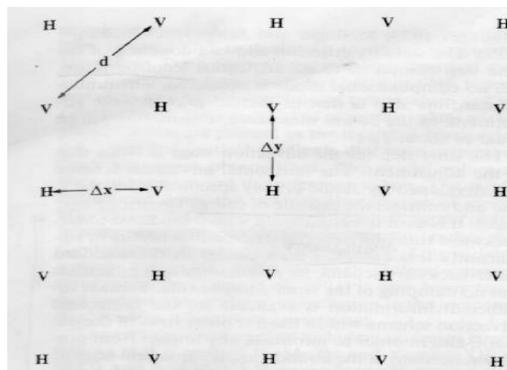


Figura 3.1 - Grade horizontal E de Arakawa. Fonte: Arakawa (1977).

Na ordem de obter uma maior eficiência computacional, tem sido usado um sistema de coordenadas latitude-longitude transformada, na qual é obtida de forma a situar a intercessão do equador com o mediano zero no centro do domínio do modelo. Este sistema transformado providencia grades horizontais mais uniformemente espaçadas pela redução da convergência dos meridianos e ajuste do passo de tempo na integração do modelo.

b) Coordenada vertical

A coordenada vertical η (η), que dá nome ao modelo, foi definida por Mesinger (1984) para remover os erros que ocorrem no cálculo da força do gradiente de pressão, advecção e difusão horizontal, em regiões de relevo com acentuada inclinação. Semelhante à coordenada σ (σ); desenvolvida por N. A. Phillips na década de 1950, útil sobre terrenos irregulares e algumas vezes referida como sistema de coordenada que acompanha o terreno; a coordenada η é baseada na normalização da pressão. A grande vantagem da coordenada η em relação à coordenada σ está no fato de na primeira as superfícies constantes estarem dispostas quase na horizontal, tanto nas áreas planas quanto sobre as montanhosas.

A coordenada eta é definida pela relação:

$$\eta = \underbrace{\left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right)}_{\sigma} \underbrace{\left[\frac{p_{ref}(z_{sfc}) - p_T}{p_{ref(0)} - p_T} \right]}_{\eta_s} \quad (3.1)$$

onde:

p_T = pressão no topo do domínio (ex. 50 hPa)

p_{sfc} = pressão na base do relevo

z_{sfc} = elevação na base do relevo

p_{ref} = pressão de referência que é uma função da elevação acima do nível médio do mar (utiliza-se a atmosfera padrão)

O primeiro termo do lado direito da equação 3.1 é a definição padrão da coordenada sigma (σ). O segundo termo (η_s) é função apenas de x e y, que converte a coordenada sigma em coordenada eta (η).

Um exemplo de configuração da estrutura vertical é descrita pela Figura 3.2, onde o modelo Eta se apresenta com 50 camadas. As pressões no lado esquerdo indicam as posições das camadas com respeito à atmosfera padrão, enquanto que os números do lado direito indicam aproximadamente a profundidade em pressão de cada camada em hPa.

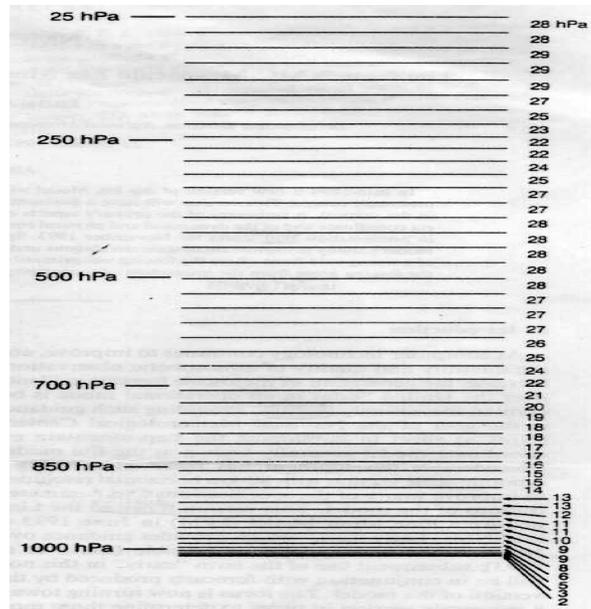


Figura 3.2 – Exemplo de distribuição de 50 camadas no modelo Eta. Fonte: Black (1994).

O nível mais baixo do modelo é configurado com aproximadamente 20 metros de espessura dentro da atmosfera padrão. Como pode ser notado, as camadas aumentam a espessura gradativamente até a alta troposfera, onde elas começam a reduzir a espessura novamente, resultando em um máximo secundário em resolução próximo à tropopausa.

c) Topografia

A topografia é representada por degraus discretos cujos topos coincidem exatamente com as interfaces das camadas do modelo. Na determinação destas elevações, cada grade horizontal é primeiramente dividida em 16 sub-grades, de modo que se tenha 4 linhas e 4 colunas. Para cada sub-grade é estabelecido um valor de altura proveniente de uma média calculada a partir de dados de elevação do terreno. Para cada linha 11 e cada coluna da grade é escolhido o maior valor de elevação, o que proporciona oito valores máximos, destes oito valores máximos é feita uma média, que determina para cada grade um valor chamado de altura intermediária. A altura final será obtida simplesmente movendo para cima ou para baixo a altura intermediária em direção a interface do nível que estiver mais próximo.

As alturas das interfaces dos níveis do modelo são previamente determinadas, de acordo com a atmosfera padrão. A distribuição da resolução vertical é especificada de acordo com o modelo. Na Figura 3.3 temos uma seção vertical representando os níveis mais baixos do modelo. Podemos verificar que as variáveis de massa e componentes horizontais do vento são determinadas no meio da camada entre dois níveis, enquanto que a variável velocidade vertical é determinada nas interfaces.

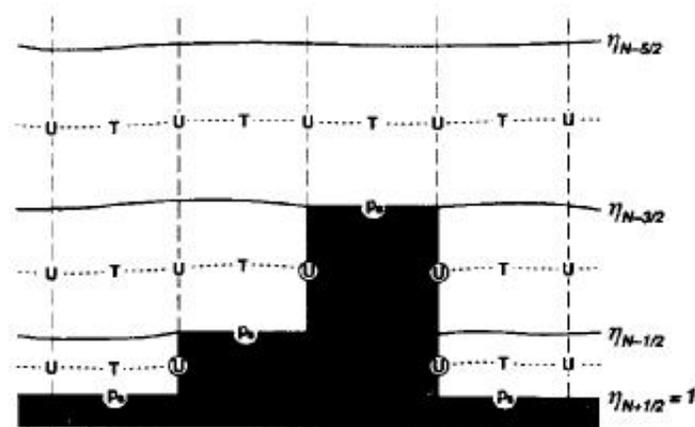


Figura 3.3 - Uma seção vertical idealizada da topografia do modelo Eta. Fonte: Black (1994).

d) Dinâmica

A grade E de Arakawa é essencialmente uma superposição de duas grades C de Arakawa. A integração no tempo utiliza a técnica do particionamento explícito (Gadd, 1978). Os termos devido ao ajuste pelas ondas de gravidade inerciais são integradas separadamente dos termos devido à advecção. Um esquema “forward-backward” modificado por Janjic (1979) trata dos termos responsáveis pelo ajuste, enquanto o esquema “first forward e depois centrado; e o esquema linear Piecewise”, trata dos termos de advecção horizontal e vertical. O passo de tempo fundamental do modelo é o do ajuste, que equivale à metade do passo de tempo da advecção. O esquema de diferenças finitas no espaço emprega o método de Janjic (1984) que controla o falso escoamento de energia para as ondas mais curtas.

e) Troca vertical turbulenta

O cálculo da troca vertical turbulenta segue o esquema proposto por Mellor e Yamada (1974, 1982) e é conduzido a cada quatro passos de ajuste no tempo. Trocas entre as camadas do modelo na atmosfera livre são baseadas no esquema de Mellor-Yamada nível 2.5. Nesse esquema, a energia cinética turbulenta (ECT) é uma variável prognóstica, obtida nas interfaces das camadas do modelo Eta. Os valores de ECT são calculados usando o esquema forward-backward, e então são atualizados, para serem usados no cálculo dos coeficientes de troca para a transferência de calor, umidade e momentum entre camadas adjacentes do modelo.

As trocas que ocorrem entre a superfície da Terra e a primeira camada mais baixa do modelo seguem o esquema de Monin-Obukhov com as funções de estabilidade de Paulson. Nesse esquema o regime turbulento é determinado pelas derivadas verticais das variáveis de grande escala resolvidas pelo modelo e consideram os fluxos constantes nesta camada. Na parte inferior da camada de superfície, é colocada uma fina camada chamada de “camada de turbulência dinâmica”. Sobre superfícies líquidas, essa camada é substituída pela presença da subcamada viscosa, que descreve as diferenças dos valores de temperatura, umidade e momentum na própria superfície e aqueles da atmosfera.

f) Radiação

A parametrização da radiação do modelo Eta foi desenvolvida no Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). O esquema de cálculo da radiação de ondas curtas segue o esquema de Lacis e Hansen (1974), enquanto que a radiação de onda longa segue o de Fels e Schwarzkopf (1975). Os dois esquemas são chamados a cada hora de integração. As tendências da temperatura da atmosfera devido aos efeitos radiativos são aplicadas após cada passo de ajustamento no tempo. As nuvens estratiformes e cumuliformes (Slingo, 1987) são diagnosticados baseando-se na umidade relativa e na taxa de chuva convectiva do modelo. O esquema de parametrização de nuvens proposto por Ferrier (2004) é usado na

parametrização de radiação, proporcionando resultados mais acurados. Da climatologia são retirados os valores da distribuição de dióxido de carbono e de ozônio, e do albedo da superfície inicial.

g) Esquema de convecção Betts-Miller-Janjic

O esquema de parametrização de Betts-Miller-Janjic (BMJ) é um tipo de esquema de ajuste convectivo, que se baseia no conceito de que quando a atmosfera exibe um “lapse-rate” instável, a mistura ocorre espontaneamente e provoca o retorno para um “lapse-rate” neutro. Em condições saturadas, ocorre condensação e o estado final é um “lapse-rate” neutro úmido. A atmosfera é relaxada em direção a um perfil vertical prescrito.

O esquema BMJ usa um perfil de referência que é cuidadosamente escolhido para representar a estrutura termodinâmica tipicamente observada em situações convectivas e que se assemelha a um estado de quase-equilíbrio entre a forçante de grande escala e a convecção cúmulos. No esquema de BMJ três parâmetros de ajuste do perfil termodinâmico de referência são usados:

- **Déficit de pressão de saturação:** que determina o perfil de referência de umidade. O déficit de pressão de saturação representa o quanto a pressão de uma dada parcela deverá ser reduzida por levantamento para que a parcela atinja a saturação. Este parâmetro é definido em três níveis, na base da nuvem, no nível de congelamento e no topo da nuvem e interpolado linearmente nos níveis intermediários.
- **Coefficiente de estabilidade:** que determina o “lapse-rate” da temperatura de referência comparada à adiabática úmida.
- **Tempo de ajuste:** que é o tempo de relaxação para a remoção da instabilidade encontrada na coluna.

h) Esquema de microfísica das nuvens Ferrier

O esquema de nuvens do modelo regional Eta foi formulado para prever a variação de seis formas da substância água. O esquema representa a nuvem e a chuva da escala de grade do modelo. O texto a seguir descreve as principais características do esquema. O esquema de microfísica de nuvens Ferrier (FR) prevê a variação da água na forma de: vapor de água, água de nuvem, gelo de nuvem, neve, granizo e “sleet”.

- **Variáveis prognósticas:** o esquema prevê as mudanças na umidade específica do vapor d’água. O esquema prevê a condensação total, que é a soma da água de nuvem (gotas pequenas não precipitantes), chuva (gotas grandes) e gelo. Todos podem coexistir a temperaturas maior que $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. A categoria de gelo é formada de pequenos cristais de gelo, que são dominantes em nuvens cirrus na alta troposfera, e partículas maiores em forma de neve (agregados), “ice pellets”, “graupel”, e granizo, que são dominantes em níveis inferiores.
- **Algoritmo de condensação:** mudanças entre o vapor d’água e a condensação de nuvem são determinadas baseadas no algoritmo proposto por Asai (1965). Os campos de temperatura, umidade, e a água de nuvem condensada são ajustados considerando-se um limiar de umidade relativa do ar associado com o início da condensação. Esse limiar é dado em função da resolução horizontal do modelo. E se aproxima de 100% para modelos em altas resoluções (1-2 km).
- **Fluxo de precipitação e armazenamento:** a precipitação é prevista pela integração dos fluxos de precipitação do topo da nuvem até a superfície. A precipitação é dividida em armazenamento local, proporcional à espessura da camada e precipitação que cai através da base da grade do modelo.
- **Tipos de precipitação e física da colisão (“rime physics”):** a precipitação pode ser na forma de chuva, chuva congelada, e gelo. A densidade do gelo varia dependendo do processo de formação. De baixa densidade pelo congelamento água de nuvem ou da

chuva super gelada (“sleet”) sobre a neve de baixa densidade (“fluffy snow”), ou de alta densidade pelo congelamento da neve derretida (granizo) ou congelamento de água de nuvem super gelada (“ice pellets/graupe”).

- **Condições de mistura de fases:** processos entre diferentes estados de fase são considerados ocorrerem a temperaturas acima de -10 C. Em temperaturas mais frias assume-se que a chuva super gelada congela formando granizo e a gota super-gelada congela formando gelo de nuvem.
- **Processos de congelamento e derretimento:** o calor latente associado à fusão da água (“riming”) no gelo, do congelamento de chuva super gelada, e do derretimento de todas as partículas de gelo são consideradas.

Os processos microfísicos considerados pelo esquema são:

- Condensação/evaporação da água de nuvem;
- Deposição/sublimação dos cristais de gelo;
- Coleta da água de nuvem pela precipitação;
- Crescimento da precipitação de gelo por “riming”;
- Aglutinação de água da nuvem para formar chuva;
- Congelamento da chuva sobre grandes partículas de gelo a temperaturas super baixas;
- Condensação sobre gelo em derretimento;
- Derretimento do gelo;
- Autoconversão da água de nuvem em chuva;
- Coleta da água de nuvem para chuva;
- Evaporação da chuva.

i) Esquema de superfície NOAH

O esquema NOAH (Chen et al., 1997) inclui um modelo de superfície terrestre mais completo, incluindo parametrizações do solo/vegetação/hidrologia e uma parametrização da camada superficial atmosférica com maior capacidade de absorver as novas características fornecidas pelo modelo de superfície terrestre. Esta nova versão resolve bem a variação diurna observada dos fluxos de superfície e da temperatura da superfície, além de capturar a evolução sazonal na evaporação e umidade do solo. O esquema possui uma parametrização da camada superficial que permite o cálculo do coeficiente de troca na superfície para o momentum, calor e vapor d'água, usados para determinar o fluxo destas quantidades entre a superfície terrestre e a atmosfera. Estes cálculos são baseados na teoria da similaridade de Monin-Obukhov usando a função de estabilidade e o comprimento de rugosidade para determinar os coeficientes de troca na superfície para o calor e a umidade. O esquema permite o cálculo da razão entre o comprimento de rugosidade para o calor e para o momentum em função do número de Reynolds ou a partir de um valor pré-determinado. Este ajuste torna possível a correção de problemas de erros de sub ou superestimativa da temperatura de superfície.

j) Atualizações do Eta

As atualizações do modelo Eta são implementadas ao longo dos anos, e suas novas versões disponibilizam a compreensão física mais detalhada das condições meteorológicas para uma específica área em estudo. Basicamente, Mesinger et al. (2012) descreveram as recentes atualizações (listadas abaixo) do modelo Eta a partir das principais características:

- Pequena mudança na coordenada vertical com efeito no topo das montanhas onde se permite fluxos inclinados;
- Advecção vertical trocada para “piecewise linear scheme”, o modelo torna-se um modelo de volume finito;
- Inclusão de água líquida no cálculo da pressão;

- Modificação no cálculo do vento a 10 metros;
- Produção de vento a 50 e 100 metros;
- Modificação no cálculo de parâmetros da camada subviscosa sobre o oceano;
- Modificação em parâmetros do esquema de convecção Betts-Miller-Janjic;
- Modificação em parâmetros do esquema de convecção Kain- Fritsch;
- Modificação em parâmetros do esquema de convecção Kain- Fritsch com inclusão do fluxo de momento;
- Mudança dos parâmetros convectivos do perfil de ajuste da umidade;
- Solo com 4 camadas (versão antiga 2 camadas).

k) Descrição das integrações – Modelo Eta

Para cada um dos 25 casos listados na Tabela 3.1 foram geradas inicialmente as previsões do modelo Global do CPTEC (T126L28 – resolução horizontal de aproximadamente 100 x 100 km). A seguir foram geradas previsões com os modelos Eta-40 km e Eta-8km, como descrito a seguir.

- Previsões do modelo Global do CPTEC

O modelo Global do CPTEC/INPE na versão T126L28 (resolução horizontal aproximada de 100 x 100 km) foi integrado usando como condição inicial a Análise do NCEP, no horário de 12 UTC, gerando previsões a cada 6 horas para todo o globo, durante 11 dias.

No pós-processamento o modelo gera campos com 384 pontos em x, 193 pontos em y e 41 níveis na vertical.

- Previsões do modelo Eta-40km

O modelo Eta-40km foi integrado, recebendo como condição inicial a Análise do NCEP e como condições de contorno lateral as previsões do modelo Global do CPTEC/INPE (T126L28) atualizado a cada 6 horas, descritas no item anterior. Tais previsões são geradas com saídas horárias, para um prazo de 11 dias. O domínio em que o modelo Eta-40 km foi configurado, abrangendo quase toda a América do Sul, é apresentado na Figura 3.4. No pós-processamento o modelo gera campos com 144 pontos em x, 157 pontos em y e 22 níveis na vertical.

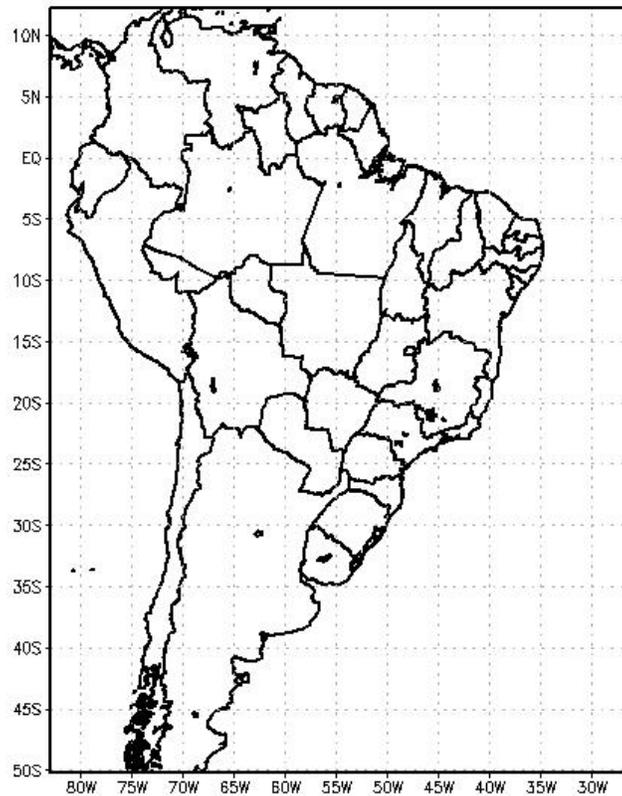


Figura 3.4 – Integração do modelo Eta-40 km.

- Previsões do modelo Eta-8km

O modelo Eta-8km foi integrado, a partir da Análise do NCEP e como condições de contorno as previsões do modelo Eta-40km atualizadas a cada 6 horas. O domínio de

integração do modelo Eta-8km juntamente cobre toda a Região Sudeste do Brasil, como apresentado na Figura 3.5 junto à topografia da região. Tais previsões são geradas com saídas horárias para um período de 11 dias. Nesta dissertação apresenta-se o prazo de previsão para 3 dias (72 horas de antecedência). A grade pós-processada tem 196x156 pontos na horizontal e 39 níveis de pressão na vertical. O topo do modelo está em 50 hPa.

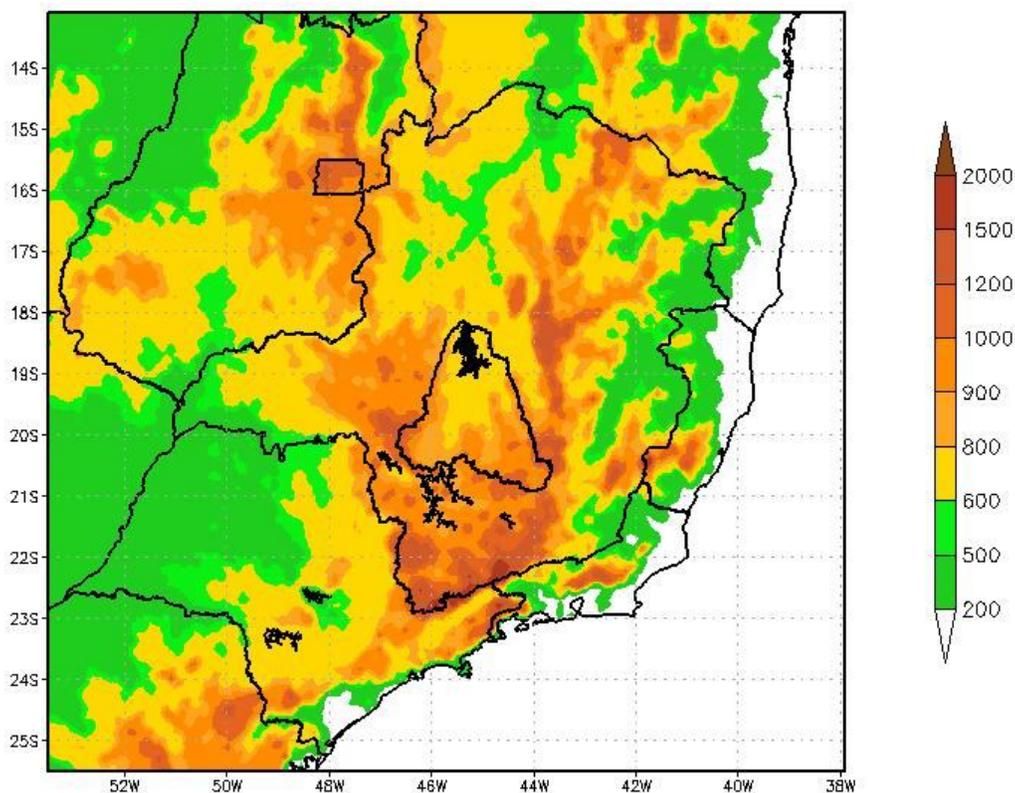


Figura 3.5 – Integração do modelo Eta-8km e topografia (em metros) da região.

A Tabela 3.2 detalha mais características do modelo Eta-8km.

Tabela 3.2 – Características gerais do modelo Eta-8km.

Ponto central	45,5°W;19,5°S
Resolução horizontal	8 km
Passo de tempo do modelo	15 segundos
Condições Iniciais (CI)	Análise do NCEP interpolada para a grade do Eta-Ensemble de 40km
Condições de Contorno Lateral (CCL)	Previsões pós-processadas do modelo Eta-40km Ensemble, 11 dias
Frequência da Atualização das CCL	A cada 6 horas
Condições de Contorno Inferiores	- Temperatura da Superfície do Mar (TSM) atualizada diariamente, 0.25° x 0.25° lat x lon, anomalia observada da TSM persistida durante toda a integração; - Climatologia sazonal da umidade do solo.
Prazo de previsão	11 dias
Número de processadores	32
Tempo de integração	45 minutos para previsão 3 dias (72 horas)
Parâmetros convectivos	Valores dos parâmetros convectivos dos perfis de referência de temperatura e umidade, sobre continente e oceano, tempo de relaxação convectivo. DSPBFL=-4500; DSP0FL=-5500; DSPTFL=-2000; FSL=0.85 DSPBFS=-3875; DSP0FS=-5875; DSPTFS=-1875; FSS=0.85 TREL=3250; UNIS=UNIL=FALSE
Mapa de solo	9 tipos
Land cover original map	PROVEG-INPE, 1 km, Sestini et al. (2002).
Topografia original	USGS 1 km
Ozônio	Média zonal climatológica

A Tabela 3.3 apresenta as datas das condições iniciais das previsões geradas com modelo Eta-8km, para cada um dos vinte e cinco casos estudados, listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.3 – Datas das condições iniciais das previsões geradas com o modelo Eta-8km para cada um dos 25 casos analisados.

Caso	Período	Condição Inicial
1	01 a 05/03/2005	28/02/2005 12UTC
2	17 a 21/11/2005	17/11/2005 12UTC
3	24 a 27/11/2005	21/11/2005 12UTC
4	07 e 08/12/2005	05/12/2005 12UTC
5	11 a 15/12/2005	12/12/2005 12UTC
6	03 a 08/01/2006	02/01/2006 12UTC
7	07 e 08/03/2006	04/03/2006 12UTC
8	11 e 12/03/2006	08/03/2006 12UTC
9	27 e 28/12/2006	25/12/2006 12UTC
10	05/01/2007	02/01/2007 12UTC
11	12 a 16/02/2007	09/02/2007 12UTC
12	18 a 20/10/2007	16/10/2007 12UTC
13	04 a 07/11/2007	01/11/2007 12UTC
14	19 a 24/12/2007	17/12/2007 12UTC
15	20 a 25/01/2008	22/01/2008 12UTC
16	03 e 04/02/2008	01/02/2008 12UTC
17	12 e 13/03/2008	10/03/2008 12UTC
18	15 e 16/03/2008	13/03/2008 12UTC
19	13 e 14/02/2009	10/02/2009 12UTC
20	20 a 22/10/2009	19/10/2009 12UTC
21	29 a 31/12/2009	27/12/2009 12UTC
22	25 e 26/01/2010	22/01/2010 12UTC
23	03 e 04/03/2010	01/03/2010 12UTC
24	15 a 19/12/2011	14/12/2011 12UTC
25	31/12/2011 a 06/01/2012	30/12/2011 12UTC

O método para determinar quais produtos meteorológicos e o período correspondente a ser abordado neste trabalho foi estabelecido a fim de comparar-se com os dados observacionais diários da ANA, INMET e CEMIG.

3.5 Métricas para Avaliação Objetiva

A avaliação objetiva das previsões do modelo Eta (40 km e 8 km) para eventos de chuvas intensas foi elaborada confrontando-se os totais pluviométricos previstos nas caixas de grade do modelo com os acumulados diários observados nas estações meteorológicas contidas no domínio de cada caixa de grade.

Os totais pluviométricos são acumulados as 12 UTC do dia de maior intensidade de chuva para cada um dos 25 casos de chuvas intensas (listados na Tabela 3.1), com 72 h de antecedência. A metodologia empregada na avaliação objetiva é a mesma utilizada em Chou e Justi da Silva (1999), calculando-se o BIAS e o ‘Equitable Threat Score’ (ETS), como descritos a seguir.

O BIAS é definido como o número de eventos previstos (F) dividido pelo número de eventos observados (O) acima de um certo limiar:

$$BIAS = \frac{F}{O}$$

Foram definidos nove limiares de precipitação (Tabela 3.4) que variam de categoria chuva-não chuva à chuva extremamente forte. O BIAS é sempre maior ou igual a zero, sendo 1 o valor do BIAS ideal. Contudo, é importante ressaltar que o BIAS igual a 1 não garante que os eventos isolados tenham sido previstos corretamente, ou seja, o BIAS pode ser 1, contudo o número de acertos pode ser nulo. Quando o BIAS é maior (menor) do que 1 significa apenas que o modelo superestima (subestima) o número de eventos acima de um certo limiar para a intensidade de precipitação.

Tabela 3.4 – Limiares em mm por dia e classificação da intensidade da precipitação.

Limiares (mm/dia)	Classificação da Chuva
$\geq 0,3$	Chuva/não chuva
$\geq 10,0$	Chuva fraca
$\geq 20,0$ $\geq 30,0$ $\geq 40,0$	Chuva moderada
$\geq 50,0$ $\geq 60,0$ $\geq 70,0$	Chuva forte
$\geq 80,0$	Chuva extremamente forte

De acordo com Anthes et al. (1989) o Threat Score (TS) é definido como:

$$TS = \frac{H}{F + O - H}$$

onde H (Hits) é o número de acertos, ou seja, as situações em que a precipitação é prevista e ao mesmo tempo observada, acima de um certo limiar. O TS varia entre 0 e 1, sendo ideal quando igual a 1. Contudo, podem ocorrer situações em que o modelo prevê persistentemente valores acima de um determinado limiar e quando estes valores ocorrem, eles são devido ao erro sistemático do modelo. Em tais situações o TS estará próximo da unidade. Para solucionar tal problema Mesinger e Black (1992) aplicaram ao índice TS o fator de correção (CH), que representa o número de pontos de acertos aleatórios, definido por:

$$CH = \frac{F \times O}{N}$$

Eles chegaram ao valor do Equitable Threat Score (ETS), diminuindo o numerador e o denominador do termo TS pelo fator CH:

$$ETS = \frac{H - CH}{F + O - H - CH}$$

Assim, numa situação exemplo em que a maior parte dos valores estão sendo previstos pelo modelo acima de um certo limiar devido ao modelo prever sistematicamente valores acima do limiar, o TS seria próximo de 1, enquanto o ETS seria próximo de zero. Uma previsão ideal teria ETS igual a 1.

Além do BIAS e ETS, conhecidas como variáveis categóricas, a qualidade da previsão de chuva também é avaliada por medidas de acurácia como o erro médio (EM), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e a correlação espacial (CORR), definidas como variáveis contínuas. É importante ressaltar que valores de EM e REQM, apesar de serem úteis para comparar o desempenho das duas versões do modelo, devem ser utilizados com cautela para o caso da variável chuva, pois os totais pluviométricos diários apresentam elevada variabilidade espacial e temporal e tais medidas (EM e REQM) são apropriadas para variáveis que apresentam distribuição normal ou distribuição de Gauss.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{prev_i} - V_{obs_i})}{n}$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{prev_i} - V_{obs_i})^2}{n}}$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{prev_i} - \overline{V_{prev}})(V_{obs_i} - \overline{V_{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{prev_i} - \overline{V_{prev}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{obs_i} - \overline{V_{obs}})^2}} \times 100$$

onde F é o número de eventos previstos para cada limiar de intensidade de chuva, O é o número de eventos observados, H é o número de acertos, Vprev representa a variável prevista, Vobs a variável observada e n o número de pontos avaliados.

A avaliação objetiva foi realizada a partir dos dados observacionais coletados nas estações da rede da ANA, INMET e CEMIG (Tabela 3.5), totalizando 35 estações meteorológicas. Como observado na tabela a seguir, em relação às 35 estações, 18 pertencem à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), 13 a Agência Nacional de Águas (ANA) e 4 ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Todas as estações (Figura 3.6) estão distribuídas em 32 municípios e 7 mesorregiões mineiras. Além disso, a altitude delas varia entre 489 e 1179 metros nas estações Pirapora Ponte e SE Ouro Preto respectivamente, ambas da CEMIG.

Tabela 3.5 – Informações referentes às 35 estações da ANA, INMET e CEMIG utilizadas para avaliação objetiva das previsões de chuva geradas pelo Eta-40km e Eta-8km.

Número	Estações	Latitude (°S)	Longitude (° W)	Município	Altitude	RESPONSÁVEL
1	Pirapora Ponte	17,37	44,94	Pirapora	489	CEMIG
2	Ponte Br 040	18,11	45,46	São Gonçalo do Abaeté	798	CEMIG
3	Lagoa do Gouvéia	19,00	45,96	Tiros	1035	ANA
4	Barra do Funchal	19,08	44,95	Serra da Saudade	720	ANA
5	Felixlândia	18,75	44,89	Felixlândia	628	ANA
6	Lagoa da Prata	20,02	45,04	Lagoa da Prata	658	ANA
7	Silva Campos	19,09	44,95	Pompéu	662	ANA
8	Pompéu	19,21	45,00	Pompéu	691	INMET
9	Porto Andorinhas	19,15	45,45	Abaeté	647	CEMIG
10	Porto Mesquita	19,17	44,70	Pompéu	657	CEMIG
11	Porto Pará	19,33	45,23	Martinho Campos	674	CEMIG
12	Barro Preto	18,73	44,88	Mateus Leme	847	ANA
13	Entre Rios de Minas	20,67	44,06	Entre Rios de Minas	885	ANA
14	Fazenda Benedito Chaves	20,19	44,42	Itatiaiuçu	944	ANA
15	Melo Franco	20,11	44,20	Brumadinho	761	ANA
16	Papagaios	19,44	44,74	Papagaios	703	ANA
17	Ponte Nova do Paraopeba	19,96	44,19	Betim	721	ANA
18	Florestal	19,88	44,41	Florestal	745	INMET
19	Ibirité	20,01	44,05	Ibirité	815	INMET
20	Ponte dos Vilelas	20,40	44,62	Itaguara	839	CEMIG
21	Rio de Pedras	20,25	43,80	Itabirito	870	CEMIG
22	SE Barreiro	19,91	43,93	Belo Horizonte	885	CEMIG
23	SE Conselheiro Lafaiete	20,66	43,78	Conselheiro Lafaiete	995	CEMIG
24	SE Ouro Preto	20,38	43,50	Ouro Preto	1179	CEMIG
25	SE Pitangui	19,68	44,89	Pitangui	709	CEMIG
26	BambuÍ	20,02	45,97	BambuÍ	654	ANA
27	Pium I	20,46	45,94	Piumhi	806	ANA
28	BambuÍ	20,03	45,00	BambuÍ	661	INMET
29	Cajuru	20,18	44,77	Carmo do Cajuru	772	CEMIG
30	Fazenda Campo Grande	20,63	44,44	Passa Tempo	980	CEMIG
31	Gafanhoto	20,13	44,88	Divinópolis	712	CEMIG
32	Iguatama Montante	20,17	45,71	Iguatama	664	CEMIG
33	São Roque de Minas	20,24	46,36	São Roque de Minas	818	CEMIG
34	Vargem Bonita	20,32	46,36	Vargem Bonita	768	CEMIG
35	Ponte Tiradentes	21,12	44,23	São João del Rei	898	CEMIG

Dentre as 35 estações (ver Figura 3.6), 14 estão localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), 9 na mesorregião Oeste de Minas, 8 na Central Mineira e 4 nas mesorregiões Norte de Minas, Noroeste de Minas, Triângulo Mineiro e Campo das Vertentes, com 1 estação para cada uma das localidades.

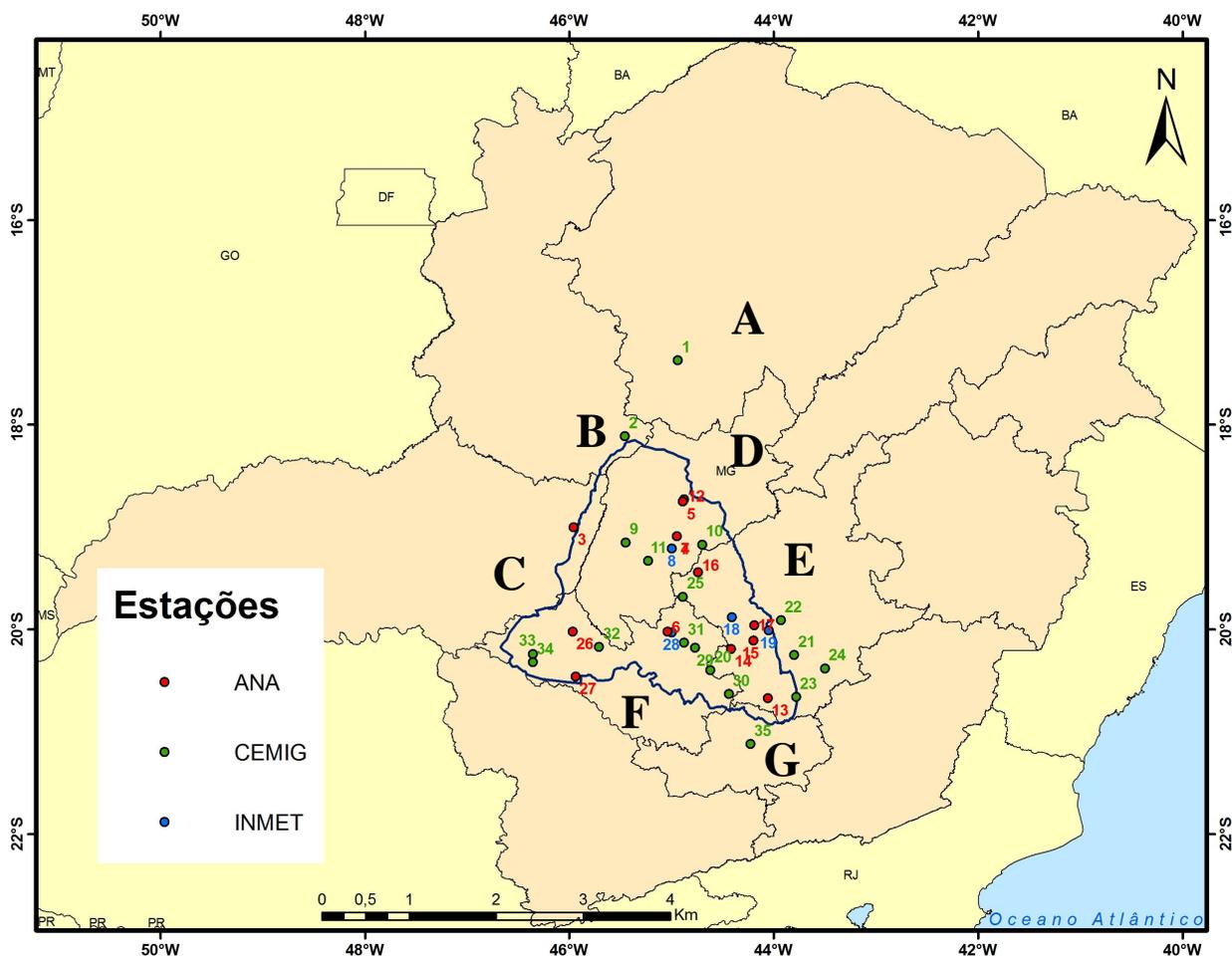


Figura 3.6 – Estações da ANA (em vermelho), CEMIG (em verde) e do INMET (em azul), utilizadas para avaliação objetiva da precipitação. Mesorregiões de Minas Gerais (em preto): A – Norte de Minas; B – Noroeste de Minas; C – Triângulo Mineiro; D – Central Mineira; E – Metropolitana de Belo Horizonte; F – Oeste de Minas e G – Campo das Vertentes.

Dos 25 casos de chuvas intensas avaliados, em alguns casos não estão disponíveis os dados pluviométricos observacionais das 35 estações. Desta forma, existem 809 pontos de observação para serem comparados com as previsões geradas pelo modelo Eta-40km e Eta-8km.

3.6 Elaboração da Avaliação Subjetiva

A avaliação subjetiva das previsões de 72 horas foi elaborada confrontando-se visualmente a localização das bandas de chuva prevista pelo modelo Eta, nas resoluções de 40 km e 8 km, com o posicionamento da faixa de precipitação observada e com o posicionamento do sistema meteorológico atuante assim como representado pelas previsões e pela Reanálise ERA-Interim. Para isto, foram utilizados os seguintes campos: pressão ao nível médio do mar (PNMM) e ventos à 10 metros, fluxo de umidade verticalmente integrado (FUVI) entre os níveis de 1000 e 300 hPa e linhas de corrente de 200 hPa.

4. CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a climatologia das chuvas na área de estudo. Inicialmente analisam-se os mapas das chuvas sobre a América do Sul (AS), elaborados a partir dos dados do CMAP. A seguir é feito um detalhamento do comportamento das chuvas na região em estudo a partir de totais pluviométricos da ANA.

Na Figura 4.1 encontram-se os mapas com a precipitação média diária para o período chuvoso (outubro a março) e à título de comparação para o restante do ano (abril a setembro).

A Figura 4.1a apresenta a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), identificada por uma banda de chuva presente desde oeste do Amazonas passando pelo Centro-Oeste do Brasil e propagando-se até a Costa Sudeste do Atlântico, ou seja, na orientação noroeste-sudeste. Além deste sistema meteorológico, há a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma estreita faixa, com altos índices pluviométricos, localizada sobre oceanos equatoriais, devido à confluência dos ventos alíseos, convergência de massa e intenso movimento vertical ascendente nesta área. Na área em estudo, os maiores valores de chuva (até 6,5 mm/dia ou aproximadamente 1200 mm/semestre) associam-se a ZCAS cujo fenômeno é mantido pela concentração de vapor d'água nos baixos níveis, liberação de calor latente na média troposfera associada à manutenção do movimento ascendente e a região relativamente quente nos altos níveis troposféricos (Satyamurti et al., 1998). Na Figura 4.1b, a expressiva queda no regime de chuvas na área estudada (até 1,5mm/dia ou aproximadamente 270 mm/semestre) está principalmente relacionada com o afastamento (predomínio) de massa de ar úmido (seco). Isto ocorre pela desconfiguração da ZCAS, aproximação e fortalecimento do Anticiclone Subtropical do Atlântico (ASAS) em direção ao interior do continente, inibindo a convecção em boa parte do território brasileiro. Conseqüentemente há o aumento da pressão atmosférica, intensificando a subsidência e diminuindo o teor de umidade.

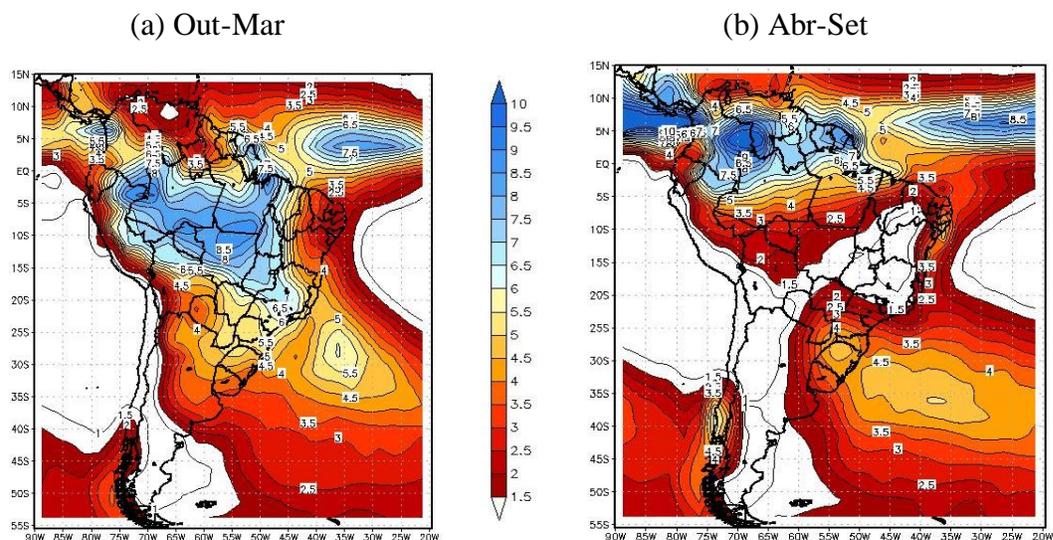


Figura 4.1 - Campo de precipitação: climatologia Xie e Arkin (1997) para o período de 1979 a 2008 para (a) Out-Mar e (b) Abr-Set. (Fonte: Dados de Precipitação CMAP fornecidos pela NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA, obtidos no sítio <http://www.esrl.noaa.gov/psd>).

A Figura 4.2 apresenta a região da Bacia do Rio São Francisco à Montante da UHE Três Marias (contorno branco) com as quatro estações (incluindo latitude, longitude e altitude) da ANA utilizadas para descrever a climatologia de precipitação nesta área. A estação Bambuí localiza-se na Serra da Canastra (mesorregião Oeste de Minas Gerais) onde fica a nascente do Rio São Francisco. As estações de Florestal e Ibirité, localizadas na região metropolitana de Belo Horizonte, têm o território ao seu redor caracterizado por um relevo bastante acidentado, especialmente o município de Ibirité (situado na Serra do Rola-Moça) cuja altitude oscila entre 797 e 1438 metros. A estação Silva Campos, na cidade de Pompéu, está próxima à Represa de Três Marias, na parte central de Minas Gerais.

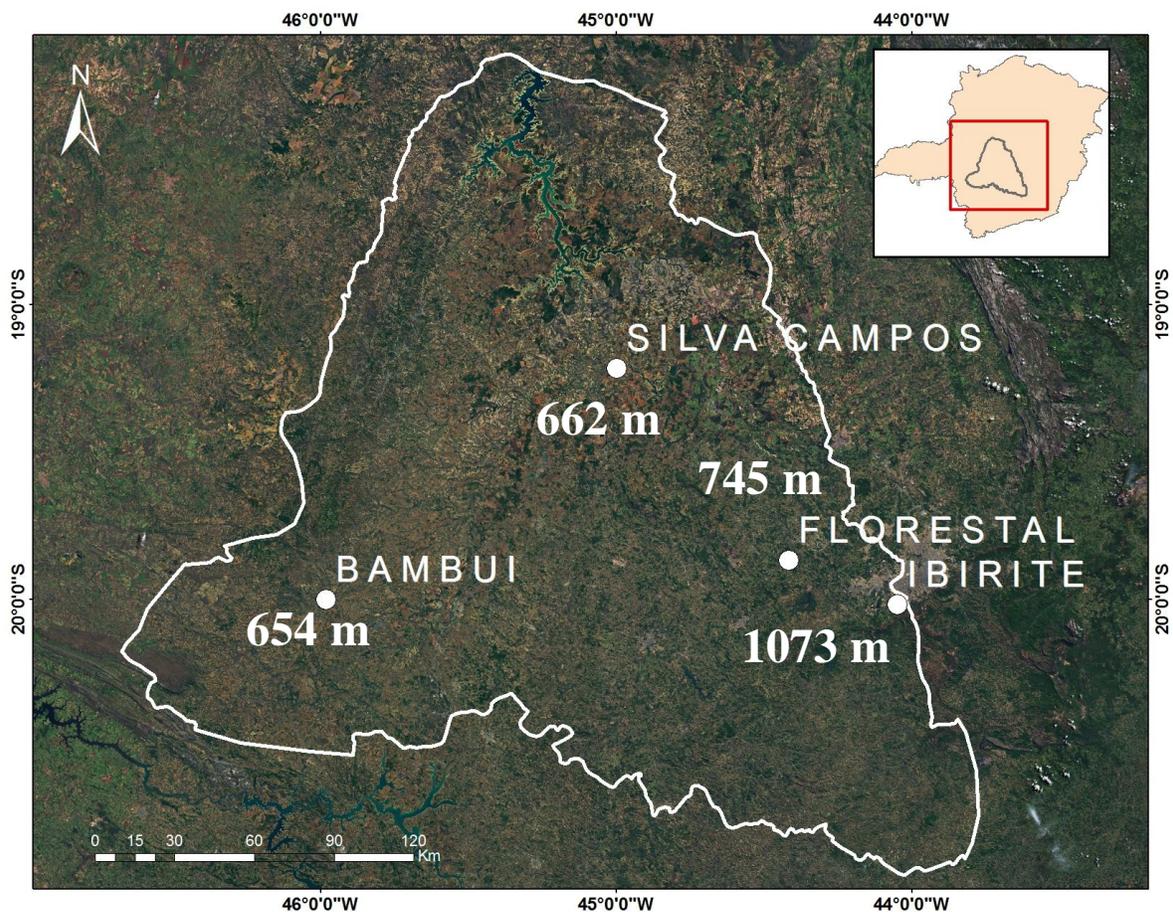


Figura 4.2 – Mapa de localização da região em estudo.

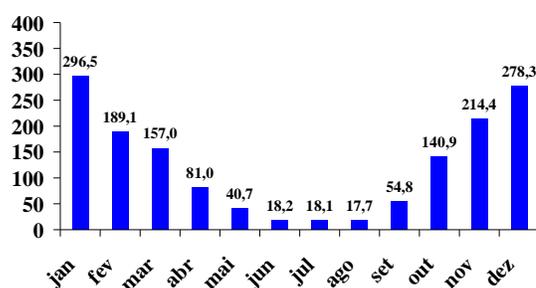
A Figura 4.3 apresenta a distribuição do total pluviométrico mensal climatológico das estações da ANA na área em estudo. Nota-se que nas quatro localidades as chuvas são mais elevadas entre os meses de outubro e março, ocorrendo uma queda acentuada entre março e abril. Em média durante os meses de outubro a março ocorre 84,5% (1273,2 mm) do total pluviométrico anual em BambuÍ, 88,8% (1267,5 mm) em Fazenda Escola Florestal, 87,3% (1536,2 mm) em Ibirité e 89,8% (1198,1 mm) em Silva Campos (Pompéu). Desta forma, neste trabalho considerou-se o período chuvoso estendendo-se de outubro a março assim como em Liebmann et al. (2001) para o Estado de São Paulo e diferentemente de Reis e Simões (2008) que incluem o mês de abril no período chuvoso da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

Nota-se ainda a partir da Figura 4.3 que a precipitação é mais intensa em Ibirité, com totais variando entre 15,7 mm em agosto até 374,2 mm em dezembro e total anual de 1759,7 mm. Em Silva Campos registra-se o menor total pluviométrico anual (1334,2 mm) dentre as quatro localidades, oscilando entre 5,9 mm em julho e 311,4 mm em dezembro.

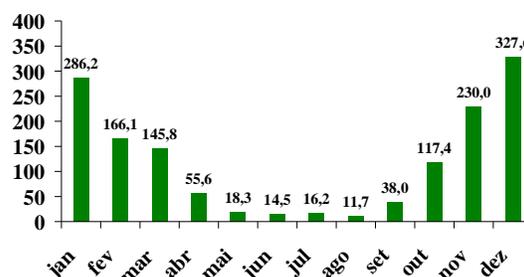
Na estação Fazenda Escola Florestal, o maior total pluviométrico mensal ocorre em dezembro (327,6 mm) e o mínimo em agosto (11,7 mm), com total anual médio de 1427,4 mm. Em Bambuí, diferentemente das demais localidades, o máximo é atingido em janeiro (296,5 mm) e não em dezembro e o mínimo ocorre em agosto (17,7 mm), com total anual de 1506,7 mm.

Totais Pluviométricos Mensais Climatológicos (mm)

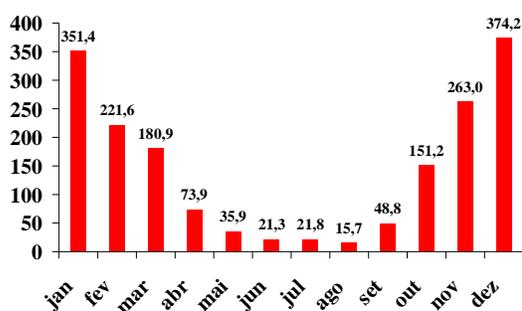
(a) Bambuí (1961-1990)



(b) Fazenda Escola Florestal (1961-1990)



(c) Ibirité (1961-1990)



(d) Silva Campos (1995-2012)

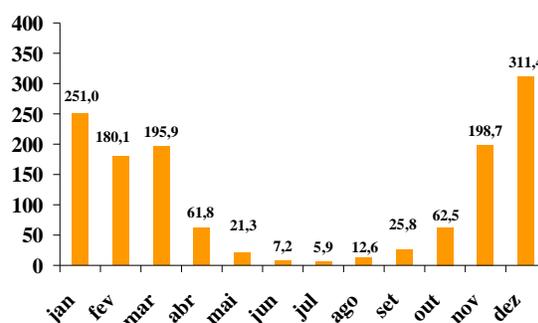


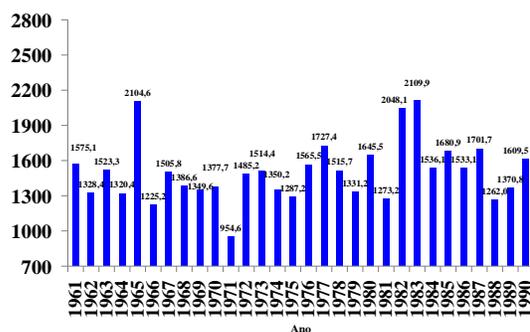
Figura 4.3 – Dados pluviométricos mensais climatológicos para as estações de (a) Bambuí; (b) Fazenda Escola Florestal; (c) Ibirité e (d) Silva Campos. Fonte: ANA.

Na Figura 4.4 apresenta-se a distribuição do total pluviométrico anual das estações da ANA na área em estudo em Bambuí, Fazenda Escola Florestal e Ibirité (período de 1961

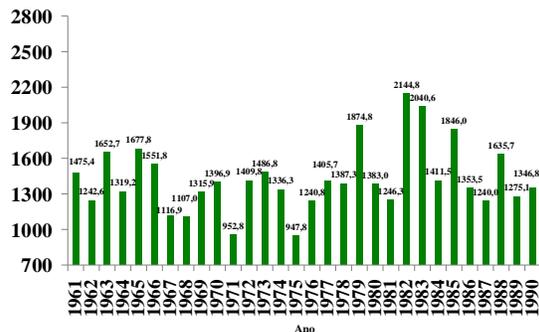
a 1990) e para Silva Campos (entre 1995-2012). Destaca-se na Figura 4.4 a grande variabilidade interanual, principalmente em Ibirité, com totais pluviométricos anuais que variam de 1282,8 mm (em 1971) até 2495,3 mm (em 1961). Para esta localidade, o desvio padrão dos totais anuais é de 340,5 mm, enquanto que para as demais localidades oscila entre 215,9 e 282,1 mm. No período analisado, destacam-se também os máximos nos anos de 1982 e 1983 (anos de El Niño forte) e o mínimo em 1971 (ano de La Niña moderada). Deste período, em alguns anos observados em Bambuí (1965, 1982 e 1983) e Fazenda Escola Florestal (1982 e 1983), os valores de precipitação ultrapassam 2000 mm enquanto em Ibirité nos anos de 1961, 1965 e 1985, os totais são superiores a 2400 mm. Na estação Silva Campos, localizada no município de Pompéu, dentro dos 18 anos de dados disponíveis, o ano de 1997 apresenta o maior valor, próximo a 1800 mm.

Totais Pluviométricos Anuais Climatológicos (mm)

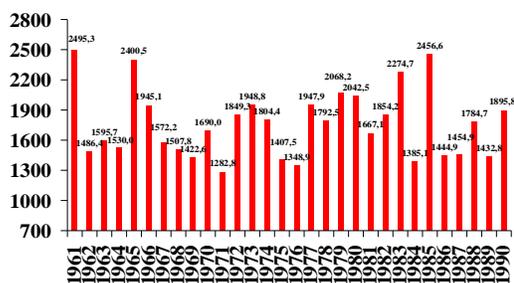
(a) Bambuí (1961-1990)



(b) Fazenda Escola Florestal (1961-1990)



(c) Ibirité (1961-1990)



(d) Silva Campos (1995-2012)

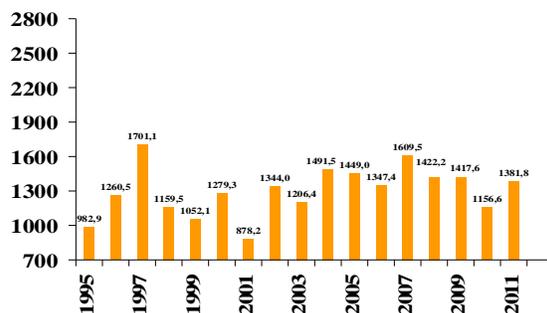


Figura 4.4 – Totais pluviométricos anuais climatológicos para as estações de (a) Bambuí; (b) Fazenda Escola Florestal; (c) Ibirité e (d) Silva Campos. Fonte: ANA.

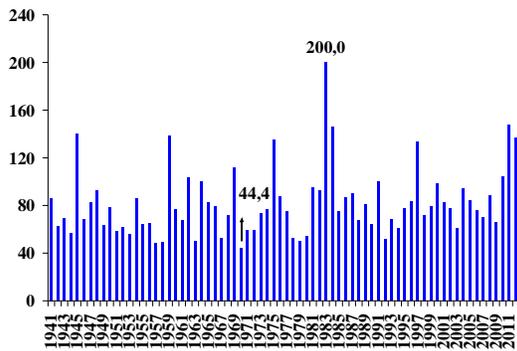
Os maiores totais pluviométricos diários a cada ano são apresentados na Figura 4.5 para todo o registro de cada uma das séries de dados, com o maior e menor valor de precipitação em destaque. Verifica-se que os máximos diários a cada ano oscilam entre 39,0 mm e 206,1 mm (ocorrido em Ibirité no dia 16 de janeiro de 2003) na área em estudo.

Como esperado, os maiores totais pluviométricos diários ocorrem em Ibirité (média de 89,7 mm) e os menores em Silva Campos (média de 53,3 mm). Destaca-se na série de Ibirité uma tendência de aumento de 0,46 mm/ano (estatisticamente significativo ao nível de 99%) na quantidade de chuva associada ao maior total pluviométrico diário. Ajustando-se uma linha de tendência linear à série de Ibirité percebe-se que por volta dos anos 1940 os maiores totais pluviométricos diários oscilavam em torno de 70 mm, enquanto nos últimos anos este valor subiu para aproximadamente 110 mm.

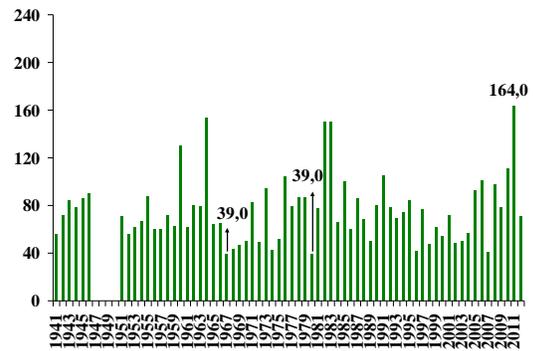
Para as demais localidades, também notam-se tendências positivas, onde apenas a série de Bambuí (0,25 mm/ano) é estatisticamente significativo, pois as duas estações restantes (Fazenda Escola Florestal e Silva Campos com elevação no regime de chuvas de 0,24 mm/ano e 0,87 mm/ano respectivamente) não são estatisticamente significativas.

Totais Pluviométricos Diários Climatológicos (mm)

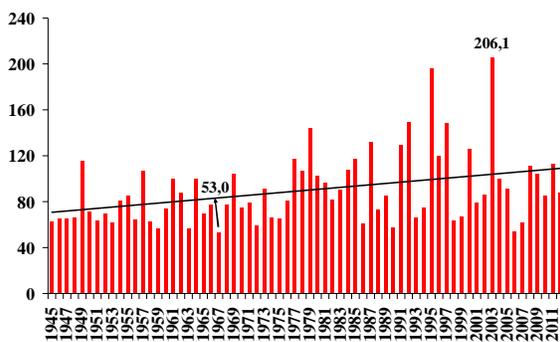
(a) Bambuí (1941-2012)



(b) Fazenda Escola Florestal (1941-2012)



(c) Ibitaré (1945-2012)



(d) Silva Campos (1995-2012)

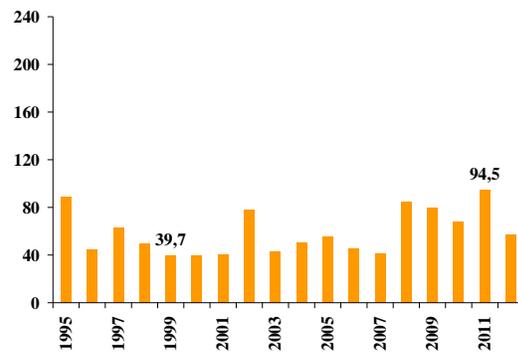


Figura 4.5 – Maiores totais pluviométricos diários (mm), a cada ano, para as estações de (a) Bambuí; (b) Fazenda Escola Florestal; (c) Ibitaré e (d) Silva Campos. Fonte: ANA.

5. RESULTADOS

Os resultados das avaliações objetiva e subjetiva do modelo Eta (versões 40 km e 8 km) para os 25 casos de chuvas intensas, com 72 horas de antecedência, são apresentados a seguir.

5.1 Avaliação Objetiva da Precipitação Prevista com 72 h de Antecedência

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam respectivamente os valores dos índices BIAS e ETS, para a previsão de 72 horas de antecedência, utilizando o modelo regional Eta-40km e Eta-8km.

Analisando-se o BIAS (Figura 5.1), nota-se uma superestimativa do número de eventos de chuvas fracas a moderadas (0,3 até 20 mm/dia) para ambas as resoluções. No limiar de 10 mm/dia (precipitação de fraca intensidade), a versão de 40 km apresenta menor BIAS (1,04) comparado ao Eta-8km (1,13), indicando melhor performance desta versão (40 km). Para chuva acima de 60 mm/dia, nota-se uma subestimativa de ambas as versões do modelo, sendo que o Eta-8km apresenta melhor performance que o Eta-40km, com valores de BIAS próximos à unidade.

Diante disto, dos nove limiares de chuva, a grade de 8 km mostra melhor desempenho em relação à resolução de 40 km em cinco categorias (0,3; 30; 40; 70 e 80 mm/dia), sendo que na escala de 30 mm/dia, o BIAS atinge o valor ideal.

BIAS

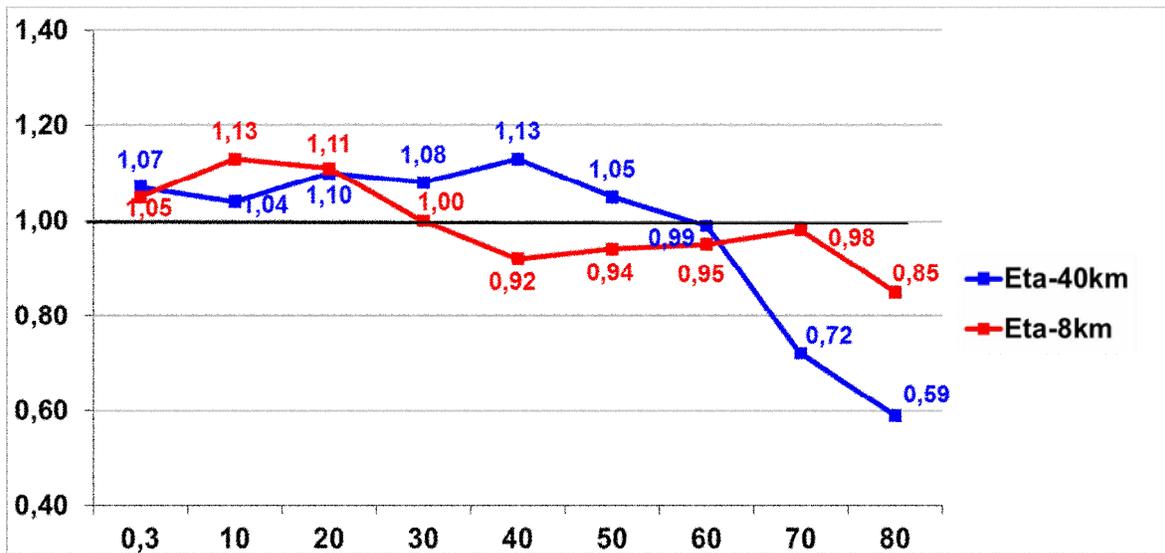


Figura 5.1 – Valores de BIAS relativos às previsões de chuvas do Eta-8km e Eta-40km para 72 horas nos 25 casos extremos. Unidade do eixo x é mm/dia. Eixo y é adimensional.

Para o índice ETS (Figura 5.2), nota-se uma queda relevante em direção aos limiares de chuva mais elevados nas versões de 40 km e 8 km. Entre os limiares de 10 e 30 mm/dia (precipitações classificadas como de fraca a moderada intensidade na região em estudo), o Eta-40km apresenta o melhor desempenho, ou seja mais próximo a unidade, em comparação com o Eta-8km. A partir de 40 mm/dia, a performance da versão 8 km supera àquela de 40 km, inclusive nas categorias de chuvas fortes a extremamente fortes (70 a 80 mm/dia), que é o foco deste trabalho.

Sendo assim, dos nove limiares de chuva, a resolução de 8 km mostra melhor desempenho em relação à resolução de 40 km em seis categorias (0,3; 40; 50; 60; 70 e 80 mm/dia), sendo que nas escalas de 50 e 60 mm/dia, as diferenças entre os valores de ETS atingem 0,04 mm/dia em ambos os limiares, entre os modelos.

ETS

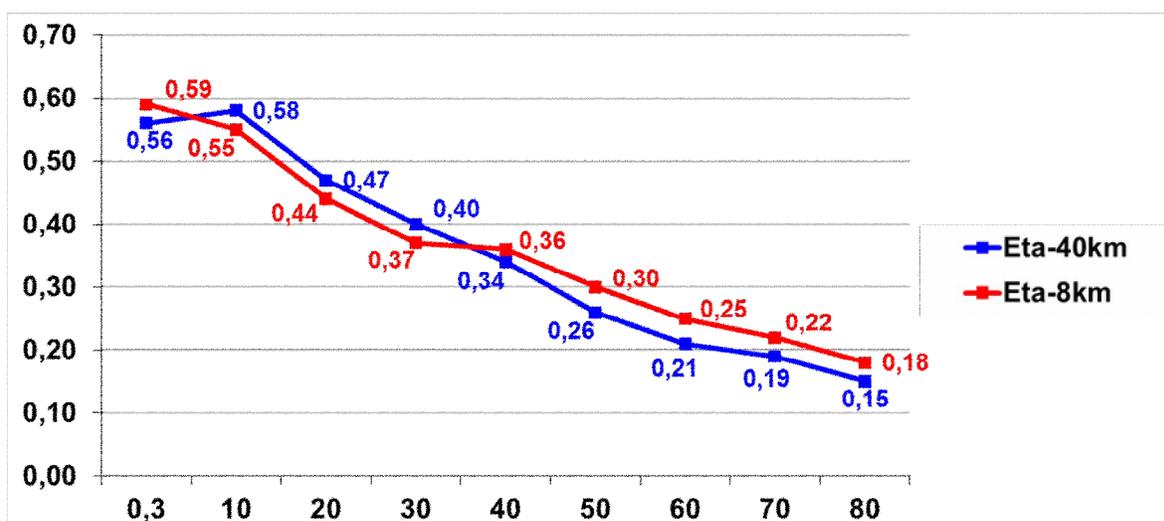


Figura 5.2 – Valores de ETS relativos às previsões de chuvas do Eta-8km e Eta-40km para 72 horas nos 25 casos extremos. Unidade do eixo x é mm/dia. Eixo y é adimensional.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de EM, REQM e CORR para a previsão de 72 horas, nas grades 40 km e 8 km do modelo Eta, referentes aos 25 casos de chuvas intensas.

Os valores positivos de EM indicam uma superestimativa da chuva em ambos os modelos. Já o menor REQM e maior CORR, na versão de 8 km, mostram o melhor desempenho desta versão comparativamente ao modelo Eta-40km.

Tabela 5.1 – Métricas de avaliação das previsões de precipitação em 72 horas para os modelos Eta-40km e Eta-8km nos 25 casos de chuvas intensas.

Número de casos	25 casos	
Versão do modelo Eta	Eta-40km	Eta-8km
EM (mm/dia)	3,3	2,8
REQM (mm/dia)	35,1	34,9
CORR (%)	19,9	27,8

Os resultados do ETS, BIAS, EM, REQM e CORR mostram no geral o melhor desempenho do modelo Eta-8km em relação ao Eta-40km, principalmente para previsões de eventos de chuvas intensas, que é o foco deste trabalho, o que justifica a utilização do modelo Eta com a maior resolução (8 km).

Na Tabela 5.2 e Figura 5.3 são apresentados os dez maiores totais pluviométricos diários ocorridos dentre os vinte e cinco casos estudados e as respectivas previsões elaboradas pelo Eta-40km e Eta-8km nos pontos de grade mais próximos à observação. Nota-se que em 9 dos 10 máximos observados, o modelo Eta-8km apresenta melhor desempenho do que o Eta-40km, apesar de ambas as versões subestimarem os máximos observados.

Tabela 5.2 - Estações e casos de chuvas intensas onde os 10 maiores valores de precipitação observada foram registrados.

Ordem	Observação				Eta-40km	Eta-8km
	Estação	Máximo de Precipitação (mm)	Caso	Dia do maior total pluviométrico diário	Máximo de Precipitação (mm)	Máximo de Precipitação (mm)
1 ^a	Fazenda Campo Grande	174,0	25	02/01/2012	46,7	76,2
2 ^a	Florestal	164,0	24	17/12/2011	58,9	94,5
3 ^a	Fazenda Campo Grande	139,0	14	20/12/2007	54,7	73,4
4 ^a	Bambuí	136,5	25	02/01/2012	18,8	22,3
5 ^a	Entre Rios de Minas	133,0	25	02/01/2012	58,2	63,2
6 ^a	Bambuí	132,3	22	25/01/2010	13,8	16,7
7 ^a	Ponte dos Vilelas	118,0	25	02/01/2012	52,4	77,8
8 ^a	Lagoa da Prata	117,3	14	20/12/2007	42,2	61,0
9 ^a	Bambuí	108,4	23	04/03/2010	13,1	27,5
10 ^a	Entre Rios de Minas	105,2	14	20/12/2007	59,2	57,6

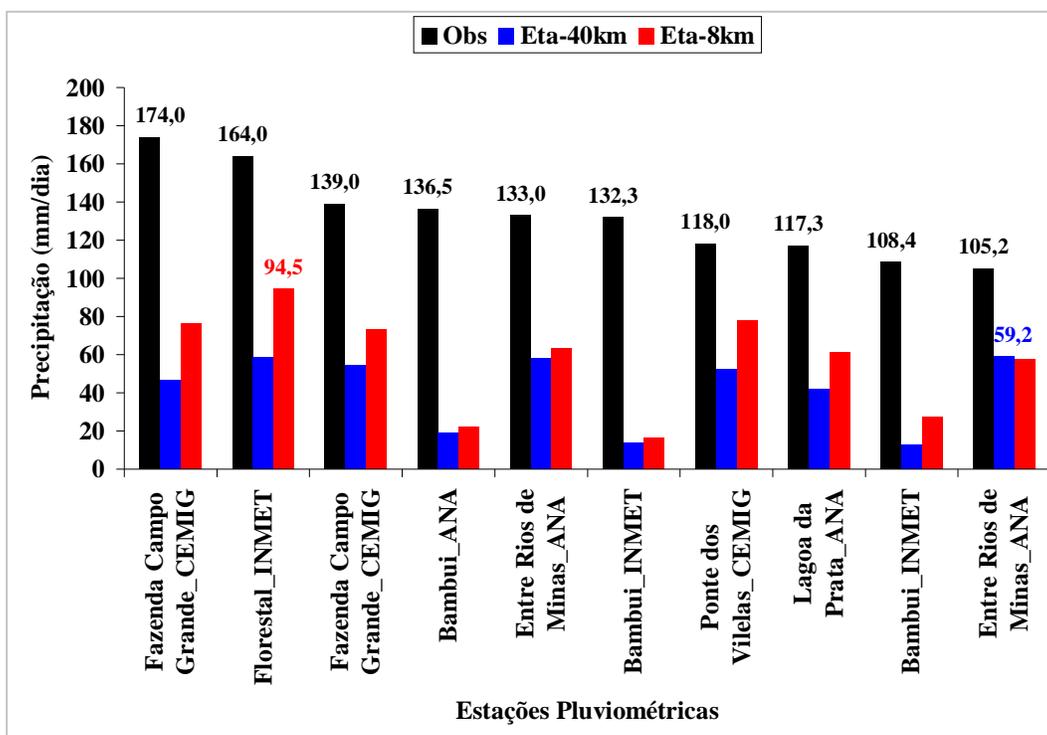


Figura 5.3 – Comparação entre os dez maiores totais pluviométricos (mm/dia) observados (preto) e previstos com o Eta-40km (azul) e Eta-8km (vermelho). Melhor performance do modelo Eta-8km: 94,5 mm (destacado em vermelho). Melhor performance do Eta-40km: 59,2 mm (destacado em azul).

O Eta-8km apresenta a melhor performance com o valor de 94,5 mm no ponto de grade próximo à estação Florestal do INMET. Já a versão de 40 km tem o melhor desempenho no ponto próximo à estação Entre Rios de Minas da ANA indicando uma precipitação de 59,2 mm.

5.2 Avaliação Subjetiva do Eta-40km e Eta-8km com 72 h de Antecedência

Neste item apresenta-se uma avaliação do posicionamento das bandas de precipitação previstas, pelo Eta-8km e Eta-40km, para os 25 eventos listados na Tabela 3.1. Além disso, é feita uma comparação entre alguns campos meteorológicos previstos com 72 horas de antecedência pelos modelos Global do CPTEC/INPE e Eta-40km, confrontando-os com a Reanálise ERA-Interim.

A Figura 5.4 mostra uma comparação entre os campos de precipitação previstos pelo Eta-40km e Eta-8km com 72 horas de antecedência e a chuva observada. Na Tabela 5.3 encontra-se um resumo da avaliação referente ao posicionamento da banda de precipitação associada ao sistema meteorológico atuante, para ambas as versões do modelo Eta.

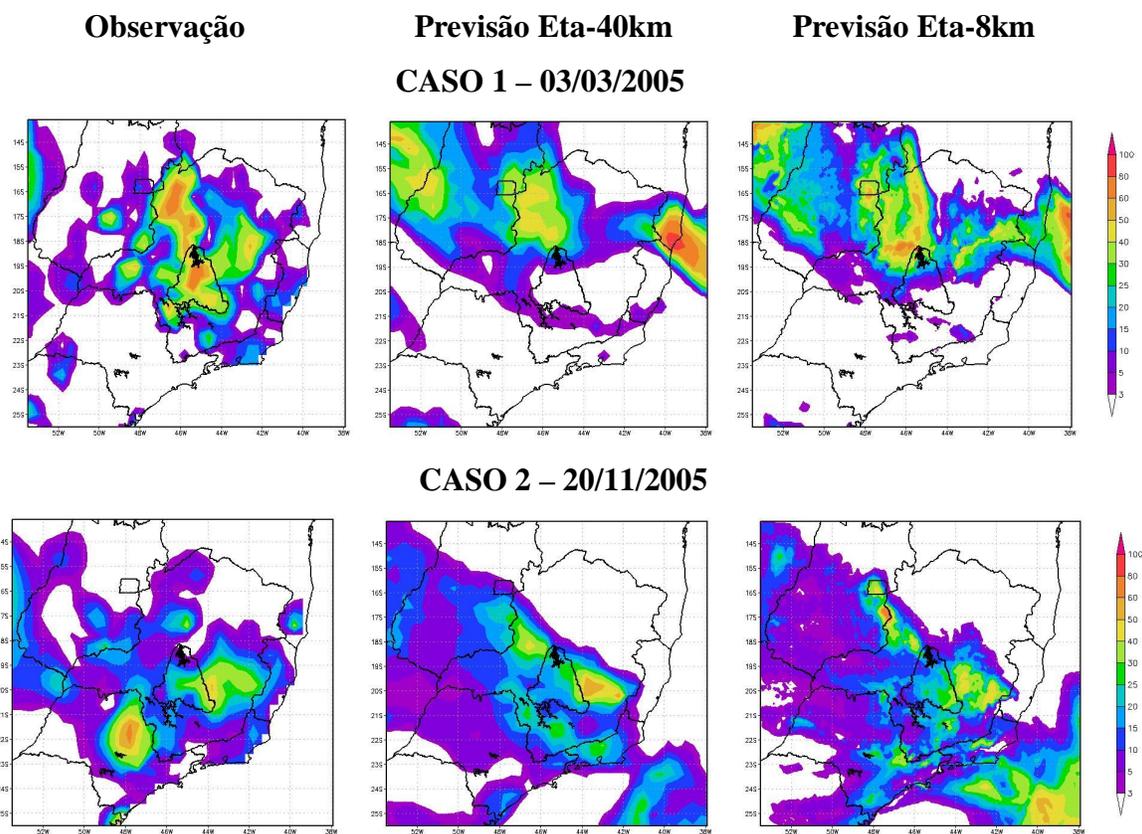


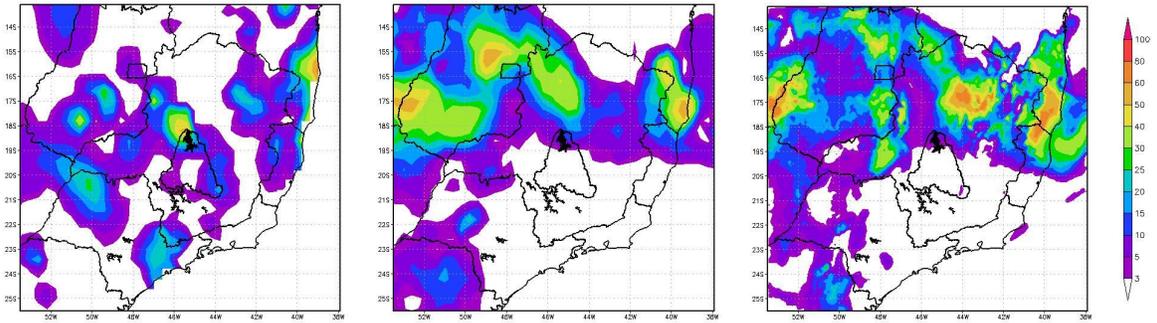
Figura 5.4 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 24 horas (entre 12 UTC do dia anterior e 12 UTC do dia em questão): observação (coluna da esquerda) e previsões do modelo com 72 h de antecedência para Eta-40km (coluna do meio) e para Eta-8km (coluna da direita) para os casos listados na Tabela 3.1.

Observação

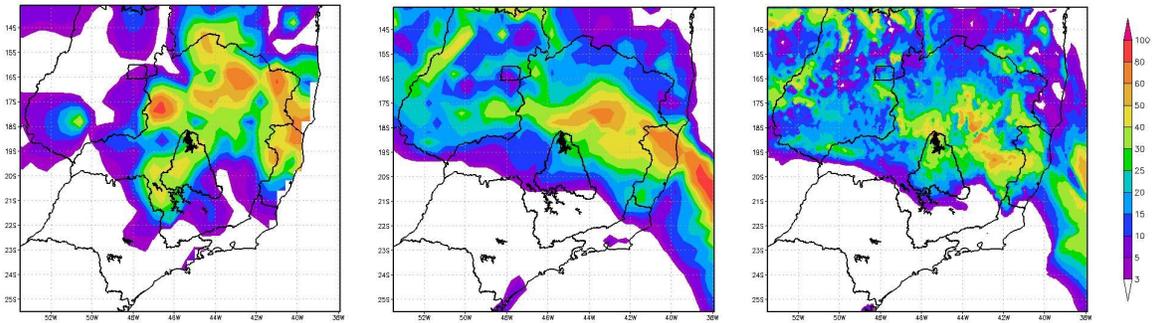
Previsão Eta-40km

Previsão Eta-8km

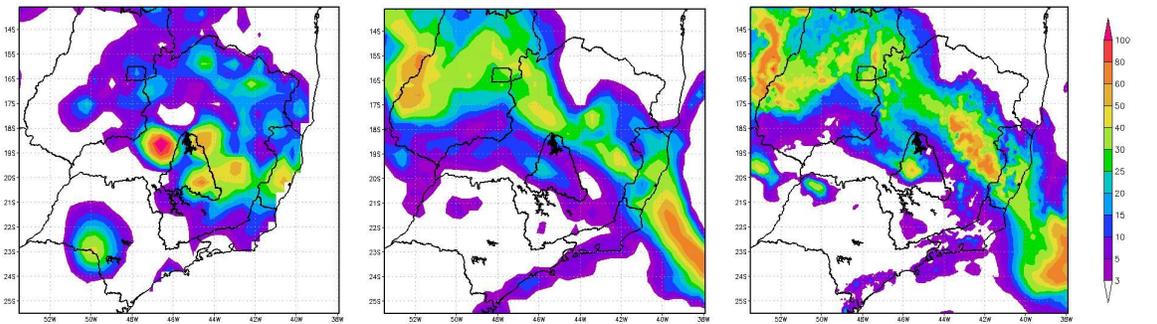
CASO 3 - 24/11/2005



CASO 4 - 08/12/2005



CASO 5 - 15/12/2005



CASO 6 - 05/01/2006

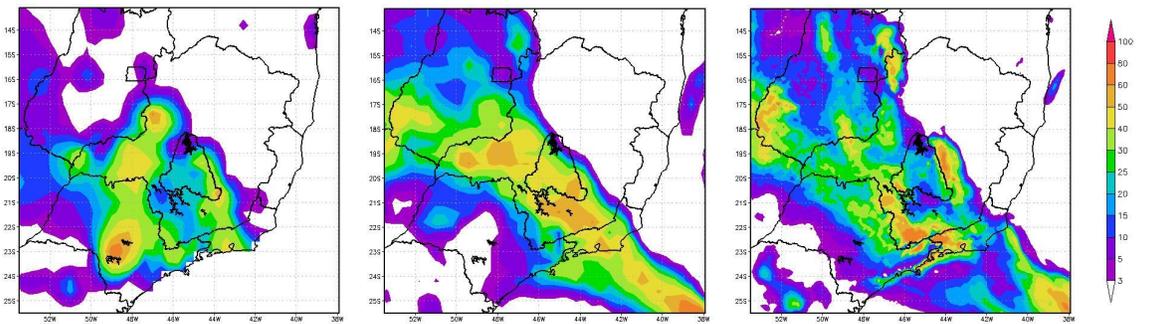


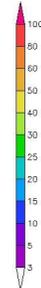
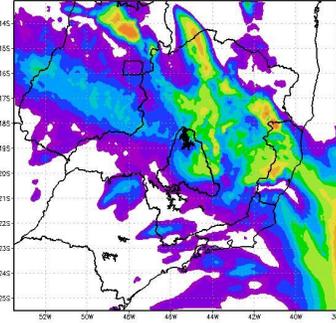
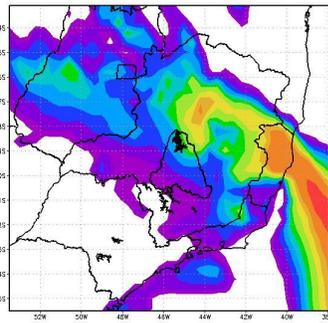
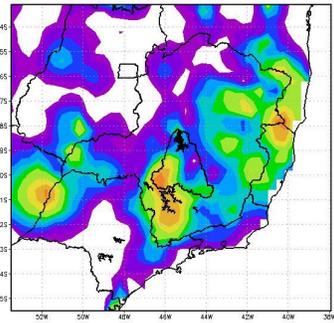
Figura 5.4 – Continuação

Observação

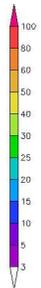
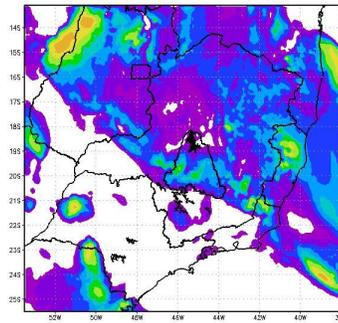
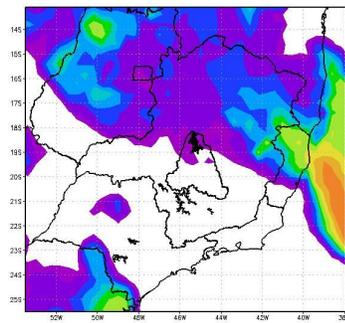
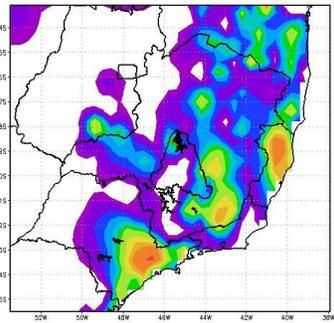
Previsão Eta-40km

Previsão Eta-8km

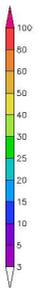
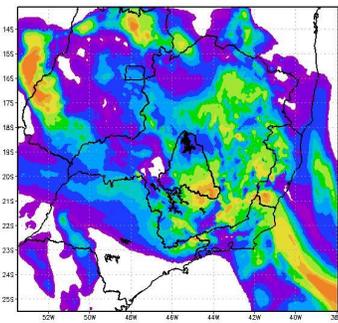
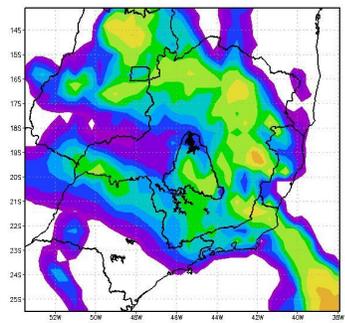
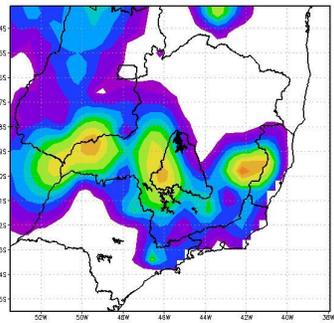
CASO 7 – 07/03/2006



CASO 8 – 11/03/2006



CASO 9 – 28/12/2006



CASO 10 – 05/01/2007

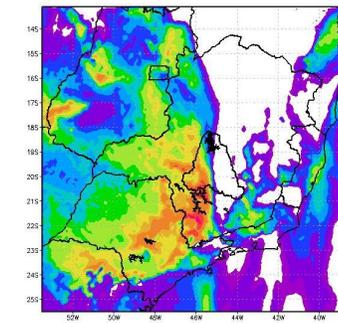
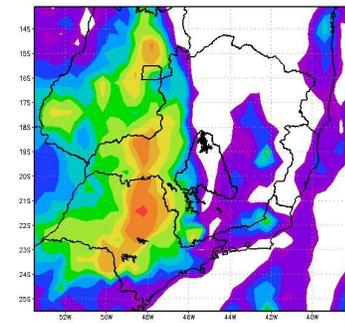
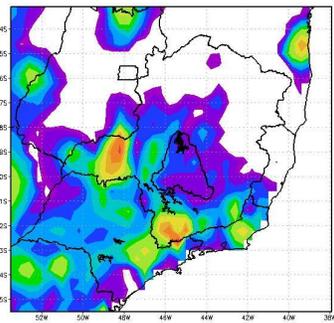


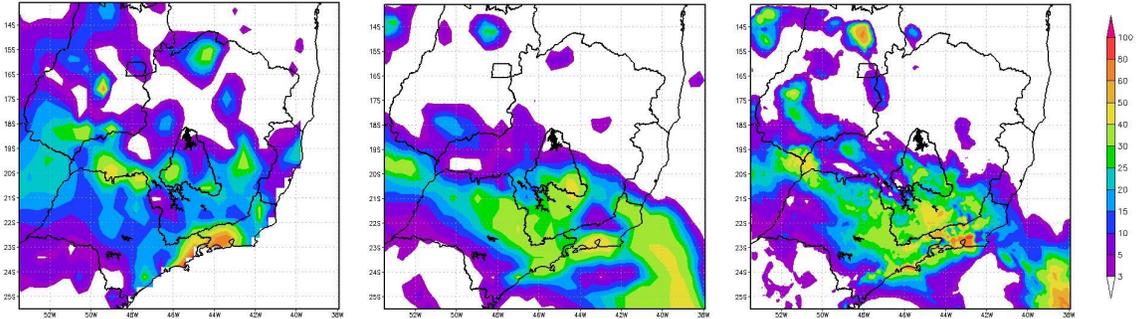
Figura 5.4 – Continuação

Observação

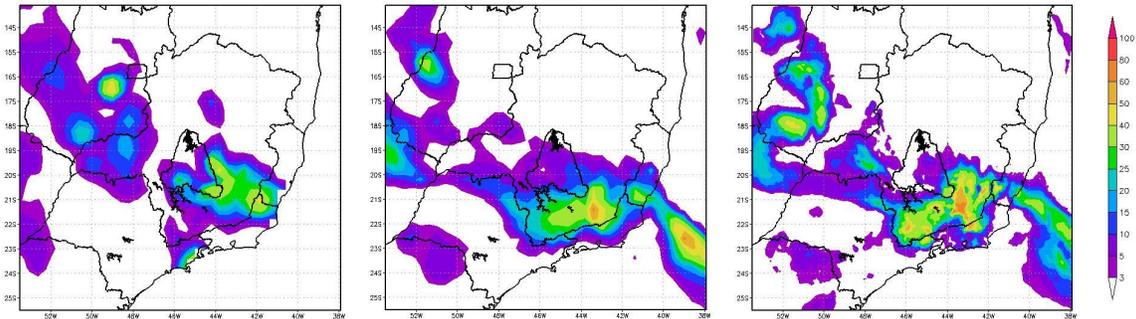
Previsão Eta-40km

Previsão Eta-8km

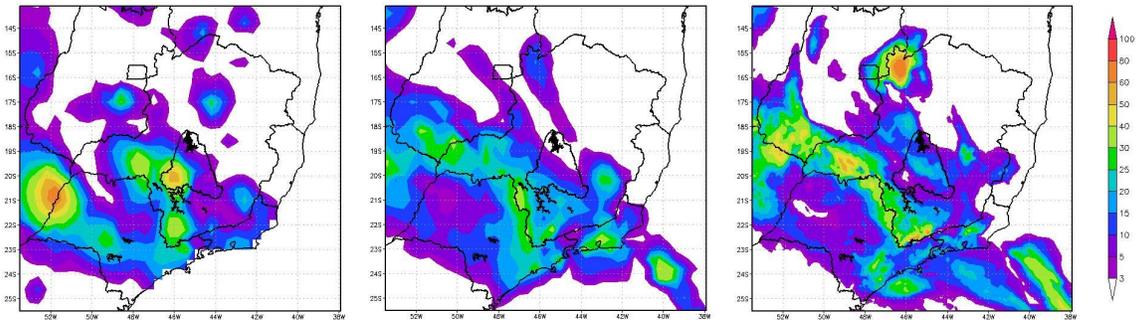
CASO 11 – 12/02/2007



CASO 12 – 19/10/2007



CASO 13 – 04/11/2007



CASO 14 – 20/12/2007

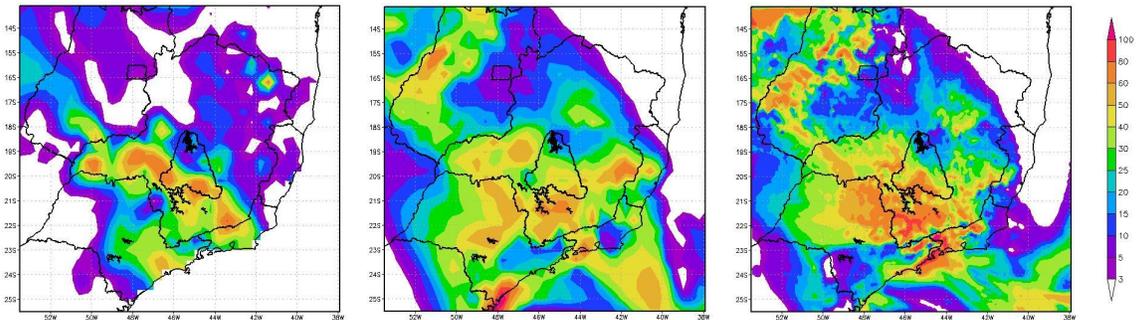


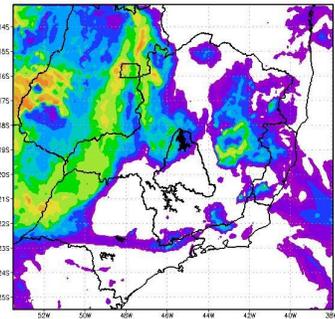
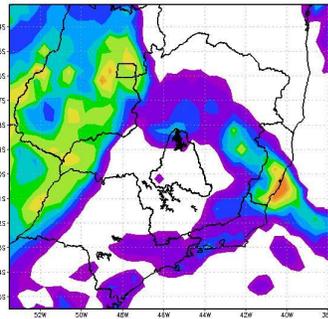
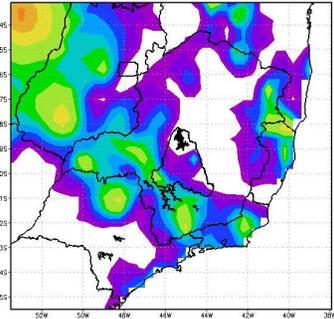
Figura 5.4 – Continuação

Observação

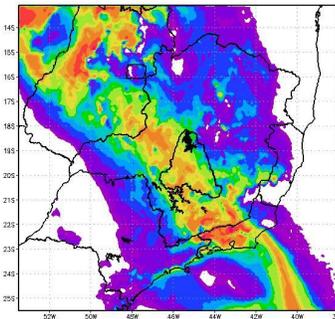
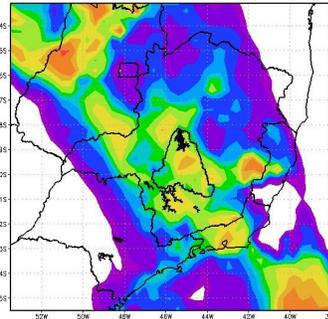
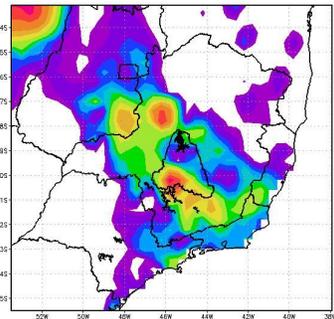
Previsão Eta-40km

Previsão Eta-8km

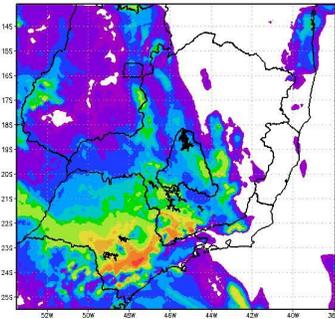
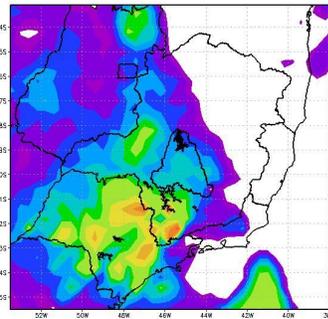
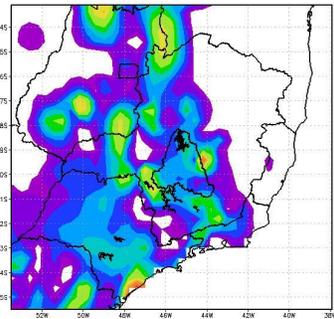
CASO 15 – 25/01/2008



CASO 16 – 04/02/2008



CASO 17 – 13/03/2008



CASO 18 – 16/03/2008

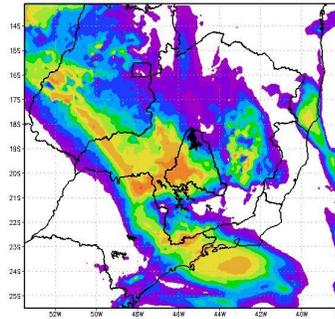
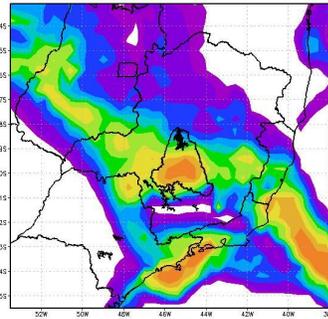
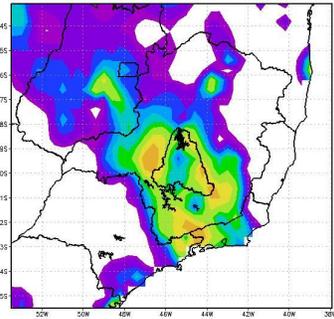


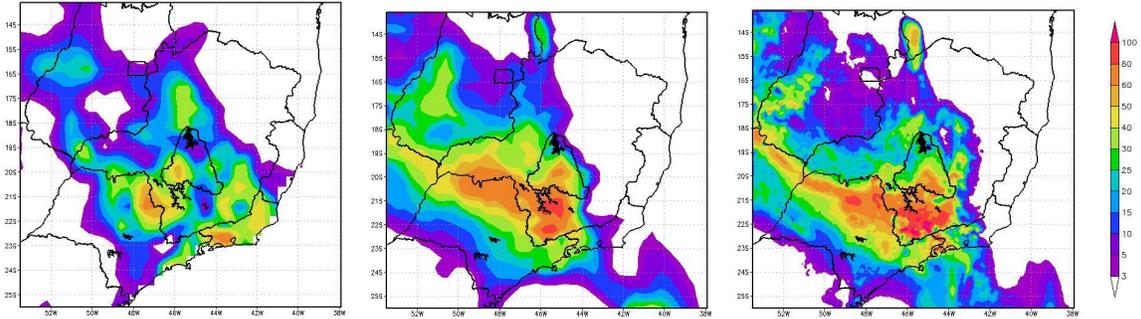
Figura 5.4 – Continuação

Observação

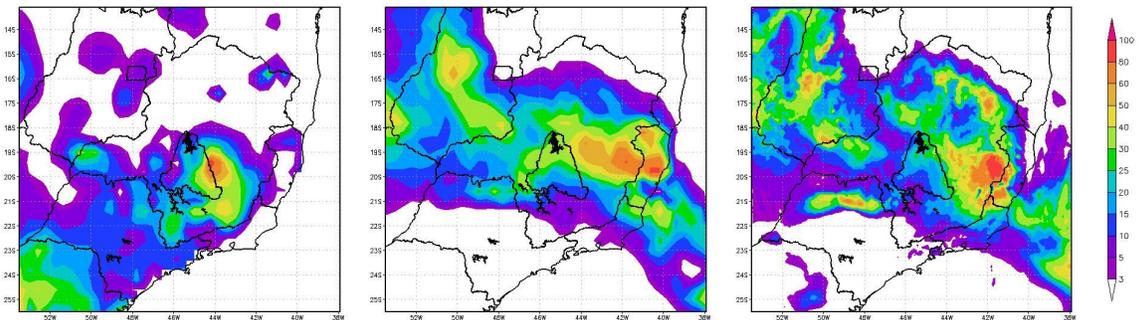
Previsão Eta-40km

Previsão Eta-8km

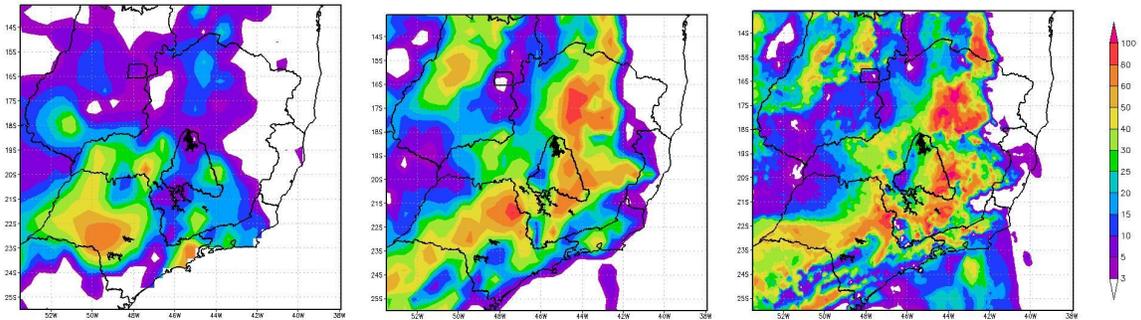
CASO 19 – 13/02/2009



CASO 20 – 22/10/2009



CASO 21 – 30/12/2009



CASO 22 – 25/01/2010

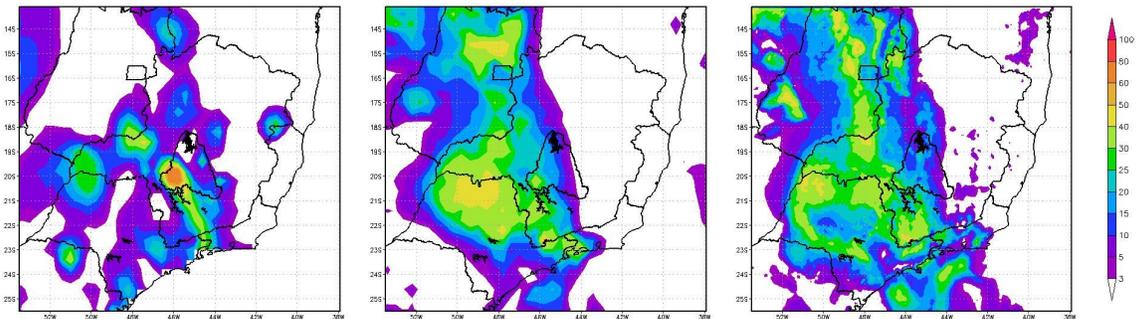


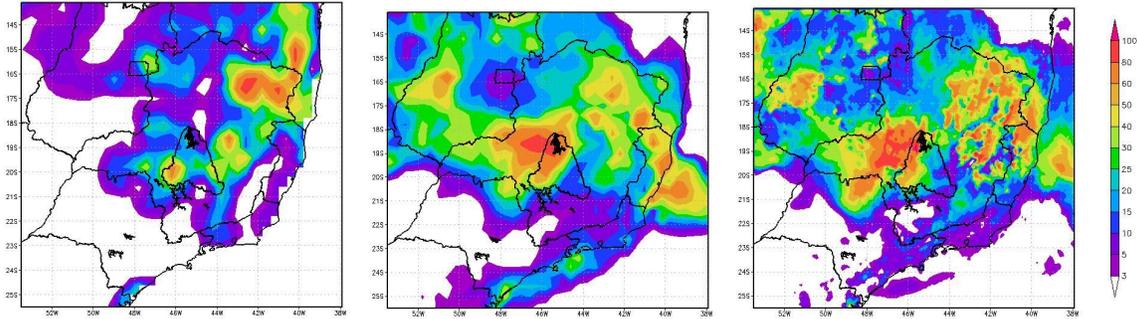
Figura 5.4 – Continuação

Observação

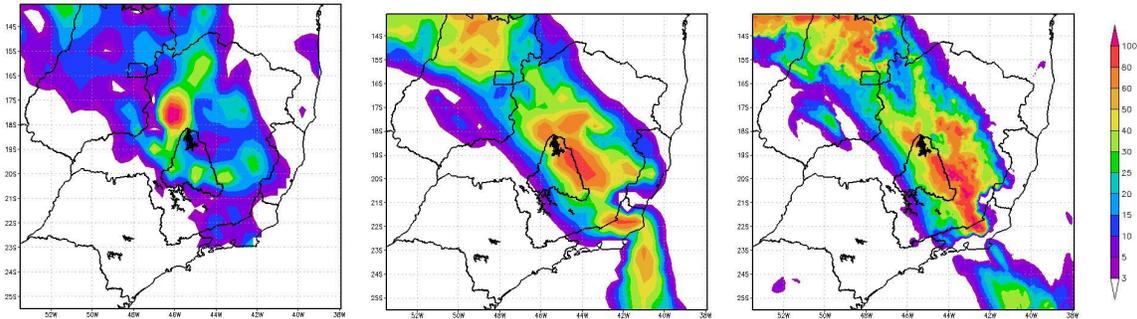
Previsão Eta-40km

Previsão Eta-8km

CASO 23 – 04/03/2010



CASO 24 – 17/12/2011



CASO 25 – 02/01/2012

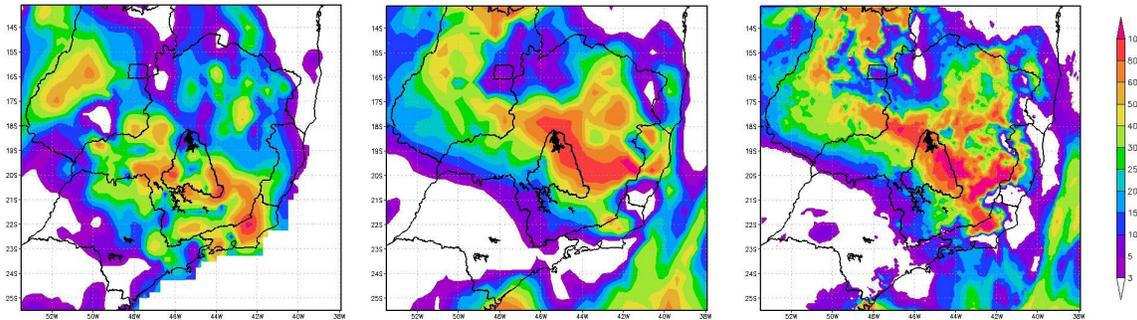


Figura 5.4 – Final

Tabela 5.3 – Localização relativa à observação do posicionamento previsto em 72 horas pelos modelos Eta-8km e Eta-40km do sistema de precipitação atuante. Estão destacados em negrito os casos em que a posição prevista do sistema precipitante foi corretamente prevista.

Caso	Eta-8km	Eta-40km
1	Norte	Norte
2	Correta	Correta
3	Norte	Norte
4	Correta	Correta
5	Norte	Norte
6	Correta	Correta
7	Correta	Correta
8	Norte	+ Norte
9	Correta	Correta
10	Correta	Correta
11	Correta	Correta
12	Correta	Correta
13	Correta	Correta
14	Correta	Correta
15	Norte	Norte
16	Correta	Correta
17	Correta	Correta
18	Correta	Correta
19	Correta	Correta
20	Norte	+ Norte
21	Norte	Norte
22	Correta	Correta
23	Correta	Correta
24	Correta	Correta
25	Correta	Correta

Nota-se na Figura 5.4 que em 18 casos (casos 2, 4, 6, 7, 9 ao 14, 16 ao 19 e 22 ao 25, que aparecem em negrito na Tabela 5.3) dos 25 analisados, a posição do sistema precipitante foi prevista corretamente em ambas as versões do modelo Eta, sendo a maior parte deles (10 casos) eventos de ZCAS. Nos demais eventos (7) foram detectados erros no posicionamento da banda de chuva, para as resoluções de 40 km e 8 km. Uma análise complementar (não apresentada) indicou que nestes 7 eventos o modelo Global do CPTEC/INPE previu erradamente a posição dos sistemas meteorológicos, ocasionando os erros no modelo Eta. Nos vinte e cinco casos estudados os padrões da chuva prevista com Eta-40km e Eta-8km são similares, exceto com maior detalhamento na versão de 8 km. Ressalta-se a dificuldade do modelo em prever a intensidade e a localização exatas dos

núcleos de máxima precipitação, dentro da faixa do sistema precipitante. Desta forma, verificam-se previsões de concentrações de máximos de chuva em áreas de pouca precipitação observada, indicando situações de alarme falso.

Dentre os dezoito casos em que a localização da banda precipitante é prevista corretamente, em 10 (casos 4, 6, 12 ao 14, 19 e 22 ao 25) nota-se que o Eta-8km apresenta melhor performance que o Eta-40km.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de EM, REQM e CORR das previsões com 72 horas de antecedência, nas versões 40 km e 8 km, para os 18 casos em que a localização do sistema precipitante é prevista corretamente. Neste subconjunto a série de totais pluviométricos diários é formada por 582 dados. Como esperado, uma melhor performance é notada para este subconjunto (em relação ao conjunto total de 25 eventos). Nota-se ainda que o EM é positivo indicando superestimativa da precipitação, contudo uma redução do REQM e aumento da CORR, principalmente no Eta-8km, indicam melhor desempenho deste subconjunto de 18 casos.

Tabela 5.4 – Métricas de avaliação das previsões de precipitação em 72 horas para o modelo Eta-40km e Eta-8km para os 18 casos nos quais a localização do sistema meteorológico é prevista corretamente, e todos os 25 casos.

Número de casos	18 casos		25 casos	
	Eta-40km	Eta-8km	Eta-40km	Eta-8km
EM (mm/dia)	0,7	0,3	3,3	2,8
REQM (mm/dia)	20,2	13,7	35,1	34,9
CORR (%)	22,0	42,7	19,9	27,8

A seguir é feita uma análise subjetiva destes 18 casos em função do sistema meteorológico atuante (ZCAS, Frente Fria ou Intensa Instabilidade Atmosférica) localizado corretamente pelo modelo Eta, comparando-se os campos meteorológicos gerados pelas previsões do modelo Global do CPTEC/INPE e o Eta-40km e confrontando-se com a Reanálise ERA-Interim.

a) Análise subjetiva dos casos de ZCAS

Para os 18 casos onde o modelo acerta o posicionamento do evento meteorológico em questão, em 10 (casos 2, 6, 7, 11, 14, 16, 18, 23 ao 25), ou seja, em 56% dos eventos, o fenômeno foi ocasionado pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Destes 10 casos de ZCAS, 7 deles (casos 2, 6, 11, 14, 18, 24 e 25) estão associados a áreas de baixa pressão, posicionadas na Costa Sul-Sudeste do Atlântico. Em 2 eventos (casos 7 e 16), a ZCAS atua sozinha, propagando-se até o oceano e em 1 evento (caso 23), o sistema está ligado a uma alta pós-frontal que auxilia na manutenção do posicionamento da ZCAS sobre a região em estudo.

A Figura 5.5 apresenta o campo de pressão ao nível médio do mar (PNMM) e ventos à 10 metros para os casos 24 e 25 como exemplo de casos de ZCAS associados a sistemas intensos de baixa pressão. Nota-se nos dois casos que a intensidade e a área do núcleo de baixa pressão, apesar de subestimada pelo modelo Global do CPTEC/INPE, é superestimada pelo Eta-40km, gerando convergência e ventos mais intensos relacionados a esse sistema (campos não apresentados). Em relação ao posicionamento, o modelo Global do CPTEC/INPE (e conseqüentemente o Eta-40km) previram corretamente a localização do sistema de baixa pressão, mesmo com 72 horas de antecedência.

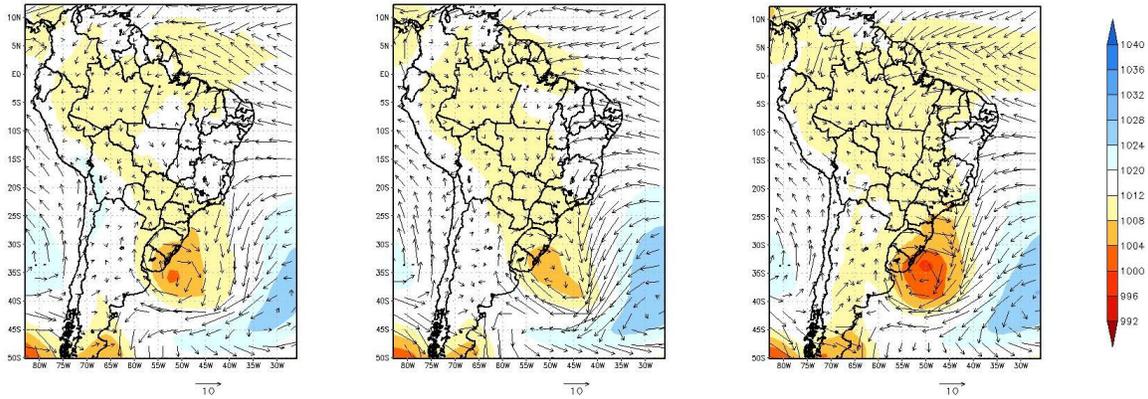
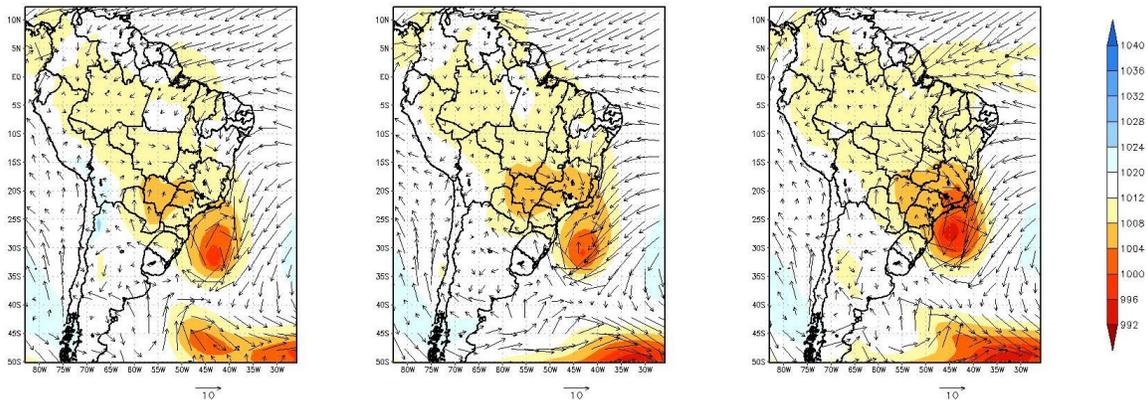
Reanálise ERA-Interim**Previsão Global CPTEC****Previsão Eta-40km****CASO 24 – 17/12/2011****CASO 25 – 02/01/2012**

Figura 5.5 – Pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar (sombreado) a cada 4 hPa e ventos (m/s) à 10 m: Reanálise ERA-Interim (coluna da esquerda), previsões do modelo Global CPTEC/INPE (coluna do meio) e do Eta-40km (coluna da direita) para os dias 17/12/2011 e 02/01/2012 às 12 UTC.

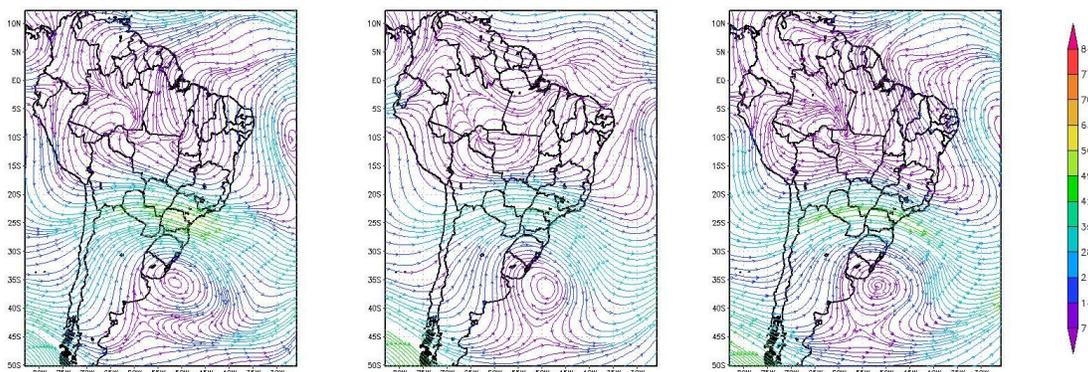
Para os altos níveis da troposfera (Figura 5.6), verifica-se nos dois eventos citados anteriormente uma boa previsão de ambos os modelos da localização do vórtice ciclônico associado ao cavado da ZCAS, estendendo-se portanto, desde a superfície até 200 hPa. Tanto a difluência na área da Alta da Bolívia quanto o Vórtice Ciclônico do Nordeste foram bem previstos pelos modelos com 72 horas de antecedência.

Reanálise ERA-Interim

Previsão Global CPTEC

Previsão Eta-40km

CASO 24 – 17/12/2011



CASO 25 – 02/01/2012

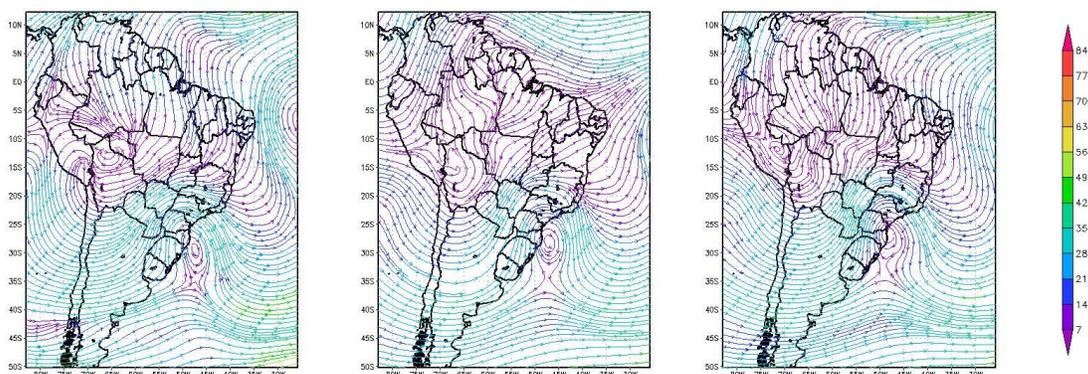


Figura 5.6 – Linhas de corrente (m/s) em 200 hPa: Reanálise ERA-Interim (coluna da esquerda), previsões do modelo Global CPTEC/INPE (coluna do meio) e do Eta-40km (coluna da direita) para os dias 17/12/2011 e 02/01/2012 às 12 UTC.

b) Análise subjetiva dos casos de frente fria

Dos 18 eventos de chuvas intensas, quatro (casos 4, 13, 17 e 19) são causados por sistemas frontais e dois deles (casos 13 e 19) são apresentados a seguir, por destacarem-se em relação às suas intensidades. A Figura 5.7 apresenta o campo de PNMM e ventos à 10 metros para os dois casos selecionados. Verifica-se nos dois eventos que em ambas as previsões ocorre um aprofundamento da baixa pressão em superfície no continente, próximo à região em estudo.

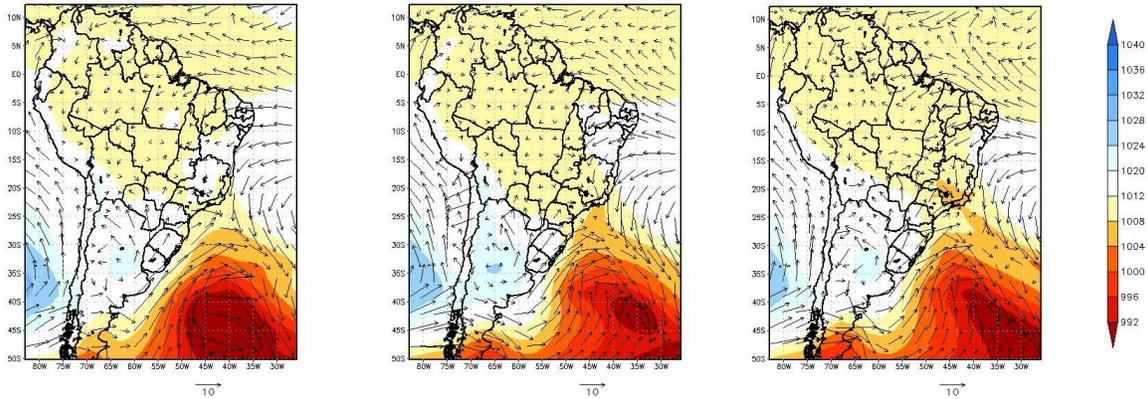
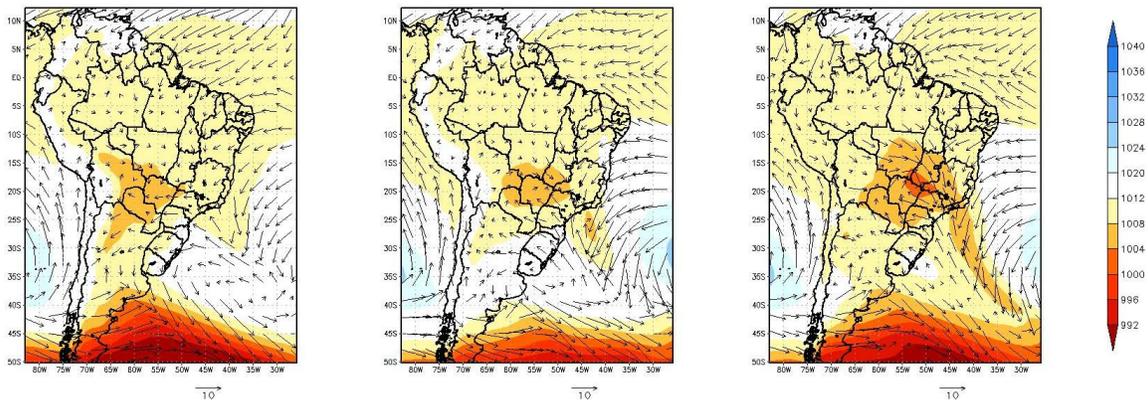
Reanálise ERA-Interim**Previsão Global CPTEC****Previsão Eta-40km****CASO 13 – 04/11/2007****CASO 19 – 13/02/2009**

Figura 5.7 – Pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar (sombreado) a cada 4 hPa e ventos (m/s) à 10 m: Reanálise ERA-Interim (coluna da esquerda), previsões do modelo Global CPTEC/INPE (coluna do meio) e do Eta-40km (coluna da direita) para os dias 04/11/2007 e 13/02/2009 às 12 UTC.

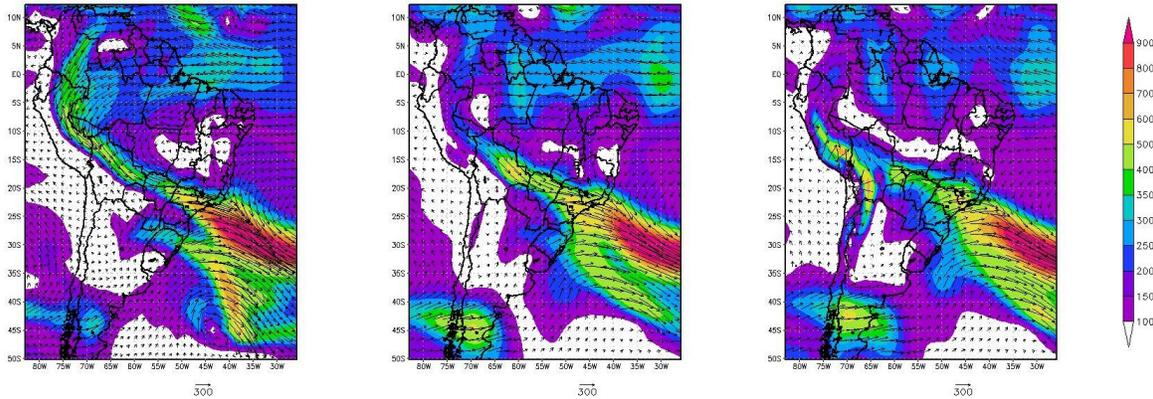
A faixa de atuação de uma frente fria pode ser identificada também através do campo de fluxo de umidade verticalmente integrado (FUVI), apresentado na Figura 5.8. Ambos os modelos preveem corretamente a localização da faixa do máximo do FUVI, apesar da intensificação sobre o continente, coerente com o fortalecimento do sistema de baixa pressão à superfície.

Reanálise ERA-Interim

Previsão Global CPTEC

Previsão Eta-40km

CASO 13 – 04/11/2007



CASO 19 – 13/02/2009

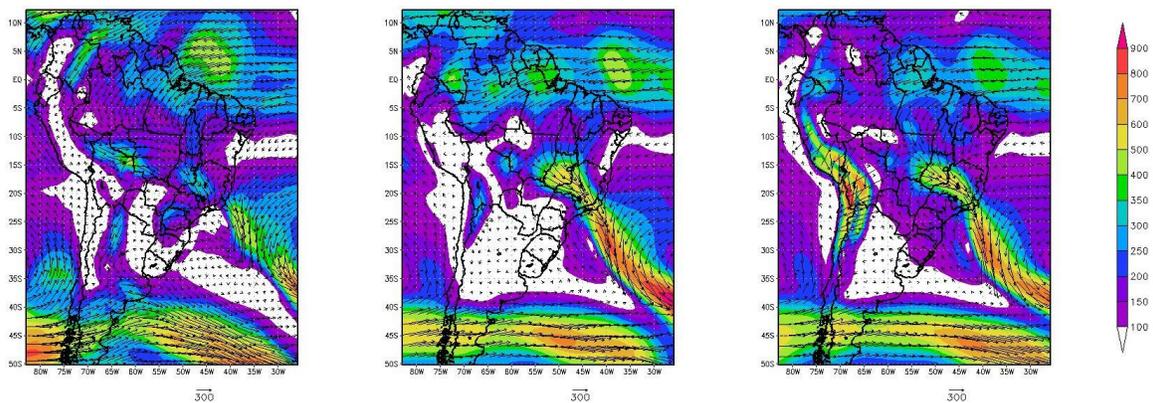


Figura 5.8 – Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado na camada 1000-300 hPa ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$): Reanálise ERA-Interim (coluna da esquerda), previsões do modelo Global CPTEC/INPE (coluna do meio) e do Eta-40km (coluna da direita) para os dias 04/11/2007 e 13/02/2009 às 12 UTC.

c) Análise subjetiva dos casos de intensa instabilidade atmosférica

Dos quatro casos (casos 9, 10, 12 e 22) causados por intensa instabilidade atmosférica, um deles (caso 10) é apresentado a seguir por destacar-se dos demais em relação à sua forte intensidade. Neste caso, os campos da Reanálise ERA-Interim mostram a passagem de um sistema frontal na Região Sul do Brasil e a presença de um Vórtice Ciclônico nos altos níveis sobre o oceano Atlântico, no litoral dos Estados do Rio de

Janeiro e Espírito Santo. Na Figura 5.9 encontra-se o campo de PNMM e ventos à 10 metros, onde se nota mais uma vez que a previsão do modelo Global do CPTEC/INPE localiza corretamente a posição do sistema frontal e o modelo Eta-40km aprofunda a região de baixa pressão, associada ao sistema frontal.

Reanálise ERA-Interim

Previsão Global CPTEC

Previsão Eta-40km

CASO 10 – 05/01/2007

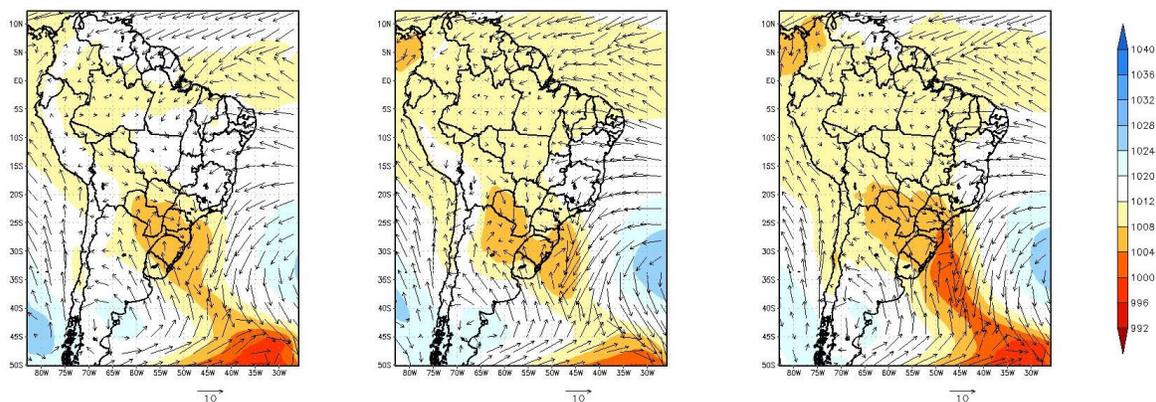


Figura 5.9 – Pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar (sombreado) a cada 4 hPa e ventos (m/s) à 10 m: Reanálise ERA-Interim (coluna da esquerda), previsões do modelo Global CPTEC/INPE (coluna do meio) e do Eta-40km (coluna da direita) para o dia 05/01/2007 às 12 UTC.

A Figura 5.10 mostra no campo de linha de corrente em 200 hPa o Vórtice Ciclônico bem posicionado pelos modelos Global do CPTEC/INPE e Eta-40km. Além disso, a versão de 40 km do modelo Eta prevê melhor a localização da Alta da Bolívia do que o modelo Global do CPTEC/INPE.

Reanálise ERA-Interim

Previsão Global CPTEC

Previsão Eta-40km

CASO 10 – 05/01/2007

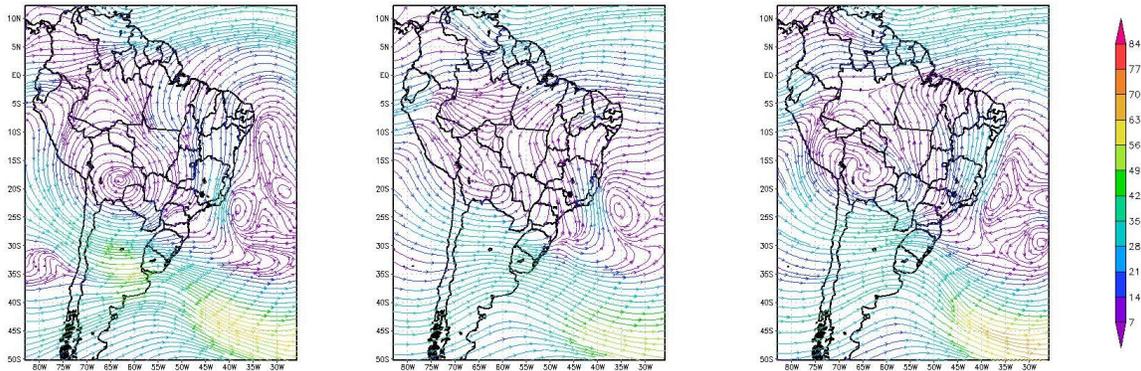


Figura 5.10 – Linhas de corrente (m/s) em 200 hPa: Reanálise ERA-Interim (coluna da esquerda), previsões do modelo Global CPTEC/INPE (coluna do meio) e do Eta-40km (coluna da direita) para o dia 05/01/2007 às 12 UTC.

As avaliações das previsões dos 25 casos de chuvas intensas estudados neste trabalho, indicam que quando o modelo Global do CPTEC/INPE não consegue prever adequadamente a posição dos sistemas meteorológicos atuantes, as previsões do modelo Eta acompanharão as previsões do primeiro modelo, sendo impossível o aprimoramento de suas previsões. Nos casos em que o modelo Global apresenta uma boa performance para prever a localização dos sistemas, o desempenho de ambos os modelos dependerá das intensidades dos sistemas em si, ou seja, nos eventos de intensos sistemas frontais, ciclones extratropicais, cavados ou outros, a previsibilidade é acentuada.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram selecionados 25 casos de chuvas intensas na região da Bacia do Rio São Francisco, à montante da UHE de Três Marias, em Minas Gerais, entre os anos de 2005 e 2012. A seguir, avaliou-se o desempenho do modelo Eta-40km e Eta-8km para previsões de precipitação, com 72 horas de antecedência, em tais casos. Além disso, foi feita uma breve investigação da climatologia da precipitação na área em estudo.

O estudo da climatologia da precipitação na região em estudo mostrou que o período chuvoso ocorre de outubro a março, quando concentra-se quase 90% do total pluviométrico anual (variando entre 1300 e 1700 mm aproximadamente). Eventos ocorridos neste intervalo alteram o regime hidrológico da região, podendo causar prejuízos a diversas empresas e à população residente na área em estudo. O maior total pluviométrico mensal climatológico ocorre em dezembro/janeiro (em torno de 300 mm). Na estação Ibitité, de maior altitude (localizada a 1073 metros, na região da Serra do Rola-Moça), a chuva é mais intensa, com totais variando entre 15,7 mm em agosto e 374,2 mm em dezembro. Analisando os maiores totais pluviométricos diários a cada ano, a estação de Ibitité também apresenta os maiores valores, com máximo de 206,1 mm ocorrido em 16/01/2003. Ainda na estação Ibitité, destaca-se uma tendência de aumento da quantidade de chuva (0,46 mm/ano), associada a maior chuva diária a cada ano.

A seleção dos casos de chuvas intensas foi elaborada para o período chuvoso (outubro a março), entre os anos de 2005 e 2012, em Minas Gerais. Aplicou-se um critério objetivo, adaptado de Liebmann et al. (2001), considerando-se como caso de chuvas extremas aquele no qual o total pluviométrico diário fosse superior à 38,3 mm; 38,2 mm e 46,3 mm, respectivamente em Bambuí, Fazenda Escola Florestal e Ibitité. Dessa forma foram pré-selecionados 49 eventos, e destes apenas em 25 foram estudados por estarem relacionados com graves consequências na região de estudo.

Dos 25 casos selecionados para o estudo da performance do modelo Eta, 6 foram provocados por frentes, 13 por atividade convectiva da ZCAS e 6 por intensa instabilidade

atmosférica, quando não havia nem ZCAS ou frentes atuando. Os casos mais intensos, considerando-se a chuva diária dentro da área de estudo foram os casos 24 e 25. Em tais casos, ambos provocados por ZCAS, as chuvas atingiram 164,0 mm/dia em Florestal (17/12/2011) e 174,0 mm/dia na estação Fazenda Campo Grande (02/01/2012).

A avaliação objetiva da precipitação indicou que ocorre uma superestimativa (subestimativa) do número de eventos previstos associados com chuvas fracas a moderadas (fortes a extremamente fortes) nas 35 estações localizadas na área em estudo. Avaliando-se a partir do ETS, percebe-se que a versão de 40 km do modelo Eta apresenta o melhor desempenho para chuvas fracas (10 mm/dia). Já a resolução de 8 km exibe o melhor resultado, para eventos de chuvas moderadas a extremamente fortes (limiares de 40 a 80 mm/dia) comparado à versão de 40 km.

A análise de EM, REQM e CORR indica que ambas as resoluções do modelo Eta tendem a superestimar a chuva, visto pelo valor positivo de EM. O Eta-8km apresenta menor valor de REQM e maior CORR comparado à versão de 40 km, indicando uma melhor performance nesta resolução.

Em relação aos 10 máximos totais pluviométricos diários observados, durante os 25 casos e considerando-se as 35 estações, o modelo Eta-8km apresenta melhor desempenho do que o Eta-40km em 9 das 10 ocorrências. Contudo, ambas as resoluções subestimam os máximos observados.

A análise subjetiva dos 25 eventos de chuvas intensas indica que quando a previsão do modelo Global do CPTEC/INPE prevê erroneamente o posicionamento do sistema meteorológico atuante (o que ocorreu em 7 dos 25 casos estudados), as previsões de ambas as resoluções do modelo Eta são afetadas, gerando prognósticos deficientes. Nos 18 casos restantes (72% dos 25 eventos), sendo que 10 casos provocados por ZCAS, nota-se em geral que os sistemas meteorológicos são mais pronunciados (cavados mais profundos, frentes mais intensas e deslocamento de áreas de baixa pressão) promovendo o aumento da

previsibilidade dos modelos, principalmente na versão Eta-8km. Desses 18 casos, em 10 deles a performance do Eta-8km é superior ao Eta-40km.

Diante dos resultados obtidos ao longo do trabalho, as questões levantadas no primeiro capítulo (introdução) são respondidas a seguir:

a) O aumento da resolução espacial do modelo Eta (de 40 km para 8 km), melhora a previsão de chuva em situações de eventos extremos?

Resposta: Sim, modelo Eta-8km apresenta melhor desempenho comparado ao Eta-40km para prever o total pluviométrico diário na área estudada, em eventos de chuvas intensas.

b) As características dos sistemas meteorológicos atuantes influenciam na previsibilidade dos modelos de previsão numérica de tempo?

Resposta: Sim, sistemas meteorológicos intensos, ou seja, baixas e cavados profundos, fortes sistemas frontais aumentam a previsibilidade dos modelos numéricos e vice-versa.

c) Caso o modelo Global erre a previsão do posicionamento do sistema meteorológico atuante, existe alguma possibilidade do modelo regional realizar uma boa previsão? Esta seria a principal origem dos erros do modelo regional?

Resposta: Não, as previsões do modelo regional Eta acompanham as previsões do modelo Global do CPTEC/INPE. Desta forma, caso o modelo Global do CPTEC/INPE erre o posicionamento do sistema meteorológico atuante, não há possibilidade do modelo regional realizar uma boa previsão.

d) Quais as principais características da climatologia da precipitação da área em estudo?

Resposta: A região em estudo apresenta o período chuvoso entre os meses de outubro e março, tendo uma queda acentuada entre março e abril. O período chuvoso concentra quase 90% do total pluviométrico anual.

Para trabalhos futuros, sugere-se a integração do Eta (40 km e 8 km) para um período chuvoso de 2 meses, de forma contínua, com o objetivo de avaliar seu comportamento tanto para dias muito chuvosos quanto para as demais situações (dias sem precipitação ou com pouca chuva). Além disso, testes e ajustes no atual esquema de convecção do Eta-8km poderiam ser elaborados com o intuito de identificar a melhor configuração deste modelo na área em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008: Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3ª Ed. Brasília, 236 p. Disponível em www.aneel.gov.br
- Anthes, R. A.; Kuo, Y.-H.; Hsie, E.-Y.; Low-Nam, S. & Bettge, T. W. 1989: Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models. **The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, **115**: pp.763-806.
- Arakawa, A. Lamb, V. R., 1977: Computational design of the basic dynamical process of the UCLA generation circulation model. *Methods in Computational Physics*, **v. 17**, pp. 173-265.
- Asai, T., 1965: A numerical study of air-mass transformation over the Japan sea in winter. **J. Meteor. Soc. Japan**, **v. 43**, pp. 1-15.
- Black, T. L., 1994: The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Wea. and Forecasting**, **9**, pp.265-278.
- Chen, F.; Janjic, Z. I.; and Mitchel K., 1997: Impact of atmospheric surface layer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta Model. *Boundary Layer Meteorology*, **v. 85**, pp. 391-421.
- Chou, S.C. & Justi da Silva, M. G. A. 1999: Objective Evaluation of Eta Model Precipitation Forecasts Over South America. **Climanálise**. Ano 1. N°. 1: pp. 1-17.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., et al., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Q. J. R. Meteorol. Soc.** **137**: pp. 553-597. April 2011 A.

- DeMaria, M., 1985: Linear response of a tropical atmosphere to convective forcing. **J. Atmos. Sci.**, **42**, pp.1944-1959.
- Fels, S. B.; and Schwarzkopf, M., D., 1975: The simplified exchange approximation. A new method for radiative transfer calculations. **J. Atmos. Sci.**, **v. 32**, pp. 1475-1488.
- Ferrier, B., 2004: A double moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. **J. Atmos. Sci.**, **v. 51**, pp. 249-280.
- Figueroa, S. N. and Nobre C.A., 1990: Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, **5**, pp.36-45.
- Figueroa, S. N., Satyamurti, P., and Silva Dias, P. L., 1995: Simulations of the Summer Circulation over the South American Region with an Eta Coordinate Model. **Journal of the Atmospheric Sciences** **Vol.52**, **Nº 10**, **12p**, pp.1573-1584.
- Gadd, A. J., 1978: A split explicit integration scheme for numerical weather prediction. **Quart. J. Roy. Soc.**, **v. 104**, pp. 569-582.
- Gallus Jr., W. A., 1999: Eta simulations of three extreme precipitation events: Sensitivity to resolution and convective parameterization. **Weather and Forecasting**, **v. 14**, pp. 405-426.
- Gomes, J. L., Chou, S. C., 2010: Dependence of partitioning of model implicit and explicit precipitation on horizontal resolution. **Meteorology and Atmospheric Physics**. DOI: 10.1007/s00703-009-0050-7.
- Janjic, Z. I., 1979: Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. **Contributions to Atmospheric Physics**, **v. 52**, pp. 69-84.

- Janjic, Z. I., 1984: Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. **Monthly Weather Review**, v. **112**, pp. 1234-1245.
- Kleeman, R., 1989: A modeling study of the effect of the Andes on the summertime circulation of tropical South America. **J. Atmos. Sci.**, **46**, pp.3344-3362.
- Lacis, A. A. and Hansen, J. E., 1974: A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **J. Atmos. Sci.**, v. **31**, pp. 118-133.
- Liebmann, B., Jones, C e Carvalho, L. M. V. de, 2001: Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil. **J. Climate**, vol. **14**, pp.208-218.
- Lima, D.R.O., 2005: Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Manso. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, 155p.
- Machado, C., O., Cataldi, M., Rocha, V., F., de Oliveira, F., J., A., 2007: A Aplicação das Informações Meteorológicas no Planejamento Eletroenergético de Curto Prazo e Operação em Tempo Real do Sistema Interligado Nacional, 10p. IX EDAO – Encontro Para Debates De Assuntos De Operação. Página da EDAO na Internet: <http://www.edao.com.br>.
- Meira, D., N., O., 2010: Avaliação de previsões de tempo do modelo ETA para subsidiar pesquisas agrícolas no Brasil. MS777 - Projeto Supervisionado – Cepagri Meteorologia – Unicamp, 11p.
- Mellor, G. L.; T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. **J. Atmos. Sci.**, v. **31**, pp. 1791-1806.
- Mesinger, F., 1984: A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronautica**, **44**, pp.195-202.

- Mesinger, F. e Black, T. L., 1992: On the impact on forecast accuracy of the step-mountain (Eta) vs. sigma coordinate. **Meteorol. Atmos. Phys.**, **50**, pp.47-60.
- Mesinger, F. Chou, S. C., Gomes, J. L., Jovic, D., Bastos, P., Bustamante, J. F., Lazic, L., Lyra, A. A., Morelli, S., Ristic, I., Veljovic, K., 2012: An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**. DOI: 10.1007/s00703-012-0182-z.
- Mesinger, F., Janjic Z. I, 1985: Problems and numerical methods of the incorporation of mountains in atmospheric models. *Lect. Appl. Math.*, *22*, pp.81-120.
- Mesinger, F., Janjic Z. I., Nickovic, S., Gavirov, D., e Deaven, D. G., 1988: The step-mountain coordintate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Mon. Wea. Rev.**, **116**, pp.1493-1518.
- Paegle, J., C. D. Zhang, and Baumhefner, 1987: Atmospheric response to tropical thermal forcing in real data integrations. **Mon.Wea.Rev.**, **115**, 2975-2995.
- Pessoa, M. L. e M. R. M. Mine, 1994: “Benefícios da Meteorologia para o Setor Elétrico Brasileiro”, In: P. M., Lacerda, Meteorologia e Hidrologia: aspectos e considerações no contexto brasileiro, 1a ed., pp 139-154.
- Phillips, N. A, 1957: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. **Journal of Meteorology**, v. **14**, pp. 184-185.
- Reis, R.J., Simões , T.K., 2008: MG Tempo – PUC Minas: Período chuvoso em Belo Horizonte 2006 / 2007: Relatório do Convênio MG – Tempo PUC Minas/PBH, 34p.
- Rozante, J.R., 2008: Experimentos com o Modelo Regional Eta em Diferentes Configurações durante o Período Salljex e Mecanismos de Mesoescala Associados ao Desenvolvimento de SCM. Tese de Doutorado.INPE, 181p.

- Satyamurti, P.; Rao, V. B., 1988: Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Climanálise**, **3**, pp. 31-35.
- Seluchi, M. E., Chou, S. C., 2000: Diagnosing Systematic Errors in the Eta model over South America. Proceedings VI Internacional Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, **American Meteorological Society**.
- Seluchi, M. E., Chou, S. C., 2001:: Ajuste del esquema convectivo de Betts-Miller en el modelo regional Eta/CPTEC. **Revista Meteorologica. Argentina: v.5.**, pp.45-56.
- Sestini, M. F; Alvalá, R. C. S., Mello, E. M. K., Valeriano, D. M., Chou, S. C., Nobre, C. A., Paiva, J. A. C., Reimer, É. S., 2002: Vegetation map elaboration for use in numerical models (“Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos”). Internal Report. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. Brasil.
- Silva Dias, P., L., Schubert, W., H., and DeMaria, M., 1983: Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. **J.Atmos.Sci.**, **40**, pp.2689-2707.
- Slingo, J. M., 1987: The development and verification of a cloud prediction scheme for ECMWF model. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, **v. 113**, pp. 899-927.
- Uppala, S. M., Kallberg, P. W., Simmons, A. J. et al., 2005: The ERA-40 re-analysis. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, **131**, pp. 2961–3012.
- Winninghoff, F. J., 1968: On the adjustment toward a geostrophic balance in a simple primitive equation model with application to the problems of initialization and objective analysis. Ph. D. thesis, University of California, Los Angeles.

Xie, P., e P.A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, **78**, pp.2539-2558.